

نشریه آبیاری و زهکشی ایران

صاحب امتیاز: انجمن آبیاری و زهکشی ایران

مدیر مسئول: مهندس عباس کشاورز

سردبیر: دکتر امین علیزاده

هیات تحریریه:

- ۱- دکتر حسین انصاری (دانشیار آبیاری و زهکشی، دانشگاه فردوسی مشهد)
- ۲- دکتر ابراهیم پذیرا (استاد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران)
- ۳- دکتر حسین دهقانی سانچ (دانشیار پژوهشی آبیاری و زهکشی، وزارت جهاد کشاورزی)
- ۴- دکتر حسین شریفان (دانشیار آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)
- ۵- دکتر فریبرز عباسی (استاد پژوهشی آبیاری و زهکشی، وزارت جهاد کشاورزی)
- ۶- دکتر امین علیزاده (استاد آبیاری و زهکشی، دانشگاه فردوسی مشهد)
- ۷- دکتر بیژن قهرمان (استاد آبیاری و زهکشی، دانشگاه فردوسی مشهد)
- ۸- دکتر عبدالمجید لیاقت (استاد آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران)
- ۹- دکتر سید فرهاد موسوی (استاد منابع آب، دانشگاه سمنان)
- ۱۰- دکتر سید مجید میرلطیفی (دانشیار آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس تهران)

مدیر داخلی: الهه کنعانی

صفحه آرایی: رحمان اسدی

اعتبار: علمی و پژوهشی

درجه علمی - پژوهشی این مجله طی نامه شماره ۳/۴۶۵۵ مورخ ۸۵/۵/۱۵ کمیسیون نشریات علمی کشور به هیات مدیره انجمن آبیاری و زهکشی ایران ابلاغ شده است.
این نشریه در پایگاه استنادی علوم ایران (ISC) نمایه شده و دارای ضریب تاثیر (IF) می باشد.

نشانی دفتر مجله: تهران - خیابان کریم خان زند - نبش خیابان عضدی (آبان شمالی)، ساختمان دانشگاه علامه طباطبائی

طبقه دوم - اتاق ۲۱۰، کد پستی: ۳۳۱۳۱-۱۵۹۷۶

تلفن: ۰۹۳۸۱۸۷۷۹۵۷ و ۰۲۱)۸۱۰۳۲۲۱۷ (نمابر ۰۲۱)۸۱۰۳۲۲۰۰

سایت اینترنتی: www.iaid.ir

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- ۱ اثر استفاده از آب آلوده به فلز سرب با آبیاری سطحی و زیرزمینی بر عملکرد و جذب آن توسط گیاه ذرت علوفه‌ای
عبدالمجید لیاقت، محمدرضا اویسی، حامد ابراهیمیان، مسعود پورغلام آمیجی، محمد صالح
- ۱۷ برآورد رواناب با استفاده از طرحواره‌های SIMTOP و BATS و تبخیر - تعرق واقعی با استفاده از طرحواره پوشش گیاهی پویا
در مدل سطح خشکی Noah-MP در حوضه نیشابور
سمیرا میرشفیعی، حسین انصاری، کامران داوری، علی نقی ضیایی
- ۲۷ مدل سازی جریان و تغییرات کیفی (شوری) آب زیرزمینی در دشت نیشابور توسط کدهای MODFLOW و MTDMS
پریشان طاهریان، حسین انصاری، کامران داوری، علی نقی ضیایی، علی اصغر بهشتی
- ۳۸ پیش بینی مقادیر دما و بارش استان اصفهان بر اساس دو مدل ریزمقیاس نمایی Lars_WG و SDSM و روش شبکه عصبی مصنوعی
آرین زرفشانی، محمدحسین جهانگیر
- ۵۰ مقایسه دو مدل فیزیکی بر پایه مویبگی-جذب سطحی برای تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع در هر دو ناحیه رطوبت‌های
نزدیک به خشک و اشباع
اشکان طهرانی، عبدالمجید لیاقت، صارم نوروزی
- ۶۲ بررسی آزمایشگاهی جریان در سازه ترکیبی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای تک سیکل - دریچه
بهزاد خلیلی، اکرم عباسپور، داود فرسادی زاده، جواد پارسا
- ۷۵ ارزیابی اقتصادی مدیریت کم آبیاری - مطالعه موردی: باغ پر تقال
محمد اسماعیل کمالی، حسین انصاری
- ۸۷ بررسی عملکرد، اجزاء عملکرد و بهره‌وری آب گندم در سه سامانه آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای نواری
سیروس صفرزاده، مریم صارمی، امیر فرشید، منیر دهقانی
- ۹۸ بررسی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و زمان اولین آبیاری بر کمیت و کیفیت زعفران
یحیی چوپان، ابوطالب هزار جریبی، خلیل قربانی، موسی حسام و عباس خاشعی سیوکی
- ۱۰۹ مدل سازی ضریب دبی دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان مستغرق با استفاده از روش‌های پایه کرنلی
کیومرث روشنگر، آرمان علیرضازاده صدقیانی، سامان شهنازی
- ۱۲۱ بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب سطحی با مدل SWAT (مورد مطالعه: رودخانه مزلقان)
شهاب حاجی قاسمی، محمود ذاکری نیری، عطاالله نجفی جیلانی
- ۱۳۸ ارزیابی مدل‌های هوشمند جهت برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های لومی
شادیه حیدری تاشه کبود، مجتبی خوش‌روش
- ۱۵۱ روندیابی سیل به روش موج سینماتیک در بستر GIS (مطالعه موردی: رودخانه قره‌چای)
مینا رضایی انور، محمود ذاکری نیری، معصومه سهرابی ملایوسفی
- ۱۶۴ توزیع زمانی و مکانی ردهای آب و کارایی مصرف آب جو در مناطق مختلف ایران
حلیمه پیری، مجتبی مبارکی
- ۱۷۷ تعیین مقادیر مناسب پارامترهای طراحی سیستم آبیاری با دو رژیم جریان پیوسته و کاهش جریان
هادی رضوانی اعتدالی، کیوان زرکانی، محدثه السادات فخار

- ۱۸۸ بهینه‌سازی چندهدفه الگوی کشت مبتنی بر ردپای آب در استان‌های شرق کشور
علی عارفی‌نیا، خالد احمدالی
- ۱۹۹ مطالعه‌ی اثر تغییر ارتفاع و چیدمان پوشش گیاهی با آرایش منظم بر میرایی امواج با استفاده از مدل عددی Flow-D
سید احمد قاهری‌نژاد، مهدی بهدارروندی عسکر، محمد انصاری قوجقار، احسان پارسی
- ۲۱۱ تأثیر شکل‌های مختلف آبشکن منفرد بر آبستگي تکیه‌گاه پل در کانال مرکب
صمد امامقلی‌زاده، امین ناظری، خلیل اژدری
- ۲۲۳ مقایسه کارایی دو مدل دی‌ست و آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گندم
محمدرضا امداد، آرش تافته
- ۲۳۴ تعیین بهره‌وری مصرف آب در ذرت دانه‌ای (KSC 706) با استفاده از مدل AquaCrop در استان کرمانشاه
میثم پالاش، علی بافکار، بهمن فرهادی بانسوله

راهنمای تهیه مقاله برای نشریه آبیاری و زهکشی

۴- عنوان جدول‌ها در بالای آن‌ها و عنوان شکل‌ها و نمودارها در پایین آنها آمده (B Mitra-10-Bold) و همچنین الزاماً باید به هریک از جدول‌ها و شکل‌ها در داخل متن اشاره شود. در همه جای مقاله (متن، شکل و نمودار، جدول‌ها) باید از اعداد و ارقام فارسی استفاده گردد. همچنین شکل‌ها و جدول‌ها بایستی به ترتیبی که در متن مقاله مورد اشاره قرار گرفته است شماره‌گذاری شوند. برای جلوگیری از بهم‌ریختگی شکل‌ها باید به صورت تصویر (با فرمت Jpg) ارائه شوند.

۵- آحاد فیزیکی در کلیه معادلات باید در سیستم متریک (SI) بوده و هر سیستم در صورت لزوم در پراوترنر بیاید.

۶- معادلات و رابطه‌ها با استفاده از دستور فرمول‌نویسی از سمت چپ تایپ شود و از منتهی الیه سمت راست شماره‌گذاری گردد.

۷- از به‌کاربردن واژه‌ها و اصطلاحات لاتین که معادل متداول فارسی دارند، اجتناب گردد و در مورد نمادها، از علائم استاندارد استفاده شود.

۸- رفرنس دهی در تمام متن مقاله برای منابع فارسی در صورتی که مولف تمایل داشته باشد نام نویسنده در ابتدای جمله بیاید نام پژوهشگر به زبان فارسی با درج تاریخ در جلوی آن مشخص شود مثال: عزیزاده و همکاران (۱۳۸۷) عنوان کردند و ادامه جمله... و اگر تمایل داشته باشد نام نویسنده در انتهای جمله بیاید ذکر نام نویسنده و سال انتشار اثر هر دو در انتهای جمله بیاید مثال: (...جمله.... عزیزاده و همکاران، ۱۳۸۷)).

در خصوص منابع لاتین (هرچند نویسنده ایرانی باشد) در صورتی که نویسنده تمایل داشته باشد اسم نویسنده در ابتدای جمله بیاید کافی است نام پژوهشگر بدون ذکر سال در ابتدای جمله به فارسی بیاید و در انتهای جمله نام لاتین به همراه سال ذکر گردد. مثال: (آلن و همکاران در بررسی خود به نتیجه رسیدند ...ادامه جمله... (Allen et al., 2010). اگر تمایل داشته باشد نام نویسنده در انتهای جمله بیاید نام نویسنده و سال انتشار اثر به لاتین در انتهای جمله بیاید مثال: (جمله.... (Jaynes and Hunsaker., 1989)).

۹- تمام منابع استفاده شده در متن مقاله بایستی در قسمت منابع بیاید و بالعکس، عبارتی از آوردن منابعی که در متن مقاله به آن‌ها اشاره نشده است در فهرست منابع خودداری گردد.

۱۰- مقاله باید به صورت تک ستونه تنظیم شود.

ج- نحوه ارائه مقالات

- مقالات باید در قطع A4 و فاصله بین خطوط ۱/۵ سانتی‌متر حداکثر ۱۲-۱۴ صفحه (۲۵ خطی) تایپ شده و به صورت یک فایل

آبیاری و زهکشی از کلیه اساتید و متخصصان رشته آبیاری و زهکشی و علوم مرتبط با مهندسی آب، برای ارائه مقالات علمی و پژوهشی دعوت به عمل می‌آورد. هدف اصلی این نشریه، انتشار نتایج پژوهش‌های علمی، فنی و تخصصی میان اساتید، محققان، دانشمندان و مهندسين ایرانی و جوامع علمی و حرفه ای ملی و بین المللی و اعتلای سطح دانش نظری می باشد. لذا نشریه تلاش خواهد نمود که بتواند مجموعه‌ای مفید و مورد استفاده در اختیار پژوهشگران، اساتید، دانشجویان و کارشناسان بخش های دولتی و خصوصی علوم و مهندسی آب قرار دهد.

لازم به ذکر است وزارت علوم، تحقیقات و فناوری به این نشریه از بدو انتشار مجوز علمی - پژوهشی داده است. و این نشریه یکی از نشریات تخصصی و معتبر در خصوص مسائل فوق الذکر می‌باشد، که در زیر بطور خلاصه به نوع، مشخصات و نحوه ارائه مقالات، اشاره می‌شود.

تذکر: در حین ارسال مقاله به این نکته توجه فرمائید که تغییر نام نویسندگان، ترتیب نویسندگان و نویسنده مسئول امکان پذیر نبوده و در مقاله مشابه آنچه در سامانه ثبت شده است به چاپ خواهد رسید.

الف- نوع مقالات

مقالات علمی، پژوهشی و مهندسی اصیل به زبان فارسی که حاصل پژوهش‌ها و تحقیقات نویسنده یا نویسندگان بوده و در نشریه دیگری در داخل و خارج چاپ نشده باشد.

ب- مشخصات مقالات ارسالی

۱- عنوان مقاله باید با حروف بزرگ سیاه و درشت در حداکثر ۶۰ حرف در صفحه اول مقاله (BLotus-16-Bold) باشد. عناوین دیگر مانند: چکیده، مقدمه، عناوین بخش‌های اصلی مقاله و نتیجه‌گیری و فهرست مراجع (Mitra-13-Bold B) نوشته شود. فونت‌های فارسی متن نوع (B Mitra-12) و فونت انگلیسی (-Times New Roman) 10 باشد.

۲- نام و نام خانوادگی نویسنده و یا نویسندگان (Lotus-12- B Bold) باید در صفحه اول و زیر عنوان مقاله نوشته شده باشد. نشانی محل کار، رتبه دانشگاهی مولفینی که عضو هیئت علمی هستند (Mitra-11) و همچنین آدرس الکترونیکی نویسنده مسئول و یا همه نویسندگان در پانوشت صفحه اول درج شود (Times New Roman-10).

۳- مقالات ارسالی باید دارای اجزای اصلی یک مقاله باشند که عبارتند از: چکیده (به زبان فارسی و انگلیسی)، واژه‌های کلیدی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و مراجع.

تحت Word-2003 به آدرس سایت نشریه آبیاری و زهشکی idj.iaid.ir ارسال نموده و کد مقاله دریافت گردد.

-همچنین ارسال فرم تعهدنامه با محتوای " این مقاله در نشریه‌ای چاپ و یا در حال چاپ نمی‌باشد و تمام مولفین از ارسال این مقاله به نشریه آبیاری و زهشکی آگاهی کامل دارند و به امضای تمام مولفین برسد"

-فرم تعارض منافع را هم به همراه فرم تعهدنامه بارگزاری فرمایید. در زیر بطور خلاصه به هریک از بخش‌های مقاله، اشاره‌ای خواهد شد:

چکیده

خلاصه‌ای از اهمیت، اهداف و روش اصلی تحقیق و نتایج کلی حاصل از آن در حداکثر دویست کلمه (۸- ۱۰ سطر) به دو زبان فارسی و انگلیسی تهیه شود.

متن چکیده انگلیسی عیناً مطابق چکیده فارسی و با فونت (Times New Roman-10) باشد.

واژه های کلیدی: حداکثر ۵ واژه کلیدی به ترتیب حروف الفبا (به فارسی و انگلیسی).

مقدمه

شامل مطالبی در خصوص کلیات، تعاریف، اهمیت، ضرورت، بررسی منابع، جمع‌بندی منابع، اهداف پژوهش با فونت (B Mirtra-12) می-باشد.

مواد و روش‌ها

در این قسمت به موقعیت پژوهش، شرح کامل روش تحقیق و نحوه آزمایش‌های انجام شده همراه با جدول و شکل و توضیحات مربوط به هریک با فونت (B Mirtra-12) اشاره می‌شود. اگر به جدول و یا شکل نیاز باشد بایستی هم جدول و هم شکل به صورت فارسی تهیه و در داخل متن نیز به آن‌ها اشاره شود.

نتایج و بحث

در این قسمت نتایج حاصل از تحقیقات و آزمایش‌های انجام شده و بحث بر روی آن‌ها با تأکید بر یافته‌های جدید و مقایسه نتایج با پژوهش‌های قبلی انجام و در پایان نتیجه‌گیری و جمع‌بندی نهایی آن‌ها خواهد آمد. ضمناً نتیجه‌گیری می‌تواند به صورت بخشی مجزا آورده شود (B Mitra-12).

اگر به جدول و یا شکل نیاز باشد بایستی هم جدول و هم شکل‌ها به فارسی آمده و همچنین در داخل متن به آن‌ها اشاره شود.

تذکر: اعداد داخل جدول و نمودار و شکل‌ها یک سایز داشته باشند و نحوه قرار گرفتن ستون‌ها از سمت راست رعایت گردد. ستون‌ها راست‌چین باشند و خطوط عمودی و افقی داخل جدول‌ها حذف

گردد. (به جز خطوط افقی بالا و پایین معرفی ستون‌ها و خط افقی زیرین آخرین ردیف).

تشکر و قدردانی

مؤلف می‌تواند به پروژه‌های تحقیقاتی که مقاله در قالب آن تهیه شده است و افرادی که به او کمک کرده‌اند در این قسمت به‌طور خلاصه اشاره کند.

پی‌نوشت‌ها

کلیه پی‌نوشت‌ها با شماره‌ای که در متن استفاده شده است از شماره او قبل از مراجع شماره‌گذاری شوند.

منابع

کلیه منابع مورد استفاده از دیگر پژوهشگران، باید در متن مقاله با اسم مؤلف و همکارن طبق توضیحات ذکر شده بیاید. نام نشریات در منابع فارسی و انگلیسی به صورت کامل بیاید.

نحوه ارائه منابع فارسی:

صادقی، م.، قهرمان، ب. و داوری، ک. ۱۳۸۷. مقیاس‌سازی و پیش-بینی نیم‌رخ رطوبت خاک در فاز توزیع مجدد. مجله آب و خاک. ۲۲ (۲): ۴۱۷-۴۳۱.

ابراهیمی، ن.ق.، کاشفی‌پور، م. و ابراهیمی، ک. ۱۳۸۴. بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان بر روی مدل سرریز توری سنگی پلکانی. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران. خردادماه، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان.

قبادیان، ر. ۱۳۸۵. بررسی الگوی جریان، فرسایش و رسوب‌گذاری در تلاقی رودخانه‌ها. رساله دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

نحوه ارائه منابع لاتین:

Warrick, A.W., Lazarovitch, N., Furman, A. and Zerihun, D. 2007. Explicit infiltration function for furrows. Journal Irrigation and Drainage Engineering. 133 (4):307- 313.

علائم

مؤلف می‌تواند علائم و نشانه‌هایی (notations) که در مقاله استفاده شده‌اند در آخر مقاله درج نماید.

تذکر: در تمام متن مقاله فاصله و نیم‌فاصله‌ها باید رعایت شود.

د-هزینه های داوری و چاپ مقالات:

مجله آبیاری و زهشکی ایران در قبال داوری و بررسی مقالات هیچ گونه هزینه‌ای را از نویسندگان محترم مقالات دریافت نمی‌کند.

پس از مرحله داوری و در صورت پذیرش مقاله مبلغ دومیلیون و پانصد هزار ریال به شماره حساب ۴۲۵۲۵۸۱۲۵ بانک تجارت شعبه دانشگاه فردوسی مشهد و بنام آقای دکتر امین علیزاده، به منظور

تأمین بخشی از هزینه های انتشار از نویسندگان محترم دریافت خواهد نمود.

نویسنده مسئول باید تصویر فیش پرداختی را با ذکر کد مقاله به آدرس ایمیل نشریه و نیز ایمیل سردبیر نشریه (دکتر علیزاده) ارسال نماید.

مقاله علمی-پژوهشی

اثر استفاده از آب آلوده به فلز سرب با آبیاری سطحی و زیرزمینی بر عملکرد و جذب آن توسط گیاه ذرت علوفه‌ای

عبدالمجید لیاقت^۱، محمدرضا اویسی^۲، حامد ابراهیمیان^{۳*}، مسعود پورغلام آمیجی^۴، محمد صالح^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۲۲

چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی امکان استفاده از آب آلوده به سرب در آبیاری سطحی و زیرزمینی و تأثیر آن بر عملکرد ذرت علوفه‌ای می‌باشد. در همین راستا، پژوهشی در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در سال ۱۳۹۵ در قالب آزمایش فاکتوریل به صورت طرح کاملاً تصادفی با شش تیمار در سه تکرار و مجموعاً ۱۸ پلات آزمایشی در لایسیمتر انجام شد. تیمارها عبارت بودند از: آبیاری سطحی با آب آلوده به سرب (SP)، آبیاری سطحی با آب معمولی به عنوان تیمار شاهد (SC)، آبیاری زیرزمینی با آب آلوده به سرب و عمق سطح ایستابی ۵۰ سانتی‌متر (50P)، آبیاری زیرزمینی با آب معمولی و عمق سطح ایستابی ۵۰ سانتی‌متر (50C)، آبیاری زیرزمینی با آب آلوده به سرب و عمق سطح ایستابی ۷۵ سانتی‌متر (75P) و در نهایت آبیاری زیرزمینی با آب معمولی و عمق سطح ایستابی ۷۵ سانتی‌متر (75C). نتایج نشان داد که مدیریت آبیاری بر ارتفاع گیاه، وزن خشک بوته و عملکرد علوفه گیاه در سطح احتمال ۱ درصد و وزن تر بوته و وزن تر بلال در سطح ۵ درصد اثر معنی‌دار داشت و بر وزن خشک بلال هیچ تأثیری نداشت. همچنین آلودگی هیچ‌گونه تأثیری در رشد و عملکرد ذرت و اجزای عملکرد نداشت. همچنین در تیمار SP، به‌طور میانگین به میزان ۲/۲۵ میلی‌گرم سرب در یک کیلوگرم ماده خشک ذرت وجود داشت که طبق توصیه سازمان جهانی بهداشت (WHO)، این میزان در گروه آلودگی کم قرار می‌گیرد. در نمونه‌های گیاهی دو تیمار 50P و 75P هیچ‌گونه سربی مشاهده نشد. از طرفی بیشترین عملکرد ذرت در تیمار 75P با مقدار ۴۹/۶۵ تن در هکتار و بعد از آن در تیمار 50P با مقدار ۴۷/۰۴ تن در هکتار به ثبت رسید. میزان عملکرد در دو تیمار 75P و 50P نسبت به تیمار شاهد، به ترتیب به مقدار ۳۶ و ۲۹ درصد افزایش داشت. نکته قابل توجه اینکه مقدار فلز سرب تثبیت‌شده و صعود کرده در تیمار آبیاری زیرزمینی، خارج از دسترس گیاه بوده و مشکلی از نظر آلودگی و عملکرد ذرت وجود نداشت.

واژه‌های کلیدی: آبیاری زیرزمینی، آلودگی خاک، سطح ایستابی، فلز سنگین

مقدمه

با فشار بیش از اندازه به منابع آب سالم و همچنین محدودیت آن، روش‌های جایگزین برای منابع آب کشاورزی شامل نمک‌زدایی از آب‌های شور و همچنین استفاده مجدد از فاضلاب‌های صنعتی و شهری ارائه شده است که این آب‌های نامتعارف هم از جنبه اقتصادی و هم توسعه در کشاورزی مفید می‌باشند (Hakimi et al., 2018). استفاده صحیح از پساب‌های شهری در بخش کشاورزی، علاوه بر گسترش سطح زیر کشت و افزایش تولید محصول‌های زراعی، از آلودگی محیط‌زیست نیز جلوگیری می‌کند (Moretti et al., 2019) اما استفاده از پساب سبب افزایش غلظت فلزهای سنگین در خاک و گیاهان می‌شود که این افزایش بستگی به نوع و ویژگی‌های پساب مصرف‌شده دارد (Ahmad et al., 2019). بررسی‌ها نشانگر آن است که در سال ۱۴۰۰، فاضلاب تولیدی کشور به رقمی برابر با ۵۱ درصد

رشد روز افزون جمعیت و نیاز به آب و تولیدات بیشتر از یک‌سو، و خشک‌سالی‌های به وجود آمده از سوی دیگر باعث شده که در سال‌های اخیر تقاضای آب افزایش یابد (Ma et al., 2020). بنابراین

۱ و ۳ - به ترتیب استاد و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲ و ۵ - دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۴ - دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(* نویسنده مسئول: Email: ebrahimian@ut.ac.ir)

افزایش شاخص انباشت آن‌ها از ۱ به ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴ و ۱/۶ و کاهش غلظت و شاخص انباشت کادمیوم و سرب به ترتیب به ۰/۴ و ۰/۸ گردید. همچنین ارفعی‌نیا و همکاران (۱۳۹۵) غلظت و ارزیابی خطر فلزات سنگین ناشی از مصرف محصولات کشاورزی در مزارع مختلف بوشهر را بررسی کردند. یافته‌های این مطالعه نشان دادند که میزان آلودگی به فلزات سنگین در خاک و محصولات کشاورزی آبیاری شده با آب آلوده به پساب شهری و صنعتی بالاتر از مقداری بود که با آب زیرزمینی آبیاری می‌شدند. فلزات سنگین مورد بررسی در این پژوهش شامل روی، منگنز، مس، کروم، کادمیوم و سرب بودند.

حسن‌لی و همکاران با بررسی تأثیر پساب شهری بر عملکرد ذرت و کارایی مصرف آب در مرودشت شیراز گزارش کردند که آبیاری با پساب باعث افزایش بیشتر کارایی مصرف آب در مقایسه با آب تازه گردید اما تفاوت آن‌ها معنی‌دار نبود (Hassanli et al., 2009). همچنین کرمی و همکاران (۱۳۹۸) تأثیر سطوح مختلف آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت در منطقه پاکدشت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نوع آب کاربردی باعث ایجاد تفاوت معنی‌داری در مقدار عملکرد ماده خشک گردید و بیشترین عملکرد ماده خشک در تیمار پساب با مقدار ۲۰/۹۰۴ تن در هکتار و کمترین مقدار در تیمار آب چاه با مقدار ۱۷/۲۳۱ تن در هکتار به دست آمد. بنابراین می‌توان پساب تصفیه‌شده در سطح ۷۵ درصد نیاز آبی در منطقه پاکدشت را به عنوان یک راهکار مدیریتی برای آبیاری پیشنهاد نمود.

حاتمیان و همکاران (۱۳۹۸) اثر آبیاری با فاضلاب بر انباشت فلزات سرب و کادمیوم در خاک و دانه‌های گندم و جو در شهرستان قدس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که غلظت‌های کادمیوم و سرب در تیمار ترکیبی فاضلاب تصفیه‌شده و آب چاه بیشتر از تیمار فاضلاب تصفیه‌شده بود. همچنین میانگین غلظت کادمیوم در دانه‌های دو گیاه دارای اختلاف معنی‌داری نبود، هرچند که غلظت سرب در دانه‌های جو به طور معنی‌داری بیشتر از گندم بود. خسروی و همکاران (۱۳۹۸) نیز تأثیر آبیاری با فاضلاب‌های شهری بر غلظت فلزهای سنگین در خاک‌های سطحی جنوب شهر هرسین کرمانشاه را در ۱۵ ایستگاه مختلف در عمق‌های ۰-۲۰ و ۲۰-۴۰ سانتی‌متر را بررسی کردند. نتایج نشان داد که جز دو فلز نیکل و کبالت، میانگین مقدار کل فلزهای سنگین در خاک‌های سطحی بیش‌تر از خاک‌های عمقی است. همچنین مقایسه آماری نشان داد که مقدار کل فلزهای سنگین، روی و سرب در دو عمق خاک زمین‌های آبیاری شده با فاضلاب، دارای اختلاف معنی‌دار است. بنابراین یکی از عمده‌ترین راه‌های ورود عناصر سنگین به اراضی کشاورزی آبیاری با پساب صنعتی می‌باشد. آبیاری با پساب صنعتی موجب افزایش مقدار سرب، نیکل، کادمیوم و کروم در خاک می‌شود که توسط پژوهشگران مختلفی نظیر جهانی و رضاپور گزارش شد اما در شرایطی که آبیاری

آب مصرفی برسد. بنابراین کاربرد مجدد آن در کشاورزی به علت نیاز روز افزون به آب، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران می‌تواند تا حدودی کمبود منابع آب سالم را جبران کرده و ضمن استفاده در تولیدات کشاورزی، به عنوان یک روش دفع تقریباً ایمن محیط‌زیستی برای فاضلاب به کار رود (یزدانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ آتش‌پز و همکاران، ۱۳۹۷). علاوه بر این وجود عناصر غذایی موجود در فاضلاب، سبب کاهش مصرف کودهای شیمیایی می‌شود اما آثار منفی احتمالی این منابع آب در آلودگی محیط‌زیست باید در نظر گرفته شود (ایزدپناه و صراف‌زاده، ۱۳۹۹). نوع سامانه آبیاری در توزیع این منابع آب نامتعارف و مدیریت آبیاری بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Ahmed and Slima, 2018).

اگرچه بدن انسان به عناصری از قبیل روی، مس، نیکل و کروم در مقادیر بسیار کم نیازمند است ولی مقادیر بسیار کم عناصری مانند کادمیوم و سرب برای سلامتی انسان خطرناک است (Liu et al., 2020). اما محققین دریافته‌اند که در خاک‌های قلیایی ($pH > 6/5$) و یا در حضور مواد آلی بسیار زیاد که با رس ترکیب شده‌اند، فلزات سنگین بیشتر تثبیت شده و در نتیجه شستشوی آن‌ها از خاک و در دسترس بودنشان کاهش پیدا می‌کند (Jyothi and Farook, 2020). وی و همکاران در پژوهشی که در چین انجام شد، گزارش کردند که اگر دو رژیم آبیاری یکی با مصرف آب کم و دیگری با مصرف آب زیاد استفاده شود، در رژیم مصرف آب کم، کادمیوم و مس حرکت کمی داشته و دیگر فلزات به‌طور افقی حرکت کرده (همانند آبیاری زیرزمینی) و در فاصله‌ای دور از قطره‌چکان تجمع می‌یابند ولی در رژیم آبیاری با مصرف آب زیاد، حرکت تمامی فلزات به‌صورت عمودی بوده و در عمق‌های بیشتر تجمع پیدا می‌کنند (Wei et al., 2015). همچنین منگ و همکاران پژوهشی درباره میزان فلزات سنگین در بافت گیاه و خاک در آبیاری سطحی طولانی‌مدت در چین انجام دادند و گزارش کردند که غلظت فلزات در خاک سطحی، بسیار بیشتر از خاک زیرین است (Meng et al., 2016).

نصر آزادانی و هودجی (۱۳۹۳) نیز تأثیر یک نمونه پساب صنعتی بر آلودگی خاک با فلزات سنگین را در اصفهان مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌های برداشت‌شده شامل چهار عمق از صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متری در زهکش‌های خاکی بود. نتایج همبستگی بین عمق خاک و غلظت فلزات سنگین نشان داد که بین این دو عامل همبستگی منفی وجود داشته که این موضوع با حرکت کند فلزات سنگین در خاک‌های با درصد آهک و pH بالا و تجمع بیشتر این فلزات در لایه‌های سطحی خاک قابل توجیه است. بیگی هرچگانی و بنی طالبی (۱۳۹۲) نیز اثر بیست‌وسه سال آبیاری سطحی با پساب شهری بر انباشت بعضی فلزات سنگین در خاک، انتقال به دانه‌های گندم و ذرت در شهرکرد را بررسی کردند. نتایج نشان داد که آبیاری با پساب در درازمدت منجر به افزایش غلظت روی، مس، کروم و نیکل و

مواد و روش‌ها

محل انجام آزمایش

پژوهش حاضر در سال ۱۳۹۵ در مرکز تحقیقات آب و هواشناسی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران با مختصات ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه عرض جغرافیایی (°N) و ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه طول جغرافیایی (°E) در ارتفاع ۱۲۹۳ متر از سطح دریا انجام شد. طبق داده‌های درازمدت، منطقه دارای آب و هوای مدیترانه‌ای بوده و بر اساس طبقه‌بندی کوپن با داشتن ۱۵۰ تا ۱۸۰ روز خشک، از نوع اقلیم نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های نسبتاً سرد و مرطوب است. مطابق آمار درازمدت ۳۰ ساله (۱۹۸۸-۲۰۱۸)، متوسط بارندگی سالانه منطقه ۲۴۷/۸ میلی‌متر و میانگین سالانه دمای هوا ۱۵/۹۳ درجه سانتی‌گراد است. بیشینه و کمینه دمای منطقه مورد بررسی به ترتیب ۴۲ و ۱۷- درجه سانتی‌گراد به ثبت رسید. حدود ۴۳ درصد از باران سالانه در فصل زمستان، ۲۸ درصد در فصل پاییز، ۲۸ درصد در فصل بهار و تنها یک درصد در فصل تابستان می‌بارد (پورغلام آمبجی و همکاران، ۱۳۹۷). جدول (۱)، اطلاعات هواشناسی و مقادیر آن‌ها در طول دوره کشت را نشان می‌دهد. لایسیمترها در یک فضای باز قرار داشتند و نزدیک‌ترین ساختمان به آن‌ها، سوله آزمایشگاه بود که در فاصله ۵۰ متری شمال شرقی لایسیمترها قرار داشت. محل قرارگیری لایسیمترها و نحوه قرارگیری آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.

زیرزمینی استفاده شود، شرایط فرق داشته و عمق تجمع فلزات سنگین خارج از محدوده توسعه ریشه می‌باشد (Jahany and Rezapour, 2020).

در مناطق مختلف برای گیاهان مختلف، نتایج متفاوتی در مورد انباشت فلزات سنگین در خاک و گیاه گزارش شده و بنابراین نیاز است که بررسی‌های بیشتری صورت گیرد. با توجه به اینکه در کشور ایران اکثر خاک‌ها از نوع قلیایی هستند، لذا تحرک و شستشوی فلزات سنگین بسیار کم بوده و باعث انباشت فلزات در لایه‌های سطحی خاک می‌شوند. از طرفی، جذب آب و املاح در لایه‌های سطحی که جایگاه تراکم بیشتری از ریشه‌های گیاه می‌باشد، نسبت به لایه‌های زیرین بیشتر است. این دو مسئله (انباشت و جذب فلزات) سبب تنش آلودگی گیاه هنگام آبیاری سطحی با فاضلاب صنعتی می‌شود. حال اگر به‌جای آبیاری سطحی، از آبیاری زیرزمینی (از طریق لوله‌های زهکشی و کنترل سطح ایستابی) با پساب استفاده شود، انتظار می‌رود که انباشت فلزات در لایه‌های زیرین خاک صورت گیرد و پساب با کیفیت بهتری در محیط ریشه قرار گیرد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی استفاده از آب آلوده به فلز سرب با دو روش آبیاری سطحی و زیرزمینی بر عملکرد ذرت علوفه‌ای و آلودگی خاک بود.

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی دوره کشت در منطقه مورد آزمایش (سال ۱۳۹۵)

شرح	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
حداکثر دما (°C)	۳۱/۵	۳۸/۱	۳۷/۷	۳۲/۹
حداقل دما (°C)	۱۵/۴	۲۲/۵	۲۱/۵	۱۷/۷
متوسط دما (°C)	۲۳/۴	۳۰/۳	۲۹/۶	۲۵/۳
بارش (mm)	۴۱/۹	۰	۰	۰/۵
سرعت باد (m/s)	۳/۳	۲/۸	۳/۳	۲/۷
تبخیر (mm/month)	۲۵۸/۱	۴۷۰	۴۳۶	۳۲۵/۹
رطوبت نسبی (%)	۴۴/۲	۲۴/۷	۳۰/۸	۳۳/۸



شکل ۱- نمایی از لایسیمترهای تحت آزمایش

خصوصیات خاک مورد آزمایش

مقداری آب اضافه شد تا شرایط خاک مساعد و آماده کشت شود. برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، قبل از شروع آزمایش و اعمال تیمارها، نمونه برداری از خاک لایسیمترها انجام شد. بافت خاک از طریق مثلث بافت خاک USDA تعیین شد. مشخصات فیزیکی خاک مزرعه شامل فراوانی نسبی ذرات، جرم مخصوص ظاهری (Pb)، رطوبت ظرفیت زراعی (FC) و رطوبت نقطه پژمردگی (PWP) و رطوبت اشباع به ترتیب با روش های هیدرومتری، سیلندر، دستگاه صفحات فشاری در مکش ۰/۳ و ۱۵ بار و روش وزنی اندازه گیری شد. مقدار pH خاک نیز به وسیله دستگاه pH متر اندازه گیری شد. نتایج خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۲) آورده شده است.

پس از تهیه خاک زراعی مورد نظر (خاک باغچه ای، منطقه مهرشهر کرج)، پر کردن لایسیمترها با خاک طی چند مرحله انجام شد. در هنگام پر کردن لایسیمترها از خاک، عملیات تراکمی خاصی صورت نپذیرفت. خاک به صورت لایه هایی به ارتفاع تقریبی ۲۰ سانتی متر در لایسیمترها ریخته شد و پس از تسطیح نسبی، لایه بعدی اضافه شد. با رسیدن ارتفاع خاک به میانه لایسیمترها، جهت ایجاد نشست و تحکیم طبیعی، مقداری آب به خاک اضافه شد و سپس اضافه نمودن خاک تا پر شدن لایسیمتر ادامه یافت. در این مرحله مجدداً با افزودن آب و پس از نشست، فضای خالی باقی مانده تا ارتفاع پنج سانتی متر پایین تر از لبه فوقانی لایسیمترها از خاک پر شد. در نهایت پس از پر کردن لایسیمترها و در چندین مرحله،

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک لایسیمترها

θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_{PWP} (cm ³ /cm ³)	θ_{FC} (cm ³ /cm ³)	P_b (g/cm ³)	pH	بافت خاک	ذرات تشکیل دهنده خاک (%)			عمق (cm)
						شن	سیلت	رس	
۴۶/۲۷	۱۴/۸۸	۲۷/۲۴	۱/۵۵	۷/۸	لوم	۳۵/۲۷	۴۵/۰۴	۱۹/۶۹	۰-۷۰

زیرا دمای خاک تأثیر اساسی در رشد و رویش گیاه داشته و همچنین بر فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک اثرگذار است (Fang et al., 2018). بنابراین انتقال افقی حرارت از جداره لایسیمتر به سمت مرکز آن، قابل توجه می باشد (Pütz et al., 2018). برای مقابله با این مسائل بهتر بود که برای لایسیمترها پوششی در نظر گرفته شود. بهترین پوشش برای این لایسیمترها، پشم شیشه با روکش آلومینیوم می باشد اما رنگ سفید نیز می تواند دمای خاک داخل لایسیمتر را تعدیل کند. در نتیجه با توجه به هزینه های پشم شیشه و سخت بودن نمونه گیری از بدنه لایسیمتر، در نهایت تصمیم بر این شد که لایسیمترها رنگ سفید زده شود.

ساخت لایسیمترها

لایسیمترها از جنس PVC با ابعاد ۶۰ سانتی متر قطر و ۱۰۰ سانتی متر ارتفاع انتخاب شدند. با توجه به تعداد تیمارها و تعداد تکرار هر کدام، ۱۸ لایسیمتر استفاده شد. برای خارج کردن آب اضافی از لایسیمترها، لوله هایی از جنس PVC به قطر ۵ سانتی متر و طول ۷۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. روی لوله ها سوراخ هایی به قطر دو میلی متر و به فاصله ۲/۵ سانتی متر در ۴ ردیف در ۵۰ سانتی متر از طول لوله تعبیه گردید تا به عنوان زهکش عمل کند. به منظور جلوگیری از ورود ذرات خاک به درون لوله های زهکش، استفاده از صافی یا فیلتر مناسب در اطراف لوله زهکش امری ضروری است. به همین دلیل، در پژوهش حاضر از نوعی صافی ژئوتکستایل استفاده شد. این صافی پس از دوخت به صورت پوششی هم قطر با لوله، به دور آن کشیده شد. لوله های زهکشی به طور افقی در پنج سانتی - متری کف لوله قرار گرفتند. به طوری که سر مسدود آن ها در داخل لایسیمتر و سر باز آن ها، خارج از لایسیمتر قرار می گرفت. محل اتصال لوله با بدنه لایسیمتر از داخل و بیرون آب بندی شد.

تیمارهای آزمایشی

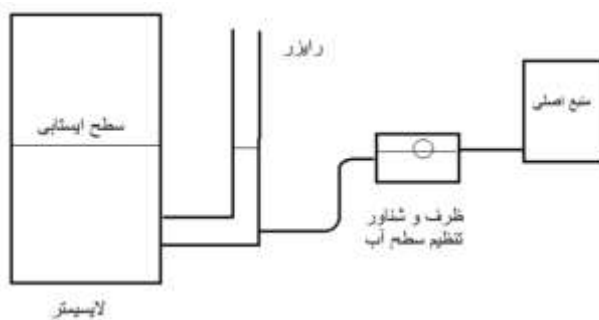
این پژوهش در قالب آزمایش فاکتوریل به صورت طرح کاملاً تصادفی با شش تیمار در سه تکرار که مجموع ۱۸ پلات آزمایشی بود، انجام شد. در این تیمارها گیاه ذرت رقم SC 704 کشت شد. تیمارهای آزمایش به شرح زیر بود:

- آبیاری سطحی با آب معمولی (SC)
- آبیاری سطحی با آب آلوده به سرب (SP)
- آبیاری زیرزمینی با آب معمولی و عمق سطح ایستابی ۵۰ سانتی متر (50C)
- آبیاری زیرزمینی با آب آلوده به سرب و عمق سطح ایستابی ۵۰ سانتی متر (50P)

پوشش لایسیمترها

از آنجایی که لایسیمترها روی زمین قرار می گیرند، بنابراین در معرض مستقیم تابش خورشید و جریان هوا قرار خواهند داشت. این عوامل بر روی دمای خاک داخل لایسیمترها و تغییرات آن در طول روز تأثیر گذاشته و آن را از شرایط واقعی خاک مزرعه دور می کند

تیمارهای 50C و 50P و دو مخزن دیگر برای تیمارهای 75C و 75P). این مخازن توسط شلنگ‌های باریک، هر یک به شبکه کوچکی متصل می‌شد. داخل هر یک از این شبکه‌های کوچک، یک شناور قرار داشت که شلنگ‌ها به آن متصل می‌شدند. خروجی این ظرف‌ها توسط شبکه‌ای از شلنگ‌ها به انتهای لوله‌های زهکشی در تیمارهای آبیاری زیرزمینی متصل شد. شکل (۲) شماتیک نحوه آبیاری زیرزمینی لایسیمترها را نشان می‌دهد.



شکل ۲- شماتیک نحوه آبیاری لایسیمترهای آبیاری زیرزمینی

آبیاری زیرزمینی، به سطح لایسیمتر به صورت دستی خاک اضافه شد تا هم فضای خالی ناشی از خاک نشست کرده را پر کند و همچنین عمق‌های سطح ایستابی به میزان مورد انتظار برسد. (۴) در ابتدای کاشت بذر به دلیل جریانات ترجیحی، آب از منطقه دسترس بذر خارج گشته و به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کرد. قبل از جوانه‌زنی بذر نیز گاهی شسته شدن بذر مشاهده شد. (۵) به دلیل اینکه لایسیمترها روی سطح خاک بودند و ارتفاعی حدود یک متر را داشتند، سطح صفر خاک و اندام هوایی گیاه، نسبت به سطح زمین در ارتفاع قرار داشتند. (۶) تراکم دو برابری تعداد گیاهان، نسبت به حالت استاندارد مزرعه، درون لایسیمترها، نکته مهم این که، در این مرحله، نیاز آبیاری گیاه در شرایط نرمال، با استفاده از آخرین نسخه نرم‌افزار CROPWAT (نسخه 8.0) محاسبه گردید. سپس به دلیل شش موردی که در بالا ذکر شد، راندمان ۵۰ درصد در نظر گرفته شد. به عبارتی دیگر، میزان آب مورد نیاز گیاه در شرایط استاندارد محاسبه و سپس به میزان دو برابر آن، گیاه درون لایسیمترهای مورد آزمایش، آبیاری شدند.

نحوه آبیاری تیمارهای مختلف در بخش دوم

در این بخش تیمارهای آبیاری زیرزمینی، به منبع آب متصل شدند و با توجه به نیاز تبخیر و تعرق خود، از منبع مورد نظر، آب مورد نیاز را دریافت می‌کردند اما برای اینکه تیمارهای آبیاری سطحی و زیرزمینی با یکدیگر مقایسه شود و همچنین به دلایلی که آب مورد نیاز تیمارهای سطحی قابل محاسبه نبود، در نتیجه تیمار آبیاری

- آبیاری زیرزمینی با آب معمولی و عمق سطح ایستابی ۷۵ سانتی‌متر (75C)
- آبیاری زیرزمینی با آب آلوده به سرب و عمق سطح ایستابی ۷۵ سانتی‌متر (75P)

کنترل سطح ایستابی در لایسیمترها

برای کنترل سطح ایستابی و تثبیت آن در آبیاری زیرزمینی، از چهار مخزن آب به حجم ۲۲۰ لیتر استفاده شد (دو مخزن برای

نحوه آبیاری لایسیمترها

آبیاری لایسیمترها به دو بخش مجزا تقسیم‌بندی شد. بخش اول از تاریخ کشت بود تا زمانی که ریشه گیاه برای استحصال آب از اعماق پایین‌تر پروفیل خاک، به حد کافی رشد کرده باشد (خرداد و تیر ۱۳۹۷) و بخش دوم، از انتهای بخش اول تا روز برداشت بود (از انتهای تیر تا اواسط مهر ۱۳۹۷). در ابتدای بخش دوم، سیستم آبیاری زیرزمینی، بر روی تیمارهای مربوطه اعمال گردید.

نحوه آبیاری تیمارهای مختلف در بخش اول

آبیاری تمامی تیمارها، در بخش اول اعم از سطحی و زیرزمینی، از روی سطح خاک انجام شد. در این مرحله به دلایل زیر، بیش‌آبیاری انجام شد تا از تنش احتمالی جلوگیری به عمل آید اما این نکته لازم به ذکر است که میزان آب مصرفی برای تمامی تیمارها به یک میزان و برابر بود. دلایل بیش‌آبیاری لایسیمترها بدین منظور بود که (۱) لایسیمترها روی سطح خاک بودند و هر چند که بدنه لایسیمترها با رنگ سفید پوشیده شده بود، تا نور را بازتاب کند و از افزایش دمای لایسیمتر جلوگیری به عمل آید اما افزایش دما در بدنه لایسیمترها تا اندازه‌ای محسوس بود. (۲) لایسیمترها با خاک دستی پر شده بودند، لذا جریانات ترجیحی و غیرقابل کنترل آب و همچنین شسته شدن خاک کناره‌های بدنه لایسیمتر رخ داد. (۳) به دلیل پر شدن لایسیمترها با خاک دستی، در هر لایسیمتر حدود ۱۵ سانتی‌متر نشست خاک اتفاق افتاد که برای آماده شدن لایسیمترها برای اعمال

$(Pb(C_2H_3O_2)_2)$ با غلظت $0/34$ گرم در 200 لیتر آب بود که بر این اساس، غلظت نهایی فلز سرب (Pb) $1/10$ میلی گرم در لیتر به دست آمد. لازم به ذکر است که درصد خلوص هر یک از ترکیبات شیمیایی مورد استفاده، تأثیر زیادی در مقدار نمک به کار رفته دارد. مقادیر معینی از نمک این فلزات در آب شهری حل شده و به منبع آب متصل به تیمار آبیاری زیرزمینی با آب آلوده اضافه گشته و سپس غلظت فلزات سنگین حاصل از انحلال این نمک‌ها، محاسبه شد. همان طور که ذکر شد، مقادیر نمک برای انحلال در 200 لیتر آب (حجم مخزن) محاسبه گردید.

اندازه‌گیری مقدار فلزات

برای اندازه‌گیری مقدار فلزات در نمونه‌های مورد نظر، از روش طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS^3) استفاده شد. تکنیک AAS برای تعیین مقادیر بسیار ناچیز غلظت فلزات (در حد ppm)، در نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر بسیاری از فلزات مختلف با استفاده از AAS تعیین می‌شوند. در این خصوص دو نکته مهم وجود دارد: (۱) هرچه غلظت عنصری در محلول بالاتر باشد، نور بیشتری از خود منتشر می‌کند و (۲) هر عنصری که انرژی جذب می‌کند، رنگ متفاوتی را به صورت نور از خود منتشر می‌کند. با استفاده از این ویژگی عناصر، طیف‌سنجی جذب اتمی، می‌تواند یون‌های خاص را در نمونه، شناسایی و اندازه‌گیری کند. نحوه تهیه نمونه خاک برای قرائت توسط دستگاه جذب اتمی بدین صورت بود که به دو گرم از نمونه خاک، 15 میلی‌لیتر اسید نیتریک چهار نرمال اضافه و در حمام آب گرم، در دمای 80 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از گذشت 12 ساعت، نمونه صاف گردید. اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین در عصاره به دست آمده توسط دستگاه جذب اتمی قرائت شد (Walsh, 1989). نحوه تهیه نمونه گیاه برای قرائت توسط دستگاه جذب اتمی نیز بدین صورت بود که ذرت‌های برداشت‌شده، به طور کامل هوا خشک شدند. سپس از قسمت‌های مختلف گیاه ذرت (برگ، ساقه، ذرت) نمونه‌گیری انجام شد. نمونه‌های خشک گیاه توسط دستگاه خردکن، پودر شده و سپس درون کوره سوزانده شد. خاکستر گیاه با اسیدکلریدریک سه نرمال هضم شد و عصاره‌گیری انجام شد (Walsh, 1989). در آخر نمونه‌ها تحویل آزمایشگاه موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی شد، تا میزان فلزات سنگین نمونه‌های آزمایشی، اندازه‌گیری شود.

بذر گیاه ذرت، در تیرماه سال 1395 درون لایسیمترها کاشته شد. مرحله جوانه‌زنی گیاه نیز چهار روز پس از تاریخ کشت، آغاز شد. همچنین در مهرماه همان سال، محصول پس از گذشت 83 روز، محصول علفوفای برداشت شد. در نهایت برای تحلیل آماری داده‌ها،

زیرزمینی با عمق آبیاری کمتر (50 سانتی‌متر)، ملاک آبیاری تیمارهای سطحی قرارداد شده. به این نحو که هر میزان مصرف آب تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق کمتر بود ($50C$ و $50P$)، به همان میزان از سطح خاک، تیمارهای آبیاری سطحی شدند. یکی دیگر از دلایل این امر این بود که یکی از اهداف انجام این تحقیق، بررسی اثر مدیریت آبیاری و آلودگی بر عملکرد گیاه بود؛ در نتیجه می‌بایست تمامی عامل‌های دیگری که ممکن بود بر عملکرد گیاه تأثیر بگذارند، برای تمامی تیمارها شرایط یکسانی می‌داشتند. به همین خاطر تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق کمتر (به دلیل داشتن میزان تبخیر بیشتر) ملاک آبیاری تیمارهای سطحی قرار گرفت. لازم به ذکر است که با توجه به شرایط خاص لایسیمترها و خاک درون آن‌ها، برای جلوگیری از شسته شدن خاک و به حداقل رساندن جریان‌ات ترجیحی زیرزمینی در تیمارهای آبیاری سطحی، دور آبیاری کوتاه در نظر گرفته شد. بجای این که از دورهای آبیاری طولانی با آب زیاد استفاده گردد، آبیاری به دفعات بیشتر و میزان کمتر انجام شد؛ به همین دلیل، خروجی آب از زهکش تیمارهای سطحی مشاهده شد.

کیفیت آب مصرفی برای تیمارهای مختلف

آب مورد استفاده در تیمار آبیاری سطحی با آب آلوده به فلزات سنگین (SP)، به صورت مصنوعی تهیه شد، بدین صورت که آب معمولی با غلظت معینی به نمک فلز سرب آلوده شد. به عبارتی فاضلاب مصنوعی تهیه شد. در آب مورد استفاده در تیمار آبیاری سطحی (SC)، هیچ‌گونه آلاینده‌ای وجود نداشت. این تیمار، تیمار شاهد برای تیمار سطحی آلوده بود. کیفیت آب مصرفی تیمار آبیاری زیرزمینی با آب آلوده به فلزات سنگین ($50P$ و $75P$)، مشابه تیمار سطحی آلوده بود. تنها تفاوت آبیاری زیرزمینی با آب معمولی ($50C$ و $75C$) با تیمار پیشین، در کیفیت آب است که در این تیمار از آب معمولی استفاده شد. این تیمار نیز، تیمار شاهد برای تیمار آبیاری زیرزمینی با آب آلوده به فلزات در نظر گرفته شد.

مقدار غلظت فلزات مورد استفاده (سرب) در مصارف کشاورزی و آبیاری، بر اساس مقادیر دستورالعمل سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران (1371)، FAO^1 (1992) و WHO^2 (2006) تعیین شد. لازم به ذکر است که به هر کدام از مقادیر استاندارد 10 درصد افزوده شد. این افزایش به منظور حصول اطمینان از وجود حداکثر غلظت مجاز فلزات در آب مورد استفاده، صورت گرفت. برای آبیاری در تیمارهای شاهد، از آب شهری استفاده شد. اما در تیمارهای آب آلوده، با اضافه کردن مقادیر مشخصی از نمک فلزات مورد نظر، آب آلوده به صورت مصنوعی آماده شد. نمک مورد استفاده، استات سرب

1- Food and Agriculture Organization

2- World Health Organization

3- Atomic Absorption Spectroscopy

آماری قرار گرفت. منظور از مدیریت آبیاری، اعمال آبیاری از سطح خاک، آبیاری زیرزمینی از عمق سطح ایستابی ۵۰ سانتی‌متر و ۷۵ سانتی‌متر می‌باشد. صفات مورد اندازه‌گیری شامل ارتفاع ذرت، وزن تر بوته، وزن خشک بوته، وزن تر بلال، وزن خشک بلال و عملکرد گیاه بود. قابل مشاهده است که اثر مدیریت آبیاری بر روی ارتفاع گیاه، وزن خشک بوته و عملکرد گیاه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود زیرا در وقتی ارتفاع گیاه از نوع سامانه آبیاری تأثیر پذیرد، طبیعتاً وزن خشک بوته و عملکرد نیز تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. اثر مدیریت آبیاری بر روی وزن تر بوته و وزن تر بلال در سطح پنج درصد معنی‌دار بوده و بر وزن خشک بلال هیچ تأثیری نداشته است. نکته جالب توجه در این است که آلودگی هیچ‌گونه تأثیری در رشد و عملکرد ذرت و اجزای عملکرد نگذاشته و فقط مدیریت آبیاری است که تعیین کننده شرایط می‌باشد. تنها صفتی که تحت تأثیر اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی قرار گرفت، ارتفاع گیاه بود. دلیل آن هم جذب فلزات سنگین از طریق ریشه و تأثیر مستقیم بر اندام هوایی بوده است.

نتایج مشابهی توسط بیگی هرچگانی و بنی طالبی (۱۳۹۲) و کرمی و همکاران (۱۳۹۸) گزارش شده که استفاده از فلزات سنگین در محصول ذرت، تأثیر معنی‌داری بر عملکرد نداشته و چه بسا عملکرد و اجزای آن را را نیز افزایش داده است. به غیر از نتایج ارائه‌شده در جدول (۳)، برخی تغییرات مهم نظیر اثر مدیریت آبیاری و اثر متقابل مدیریت و آلودگی بر ارتفاع گیاه، اثر مدیریت آبیاری بر وزن تر گیاه ذرت و عملکرد گیاه ذرت به تفکیک شرح داده شد که همراه به شکل‌های مربوط به آن، در بخش‌های زیر مورد بحث قرار گرفت.

از نرم‌افزار SAS (نسخه 9.4) استفاده شد. لازم به ذکر است که میانگین‌ها، به روش دانکن مورد مقایسه قرار گرفتند.

نتایج و بحث

میزان آب مصرفی برای تیمارهای مختلف

در بخش اول، میزان آبیاری به دو بخش تقسیم شد. در بخش اول، میزان ۴۲۸ میلی‌متر آب به هر یک از لایسیمترها داده شد. در بخش دوم، که سیستم آبیاری زیرزمینی به لایسیمترها وصل شد، در تاریخ‌های مختلف، میزان افت سطح آب منابع یادداشت شد و به میزان افت سطح آب، به تیمارهای شاهد، آب معمولی اضافه شد. برای تیمارهای آلوده به فلزات سنگین نیز، به نسبت افت سطح آب و حجم کل منبع، در هر بار نمک فلزات سنگین مورد نیاز برای آلوده کردن آب، محاسبه و توزین شد و به همراه آب، به منبع اضافه شد. در این بخش، جمع مقادیر آب اضافه‌شده به منبع و به مصرف گیاه رسیده شده، برای تیمارهای زیرزمینی (50C و 50P)، اعم از آلوده و غیر آلوده، برابر با ۶۳۸ میلی‌متر بود و برای تیمارهای زیرزمینی (75C و 75P)، اعم از آلوده و غیر آلوده، برابر با ۶۰۰ میلی‌متر بود. میزان آب اضافه‌شده به تیمارهای سطحی (SC و SP)، همان‌طور که در فصل روش انجام آزمایش ذکر شد، برابر با آب مصرفی تیمار زیرزمینی با عمق کم‌تر (۵۰ سانتی‌متر) بود. مقدار کمتر مصرف آب در روش آبیاری زیرزمینی با عمق بیشتر قابل انتظار بوده و توسط محققین مختلف به آن اشاره شده است (Ma et al., 2020; Wei et al., 2015).

در جدول (۳)، اثر مدیریت آبیاری، آلودگی و اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی بر روی صافت اندازه‌گیری شده مورد تجزیه و تحلیل

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر مدیریت آبیاری و آلودگی بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت

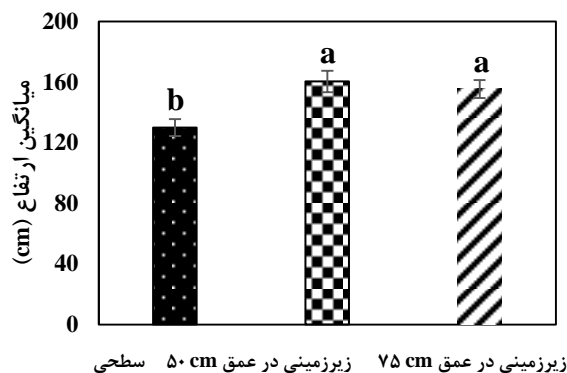
منابع تغییر	ارتفاع گیاه	وزن تر بوته	وزن خشک بوته	وزن تر بلال	وزن خشک بلال	عملکرد گیاه
اثر مدیریت آبیاری	۱۶۰۵/۵**	۰/۱۴۵*	۰/۰۰۹**	۰/۱۹۳*	۰/۰۰۲۶ ^{ns}	۲۹۳/۸**
اثر آلودگی	۳۲ ^{ns}	۰/۱۱۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۳۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۹ ^{ns}	۵۵/۷۹ ^{ns}
اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی	۱۱۳/۱۶*	۰/۰۰۲۷ ^{ns}	۰/۰۰۰۵۹ ^{ns}	۰/۰۰۱۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۳۳ ^{ns}	۰/۲۳ ^{ns}
خطا	۲۷/۵	۰/۰۲۵	۰/۰۰۱۱	۰/۰۲۹	۰/۰۰۰۶۹	۳۹/۷
ضریب تغییرات	۳/۵۳	۱۰/۵۱۵	۹/۸۱۳	۳۱/۴	۴۲/۴	۱۴/۲۴

**، * و ^{ns} به ترتیب نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد و عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

معنی‌دار بوده است. شکل (۳)، به صورتی دیگر اثر مدیریت آبیاری بر ارتفاع گیاه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که هر عمق موجود در شکل (۳)، مربوط به سه تکرار از آب معمولی و سه تکرار از آب آلوده به فلزات سنگین می‌باشد. بنابراین هر عمق بیان‌شده، معرف میانگین ارتفاع ناشی از ۶ پلات آزمایشی است.

اثر مدیریت آبیاری بر ارتفاع گیاه

طبق نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، تأثیر مدیریت آبیاری بر ارتفاع گیاه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود اما آلودگی به تنهایی هیچ تأثیری بر ارتفاع گیاه نداشته است. همچنین ملاحظه می‌شود که اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی، در سطح پنج درصد

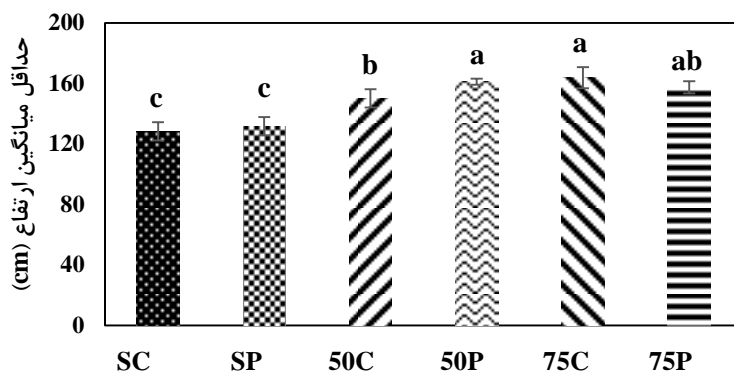


شکل ۳- اثر مدیریت آبیاری بر ارتفاع گیاه و مقایسه میانگین به روش دانکن

اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی بر ارتفاع گیاه

اثر متقابل مدیریت و آلودگی بر ارتفاع گیاه در جدول (۳) و شکل (۴) نشان داده شده است. در تیمارهای آبیاری سطحی (SP و SC) اختلاف معنی‌داری بین اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی بر ارتفاع گیاه مشاهده نشد و مقایسه میانگین به روش دانکن حاکی از اختلاف سه سانتی‌متری در میانگین ارتفاع بوده که هر دو در یک خانواده قرار گرفتند (c) ولی نوسانات متوسط ارتفاع گیاه در تکرارهای مختلف پلات‌های این تیمار، نسبت به دیگر تیمارها مقدار بالاتری دارد. نکته بعدی مربوط به تیمار آبیاری زیرزمینی عمق ۵۰ سانتی‌متری می‌باشد که در حالت شاهد (50C) و آلوده به فلزات سنگین (50P) اختلاف معنی‌دار بین میانگین ارتفاع ذرت وجود دارد. همچنین با تیمار قبلی و بعدی خود نیز اختلاف معنی‌دار داشته و در یک گروه آماری قرار نگرفتند (a و b). اما نکته قابل توجه این است که تیمار آب آلوده عمق ۵۰ سانتی‌متر (50P) و تیمار شاهد عمق ۷۵ سانتی‌متر (75C) در یک ردیف آماری قرار داشته که در نوبه خود قابل توجه می‌باشد. به هر حال مشهود است که آبیاری زیرزمینی ضمن کاهش مصرف، تأثیر بالایی در رشد، عملکرد و اجزای عملکرد محصول گذاشته و اثر معنی‌دار آن، گواه این ادعا می‌باشد. در تیمارهای عمق ۷۵ سانتی‌متر (75C و 75P) نیز اختلاف ناچیزی بین میانگین ارتفاع ذرت وجود داشته و اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی در این تیمار تأثیر کمتری بر میانگین ارتفاع گذاشته است. ضمن اینکه بین تیمار زیرزمینی ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر اختلاف ناچیز وجود داشته و عمده تفاوت مربوط مقایسه آن با آبیاری سطحی است. از طرفی کمترین میزان نوسان در تیمار (50P) مشاهده شد. نتایج مشاهدات محققین نیز نشان داد که تأثیر آب آلوده به فلزات سنگین بر اجزای عملکرد ذرت تأثیر معنی‌داری نداشته و در صورت کاهش عملکرد، مقدار آن بسیار ناچیز بود (Hassanli et al., 2009; Hirich et al., 2012; Abedinzadeh et al., 2019).

همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، ارتفاع گیاه هر چهار تیمارهای آبیاری زیرزمینی در آزمون مقایسه میانگین دانکن، از لحاظ آماری در گروه a قرار داشت و تیمارهای آبیاری سطحی، در گروه b قرار گرفتند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نوع سیستم آبیاری در ارتفاع نهائی گیاه تأثیر چشمگیر داشته است. دلیل این امر می‌تواند این باشد که در سیستم آبیاری زیرزمینی (50C، 50P، 75C و 75P)، همواره عمق مشخصی از آب در لایسیمتر موجود بوده است و به علت صعود کاپیلاری در اختیار گیاه قرار گرفته است اما در سیستم آبیاری سطحی (SP و SC)، به علت دستی‌پوشدن خاک لایسیمتر و جریان‌ات‌ترجیحی آب که در همه لایسیمترهای سطحی مشاهده گردید، آب به اعماق پائین‌تر نفوذ کرده و از دسترس گیاه خارج شده است. از طرفی بار آبی واردشده از سطح و جریان رو به پایین در آبیاری سطحی قابل توجه بوده و همین امر، عامل دیگری در خارج شدن آب قابل دسترس گیاه در آبیاری سطحی حاضر بوده است. در این شرایط، هر میزان که سطح آب در لایسیمتر در عمق پائین‌تری باشد، گیاه برای دسترسی به آب بالاجبار تخصیص مواد حاصل از فتوسنتز خود را به سمت اندام زمینی خود که همان ریشه است، معطوف کرده که در نتیجه باعث می‌شود سهم اندام هوایی گیاه از این مواد کاهش یابد. متوسط ارتفاع گیاه در آبیاری سطحی برابر ۱۳۰ سانتی‌متر بوده که این میزان در آبیاری زیرزمینی با عمق ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر به ترتیب به ۱۶۰/۵ و ۱۵۵/۵ سانتی‌متر رسیده است. به عبارتی در تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر نسبت به تیمار شاهد (آبیاری سطحی)، به ترتیب ۲۳/۵ و ۱۹/۶ درصد افزایش ارتفاع رخ داده که این قابلیت بالای آبیاری زیرزمینی در مصرف کمتر آب و افزایش اجزای عملکرد را نشان می‌دهد. یافته‌های این بخش با نتایج پژوهش کرمی و همکاران (۱۳۹۸)، Alizadeh et al. (2001) و Hirich et al. (2012) مطابقت دارد.

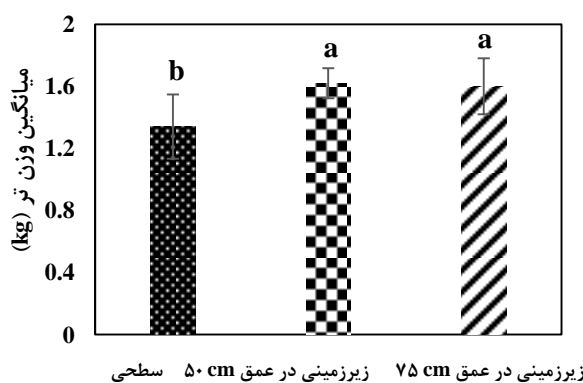


شکل ۴- اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی بر ارتفاع گیاه و مقایسه میانگین به روش دانکن

بوده است. از طرفی کاملاً قابل انتظار بود که با توجه به میانگین ارتفاع بیشتر در تیمارهای آبیاری زیرزمینی، در نتیجه میزان وزن تر گیاه هم با همین روند باشد که این گونه هم شد. همچنین به دلیل مواجه شدن گیاه تیمارهای آبیاری سطحی با تنش کم‌آبی، محصول تولیدی آن‌ها کاهش یافته است. تأثیر آبیاری زیرزمینی در کاهش مصرف آب و افزایش عملکرد محصول در پژوهش‌های مختلفی نظیر ارفعی نیا و همکاران (۱۳۹۵)، خسروی و همکاران (۱۳۹۸) و Wei et al. (2015) به آن اشاره شده است. همانند روند تغییرات ارتفاع گیاه، کمترین وزن تر بوته در تیمار آبیاری سطحی با مقدار ۱/۳۴ کیلوگرم ثبت شد و بعد از آن تیمار آبیاری زیرزمینی در عمق ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر به ترتیب مقادیر ۱/۶۲ و ۱/۶ کیلوگرم را دارا بودند. به عبارتی دو تیمار آبیاری زیرزمینی، حدود ۲۰ درصد وزن تر بیشتری نسبت به تیمار شاهد داشته که مقدار قابل توجهی است.

اثر مدیریت آبیاری بر وزن تر گیاه ذرت

با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۳)، مشاهده می‌شود که در سطح پنج درصد، تأثیر مدیریت آبیاری بر وزن تر گیاه معنی‌دار شده است ولی آلودگی هیچ‌گونه تأثیری بر وزن تر گیاه نداشته است. دلیل این امر می‌تواند این باشد که pH آب آبیاری و خاک درون لایسیمترها، در محدوده قلیایی بوده و در نتیجه حرکت فلزات سنگین به شدت کاهش یافته است. به همین دلیل، فلزات سنگین موجود در آب آبیاری، به میزان بسیار کمی جذب خاک و سپس گیاه شد. روند تغییرات شکل (۵) همانند شکل (۳) و اثر مدیریت آبیاری بر ارتفاع گیاه بوده و تیمار (50C و 50P) نسبت به تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر (75C و 75P) و سپس تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق ۵۰ سانتی‌متر (SC و SP) وزن تر بیشتری ثبت کرده است. حتی نوسان میانگین وزن تر در این تیمار نسبت به دیگر تیمارها کم تر



شکل ۵- اثر مدیریت آبیاری بر وزن تر بوته و مقایسه میانگین به روش دانکن

تیمارهای آبیاری زیرزمینی (50C, 50P, 75C و 75P) در گروه a قرار گرفته‌اند، ولی تیمارهای آبیاری سطحی (SC و SP) در گروه b دسته‌بندی شدند. با توجه به یک اندازه بودن میزان آب مصرفی برای تمامی لایسیمترها و همچنین جدول تجزیه واریانس، مشخص است

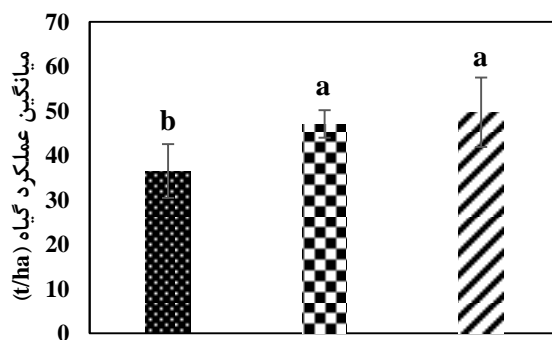
اثر مدیریت آبیاری بر عملکرد گیاه ذرت

از جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) قابل مشاهده است که اثر بر عملکرد گیاه ذرت (مجموع وزن تر بوته و بلال) در سطح یک درصد معنی‌دار شده است. همان‌طور که در شکل (۶) قابل مشاهده است،

زیرزمینی با عمق ۵۰ سانتی‌متر (50C و 50P) عملکرد بهتری از خود نشان داده بود. دلیل این امر این است که وزن بلال تولیدی در تیمار زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر بیشتر از تیمار عمق ۵۰ سانتی‌متر بوده است که در نتیجه ۲/۶ کیلوگرم در هکتار عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. چرایی آن به این مسئله بر می‌گردد که در تیمار زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر، گیاه برای دسترسی به آب، کمی دچار تنش شده است (به علت عمق زیاد سطح آب) ولی این کمبود مانند تیمار آبیاری سطحی، آن‌قدر زیاد نبوده است که باعث کاهش عملکرد شود و به حد آستانه برسد. از طرفی به دلیل اینکه گیاه ذرت به شدت به کم‌آبی حساس است، سطوح کم تنش آبی باعث می‌شود گیاه ذرت بنابه خصوصیات فیزیولوژیکی خود، سیستم ریشه خود را قوی‌تر کند که باعث زودرس شدن گیاه شده و در نتیجه رشد زایشی بهتر و بیشتری خواهد داشت که این مورد در تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر دیده شد. بیشترین عملکرد ذرت در تیمار 75P و با مقدار ۴۹/۶۵ تن در هکتار و بعد از آن در تیمار 50P با مقدار ۴۷/۰۴ تن در هکتار به ثبت رسید. میزان عملکرد در دو تیمار 75P و 50P نسبت به تیمار شاهد، به ترتیب به مقدار ۳۶ و ۲۹ درصد افزایش داشته است. نتایج این بخش نیز با نتایج علیزاده و همکاران، جی و همکاران و بله‌اج و همکاران مطابقت دارد (Alizadeh et al., 2001; Ji et al., 2018; Belhaj et al., 2016).

که عامل آلودگی بر عملکرد گیاه تأثیری نداشته است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط برابر، نوع سیستم آبیاری بر روی عملکرد گیاه به شدت تأثیرگذار است. از جدول (۳) می‌توان دریافت که با تغییر سیستم آبیاری از زیرزمینی با عمق ثابت به سیستم آبیاری سطحی، تقریباً ۱۱ تن در هکتار عملکرد محصول کاهش یافته است. دلیل این امر این است که طبق قانون ۴۰-۳۰-۲۰-۱۰، هر گیاه هفتاد درصد آب مورد نیاز خود را از لایه‌های فوقانی دریافت می‌کند. با توجه به اینکه جریان‌ات سطحی در تیمارهای آبیاری سطحی مشاهده شد، سپس آب در لایه‌های زیرین خاک نفوذ کرد و مانند تیمارهای آبیاری زیرزمینی همیشه آب در دسترس گیاه نبود؛ می‌توان نتیجه گرفت که گیاه در تیمارهای سطحی دچار کمبود آب زیاد نسبت به تیمارهای زیرزمینی شده و در نهایت از عملکرد آن کاسته شده است. همانند اثر مدیریت آبیاری بر وزن تر گیاه، اثر مدیریت آبیاری بر عملکرد گیاه ذرت به گونه‌ای است که آبیاری زیرزمینی تأثیر بیشتری در افزایش عملکرد داشته و اختلاف معنی‌دار آن با آبیاری سطحی نیز گزارش شده است (خسروی و همکاران، ۱۳۹۸؛ کرمی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Ahmad et al., 2019).

همچنین با مقایسه شکل (۶) و شکل (۵) (اثر مدیریت آبیاری بر وزن تر) می‌توان دریافت که، عملکرد تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر (75C و 75P) از تیمار زیرزمینی با عمق ۵۰ سانتی‌متر بیشتر شده است. در صورتی که در شکل مربوط به وزن تر گیاه، تیمار



شکل ۶- اثر مدیریت آبیاری بر عملکرد گیاه ذرت و مقایسه میانگین به روش دانکن

میزان جذب سرب در خاک

استانداردی که سازمان جهانی بهداشت برای خاک‌های آلوده به فلزات سنگین توصیه کرده است، در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۴)، خاکی که به میزان ۳۶ میلی‌گرم در کیلوگرم و یا کم‌تر، دارای فلز سرب باشد، در دسته خاک‌های با آلودگی کم قرار

می‌گیرد. در صورتی که فلز سرب یافت شده در خاک لایسیمیترهای این تحقیق، از یک‌دهم این میزان نیز کم‌تر بود؛ در نتیجه می‌توان انتظار داشت که بدون نگرانی و ایجاد مشکل آلودگی برای خاک، بتوان چند سال متوالی از آب آلوده به فلزات سنگین با این غلظت، برای آبیاری زیرزمینی استفاده کرد.

جدول ۴- استاندارد سازمان جهانی بهداشت برای طبقه‌بندی خاک‌ها از نظر آلودگی (WHO, 2019)

نوع فلز سنگین	واحد	آلودگی کم	آلودگی متوسط	آلودگی شدید
آهن	میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۲۰۰۰	۵۰۰۰	-
نیکل	میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۲۳	۳۶	۴۹
مس	میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۳۵	-	-
روی	میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۱۲۰	۲۹۰	۴۶۰
سرب	میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۳۶	۸۳	۱۳۰

(۱۳۹۲) و نصر آزادانی و هودجی (۱۳۹۳) در تطابق است.

حرکت سرب در خاک

میزان فلز سرب موجود در لایه‌های مختلف خاک پس از اتمام دوره کشت و برداشت محصول، در جدول (۵) آمده است. قابل مشاهده است که میزان سرب جذب‌شده در تیمار آبیاری سطحی فقط مربوط به لایه‌های سطحی خاک (۲۰-۰ سانتی‌متر) بوده و در تیمارهای آبیاری زیرزمینی در لایه‌های زیرین (۸۵-۶۵ سانتی‌متر)، مقادیری از سرب مشاهده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود (جدول ۵)، حرکت فلز سرب در جریان رو به پایین در تیمار SP (آبیاری سطحی)، ۳۰ سانتی‌متر از طول مسیر خاک بوده است و هر مقدار که فلز سرب با آب آلوده در تیمارهای سطحی وارد خاک شده است (حدوداً ۴/۵۲ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، تقریباً به همان میزان در خاک تثبیت شده است. بنابراین حدود ۶۵ درصد فلز سرب در لایه ۱۰ سانتی‌متری ابتدایی خاک تثبیت شده و ۲۵ درصد در لایه ۱۰ سانتی‌متری دوم خاک در تیمار سطحی، نفوذ کرده است. میزان این فلز در لایه بعدی خاک، ناچیز بود. ۱۰ درصد باقیمانده از سرب تزریق‌شده در آبیاری سطحی، به صورت تلفات تبخیری بود.

در مورد حرکت فلز سرب در جریان رو به بالای تیمار 50P (آبیاری زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر)، ۲/۵۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم از سرب در همان محدوده‌ای بوده که تزریق شده و فقط ۰/۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم آن به ۱۰ سانتی‌متر لایه بالایی صعود کرده است. به عبارتی دیگر، ۶۰ درصد از کل مقدار سربی که وارد خاک شده است (۴۰ درصد از ۴/۵۲ ppm به دلیل قلیابیت درون مخزن ته‌نشین شد)، از این میزان ۹۱ درصد در عمق ۶۵-۵۵ سانتی‌متری خاک تثبیت شده و فقط ۹ درصد آن به لایه بالایی صعود کرده است. نکته قابل توجه اینکه همین مقدار فلز سرب تثبیت شده و صعود کرده، خارج از دسترس گیاه بوده و بنابراین مشکلی در جذب آب و تأثیر بر عملکرد ذرت به وجود نیامده است. سرب از جمله کم‌تحرک‌ترین فلزات سنگین در خاک است و بنابراین عدم تحرک آن در لایه‌های خاک نیز قابل توجیه است. قابلیت استفاده از این عنصر، با افزایش pH خاک کاهش می‌یابد (Abedinzadeh et al., 2019; Alghobar & Suresha, 2015). نتایج این بخش در مورد حرکت ناچیز و جذب سرب در خاک با مشاهدات کرمی و همکاران (۱۳۹۸)، آتش‌پز و همکاران (۱۳۹۷)، بیگی هرچگانی و بنی‌طالبی

جدول ۵- غلظت فلز سرب موجود در لایه‌های مختلف خاک (mg/kg)

عمق خاک (cm)	تیمار		
	75P	50P	SP
۰-۱۰	۰	۰	۲/۹۴
۱۰-۲۰	۰	۰	۱/۱۳
۲۰-۴۰	۰	۰	۰
۴۰-۵۵	۰	۰/۲۴	۰
۵۵-۶۵	۰	۲/۴۷	۰
۶۵-۷۵	۰/۱۰	۰	۰
۷۵-۸۵	۲/۴۵	۰	۰

حرکت فلز سرب در جریان رو به بالا در تیمار 75P (آبیاری زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر)، برابر با ۱۰ سانتی‌متر از طول مسیر خاک بوده است. البته با توجه به اینکه نمونه‌گیری خاک از وسط لوله ورودی آبیاری زیرسطحی تا ۱۰ سانتی‌متر بالای آن بود و شعاع لوله نیز ۲/۵ سانتی‌متر بود، می‌توان نتیجه گرفت که حرکت این فلز (۹۶ درصد فلز واردشده در خاک)، برابر با ۷/۵ سانتی‌متر بوده و ۴ درصد مابقی، تا لایه ۱۰ سانتی‌متر دوم صعود کرده است. البته این نکته نیز قابل ذکر است که حدود ۴۰ درصد از فلز سرب (۴۰ درصد از ppm ۴/۲۵ کل که می‌توانست وارد خاک شود)، در منبع آب ته‌نشین شده (به علت قلیابیت آب) و حدوداً ۶۰ درصد آن وارد خاک شده است؛ که از این میزان، به مقدار ۹۶ درصد، در ۷/۵ سانتی‌متری بالای لوله آب ورودی، تثبیت گشته است. علت تفاوت حرکت روبه بالای بیشتر در تیمار 50P، به مقدار بیشتر فلز سرب در آن حالت بر می‌گردد. بنابراین ۹ درصد از فلز سرب قابل جذب، به لایه بالایی (۴۰-۵۵ سانتی‌متر) صعود کرده در صورتی که در تیمار 75P این مقدار برابر ۴ درصد از فلز سرب موجود و صعود مویبگی آن به لایه بالایی آن (۶۵-۷۵ سانتی‌متر) بود. دلیل اختلاف میزان حرکت فلز سرب در جریان رو به بالا و جریان رو به پایین، تفاوت در نوع سیستم آبیاری است. در سیستم آبیاری سطحی پس از گذشت از یک دور آبیاری، خاک داخل لایسیمتر رطوبت خود را از دست داده و منجر به ایجاد درز و شکاف در خاک می‌شود. در نتیجه با اضافه کردن آب به خاک، آب از طریق

بیان کردند که حرکت فلزات سنگین در جریان رو به بالا بسیار کم‌تر از حرکت فلزات در جریان رو به پائین می‌باشد. همچنین موگویی (۱۳۹۵) در تحقیق انجام شده بیان کرد که حرکت فلز سرب در خاک بسیار کم بوده و در همان چند سانتی‌متر اول مسیر خاک، فلز سرب رسوب کرد.

بیان سرب در خاک

میزان فلز سرب تزریق شده به آب تیمارهای آلوده، وارد شده به خاک لایسیمترها و جذب شده توسط گیاه، به شرح جدول (۶) می‌باشد. همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، در تیمار آبیاری سطحی آلوده (SP) حدود ۹۲ درصد فلز ورودی از طریق آب آبیاری، جذب خاک و گیاه شده است. دلیل این که طبق جدول فوق، ۱۰۰ درصد فلز سرب ورودی به لایسیمتر، جذب خاک و گیاه نشده است، می‌تواند مربوط به توزیع غیریکنواخت آلاینده فلز سرب در خاک به دلیل ناهمگنی خاک باشد. به طوری که نمونه خاک تهیه شده از لایسیمتر، میانگینی از توزیع آلاینده نباشد. دلیل دیگر می‌تواند به خاطر خطای اندازه‌گیری باشد؛ چرا که حساسیت دستگاه در طول آزمایش یکسان و یکنواخت نیست. همچنین فلز سرب می‌تواند در سطل مدرجی که با آن تیمارهای سطحی آبیاری می‌شدند، ته نشین شده باشد. البته که دیگر محققین نیز افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک و بعضاً گیاه که در آبیاری معمول و آب آلوده انجام شدند را تایید کردند که کم‌تر از حد سازمانی بهداشت جهانی بود که با نتیجه پژوهش حاضر همخوانی دارد (یزدانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Salakinkop and Hunshal, 2014).

این درز و شکافها به راحتی به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کند اما در سیستم آبیاری زیرزمینی، به علت این که آب همیشه در خاک موجود بوده و به دلیل صعود کاپیلاری پروفیل خاک همواره مرطوب می‌باشد، درز و شکافی در پروفیل خاک ایجاد نشده و در نتیجه حرکت فلز سرب در جریان رو به بالا، کاهش یافته است. این موضوع در مورد هر دو تیمار آبیاری زیرزمینی (50P و 75P)، صدق کرده است (Ahmed and Slima, 2018; Moretti et al., 2019).

نتایج فوق‌الذکر در مورد حرکت فلزات در خاک، با تحقیقاتی که پورسعیدی (۱۳۸۶) و موگویی (۱۳۹۵) انجام دادند، مطابقت کامل دارد. نتایج فوق‌الذکر در مورد حرکت فلزات در خاک، با تحقیقاتی که پورسعیدی (۱۳۸۶) و موگویی (۱۳۹۵) انجام دادند، مطابقت کامل دارد. پورسعیدی در تحقیق انجام شده اظهار داشت که حرکت فلزات درون خاک بسیار کم بوده و در نتیجه می‌توان از آب آلوده به فلزات سنگین برای آبیاری زیرزمینی استفاده کرد. تفاوت نتایج این تحقیق با تحقیق ایشان، این است که گیاهان تیمار آبیاری سطحی آلوده تحقیق حاضر، فلز سرب را جذب کرده ولی در آزمایشی که پورسعیدی در سال ۱۳۸۶ انجام داد، بیان کرد که حتی گیاهان تیمارهای آبیاری سطحی نیز فلز سرب را جذب نکردند. دلیل این امر این است که گیاه کشت شده در آزمایش مذکور کلزا بوده و گیاه کشت شده در تحقیق حاضر، ذرت می‌باشد. دلیل این تفاوت می‌تواند به علت تفاوت در مصرف آب دو گیاه و یا تفاوت در مشخصات گیاه‌شناسی و فیزیولوژیک آن‌ها باشد. ذرت گیاهی است که به دلیل کشت تابستانه و نیاز آبی بالا، آب زیادی مصرف می‌کند ولی کلزا به دلیل کشت پائیزه و نیاز آبی کمتر، نیاز کم‌تری به آبیاری دارد و این می‌تواند دلیل جذب سرب در گیاه ذرت باشد. چراکه مقدار سرب بیشتری همراه با آبیاری وارد خاک و در محیط ریشه انباشته شده است. همچنین ایشان

جدول ۶- بیان فلز سرب در آب، خاک و گیاه

تیمار	فلز ورودی به لایسیمتر از طریق آب آبیاری (mg)	فلز جذب شده در خاک لایسیمتر (mg)	میزان فلز جذب شده توسط گیاه (mg)	جمع فلز جذب شده در خاک و گیاه (mg)
SP	۱۴۹	۱۳۳/۹	۲/۲۵	۱۳۶/۱
50P	۱۴۹	۸۹/۲	.	۸۹/۲
75P	۱۴۰/۱	۸۳/۹	.	۸۳/۹

کمی دارند. در سیستم آبیاری زیرزمینی به دلیل حرکت جزئی آب در خاک، زمان زیادی آب در مخزن باقی می‌ماند تا به داخل خاک نفوذ کند. این امر باعث شده تا رسوب فلز سرب در مخزن آب تیمارهای آب زیرزمینی بیشتر باشد اما در آبیاری سطحی، زمان ماند آب آلوده در مخزن آب بسیار کمتر بوده و به عبارتی بلافاصله به داخل سیستم ریخته می‌شود. در تحقیقی که موگویی (۱۳۹۵) انجام داد، بیان کرد که غلظت فلز سرب درون منبع آب، از مقدار ۶ تا ۱۸/۳ میلی‌گرم در لیتر،

با مشاهده جدول (۶) مشخص است، به طور میانگین، حدوداً ۶۰ درصد فلز سرب ورودی به تیمارهای آب زیرزمینی (50P و 75P)، جذب خاک لایسیمترها شده است. پس با توجه به بیان فلز سرب می‌توان انتظار داشت که احتمالاً ۴۰ درصد کل فلز سرب تزریقی به منبع آب آبیاری تیمارهای زیرزمینی، درون منبع آب رسوب کرده باشد. دلیل این امر این است که pH آب آبیاری ۷/۷ بود و فلزات سنگین بخصوص فلز سرب، در محیط قلبایی رسوب کرده و حرکت

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف استفاده مطمئن از آب آلوده به فلز سنگین سرب با آبیاری سطحی و زیرزمینی و اثر آن بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت انجام شد. نتایج نشان داد که قابلیت استفاده از آب‌های آلوده به فلزات سنگین به صورت مدیریت شده، در آبیاری زیرزمینی وجود دارد. در مورد حرکت سرب در خاک در جریان رو به پایین تیمار آبیاری سطحی با فلز سرب، حدوداً ۶۵ درصد فلز سرب در لایه ۱۰ سانتی متری ابتدایی خاک تثبیت شده و ۲۵ درصد در لایه ۱۰ سانتی متری دوم خاک، نفوذ کرد. ۱۰ درصد باقیمانده از سرب تزریق شده در آبیاری سطحی، احتمالاً به صورت تلفات تبخیری بود. در مورد حرکت فلز سرب در جریان رو به بالای تیمار آبیاری زیرزمینی در عمق ۵۰ سانتی متر، مقدار ۹۱ درصد سرب وارد شده به خاک در عمق ۶۵-۵۵ سانتی متری خاک تثبیت شده و فقط ۹ درصد آن به لایه ۱۰ سانتی متری بالایی صعود کرده بود. در مورد تیمار آبیاری زیرزمینی در عمق ۷۵ سانتی متر نیز همین روند تکرار شد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اگر یک منبع تصفیه کوچک و پر از خاک وجود داشته باشد (به‌طور مثال، منبع میانی مورد استفاده در این تحقیق که درون آن شناور قرار داشت تا سطح آب را درون لایسیمتر کنترل کند)، از یک خاک قلیایی با حداقل pH بیشتر از ۷/۵ پر شود و علاوه بر تنظیم سطح آب درون لایسیمتر، نقش فیلتراسیون آب درون منبع اصلی را نیز ایفا کند، با مقدار بسیار کم خاک (خاک درون منبع تصفیه) انتظار می‌رود که بتوان فاضلاب آلوده به فلزات سنگین را به‌طور کامل تصفیه کرد، بدون آنکه کم‌ترین مقداری از فلزات سنگین وارد خاک لایسیمتر شود. همچنین در این صورت، به دلیل حجم کم خاک فیلتراسیون، به راحتی می‌توان با استفاده از اسید ضعیف آن را از فلزات جذب شده پاکسازی کرد. در مورد تأثیر فلزات سنگین و نوع روش آبیاری باید گفت که عملکرد گیاه ذرت در تیمارهای آبیاری زیرزمینی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند اما عملکرد محصول در تیمارهای آبیاری سطحی نسبت به تیمارهای زیرزمینی، کاهش یافت.

منابع

آتش‌پز، ب.، رضایپور، س. و قائمیان، ن. ۱۳۹۷. اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده بر غلظت، توزیع و آلودگی بعضی عناصر سنگین خاک. آب و خاک. ۳۲ (۳): ۵۸۵-۵۷۳.

ارفعی‌نیا، ح.، رنجبر وکیل‌آبادی، د.، سیفی، م.، اسدگل، ز. و هاشمی، س.ع. ۱۳۹۵. بررسی غلظت و ارزیابی خطر (Risk Assessment) فلزات سنگین ناشی از مصرف محصولات کشاورزی در مزارع مختلف شهرستان دیر، بوشهر. طب جنوب. ۱۹ (۵): ۸۵۴-۸۳۹.

متغیر بود و دلیل آن را قلیایی بودن آب درون منبع دانستن و بیان کردند که فلز سرب در pH بالای ۷، مقداری رسوب خواهد کرد. دیگر محققین نیز حرکت بیشتر فلز سرب در لایه‌های سطحی خاک و جذب کمتر آن در آبیاری زیرزمینی را تایید کردند. در واقع این یافته نشان می‌دهد که آبیاری با فاضلاب آلوده به فلزات سنگین با آبیاری زیرزمینی نتوانسته غلظت سرب خاک را افزایش دهد معنی‌داری دهد که با مطالعات دیگر پژوهشگران در این زمینه هم سو است (Liu et al., 2020; Jyothi & Farook, 2020; Belhaj et al., 2015; Alghobar and Suresha, 2015).

جذب سرب توسط گیاه

از گیاهان هر شش لایسیمتر مربوط به دو تیمار آبیاری زیرزمینی آلوده، نمونه‌گیری انجام شد. همچنین از دو تیمار شاهد آبیاری زیرزمینی نیز دو نمونه تهیه شد تا بتوان نمونه‌های تیمارهای آلوده را مورد بررسی قرار داد و با تیمارهای شاهد مقایسه کرد. همچنین سه نمونه از گیاهان سه لایسیمتر مربوط به تیمار آبیاری سطحی آلوده و یک نمونه از گیاه تیمار آبیاری سطحی با آب معمولی تهیه شد. در هر دو تیمار آبیاری زیرزمینی با آب آلوده و تمامی تکرارهای آن‌ها، میزان سرب جذب شده توسط گیاه برابر با صفر بود و فلز سرب وارد اندام هوایی گیاه ذرت نشد اما گیاه ذرت، در تیمار آبیاری سطحی با آب آلوده، به‌طور میانگین (میانگین سه تکرار)، به میزان ۲/۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک ذرت، سرب را به اندام هوایی خود جذب کرد. بر اساس نتیجه تحقیقات، سرب فلزی است که به وسیله ریشه گیاه جذب شده، به بخش‌های بیرونی ریشه، آپوپلاست و دیواره سلولی متصل شده و بنابراین کمتر در اختیار اندام هوایی گیاه قرار می‌گیرد که در پژوهش حاضر نیز چنین نتیجه‌ای به دست آمد و سرب به مقدار بسیار کم جذب گیاه شد (Agarwal, 2009). همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقادیر سرب جذب شده در خاک، طبق جدول توصیه شده توسط سازمان جهانی بهداشت (جدول ۴)، کمتر از ۳۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بوده است و این میزان از آلودگی در گروه آلودگی کم و ناچیز قرار می‌گیرد و طبیعی است که اثر عامل آلودگی بر صفات اندازه‌گیری شده گیاه ذرت، در تحلیل‌های آماری معنی‌دار نشده است. هرچند که برخی نتایج عکس این موضوع است؛ زیرا برخی پژوهشگران درباره تأثیر آبیاری با آب‌های آلوده یافتند که موجب صدمه به خاک و تجمع برخی فلزات سنگین در خاک‌های منطقه تیانجین چین (Meng et al., 2016) و خاک‌های زیرکشت محصولات گلخانه‌ای در تونس (Belhaj et al., 2016) شده که این موضوع، لزوم بررسی آبیاری با آب آلوده به فلزات سنگین در هر منطقه خاص و استفاده از سامانه‌های مختلف آبیاری را نشان می‌دهد.

- 21, e00305.
- Agarwal, S.K. 2009. Heavy metal pollution (Vol. 4). APH publishing.
- Ahmad, K., Wajid, K., Khan, Z.I., Ugulu, I., Memoona, H., Sana, M. ...and Sher, M. 2019. Evaluation of potential toxic metals accumulation in wheat irrigated with wastewater. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 102 (6): 822-828.
- Ahmed, D.A. and Slima, D.F. 2018. Heavy metal accumulation by *Corchorus olitorius* L. irrigated with wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*. 25 (15): 14996-15005.
- Alghobar, M.A. and Suresha, S. 2015. Evaluation of nutrients and trace metals and their enrichment factors in soil and sugarcane crop irrigated with wastewater. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 3 (08): 46.
- Alizadeh, A., Bazari, M.E., Velayati, S., Hasheminia, M. and Yaghmai, A. 2001. Using reclaimed municipal wastewater for irrigation of corn. In *ICID International Workshop on Wastewater Reuse Management*, Korea.
- Belhaj, D., Jerbi, B., Medhioub, M., Zhou, J., Kallel, M. and Ayadi, H. 2016. Impact of treated urban wastewater for reuse in agriculture on crop response and soil ecotoxicity. *Environmental Science and Pollution Research*. 23 (16): 15877-15887.
- Fang, Q., Zhang, X., Shao, L., Chen, S. and Sun, H. 2018. Assessing the performance of different irrigation systems on winter wheat under limited water supply. *Agricultural water management*. 196: 133-143.
- FAO. 1992. *Wastewater Treatment and Use in Agriculture*. Irrigation and Drainage Paper, No 47, FAO, Rome, Italy.
- Hakimi, L., Sadeghi, S.M.M., Van Stan, J.T., Pypker, T.G. and Khosropour, E. 2018. Management of pomegranate (*Punica granatum*) orchards alters the supply and pathway of rain water reaching soils in an arid agricultural landscape. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 259: 77-85.
- Hassanli, A.M., Ebrahimzadeh, M.A. and Beecham, S. 2009. The effects of irrigation methods with effluent and irrigation scheduling on water use efficiency and corn yields in an arid region. *Agricultural Water Management*. 96 (1): 93-99.
- Hirich, A., Allah, R.C., Jacobsen, S.E., El Youssfi, L. and El Homaria, H. 2012. Using deficit irrigation with treated wastewater in the production of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in Morocco. *Revista Científica UDO Agrícola*. 12 (3): 570-583.
- Ji, Y., Wu, P., Zhang, J., Zhang, J., Zhou, Y., Peng, Y. ... and Gao, G. 2018. Heavy metal accumulation, risk assessment and integrated biomarker responses of local vegetables: a case study along the Le'an River. *Chemosphere*. 199: 361-371.
- Jyothi, N.R. and Farook, N.A.M. 2020. Heavy Metal ایزدپناه، م. و صرافزاده، م. ح. ۱۳۹۹. بررسی پتانسیل استفاده مجدد از پساب استخرهای شنا برای آبیاری فضای سبز، مطالعه موردی شهر تهران. آب و فاضلاب. ۳۱ (۱): ۹۹-۱۱۰.
- بیگی هرچگانی، ح. و بنی طالبی، گ. ۱۳۹۲. اثر بیستوسه سال آبیاری سطحی با پساب شهری بر انباشت بعضی فلزات سنگین در خاک، انتقال به دانه‌های گندم و ذرت و خطرات بهداشتی مرتبط. آب و خاک. ۲۷ (۳): ۵۷۰-۵۸۰.
- پورسعیدی، م. ۱۳۸۶. استفاده مطمئن از آب آلوده به فلزات سنگین برای آبیاری کلزا به روش آبیاری زیرزمینی در اقلیم کرج. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- پورغلام آمیجی، م.، لیاقت، ع.، نازی قمشلو، آ. و خوشروش، م. ۱۳۹۷. اثر آب زیرزمینی کم عمق و شور بر روی رشد و زیست-توده برنج. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۲ (۴): ۴۹۹-۵۱۶.
- حاتمیان، ل.، رفعتی، م. و فرساد، ف. ۱۳۹۸. اثر آبیاری با فاضلاب بر انباشت فلزات سرب و کادمیوم در خاک و دانه‌های گندم و جو. مدیریت آب و آبیاری. ۹ (۲): ۳۳۲-۳۳۱.
- خسروی، ی.، زمانی، ع.، پری زنگنه، ع. و نوری، ف. ۱۳۹۸. مطالعه تأثیر آبیاری با فاضلاب‌های شهری بر غلظت فلزهای سنگین در خاک‌های سطحی جنوب شهر هرسین، کرمانشاه. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳ (۶): ۱۵۵۰-۱۵۶۴.
- کریمی، ع.، هاشمی گرم‌دره، س. ا.، قربانی جاوید، م. و وراوی پور، م. ۱۳۹۸. تأثیر سطوح مختلف آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت در منطقه پاکدشت. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰ (۹): ۲۱۹۲-۲۱۸۳.
- معاونت تحقیقاتی سازمان حفاظت محیط‌زیست. ۱۳۷۱. استاندارد خروجی فاضلاب‌ها. انتشارات دفتر آموزش زیست‌محیطی.
- موگویی، م. ۱۳۹۵. مدیریت ذخیره-بازیافت در سفره‌های آب زیرزمینی بر اساس ارزیابی کیفیت آب. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- نصر آزادانی، آ. و هودجی، م. ۱۳۹۳. ارزیابی تأثیر یک نمونه پساب صنعتی بر آلودگی خاک با فلزات سنگین. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست. ۱۶ (۱): ۳۷۹-۳۸۹.
- یزدانی، ع.، صفاری، م. و رنجبر، غ. ۱۳۹۶. اثر آبیاری با فاضلاب شهری تصفیه‌شده بر عملکرد دانه و تجمع فلزات سنگین در دانه ژنوتیپ‌های جو. علوم زراعی ایران. ۱۹ (۴): ۲۸۴-۲۹۶.
- Abedinzadeh, M., Etesami, H. and Alikhani, H.A. 2019. Characterization of rhizosphere and endophytic bacteria from roots of maize (*Zea mays* L.) plant irrigated with wastewater with biotechnological potential in agriculture. *Biotechnology Reports*.

- 1521.
- Pütz, T., Fank, J. and Flury, M. 2018. Lysimeters in vadose zone research. *Vadose Zone Journal*. 17 (1).
- Salakinkop, S.R. and Hunshal, C.S. 2014. Domestic sewage irrigation on dynamics of nutrients and heavy metals in soil and wheat (*Triticum aestivum* L.) production. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 3 (3): 1-11.
- Walsh, A. 1989. The application of atomic absorption spectra to chemical analysis. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy*. 45: 221-230.
- Wei, Z., Paredes, P., Liu, Y., Chi, W.W. and Pereira, L. S. 2015. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. *Agricultural water management*. 147: 43-53.
- World Health Organization. 2006. Guidelines for the Safe Use of Waste water Excreta and Grey water, Volume 2: Wastewater Use in Agriculture. World Health Organization, Geneva.
- World Health Organization. 2019. Chemical Safety, Activity Report 2018.
- Toxicity in Public Health. In *Heavy Metal Toxicity in Public Health*. IntechOpen.
- Liu, J., Xue, J., Yuan, D., Wei, X. and Su, H. 2020. Surfactant Washing to Remove Heavy Metal Pollution in Soil: A Review. *Recent Innovations in Chemical Engineering (Formerly Recent Patents on Chemical Engineering)*. 13 (1): 3-16.
- Ma, X., Sanguinet, K.A. and Jacoby, P.W. 2020. Direct root-zone irrigation outperforms surface drip irrigation for grape yield and crop water use efficiency while restricting root growth. *Agricultural Water Management*. 231: 105993.
- Meng, W., Wang, Z., Hu, B., Wang, Z., Li, H. and Goodman, R.C. 2016. Heavy metals in soil and plants after long-term sewage irrigation at Tianjin China: A case study assessment. *Agricultural water management*. 171: 153-161.
- Moretti, M., Van Passel, S., Camposeo, S., Pedrero, F., Dogot, T., Lebailly, P. and Vivaldi, G. A. 2019. Modelling environmental impacts of treated municipal wastewater reuse for tree crops irrigation in the Mediterranean coastal region. *Science of the Total Environment*. 660: 1513-

Effect of Using Lead-Contaminated Water by Surface Irrigation and Subirrigation on Silage Maize Yield and Uptake

A. Liaghat¹, M. R. Oveysi², H. Ebrahimian^{3*}, M. Pourgholam-Amiji⁴, M. Saleh⁵

Received: Jun.07, 2020

Accepted: Agu.12, 2020

Abstract

The aim of this study was to investigate the possibility of using lead contaminated water in surface irrigation and subirrigation and its effect on silage maize yield. In this regard, lysimeter experiments were conducted in the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran in 2017 in the form of factorial experiment in a completely randomized design with six treatments in three replications and a total of 18 experimental plots. Treatments included: Surface irrigation with lead-contaminated water (SP), Surface irrigation with fresh water as control treatment (SC), Subirrigation with lead-contaminated water and water table depth of 50 cm (50P), Subirrigation with fresh water and water table depth of 50 cm (50C), Subirrigation with lead-contaminated water and water table depth of 75 cm (75P), and finally, Subirrigation with fresh water and water table depth of 75 cm (75C). The results showed that the effect of irrigation management on plant height, plant dry weight and maize silage yield at 1% probability level, wet plant weight and maize wet weight at 5% level was significant and it had no effect on maize dry weight. Also, pollution had no effect on growth and yield and components of maize yield. The results also showed there was a 2.25 mg of lead per one kg of maize dry matter in the SP treatment, which this amount is in the group of low pollution according to the World Health Organization (WHO), No lead was observed in the plant samples of the 50P and 75P treatments. On the other hand, the highest maize yield was recorded in the 75P treatment with 49.65 t/ha and then in the 50P treatment with 47.04 t/ha. Crop yield increased by 36% and 29% in the 75P and 50P treatments compared to the control treatment, respectively. It is noteworthy that the amount of lead metal stabilized and rised in the subirrigation treatment was out of reach of the plant and there was no problem in terms of pollution and maize yield.

Keywords: Heavy metals, Soil pollution, Subirrigation, Water table

1 and 3- Respectively Professor and Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2 and 5- M.Sc. Graduate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(*-Corresponding Author Email: ebrahimian@ut.ac.ir)

مقاله علمی-پژوهشی

برآورد رواناب با استفاده از طرحواره‌های SIMTOP و BATS و تبخیر - تعرق واقعی با استفاده از طرحواره پوشش گیاهی پویا در مدل سطح خشکی Noah-MP در حوضه نیشابور

سمیرا میرشفیعی^۱، حسین انصاری^{۲*}، کامران داوری^۳، علی نقی ضیایی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۳

چکیده

برنامه‌ریزی منابع آب سطحی نیاز به برآورد مؤلفه‌های بیلان آب در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف دارد. از طرفی با توجه به عدم کفایت ایستگاه‌های مشاهداتی به لحاظ تعداد، پراکندگی و ثبت داده زمانی، مدل‌سازی عددی وضعیت سطح زمین ضروری است. در این تحقیق مدل Noah-MP با هدف مقایسه دو طرحواره SIMTOP و BATS در برآورد رواناب و همچنین ارزیابی طرحواره پوشش گیاهی پویا برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی حوضه آبریز نیشابور در گام زمانی ماهانه در سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۰۰ به کار گرفته شده است. به دلیل دقت کم و پراکندگی ایستگاه‌های هیدرومتری، از خروجی مدل SWAT برای ارزیابی استفاده شد. به منظور توسعه مدل ابتدا تحلیل حساسیت رواناب خروجی مدل نسبت به پارامترهای مدل انجام شد که بیشترین و کمترین حساسیت را به ترتیب به پارامتر خاک در رابطه کلب هورن برگر (b) و ضریب محو رواناب (f) داشت. بهترین مقدار معیارهای ارزیابی کارایی مدل شامل R^2 ، NSE و RMSE برای رواناب شبیه‌سازی شده توسط طرحواره BATS به ترتیب متعلق به مناطق کوهستانی با مقدار ۰/۸۱، ۰/۶۴ و ۱/۹۱، سپس مناطق دشت و کمترین آن‌ها برای رواناب شبیه‌سازی شده مناطق کوهپایه بود. بر اساس نتایج این تحقیق، مدل BATS در مناطق دشت و کوهپایه نتایج بهتر و مدل SIMTOP در مناطق کوهستانی نتایج تقریباً مشابه با نتایج BATS داشت. طرحواره پوشش گیاهی پویا توانسته است همگام با مراحل رشد گیاه تغییرات تبخیر-تعرق را شبیه‌سازی کند. مدل Noah-MP مقدار میانگین سالانه تبخیر-تعرق را ۳۰۵ میلی‌متر برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: حوضه نیشابور، طرحواره BATS، طرحواره پوشش گیاهی پویا، طرحواره SIMTOP، مدل Noah-MP

مقدمه

خالی روشی که بتواند آن را با دقت خوب و در مقیاس منطقه‌ای محاسبه کند به چشم می‌خورد. با توجه به اینکه مدل‌های هیدرولوژیکی موجود غالباً در سطح حوضه و با وجود داده‌های ورودی زیاد برای واحدهای کوچک هیدرولوژیکی، قادر به برآورد بیلان هستند، ارزیابی مدلی که بتواند در سطح وسیع، با دقت قابل قبول مؤلفه‌های بیلان آب سطحی را شبیه‌سازی کند، می‌بایست مدنظر قرار بگیرد. یکی از راه‌های تحقق این مسئله شبیه‌سازی مناطق وسیع با مدل‌های سطح خشکی است. مدل‌های سطحی مدل‌های عددی هستند که فرآیندهای سطح زمین را شبیه‌سازی می‌کنند و به‌طور کلی و صرف‌نظر از پیچیدگی آن‌ها، معادلات بیلان آب و انرژی را در سطح زمین حل می‌کنند. اساس این مدل‌ها قانون بقای انرژی و جرم است. عامل تبخیر-تعرق در هر دو بیلان آب و انرژی وجود دارد و این دو بیلان را به هم مرتبط می‌کند و برخلاف مدل‌های هیدرولوژیکی که غالباً اساس تجربی دارند، دارای مبنای فیزیکی

تعیین اجزای بیلان آبی یکی از راهکارهای مؤثر در مدیریت منابع آب با توجه به شرایط کمبود آب است. به‌طور کلی برای محاسبه بیلان آبی در سطح حوضه‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد اما جای

- ۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(*-نویسنده مسئول): (Email: ansary@um.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.2.2

سطحی هم به صورت برخط و هم در حالت جفت شده، در چندین مقاله نشان داده شده است (Fan et al., 2007; Leung et al., 2011). در Noah-MP توده برف به سه لایه تقسیم می شود (Niu et al., 2011). فیزیک توده برف چندلایه ای، می تواند انباشتگی و ذوب برف را بهتر مدل کند بنابراین زمان شروع رواناب را بهتر نشان می دهد. Noah-MP چندین گزینه پارامتره سازی برای فرآیندهای مختلف دارد و می توان هر ترکیبی از این گزینه ها را تشکیل داد و بنابراین به جای استفاده از مدل های متعدد، یک مدل سطحی Noah-MP به تنهایی می تواند برای پیش بینی گروهی به کار رود. قدرت تفکیک مکانی این مدل از $0.1/1$ درجه تا 1 درجه است. در سال های اخیر مدل Noah-MP مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. از جمله اینکه ما و همکاران به شبیه سازی رواناب و تغییرات ذخیره آب زمینی (Ma et al., 2017) و چن و همکاران به بررسی اثر اضافه کردن پارامتره سازی مواد آلی به لایه خاک در مدل Noah-MP (Chen et al., 2016) پرداختند. بارلاچ و همکاران نتایج ترکیب مدل های سطح خشکی Noah و Noah-MP را با چند زیرمدل آب زیرزمینی (Barlage et al., 2015) مقایسه نموده و ژنگ و همکاران جذب آب از ریشه در مدل Noah-MP را مورد بررسی قرار دادند (Zheng et al., 2015). هدف از انجام این مطالعه معرفی، واسنجی و ارزیابی مدلی برای محاسبه بیلان آب در مقیاس بزرگ و با اساس فیزیکی است.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه نیشابور در منتهی الیه شمال شرقی حوزه آبریز کویر مرکزی و در مرکز استان خراسان رضوی قرار دارد که از شمال و شرق و جنوب به ارتفاعات و از غرب به حوضه آبریز دشت سبزوار محدود می شود. این حوضه دارای اقلیم خشک و نیمه خشک است. بلندترین نقطه این محدوده مطالعاتی 3300 متر (ارتفاعات کوه بینالود) و کمترین آن کمتر از 1050 متر از سطح دریا است. با توجه به نیاز این منطقه به برآورد بیلان آب و همچنین دسترسی به نتایج سایر محققان، این حوضه انتخاب شد. برای داده های واداشت، داده های پایگاه GLDAS-1 با دقت 0.25 درجه، که قبلاً داده های بارش آن اصلاح شده بود (میرشفیعی و همکاران، ۱۳۹۷)، به کار گرفته شد. برای داده های اولیه از نقشه اطلاعات پوشش گیاهی (کاربری اراضی) USGS در 24 طبقه به صورت جهانی و با دقت 30 ثانیه و نقشه بافت خاک ترکیبی از دو پایگاه FAO و STATSGO در 16 طبقه با دقت 5 دقیقه استفاده شد و نتایج آن ها با نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز نیشابور و نقشه واحدهای اراضی خاک موجود با دقت $1:100,000$ به روزرسانی شد (مهندسین مشاور سازآب شرق، ۱۳۸۷). مدل Noah-

هستند. مدل های سطحی عددی با گستره متنوعی که از قدرت تفکیک مکانی و زمانی دارند، امکان پژوهش در هر مقیاس را فراهم می کنند. اجرای مدل سطح خشکی به صورت جفت شده با مدل جوی، به دلیل لحاظ تأثیرگذاری هم زمان جو و سطح خشکی بر یکدیگر، باعث مدل سازی دقیق تری می شود که مدل های هیدرولوژیکی این امکان را ندارند. چنانچه مدلی پتانسیل اتصال به پایگاه های جهانی داده گواری و اجرای آنالین و خودکار در مقیاس زمانی مختلف از جمله ساعتی و روزانه را داشته باشد، از اهمیت دوچندان برخوردار خواهد بود. مدل های سطح خشکی دارای تاریخچه طولانی نیستند (Yang, 2004). مدل های سطح خشکی اولیه مثل مدل مخزن یا سطل (BUCKET) خاک های سطح خشکی را مانند سطلی می داند که با بارش پر می شود و با تبخیر خالی می شود (Manabe, 1969). مقدار اضافی بیشتر از ظرفیت یا همان مقدار بحرانی به رواناب تبدیل می شود. در نسل دوم این مدل ها بیش از یک لایه خاک به همراه اثرات گیاهان بر سطح خشکی اضافه شد (Deardorff, 1978). مدل های نسل سوم از روابط پیشرفته تری برای پاسخ روزنه ها به عوامل محیطی بهره می برند و به جای روابط تجربی، از یک مدل بیوشیمیایی برای فتوسنتز (Farquhar et al., 1980) و از مدل های نیمه تجربی برای هدایت روزنه (Ball et al., 1987; Leuning, 1990; Collatz et al., 1991) استفاده می کنند. مدل های نسل بعدی شامل شبیه سازی چرخه کربن بر روی زمین و شبیه سازی پوشش گیاهی پویا است. مدل Noah-MP نسخه ارتقا یافته مدل Noah است (Niu et al., 2011) که در آن نقایص برطرف شده و فرآیندهای سطح خشکی به صورت کامل تری ارائه شده است. بعضی از طرح هایی که به آن اضافه شده است، عبارتند از: ۱- اجزای اصلی شامل یک لایه پوشش گیاهی، سه لایه برف و ۴ لایه خاک ۲- طرحواره درون سلولی: در نظر گرفتن یک کاشی به صورت ترکیبی از خاک بایر و گیاه ۳- روش تکرار بیلان انرژی برای پیش بینی درجه حرارت پوسته تاج گیاهی و سطح خاک یا برف ۴- در نظر گرفتن ساختار سه بعدی تاج پوشش گیاهی ۵- فیزیک برف واقعی تر برای یک لایه نازک برف، گیرافتادگی آب مایع و یخ زدگی مجدد و متراکم شدن توده برف ۶- طرحواره رواناب با اساس طرحواره TOPMODEL ۷- یک سفره آب غیرمحصور برای در نظر گرفتن برهم کنش با خاک ۸- یک خاک یخ زده نفوذپذیرتر ۹- مقاومت روزنه به روش Ball-Berry در فتوسنتز ۱۰- مدل برگ پویا. اگرچه اضافه کردن مدل برگ پویا به دلیل افزایش پارامترها، روابط و عدم قطعیت آن ها عملکرد مدل را کاهش می دهد (Rosero et al., 2009; Jiang et al., 2010)، اما با اضافه شدن این بخش، گیاهان به عنوان حافظه فرآیندها، برای پیش بینی وضع هوای سطح به کار گرفته می شوند (Jiang et al., 2009). مزیت دیگر مدل Noah-MP در نظر گرفتن تغییرات آب زیرزمینی است که ضرورت لحاظ آن در مدل های

رواناب به روش BATS

گزینه چهارم مدل Noah-MP برای محاسبه رواناب طرحواره BATS است (Dickinson et al., 1993). در این طرحواره هنگامی که رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی است رواناب کم و هنگامی که رطوبت خاک در حد اشباع است رواناب به صورت کامل اتفاق می‌افتد. در مدل BATS رواناب به صورت ضربی از آب ورودی است و این ضریب با توجه به درصد رطوبت لایه سطحی و لایه ناحیه ریشه به دست می‌آید. در این طرحواره نسبت رطوبت این دو لایه نسبت به حالت اشباع محاسبه می‌شود و به اندازه آن طی یک رابطه نمایی، آب ورودی تبدیل به رواناب می‌شود. در این روش همانند روش SIMTOP درصد اشباع یک سلول برای رواناب در نظر گرفته می‌شود و رواناب بر روی بخش‌های اشباع اتفاق می‌افتد.

$$R_s = \left(\frac{\rho_w}{\rho_{wsat}}\right)^4 G \quad T_{g1} \geq 0^\circ C \quad (4)$$

$$R_s = \left(\frac{\rho_w}{\rho_{wsat}}\right) G \quad T_{g1} < 0^\circ C \quad (5)$$

$$\rho_w = \rho_{wsat} \frac{(s_1 + s_2)}{2} \quad (6)$$

$$s_1 = S_{rw} / S_{r\omega max} \quad (7)$$

$$s_2 = S_{tw} / S_{t\omega max} \quad (8)$$

که در آن ρ_{wsat} چگالی آب خاک اشباع و ρ_w چگالی آب خاک است. S_{rw} مقدار آب خاک در منطقه توسعه ریشه است و مقدار حداکثری آن $S_{r\omega max}$ است. S_{tw} کل آب در ستون خاک و بیشترین مقدار آن با $S_{t\omega max}$ نشان داده شده است. مقدار G از رابطه (۹) تعریف می‌شود.

$$G = P_r + S_m - F_q \quad (9)$$

G آب خالص روی سطح، P_r مقدار بارش، S_m برف ذوب شده و F_q مقدار تبخیر است. مقدار منفی F_q تشکیل شبنم را نشان می‌دهد. زمانی که G منفی است رواناب وجود ندارد و زمانی که دمای زیر سطح کمتر از نقطه یخزدگی باشد رواناب افزایش می‌یابد. وابستگی رابطه محاسبه رواناب به دما در این طرحواره این اجازه را می‌دهد تا اثر خاک یخزده در تشکیل رواناب در نظر گرفته شود.

تبخیر - تعرق واقعی

در مدل Noah-MP تبخیر کلی شامل تبخیر مستقیم از لایه‌های بالایی خاک، تبخیر از آب گیر افتاده در تاج گیاه و تعرق است. در این مدل ابتدا تبخیر - تعرق پتانسیل با استفاده از روش پنمن مانیتیت و با توجه به شرایط گیاه طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود. شرایط گیاه از طریق ضریب هدایت تعرق گیاه از برگ به تاج گیاه، مشخص می‌شود و در رابطه قرار می‌گیرد. این پارامتر با توجه به شاخص سطح برگ در معرض نور، در معرض سایه، مقاومت لایه مرزی برگ، مقاومت روزنه در برابر نور خورشید و سایه تعیین می‌شود. مقادیر کلیه این پارامترها

MP نسخه ۱/۱ (به اختصار از این به بعد Noah-MP) برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ (معادل ۱۳۷۹ تا پایان ۱۳۸۸) اجرا شد. دو سال اول برای گرم‌سازی و هشت سال دوم برای واسنجی و ارزیابی مدل استفاده شده است.

رواناب به روش SIMTOP

SIMTOP گزینه پیشنهادی مدل Noah-MP برای محاسبه رواناب و یک TOPMODEL ساده شده برای محاسبه رواناب است (Niu et al., 2011) و آن را به دو طریق ساده می‌کند. اول - شاخص توپوگرافی را در قالب توزیع گسسته و با استفاده از یک رابطه نمایی ارائه می‌دهد دوم - رواناب زیرسطحی را با استفاده از حاصل ضرب یک تابع نمایی از عمق سطح آب و یک ضریب به دست می‌آورد. منظور از رواناب سطحی میزان رواناب بر اثر اشباع است. جزء مساحت اشباع شده (F_{sat}) عبارت است از:

$$F_{sat} = (1 - F_{frz}) F_{max} e^{-0.5f(z_T - z'_{bot})} + F_{frz} \quad (1)$$

در رابطه (۱) F_{max} پارامتر درصد حداکثر سطح اشباع یک سلول است. مقدار این پارامتر عبارت از نسبت تعداد پیکسل‌های با شاخص توپوگرافی برابر یا بزرگ‌تر از شاخص میانگین توپوگرافی به تعداد کل پیکسل در یک سلول شبکه است. دقت این شاخص به شدت بستگی به قدرت تفکیک مکانی نقشه رقمی (DEM) ارتفاع دارد. F_{frz} جزء مساحت غیرقابل نفوذ است. فاکتور f (m^{-1}) فاکتور محو رواناب یا میرایی و z_T (m) فاصله تا سطح ایستابی است. بعد از محاسبه درصد اشباع هر سلول، مقدار رواناب سطحی با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌شود. دبی تخلیه آب زیرزمینی (جریان پایه یا رواناب زیرسطحی) با رابطه (۳) پارامتره‌سازی می‌شود.

$$R_s = Q_{wat} ((1 - F_{sat}) F_{sat} + F_{sat}) \quad (2)$$

$$R_{sb} = R_{sb,max} e^{-\Lambda f (z_T - z'_{bot})} \quad (3)$$

مقدار جهانی پارامتر $R_{sb,max}$ ($=5.0 \times 10^{-4} mm/s$) از واسنجی اطلاعات رواناب از طریق آزمون‌های حساسیت به وجود آمده است. Λ برابر با میانگین شاخص توپوگرافی در یک سلول است. میانگین جهانی منتخب Λ در این مدل برابر با ۱۰/۴۶ (مستخرج از اطلاعات HYDRO1K 1km) است. به خاطر برهم‌کنش بین تخلیه آب زیرزمینی و سطح ایستابی، مقدار بزرگ‌تری از Λ سطح آب زیرزمینی را افزایش خواهد داد در نتیجه رطوبت خاک هم افزایش پیدا می‌کند معمولاً شاخص توپوگرافی مستخرج از DEM با تفکیک مکانی زیادتر مثلاً ۲ متر خیلی کوچک‌تر از یک تفکیک مکانی کمتر مثلاً ۱ کیلومتر است (Wolock & McCabe., 2000). برای جبران خطایی که به خاطر مقادیر زیاد و غیرواقعی Λ به وجود می‌آید یک پارامتر اضافی $z'_{bot}=2m$ استفاده شده است که عمق انتهای مدل است.

به‌طور غیرمستقیم از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده شده است. به‌منظور واسنجی دستی در هر بار به صورت گروهی مقادیری به روش نمونه‌گیری روش مربع لاتین برای پارامترهای حساس تعیین و مدل با آن‌ها اجرا و سپس محدوده پارامترهای با مقادیر ارزیابی مطلوب، در نظر گرفته شد. در هر بار این محدوده کوچک‌تر شده و بعد از چند بار تکرار این مراحل، محدوده نهایی پارامترها تعیین شد.

نتایج و بحث

پس از بررسی ۲۸ پارامتر اصلی مدل، پارامترهای حساس مدل به ترتیب با توجه به شکل (۱)، پارامتر خاک در رابطه کلب هورن برگ (-b)، پخشیدگی هیدرولیکی خاک اشباع (-satdw)، پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع ($\text{maxsmc}(\text{m}^3/\text{m}^3)$)، میانگین جهانی ماکزیمم درصد سطح اشباع (-fsatmx)، سطح ویژه برگ ($\text{sla}(\text{m}^3/\text{m}^3)$) و مقدار خلل و فرج ریز (-cmic)، حساس شناسایی شدند. ضریب محو رواناب (f(1/m)) در این نمودار حساسیت زیادی را نشان نمی‌دهد ولی با توجه به نتایج مقالات دیگر (Cai et al., 2014) و امکان حساس بودن این پارامتر در هنگام ترکیب با سایر پارامترها، به‌عنوان آخرین پارامتر حساس انتخاب شد. حدود نهایی پارامترها در واسنجی برای maxsmc در فاصله ۰/۴۱۲۱ تا ۰/۴۸، برای satdw در فاصله 1×10^{-6} تا $1/9 \times 10^{-5}$ ، مقدار پارامتر b در فاصله ۳/۶ تا ۶/۵۵، پارامتر cmic در فاصله ۰/۱۷۵ تا ۰/۹، پارامتر f در فاصله ۲/۹ تا ۴/۹، پارامتر fsatmx در فاصله ۰/۲ تا ۰/۳، پارامتر sla در فاصله ۵۰ تا ۷۵ قرار دارد.

رواناب

با توجه به اهمیت یکنواختی سلول از نظر پوشش گیاهی و بافت خاک و همچنین نقش توپوگرافی در محاسبه رواناب به روش SIMTOP و عدم دسترسی به سلول‌های کوچک‌تر برای این مدل، در نهایت کل حوضه به سه قسمت کوهستانی، کوهپایه و دشت تقسیم‌بندی شد و در هر سه قسمت رواناب به روش SIMTOP و BATS نسبت به رواناب مدل SWAT مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۲) و جدول (۱) نتایج مدل‌سازی ماهانه رواناب را در این سه قسمت نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در هر سه شکل به لحاظ چشمی تطابق خوبی بین رواناب گزارش شده با بارش ورودی در مدل وجود دارد. طبق جدول (۱) بهترین شبیه‌سازی برای هر دو طرحواره مدل Noah-MP متعلق به مناطق کوهستانی و بعد از آن مناطق دشت و کوهپایه است. مناطق کوهستانی در این حوضه به صورت دست‌نخورده هستند و ویژگی‌های سطح خشکی از جمله بافت خاک و کاربری اراضی در آن‌ها دستخوش تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی نشده است. در نتیجه با اینکه مدل SWAT

کاملاً به دوره رشد گیاه وابسته است و با استفاده از طرحواره پوشش گیاهی پویا به دست می‌آید. بنابراین تبخیر - تعرق پتانسیل در مدل Noah-MP با زمان تغییر می‌کند. تبخیر - تعرق واقعی از تاج گیاه با توجه به تبخیر - تعرق پتانسیل و رطوبت موجود محاسبه می‌شود.

$$T_r = F_{veg} * \rho_{air} * C_p * C_{tw} * (E_s(T_v) - E_{ah}) / \gamma \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) T_r تعرق از سطح برگ (mm)، F_{veg} درصد پوشش گیاهی، C_p ظرفیت گرمایی هوای خشک در فشار ثابت j/kg/k،

ρ_{air} چگالی هوا kg/m^3 ، C_{tw} هدایت تعرق از برگ هوای اطراف تاج گیاه (m/s)، $E_s(T_v)$ فشار بخار اشباع در دمای گیاه (pa)، E_{ah} فشار بخار هوای تاج گیاهی (pa)، γ ثابت سایکرومتری (pa/k) است. تبخیر از سطح گیاه مشابه با رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود. برای تبخیر از سطح خاک از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\lambda = C_{ev} * (E_s(T_g) * RH_{sur} - E_a) \quad (11)$$

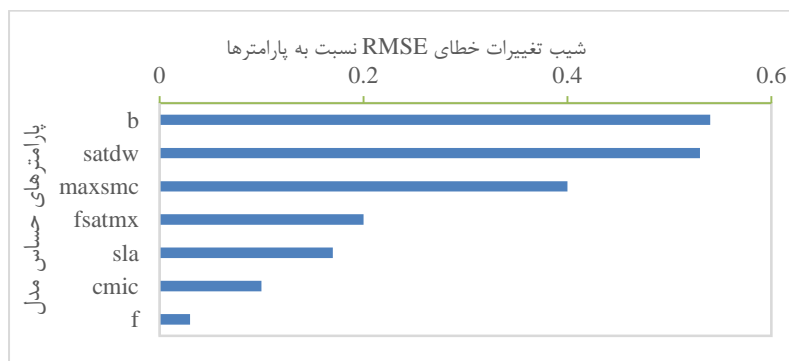
λ شار گرمای نهان تبخیر برحسب (w/m^2) ، C_{ev} ضریب در رابطه فشار بخار - فشار بخار اشباع، $E_s(T_g)$ فشار بخار اشباع در دمای سطح زمین برحسب (pa) ، RH_{sur} رطوبت نسبی هوای سطح خاک یا برف، E_a فشار بخار هوا برحسب (pa) است.

واسنجی و اعتبار سنجی مدل

به‌منظور انجام تحلیل حساسیت رواناب مدل و شناسایی پارامترهای حساس از یک روش دستی و ساده استفاده شد. در این روش پنج نقطه با فاصله یکسان در دامنه هر متغیر انتخاب شدند و مدل در هر نقطه اجرا شد و خطای جذر میانگین مربعات بین مقادیر رواناب مدل‌سازی شده و مقادیر مرجع (مقدار رواناب با مقادیر پیش‌فرض مدل) محاسبه شد. در این روش هر چه میانگین شیب تغییرات خطا نسبت به متغیرها، بیشتر باشد رواناب مدل به آن پارامتر حساس‌تر است. برای واسنجی مدل از ایستگاه‌های هیدرومتری به صورت مستقیم استفاده نشد. تعداد و پراکندگی این ایستگاه‌ها به گونه‌ای بود که بخش بزرگی از سلول‌های مدل، مبنایی برای مقایسه نداشتند و خروجی حوضه که می‌توانست نماینده کل حوضه برای مقایسه باشد به علت برداشته‌های متعدد در اکثر روزهای سال دبی صفر را گزارش می‌کرد که منطبق بر واقعیت نبود همچنین وجود مخازن تغذیه مصنوعی متعدد در نزدیکی ایستگاه‌های هیدرومتری، دبی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌داد، بنابراین در این پژوهش از رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرولوژیکی SWAT برای ارزیابی مدل Noah-MP استفاده شد. مدل SWAT به‌طور هم‌زمان با داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری، عملکرد گندم، برداشت از آبخوان و تراز آب زیرزمینی واسنجی شده و به این ترتیب ضعف موجود در داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری تا حد زیادی برطرف شده است (ایزدی، ۱۳۹۲). با مقایسه نتایج مدل Noah-MP با نتایج مدل SWAT

اصلاح شده است. همچنین روش محاسبه رواناب در دو مدل متفاوت است. در SWAT رواناب سطحی حاصل از بارندگی توسط روش شماره منحنی رواناب CN-SCS (Arnold et al., 1998) و در مدل Noah-MP رواناب با استفاده از دو طرحواره SIMTOP و BATS محاسبه می‌شود. با توجه به مقادیر ارزیابی عملکرد دو طرحواره در جدول (۱) به‌طور کلی تفاوت زیادی بین دو طرحواره دیده نمی‌شود اما مقدار R^2 در طرحواره BATS در مناطق کوهستانی و کوهپایه نسبت به طرحواره SIMTOP بزرگ‌تر و مقدار ضریب نش در هر سه منطقه بیشتر و خطای RMSE در هر سه منطقه کمتر است. به نظر می‌رسد علت این تفاوت در روش محاسبه رواناب است. روش BATS بر اساس رطوبت خاک و روش SIMTOP بر اساس توپوگرافی و فاصله تا سطح ایستابی، رواناب را تعیین می‌کند؛ بنابراین در مناطق کوهستانی که بارش شدیدتر است و فرصت نفوذ کمتر است اهمیت رطوبت خاک در تولید رواناب کمتر می‌شود و نقش توپوگرافی پررنگ‌تر می‌شود؛ بنابراین در این مناطق روش SIMTOP نیز پیش‌بینی خوبی از رواناب را ارائه می‌دهد. در مقابل در مناطق دشت، بارش کمتر است و به علت فرصت نفوذی که وجود دارد رطوبت خاک در تولید رواناب تأثیر بیشتری دارد، از طرفی سطح ایستابی تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرد؛ بنابراین در این مناطق روش BATS که بر مبنای رطوبت خاک بنا شده است، می‌تواند برآورد بهتری داشته باشد.

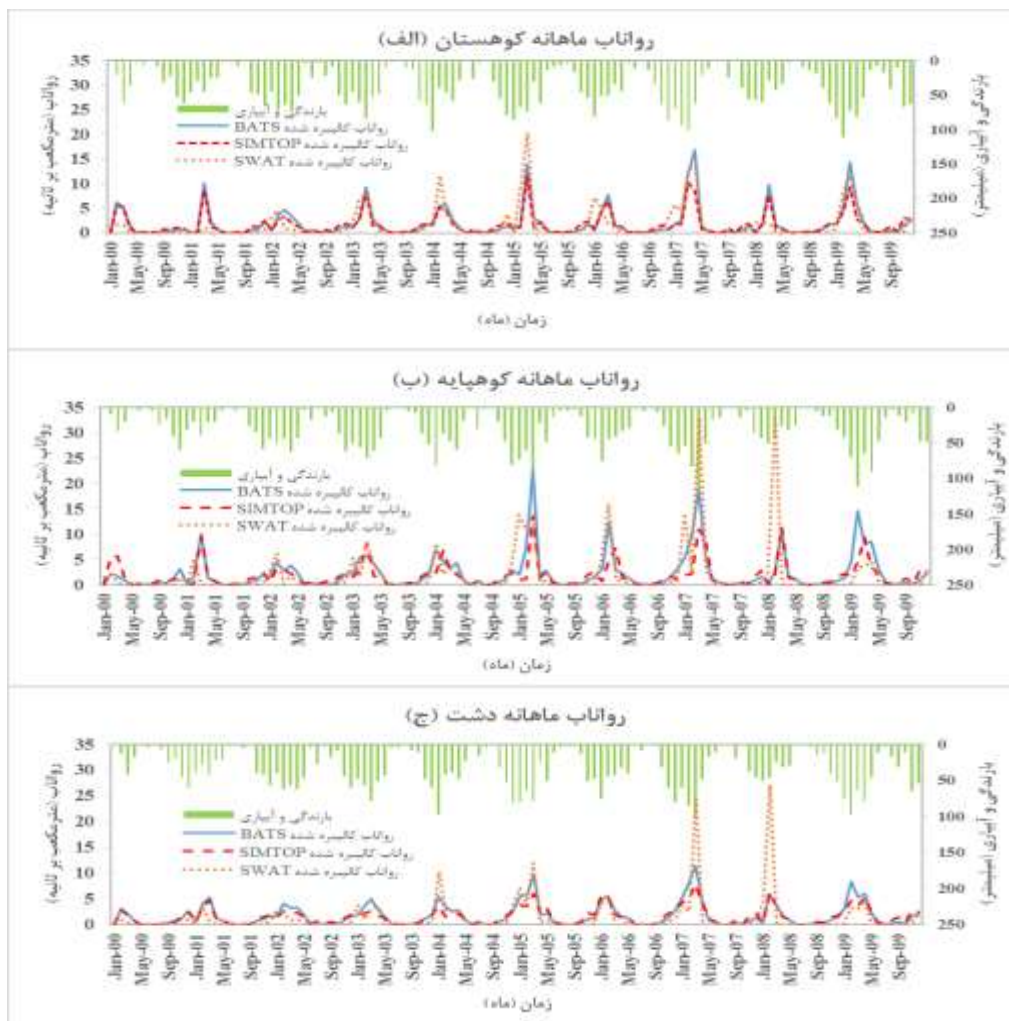
حدودی قابلیت اعمال مدیریت و دخالت انسانی در سطح خشکی را دارد و مدل Noah-MP فاقد آن است، هر دو مدل نتایج مشابهی دارند و ضریب نش ساتکلیف در مناطق کوهستانی از بقیه مناطق بیشتر است. مطابق با شکل (۲-ب) ضعیف‌ترین شبیه‌سازی از لحاظ تشابه به نتایج مدل SWAT مربوط به رواناب در مناطق کوهپایه به علت یکدست نبودن سلول از نظر کاربری اراضی، بافت خاک و شاخص توپوگرافی است. بر اساس نتایج مدل‌سازی در شکل (۲-ج) و جدول (۱) مدل در هر دو طرحواره SIMTOP و BATS در مناطق دشت نتوانسته است رواناب را به‌خوبی مناطق کوهستانی شبیه‌سازی کند که می‌تواند به چند علت باشد. در مناطق دشت فعالیت انسانی شامل کشت دیم، آبی و انجام آبیاری وجود دارد که در مدل SWAT لحاظ شده‌اند؛ بنابراین آب آبیاری با دور مشخص و در زمان مشخص در مدل SWAT وارد شده‌اند. این در حالی است که امکان وارد کردن آبیاری و فعالیت‌های انسانی برای مدل Noah-MP وجود ندارد و میزان آب آبیاری به بارش اضافه شده است. همین موضوع بر شکل‌گیری الگوهای مختلف رواناب تأثیر گذاشته است. از طرف دیگر بارش ورودی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل شکل‌گیری رواناب، در دو مدل الگوی متفاوتی دارند. مدل SWAT برای داده‌های اقلیمی از جمله بارش از نزدیک‌ترین ایستگاه به مرکز ثقل زیرحوضه استفاده می‌کند درحالی‌که بارش ورودی در مدل Noah-MP شامل داده‌های بارش GLDAS-1 است که با داده‌های چندین ایستگاه باران‌سنجی



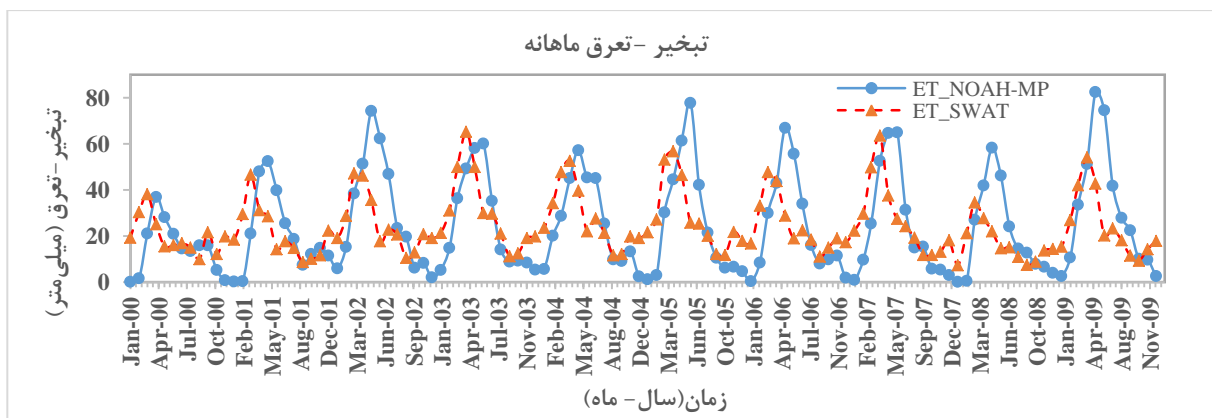
شکل ۱ - نمودار میزان حساسیت رواناب به پارامترها

جدول ۱- ارزیابی کارایی مدل بعد از واسنجی

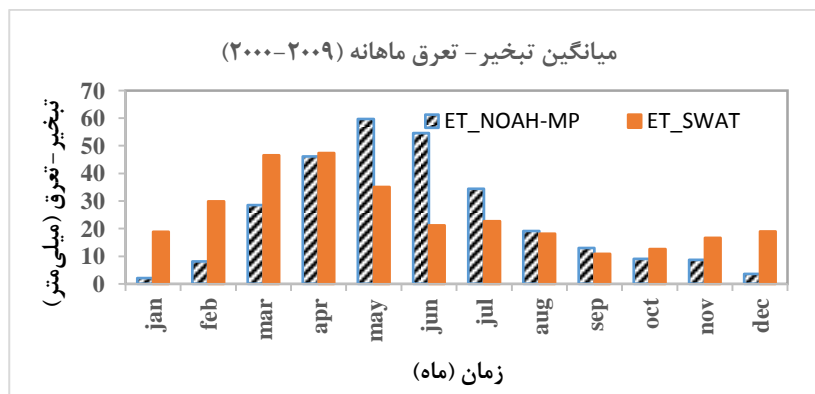
منطقه	قبل از واسنجی			بعد از واسنجی		
	RMSE	NSE	R^2	RMSE	NSE	R^2
SIMTOP	۲/۳۴	۰/۴۷	۰/۷۸	۱/۹۸	۰/۶۲	۰/۷۸
	۴/۴۸	۰/۱۹	۰/۵۲	۴/۲۷	۰/۲۷	۰/۵۲
	۲/۷	۰/۴۱	۰/۶۹	۲/۸	۰/۴۴	۰/۷۱
BATS	۲/۶۶	۰/۳۱	۰/۸۳	۱/۹۱	۰/۶۴	۰/۸۱
	۴/۷۵	۰/۰۹	۰/۵۶	۴/۰۲	۰/۳۵	۰/۶
	۴/۵۲	-۰/۵۴	۰/۴۹	۲/۶۳	۰/۴۷	۰/۷



شکل ۲- رواناب ماهانه مدل سازی شده توسط مدل Noah-MP و SWAT و مجموع آبیاری و بارش در مناطق کوهستانی، کوهپایه، دشت



شکل ۳- تبخیر- تعرق ماهانه دو مدل SWAT و Noah-MP



شکل ۴ - میانگین تبخیر-تعرق ماهانه دو مدل SWAT و Noah-MP

جدول ۲ - مقادیر سالیانه تبخیر-تعرق در مدل SWAT و Noah-MP

سال	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	میانگین
تبخیر-تعرق مدل SWAT (mm)	۲۳۹	۲۵۳	۳۰۰	۳۶۰	۳۳۱	۳۲۹	۲۹۰	۳۲۸	۲۰۰	۲۹۵	۳۲۰
تبخیر-تعرق مدل Noah-MP (mm)	۱۷۴	۲۵۳	۳۵۳	۳۰۴	۳۰۶	۳۰۹	۲۹۲	۱۹۷	۲۱۰	۳۶۸	۳۰۵

تبخیر-تعرق واقعی

میانگین تبخیر-تعرق ماهانه در ده سال در شکل (۳) رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مدل در ماه‌های سرد تبخیر-تعرق را کمتر و در ماه‌های گرم بیشتر از مدل SWAT گزارش می‌کند. همان‌طور که شکل (۴) نشان می‌دهد به‌طور متوسط تبخیر-تعرق مدل Noah-MP در ماه‌های مه، ژوئن و ژوئیه (از ۱۱ اردیبهشت تا ۹ مرداد) از مدل SWAT بیشتر و در ماه‌های نوامبر، ژانویه، فوریه و مارس (حدوداً از آبان تا اوایل فروردین) کمتر است و برخلاف مدل SWAT که اوج تبخیر-تعرق را در ماه آوریل (۱۲ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت) نشان می‌دهد بیشترین تبخیر-تعرق آن در ماه مه (۱۱ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد) است و در واقع در نشان دادن پیک تبخیر-تعرق، یک ماه عقب است. با توجه به نحوه محاسبه تبخیر-تعرق واقعی در مدل Noah-MP این مسئله مربوط به فعالیت گیاهی در طول سال است و مدل دینامیک گیاهی که رشد گیاه و افزایش فعالیت آن را شبیه‌سازی می‌کند، باعث شکل‌گیری این الگو شده است. با شروع فصل گرم مدل گیاهی شروع به محاسبه تعرق می‌کند و با افزایش رشد گیاه مقدار آن را افزایش می‌دهد که یکی از علت‌های بیش برآورد مدل Noah-MP است. همچنین بعد از تمام شدن فصول گرم مدل گیاهی با در نظر گرفتن پایان فصل رشد، کمترین شاخص سطح برگ را برای گیاه در نظر گرفته و به این ترتیب در ماه‌های سرد تعرق را صفر و یا نزدیک به صفر محاسبه

می‌کند و این در حالی است که در حوضه نیشابور کشت زمستانه وجود دارد و تعرق گیاهان در پاییز و زمستان ادامه دارد ولی مدل امکان در نظر گرفتن کشت زمستانه را ندارد. علت دیگر کم برآورد مدل در ماه‌های سرد با توجه به رابطه ۱۱ و وابستگی تبخیر به متغیرهای هواشناسی، مشخص می‌شود. علت این کم‌برآورد را باید در ضعف داده‌های ورودی جستجو کرد. همان‌طور که اشاره شد در این پژوهش به اصلاح داده‌های بارش پرداخته شده است ولی برای سایر داده‌های هواشناسی که اثر مستقیم در محاسبه تبخیر-تعرق دارند اصلاحی صورت نگرفته است اگرچه تلاش شده است با توجه به میانگین کلی داده‌های پایگاه و مقایسه آن‌ها با داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی و کم برآورد داده‌های پایگاهی، به صورت خطی داده‌های ورودی افزایش داده شود، اما خطای داده‌ها کاملاً برطرف نشده است. از طرف دیگر مدل SWAT برای محاسبه تبخیر-تعرق از روش هارگریوز و مدل Noah-MP از روش پنمن‌مانتیت استفاده می‌کند که این خود عامل دیگری برای وجود تفاوت بین مقادیر این دو مدل است. علت دیگر تفاوت در الگوی تبخیر-تعرق دو مدل، احتمالاً به خاطر کشت در دشت و آبیاری‌های منظم در کل سال است که در مدل SWAT لحاظ شده است ولی در مدل Noah-MP برای ارائه آن گزینه‌ای در نظر گرفته نشده است. در جدول (۲) مقادیر سالانه تبخیر-تعرق در مقایسه با مدل SWAT آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در بیشتر سال‌ها مدل، تبخیر-تعرق را مشابه برآورد کرده است و میانگین تبخیر-تعرق مدل به نتایج سایر تحقیقات از جمله میان‌آبادی

(۱۳۹۵) و نظریه (۱۳۹۶) نیز نزدیک بوده است.

دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

نتیجه گیری

در این پژوهش دو طرحواره رواناب BATS و SIMTOP در مدل Noah-MP با هم مقایسه شد. هر دو طرحواره بر اساس دیدگاه دان (Dunne) (بر اساس این دیدگاه رواناب در هنگام جاری شدن آب ورودی بر روی بخش اشباع هر سلول مدل تولید می‌شود) طراحی شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که در اقلیم خشک و نیمه‌خشک حوضه نیشابور، طرحواره BATS در همه مناطق عملکرد خوبی داشت و طرحواره SIMTOP در مناطق کوهستانی عملکردی مساوی با مدل BATS داشت. طرحواره BATS سطح اشباع را بر اساس رطوبت لایه‌های خاک و طرحواره SIMTOP بر اساس شاخص توپوگرافی و فاصله تا سطح ایستابی تعیین می‌کند. به نظر می‌رسد با توجه به بارش کمتر و اهمیت رطوبت در دشت، طرحواره BATS در این منطقه و به علت بارش بیشتر در مناطق کوهستانی، فرصت نفوذ کمتر و احتمال بیشتر برای تشکیل رواناب در مناطق گود آن، روش SIMTOP کارایی بیشتری دارد (Niu et al., 2005). طرحواره پوشش گیاهی پویا تبخیر-تعرق را متناسب با مراحل رشد گیاه شبیه‌سازی می‌کند که به نظر می‌رسد علت اصلی تفاوت دو مدل در برآورد تبخیر-تعرق باشد. روش متفاوت دو مدل در برآورد تبخیر-تعرق و عدم امکان شبیه‌سازی فعالیت کشاورزی در مدل Noah-MP از علت‌های دیگر این تفاوت است. در مقیاس سالیانه مدل Noah-MP تبخیر-تعرق را نزدیک به سایر تحقیقات برآورد کرده است. پیشنهاد می‌شود سایر گزینه‌های مدل Noah-MP در برآورد رواناب مورد بررسی قرار گیرند که از جمله آن‌ها گزینه رواناب بر اساس تفاوت سرعت آب ورودی و نفوذ است. استفاده از این گزینه با توجه به شرایط و بافت خاک منطقه، می‌تواند نتایج متفاوتی را ارائه دهد.

منابع

- ایزدی، ع. ۱۳۹۲. کاربرد و ارزیابی یک مدل توسعه‌یافته تلفیقی آب زیرزمینی آب سطحی در حوضه آبریز نیشابور. رساله دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- مهندسین مشاور سازآب شرق، ۱۳۸۸. مطالعات مدیریت بهم پیوسته منابع آب منطقه نیشابور، جلد شانزدهم گزارش تلفیق مطالعات طرح جامع مدیریت منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو.
- میان‌آبادی، آ. ۱۳۹۵. پیش‌بینی تغییرات تبخیر سالانه در حوضه‌های آبریز مناطق خشک با استفاده از نمایه خشکی (مطالعه موردی حوضه آبریز نیشابور). رساله دوره دکتری هواشناسی کشاورزی،
- میرشفیعی، س.، انصاری، ح.، داوری، ک. و ضیایی، ع.ن. ۱۳۹۷. بررسی داده‌های واداشت هواشناسی GLDAS-1 و تصحیح انحراف داده‌های بارش برای کاربرد در مدل‌های سطح خشکی (مطالعه موردی: حوضه نیشابور). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲(۶): ۱۳۳۶-۱۳۳۷.
- نظریه، ف. ۱۳۹۶. توسعه و ارزیابی مدل یکپارچه شبیه‌سازی جریان سطحی، ناحیه غیراشباع و اشباع در دشت نیشابور. رساله دوره دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- Ball, J. T., Woodrow, I.E. and Berry, J.A. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. *Progress in Photosynthesis Research*. 1: 221-234.
- Barlage, M., Tewari, M., Chen, F., Miguez-Macho, G., Yang, Z.-L. and Niu, G.-Y. 2015. The effect of groundwater interaction in North American regional climate simulations with WRF/Noah-MP. *Climatic Change*. 129(3-4): 485-498.
- Cai, X., Yang, Z.-L., David, C. H., Niu, G.-Y. and Rodell, M. 2014. Hydrological evaluation of the Noah-MP land surface model for the Mississippi River Basin, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 119: 23-38.
- Collatz G.J., Ball J.T., Grivet C. and Berry J.A. 1991. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*. 54: 107-136.
- Chen, L., Li, Y., Chen, F., Barr, A., Barlage, M. and Wan, B. 2016. The incorporation of an organic soil layer in the Noah-MP land surface model and its evaluation over a boreal aspen forest, *Atmospheric Chemistry and Physics*. 16: 8375-8387.
- Deardorff, J. W. 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation, *Journal of Geophysical Research*. 83: 1889-1903.
- Dickinson, R.E., Henderson-Sellers A. and Kennedy P.J. 1993. Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Technical Note. National Center for Atmospheric Research.
- Fan, Y., Miguez-Macho, G., Weaver C. P., Walko R. and Robock A. 2007. Incorporating water table dynamics in climate modeling: 1. Water table observation and equilibrium water table simulations.

- surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements, *Journal of Geophysical Research*. 116:D12109:1-19.
- Rosero, E., Yang Z.-L., Gulden, L. E., Niu G.-Y. and Gochis D. J. 2009. Evaluating enhanced hydrological representations in Noah LSM over transition zones: Implications for model development, *Journal of Hydrometeorology*. 10 (3):600-622.
- Rosero, E., Yang Z.-L., Wagener T., Gulden L. E., Yatheendradas S. and Niu G.-Y. 2010. Quantifying parameter sensitivity, interaction, and transferability in hydrologically enhanced versions of the Noah land surface model over transition zones during the warm season, *Journal of Geophysical Research*. 115.
- Wolock, D. M. and McCabe G. J. 2000. Differences in topographic characteristics computed from 100- and 1000-m resolution digital elevation model data, *Hydrology. Processes*, 14:987-1002.
- Yang, Z.-L. 2004. Modeling land surface processes in short-term weather and climate studies, in *Observation, Theory and Modeling of Atmospheric Variability*. World Scientific Series on Asia-Pacific Weather Climate. 3:288-313.
- Zheng, D., van der Velde, R., Su, Z., Wen, J., Booi, M. J., Hoekstra, A. Y. and Wang, X. 2015. Under-canopy turbulence and root water uptake of a Tibetan meadow ecosystem modeled by Noah-MP, *Water Resource Research*. 51:5735-5755.
- Journal of Geophysical Research*. 112, D10125: 1-17.
- Farquhar, G.D., Caemmerer von S. and Berry J.A. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*. 149: 78-90.
- Jiang, X., Niu G.-Y. and Yang Z.-L. 2009. Impacts of vegetation and groundwater dynamics on warm season precipitation over the Central United States, *Journal of Geophysical Research*. 114, D06109: 1-15.
- Leung, L. R., Huang, M. Y., Qian, Y. and Liang, X. 2011. Climate-soil-vegetation control on groundwater table dynamics and its feedbacks in a climate model. *Climate Dynamics*. 36: 57-81
- Leuning, R. 1990. Modelling stomatal behavior and photosynthesis of *Eucalyptus grandis*. *Australian Journal of Plant Physiology* 17:159-175.
- Ma, N., Niu, G. Y., Xia, Y., Cai, X., Zhang, Y., Ma, Y. and Fang, Y. 2017. A systematic evaluation of Noah-MP in simulating land-atmosphere energy, water and carbon exchanges over the continental United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122:12,245-12,268.
- Manabe, S. 1969. Climate and the ocean circulation I. The atmospheric circulation and the hydrology of the Earth's surface, *Monthly Weather Review*. 97:739-774.
- Niu, G.-Y., et al. 2011, The community Noah land

Estimation of Runoff Using SIMTOP and BATS Schemes and Actual Evapotranspiration Using a Dynamic Vegetation Scheme in Noah-MP Land Surface Model in Neishaboor Watershed

S. Mirshafee¹, H. Ansari^{2*}, K. Davary³, A.N. Ziaei⁴
Recived: Oct.09, 2019 Accepted: Dec.04, 2019

Abstract

Surface water resource planning requires the estimation of water balance components at different spatial and temporal scales. Moreover, due to the inadequacy of the stations in terms of number, dispersion, and temporal data recording, numerical modeling of the land surface is necessary. In this study, the Noah-MP model was used to compare the simulated runoff by SIMTOP and BATS schemes and to evaluate the dynamic vegetation scheme for estimating actual evapotranspiration in the Neishaboor watershed monthly scale in 2000-2009. Due to the low accuracy and dispersion of hydrometric stations, the SWAT model output was used for evaluation. To develop the model, first, the sensitivity analysis of the modeled runoff to parameters of the model was performed. The model showed the highest and least sensitivity to the soil parameter in the Clapp-Hornberger relation (b) and runoff decay factor (f), respectively. The best and the first performance of simulated runoff by BATS scheme were in mountainous areas and the evaluation criteria including R^2 , NSE, and RMSE were respectively 0.81, 0.64, and 1.91. The second grade of performance was for the plain and the lowest values for simulated runoff were in foothills regions. Results indicate that the BATS scheme shows better results in the plain and foothills areas and the results of the SIMTOP scheme in the mountainous regions were similar to BATS results.

The dynamic vegetation scheme has been able to simulate evapotranspiration changes along with the stages of plant growth. The mean of annual evapotranspiration estimated by the Noah-MP model was 305 mm.

Keywords: BATS scheme, Dynamic vegetation scheme, Neishaboor watershed, Noah-MP model, SIMTOP scheme

1- PhD student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2 - Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3 - Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

4 - Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(* - Corresponding Author Email: ansary@um.ac.ir)

مقاله علمی-پژوهشی

مدل‌سازی جریان و تغییرات کیفی (شوری) آب‌زیرزمینی در دشت نیشابور توسط کدهای

MODFLOW و MT3DMS

پریسان طاهریان^۱، حسین انصاری^{۲*}، کامران داوری^۳، علی نقی ضیایی^۴، علی اصغر بهشتی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۲

چکیده

در این مطالعه، به منظور ارزیابی تغییرات کیفیت آب‌زیرزمینی در دشت نیشابور تحت سناریوهای مختلف از کدهای MODFLOW و MT3DMS استفاده شد. در مرحله شناخت آبخوان و تهیه مدل مفهومی، مشخص شد افزایش شوری آبخوان به دلیل وجود ابرفت ریزدانه و کانی‌های تبخیری در حاشیه دشت و آب برگشت کشاورزی می‌باشد. مدل جریان آب‌زیرزمینی در شرایط ناماندگار برای دوره ۱۰ ساله مهرماه ۱۳۸۰ تا شهریورماه ۱۳۹۰ واسنجی و برای یک دوره ۴ ساله (مهرماه ۱۳۹۰ تا شهریورماه ۱۳۹۴) صحت‌سنجی شد. خطای مدل جریان در دوره واسنجی و صحت‌سنجی (برحسب RMSE) به ترتیب ۱/۹۲ و ۱/۶۵ متر بود. همچنین خطای مدل انتقال جرم برای دوره ۱۴ ساله شبیه‌سازی در حدود ۱/۷۸ میلی‌گرم در لیتر بود. در مرحله بعد، اثر دو سناریوی ادامه روند کنونی و شرایط ۴۰ درصد کاهش برداشت از آبخوان تا سال ۱۴۰۴ پیش‌بینی شد. تحت سناریوی یک و ادامه روند کنونی تا افق ۱۴۰۴، هیدروگراف معرف آبخوان برای کل دشت افت ۰/۷۹ متر در سال نشان داد و شوری آب‌زیرزمینی بطور پیوسته افزایش می‌یابد. تحت سناریوی دوم که هدف آن کاهش برداشت از آبخوان به منظور رسیدن به وضعیت تعادلی در بیلان آب‌زیرزمینی بود، برداشت از همه چاه‌های آبخوان به اندازه ۴۰ درصد کاهش یافت. نتایج نشان داد با اینکه میانگین سطح آب در آبخوان افت نمی‌کند، اما شوری آب‌زیرزمینی همچنان افزایشی است البته با نرخ به اندازه ۵۰ درصد کمتر از سناریوی اول. این موضوع نشان دهنده این واقعیت است که کاهش برداشت از آبخوان با نرخ یکسان برای همه چاه‌های بهره‌برداری ممکن است اهداف مدیریت منابع آب را برآورده نکند و برای مدیریت آبخوان نیاز به اطلاعات توزیعی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: دشت نیشابور، شوری آب زیرزمینی، مدل‌سازی ریاضی انتقال جرم در آبخوان، MODFLOW، MT3DMS

مقدمه

با توجه به اینکه ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته

است، ۵۶ درصد از آب آشامیدنی کشور از منابع آب‌زیرزمینی استخراج می‌شود (سبحان اردکانی، ۱۳۹۵) و بهره‌برداری ناپایدار از این منابع موجب افت مستمر سالانه بیش از ۱۱ میلیارد متر مکعب و بیلان منفی آبخوان‌ها شده است (میبدی، ۱۳۹۴). خطر آلودگی کمتر نسبت به سایر منابع آبی و هزینه پایین استحصال آن باعث شده تا برداشت از این منابع همچنان ادامه داشته باشد. این اضافه برداشت به مرور زمان موجب بروز آثار منفی دیگری همچون پیشروی آب شور، نشست زمین و کاهش حجم طبیعی آبخوان و معضلات بوم‌شناختی شده است که به مرور تبدیل به یک معضل اجتماعی شده است (فرزانه و همکاران، ۱۳۹۵). بنابراین ارزیابی کمیت و کیفیت آب‌زیرزمینی از اهمیت بسزایی در مدیریت سلامت، کشاورزی، اقتصاد و سیاست جامعه برخوردار است. در مطالعه حاضر با استفاده از مدل‌های ریاضی MODFLOW و MT3DMS، چگونگی تغییرات کیفیت آب‌زیرزمینی و پیشروی آب شور در دشت نیشابور به عنوان

- ۱- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۲- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۵- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(Email: ansary@um.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.3.3

مثبت آبخوان، حداکثر میزان بالا آمدگی سطح آب‌زیرزمینی دشت به مقدار ۱۹ سانتی‌متر در فروردین ماه خواهد بود. مدل کیفی آبخوان با کد MT3DMS تهیه و برای همان دوره‌ی شبیه‌سازی جریان، با کالیبراسیون مقادیر ضریب پراکندگی طولی مواد آبخوان و ضریب توزیع (به روش سعی و خطا) واسنجی شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که شعاع تأثیر چاه‌های فاضلاب در نقاط مختلف حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر می‌باشد.

صابری مهر و همکاران (۱۳۹۶) دشت شستر در سمت شمال-شرقی دریاچه ارومیه؛ یکی از دشت‌های حاصلخیز کشور است که سالیانه کشاورزی در آن به وسعت بسیار زیاد انجام می‌پذیرد. علاوه بر آب‌های سطحی که بخش کمی از آب‌های مورد نیاز کشاورزی منطقه را تأمین می‌نماید؛ بطور کلی کشاورزی منطقه به آب‌زیرزمینی دشت وابسته است و حجم زیادی از آب‌زیرزمینی هر ساله در همین جهت استخراج می‌شود. دشت شبستر طی سالیانه گذشته تحت تأثیر نفوذ پیشرونده آب شور قرار گرفته است که منبع و علت شوری آن شورابه‌های به دام‌افتاده در رسوبات انتهایی دشت می‌باشد. مدل کمی و کیفی دشت با استفاده از نرم‌افزار GMS جهت مدیریت صحیح برداشت از آب‌زیرزمینی منطقه و جلوگیری از پیشرفت جبهه آب شور در این پژوهش انجام شده است. تغییرات سطح آب با استفاده از آمار سطح ایستابی ۲۴ حلقه چاه پیژومتری موجود در محدوده مورد مطالعه، مورد ارزیابی قرار گرفته و پس از تعیین پارامترهای آبخوان در اثنای واسنجی مدل و اطمینان از منطقی بودن جواب‌ها و پس از طی مرحله صحت‌سنجی وضعیت هیدرولیکی آبخوان بررسی و تحلیل گردید. در دو منطقه از دشت یکی در قسمت جنوبی و دیگری در قسمت شمال غربی دشت بعلا وجود تراکم چاه‌ها افت شدید تراز آب ملاحظه گردید. در نهایت از کد عددی MT3DMS که انتقال توده‌ای ذرات را شبیه‌سازی می‌کند برای تخمین مسیر حرکت جبهه آب شور استفاده گردید که نشان داد نفوذ جبهه آب شور در قسمت جنوبی و در منطقه‌ای که افت تراز آب ایجاد شده بود اتفاق می‌افتد.

همچنین از دیگر استفاده‌های کد MODFLOW برای شبیه‌سازی جریان آب‌زیرزمینی می‌توان به مطالعه انصاری فر و همکاران (۲۰۱۹)^{a,b} در آبخوان ساحلی بندر گز، کریمی و همکاران (۲۰۱۹) در آبخوان تهران و یوسفی و همکاران (۲۰۱۹) در آبخوان کرج اشاره کرد.

از تجربیات بین‌المللی می‌توان به تحقیق بی‌وی و همکاران در سال ۲۰۰۸ اشاره کرد که در آن اثر ۳۷۲ لندفیل غیر کنترل شده در استان چه‌جیانگ کشور چین بر کاهش تدریجی کیفیت آب‌زیرزمینی بررسی شده است. آن‌ها از کدهای MT3D و MODFLOW برای شبیه‌سازی مدل جریان آب‌زیرزمینی و انتقال آلودگی استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده این موضوع بود که نشت از لندفیل‌ها تأثیر بسیار زیادی بر کاهش کیفیت آب‌زیرزمینی منطقه دارد.

یکی از دشت‌های ممنوعه کشور که با بحران کاهش سطح آب‌زیرزمینی، فرونشست و شور شدن آب‌زیرزمینی روبرو است بررسی شده است.

در مطالعات مختلف از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی جریان و فرآیندهای انتقال جرم در آبخوان استفاده شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. مشهدی و باغ‌وند (۱۳۸۹) به بررسی و مدل‌سازی آلودگی ناشی از زباله‌های محل دفن بر آب‌های زیرزمینی آبخوان امان آباد اراک با استفاده از کد MODFLOW پرداختند در این تحقیق مسیر حرکت آلودگی روندیابی گردید که نتایج حاصل از مدل‌سازی کیفی نشان می‌دهد که با توجه به نزدیک بودن فاصله محل قرارگیری چاه‌های آب شرب و مسیرهای حرکت آلودگی نهایتاً حرکت آلاینده‌ها به چاه‌های آب شرب منتهی می‌شود و در آینده‌ای نه چندان دور به تمام چاه‌ها می‌رسد. از اینرو منطقه موجود از پتانسیل آلودگی بالایی برخوردار می‌باشد.

چیت‌سازان و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از با کدهای MODFLOW و MT3DMS در قالب نرم افزار PMWIN 5.3، غلظت نیترات بر اثر فعالیت‌های کشاورزی در دشت رامهرمز (استان خوزستان) را شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه، مدل انتقال آلودگی نیترات به مدت شش ماه از خرداد ۱۳۸۹ تا آبان ۱۳۸۹ واسنجی و طی یک دوره دو ماهه در مهر و آبان ۱۳۸۹ صحت‌سنجی شده است. نتایج حاصل از مدل نشان داد که از نظر کیفی نیز آبخوان در مرحله گذر از مرز ۵۰ درصد آلودگی است که با توجه به سناریوهای مختلف و با برنامه‌ریزی مناسب می‌توان طی طولانی مدت آبخوان را پاکیزه کرد.

زمزم و رهنما (۱۳۹۱) به ارزیابی کیفیت آب‌زیرزمینی دشت رفسنجان با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW و MT3DMS و نتایج آنالیز کیفی ۶۲ حلقه چاه کشاورزی پرداختند که پس تهیه مدل کمی و کیفی آبخوان با انجام عملیات واسنجی مدل کالیبره گردید و صحت‌سنجی مدل برای دوره‌های زمانی مختلف اجرا شد. نتایج تحقیق نشان داد پارامترهای مختلف کیفی در آب‌زیرزمینی منطقه خصوصاً کلر و EC ظرف ۲ تا ۵ سال آینده روند افزایشی داشته و در طی سال‌های آتی از حد مجاز خواهد گذشت و کشت و آبیاری درختان مقاوم به شوری را با مشکل مواجه خواهد نمود.

قبادیان و بهرامی (۱۳۹۵) از مدل ریاضی برای شبیه‌سازی انتشار آلودگی چاه‌های فاضلاب در دشت خزل واقع در استان همدان استفاده کرده‌اند. در این تحقیق، مدل کمی آبخوان با کد MODFLOW در دو حالت جریان ماندگار (مهرماه ۱۳۸۸) و جریان غیرماندگار (از آبان-ماه ۱۳۸۸ تا مردادماه ۱۳۸۹) واسنجی و در شهریورماه ۱۳۸۹ صحت-سنجی شده است. سپس با مدل کالیبره شده تأثیر اجرای طرح تغذیه مصنوعی آبخوان به مدت ۵ ماه از اواخر مهر تا اواخر اسفند (توسط ۳۱ چاه تزریق) بررسی شده است. نتایج نشان داده است که با پاسخ

MODFLOW تغییرات غلظت نیترات را منطقه ال منوفیا در مصر شبیه سازی کردند (Negm and Eltarabily, 2016).

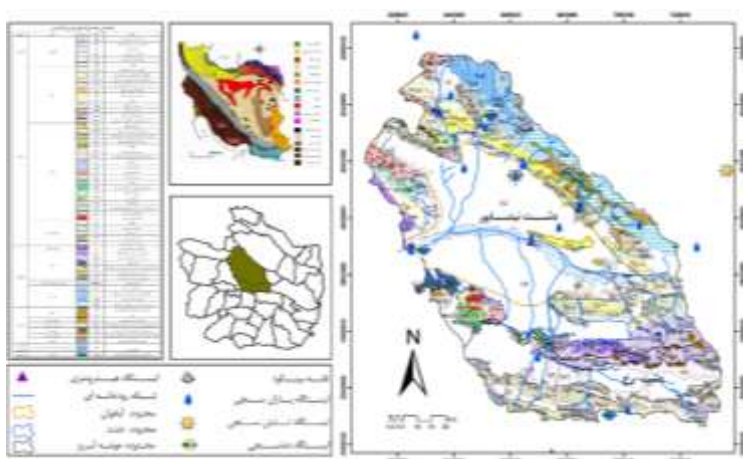
مواد و روش ها

حوضه آبریز نیشابور با وسعت ۹۱۵۷ کیلومتر مربع در استان خراسان رضوی واقع شده است (شکل ۱). آب و هوای منطقه نیمه خشک تا خشک است. متوسط بارندگی در کل حوضه معادل ۲۳۴ میلی متر و متوسط تبخیر برای کل حوضه حدود ۲۳۳۵ میلی متر در سال گزارش شده است (شفیعی، ۱۳۸۸).

به دلیل قرارگیری این دشت در اقلیم نیمه خشک، آبخوان آبرفتی دشت نیشابور است که مساحتی در حدود ۲۸۳۳ کیلومتر مربع را دربر می گیرد منبع اصلی تأمین آب مورد نیاز منطقه (شکل ۱). به دلیل عدم مدیریت مناسب برداشت ها، به تبع افزایش جمعیت و صنایع وابسته به آب، مشکلات عدیده ای مانند افت شدید سطح آب زیرزمینی، کاهش دبی چاه ها و قنوتات و افزایش شوری آب زیرزمینی در منطقه ایجاد شده است.

موکوپادیای و همکاران اثر پساب مخازن نفتی بر آلودگی آب زیرزمینی در شمال کویت را بررسی نمودند. به این منظور چهار چاه مشاهده ای در اطراف میدان های نفتی که محل دفع پساب بود حفر شد. غلظت TDS در چاه های مشاهده ای در حدود ۵۷۰۰۰ میلی گرم در لیتر بود. آنها از روش تفاضل محدود و نرم افزار visual MODFLOW برای مدل سازی جریان آب زیرزمینی و برای مدل سازی روند انتقال آلودگی (مواد شیمیایی) از MT3D استفاده نمودند. مدل عددی ساخته شده نشان داد آلودگی ایجاد شده توسط پساب نشتی از مخازن نفتی پس از یک دوره ۵ ساله، ۸۰ تا ۸۵ متر در جهت شمال شرقی حرکت کرده و آلودگی را منتقل می کند. در نهایت پیشنهاد شد که محل های دفع پساب موجود در منطقه و یا نزدیکی آن تعطیل شده و مکان های جدید خارج از محدوده کنونی ایجاد گردد (Mukhopadhyay et al., 1994).

چیتراکار و سانا مدل سازی کمی و کیفی آب زیرزمینی با کدهای MT3DMS و MODFLOW برای آبخوان ساحلی البتینه در کشور عمان انجام دادند و تاثیر سناریوهای مختلف بر نفوذ آب شور در منطقه بررسی کردند (Chitrakar and Sana, 2015). همچنین، نگم و الترابیلی با بکارگیری با کدهای MT3DMS



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز نیشابور در استان خراسان رضوی و نقشه زمین شناسی آن به همراه مرز آبخوان، ایستگاه های هواشناسی، هیدرومتری و شبکه ای آبراهه ها

مفهومی آب زیرزمینی، اقدام به تهیه مدل مفهومی کمی دشت نیشابور کردند. در این پژوهش، با استفاده از اطلاعات آنالیز شیمیایی آب ۵۵ ایستگاه پایش کیفیت آب زیرزمینی (انجام شده توسط شرکت آب منطقه ای استان خراسان رضوی) و انجام مطالعات هیدروژئوشیمی، مدل مفهومی کیفی آبخوان نیشابور تهیه شد.

به منظور انجام مطالعات هیدروژئوشیمی از داده های کیفیت آب زیرزمینی مربوط به سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ بودند استفاده شد. ۵۵ نمونه از ایستگاه در سراسر دشت مورد بررسی قرار گرفت که ۵۱

به منظور بررسی کیفیت آب زیرزمینی و مدل سازی ریاضی تغییرات شوری آب زیرزمینی در آبخوان نیشابور در ابتدا مدل مفهومی کمی و کیفی سامانه آب زیرزمینی دشت نیشابور تهیه گردید. هدف از تهیه مدل مفهومی، ساده سازی محدوده ای مطالعاتی و سازماندهی آمار و اطلاعات موجود در آن است بطوری که بتوان سیستم منابع آب (سطحی و زیرزمینی) را به آسانی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در این مطالعه از نتایج کار ایزدی و همکاران (۲۰۱۳) استفاده شد که ضمن ارائه یک دستورالعمل جامع بمنظور تهیه مدل

که آبخوان تحت تأثیر تغذیه زیرزمینی و سطحی مناسبی قرار دارد و دانه‌بندی درشت تر می‌باشد آبخوان دارای بهترین کیفیت می‌باشد و در نواحی جنوب و غرب آبخوان که آبرفت‌ها ریزدانه‌تر بوده و سرعت حرکت آب زیرزمینی در آن‌ها کمتر است، شوری آب زیرزمینی افزایش می‌یابد.

بررسی سری زمانی طولانی مدت هدایت الکتریکی در ایستگاه‌های پایش کیفیت آب زیرزمینی دشت نیشابور نشان می‌دهد میانگین شوری در آبخوان بین سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۴ افزایشی بوده است (شکل ۲).

در این مطالعه با استفاده از نمودار پایپر (شکل ۳)، تیپ آب برای نمونه‌های آب زیرزمینی دشت نیشابور تعیین شده است که بر این اساس، تیپ سدیم-کلراید (۶۳/۶ درصد)، سدیم-بیکربنات (۱۴/۵ درصد)، منیزیم-بی کربنات (۱۲/۷ درصد)، سدیم-سولفات (۷/۲ درصد) و منیزیم-کلراید (۱/۸ درصد) نمونه‌ها را شامل می‌شود.

از نظر مکانی نمونه‌های با تیپ سدیم-کلراید بیشتر در جنوب، مرکز و غرب دشت خصوصاً در مناطق تخلیه آبخوان دیده می‌شود. اما رخساره‌های کربناته که شاخص مناطق تغذیه‌های محسوب می‌شود در مناطق شمالی و شرقی و عموماً نزدیک به ارتفاعات و مخروط افکنه‌های مشرف به بلندی‌های این مناطق دیده می‌شود. نمونه‌های با رخساره سولفات نیز هر چند به تعداد کم در بین نمونه‌های با رخساره کلرو و بیکربناته دیده می‌شوند.

بخشی از شوری آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند ناشی از آبشویی لایه‌های نمک حاصل از تبخیر آب از سطح خاک باشد. روند کاهشی در نمودار EC در برابر نسبت کاتیون‌ها به کلر (Mg/Cl و K/Cl، Ca/Cl، Na/Cl) نشان می‌دهند این کاتیون‌ها می‌توانند ناشی از هوازگی سیلیکات‌ها و یا انحلال کربنات‌ها باشند (شکل ۴). چنانچه این روند افقی و موازی با محور EC باشد نشان دهنده نقش تبخیر در افزایش غلظت سدیم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بخشی از نمونه‌ها اثر بارز تبخیر و یا انحلال هالیت را نشان می‌دهند که اغلب مربوط به نمونه‌های واقع شده در غرب و بعضاً مرکز دشت نیشابور هستند.

رابطه مستقیم بین کلر و EC (شکل ۴) نیز به خوبی نشان‌دهنده اثر برهمکنش آب-سنگ (water-rock interaction) می‌باشد. آب‌هایی که مسیر طولانی در آبخوان حرکت کرده‌اند، برهمکنش بیشتری با مواد آبخوان داشته و تکامل بیشتری را طی کرده‌اند و در نتیجه غلظت‌های بالاتری از مواد محلول را دارا هستند (Moran-Ramírez et al., 2016). با توجه به رابطه کلر و EC، از یون پایدار کلر می‌توان به عنوان نماینده شوری آب زیرزمینی برای مدل‌سازی استفاده کرد.

نمونه مربوط به چاه و ۴ نمونه مربوط به قنوات می‌باشند و از لحاظ توزیع مکانی در وضعیت مطلوبی هستند (شکل ۲). قالب این نمونه‌ها در آبخوان آبرفتی نیشابور واقع شده‌اند که این امر موجب می‌شود که برآورد خوبی از وضعیت کیفیت شیمیایی آب موجود در آبخوان بدست آید.

در گام بعدی، به منظور تعیین بیلان آب زیرزمینی در دوره‌های مختلف زمانی و شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی دشت نیشابور از کد MODFLOW استفاده گردید. در این مدل، یک شبکه‌ی منظم تقاضات محدود با مساحت حدود ۲۳۶۰ کیلومتر مربع و با اندازه‌ی سلول ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر مورد استفاده قرار گرفت. برای ایجاد مدل جریان آب زیرزمینی از نتایج مطالعات قبلی بویژه مطالعه انجام گرفته توسط ایزدی (۱۳۹۲) بهره گرفته شد و مدل جریان تهیه شده در مطالعات قبلی با داده‌های جدید بروزسانی و واسنجی مجدد شد.

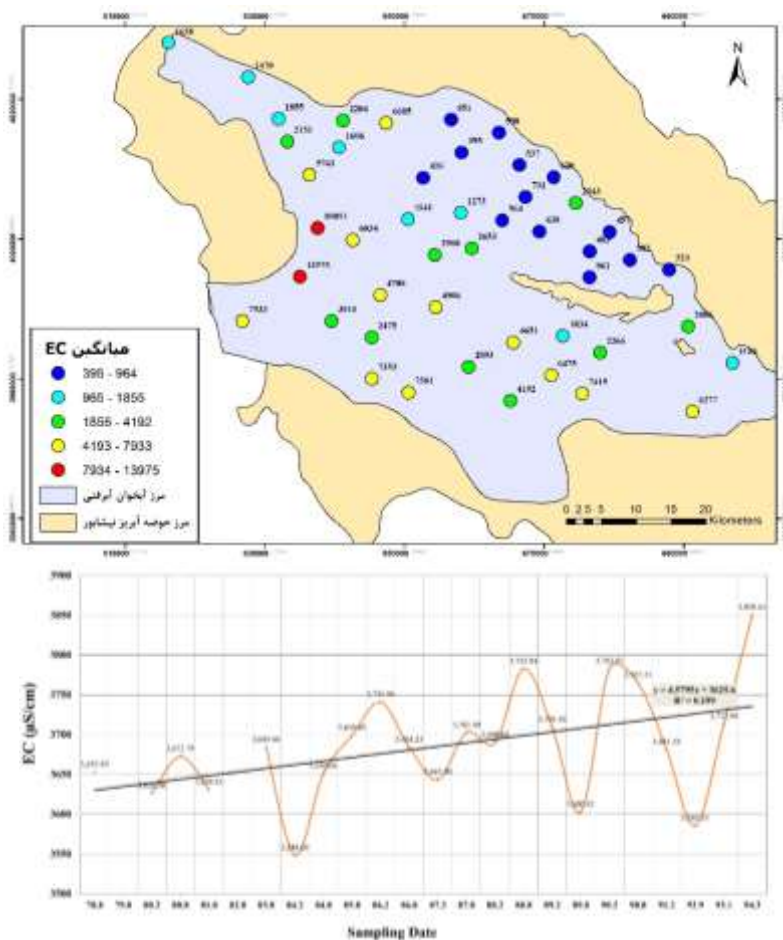
سپس، به منظور بررسی تغییرات شوری (کیفیت آب زیرزمینی) با استفاده از کد MT3DMS فرایند انتقال جرم بصورت محلول در آبخوان شبیه‌سازی شد. حرکت و انتقال مواد محلول در محیط‌های متخلخل بطور کلی به خصوصیات محیط متخلخل (خصوصیات مسیر حرکت)، مشخصات محیط مایع (بستر حرکت) و خصوصیات نوع ماده محلول بستگی دارد. در کد MT3DMS حرکت مواد محلول را با استفاده از معادلات دیفرانسیل جزئی (بر اساس قانون بقای جرم) و با استفاده از فرآیندهای انتقال (همرفت) و پخش هیدرودینامیکی شبیه‌سازی می‌نماید.

با توجه به اهداف مطالعه، یون کلر در آب زیرزمینی به عنوان آلاینده در نظر گرفته شد. سری زمانی یون کلر در ایستگاه‌های پایش کیفیت آب زیرزمینی به عنوان داده مشاهده‌ای به مدل کیفی وارد شد.

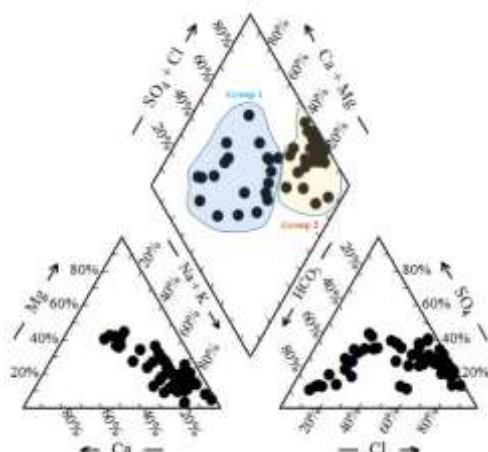
نتایج و بحث

به‌طور کلی تحلیل‌های کیفی و ارزیابی روند تغییرات کیفیت شیمیایی منابع آب علاوه بر جایگاه آن در تامین نیازهای مصارف گوناگون، در مطالعه هیدروژئولوژی و مدیریت آبخوان نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین جهت عموماً به صورت دوره‌ای از منابع آب انتخابی یا به‌صورت مطالعات موردی در مقاطع زمانی و در اعماق مختلف، از منابع آب زیرزمینی نمونه‌برداری کیفی نیز انجام شده و پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آن‌ها شامل هدایت الکتریکی (EC)، pH و غلظت عناصر اصلی مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد.

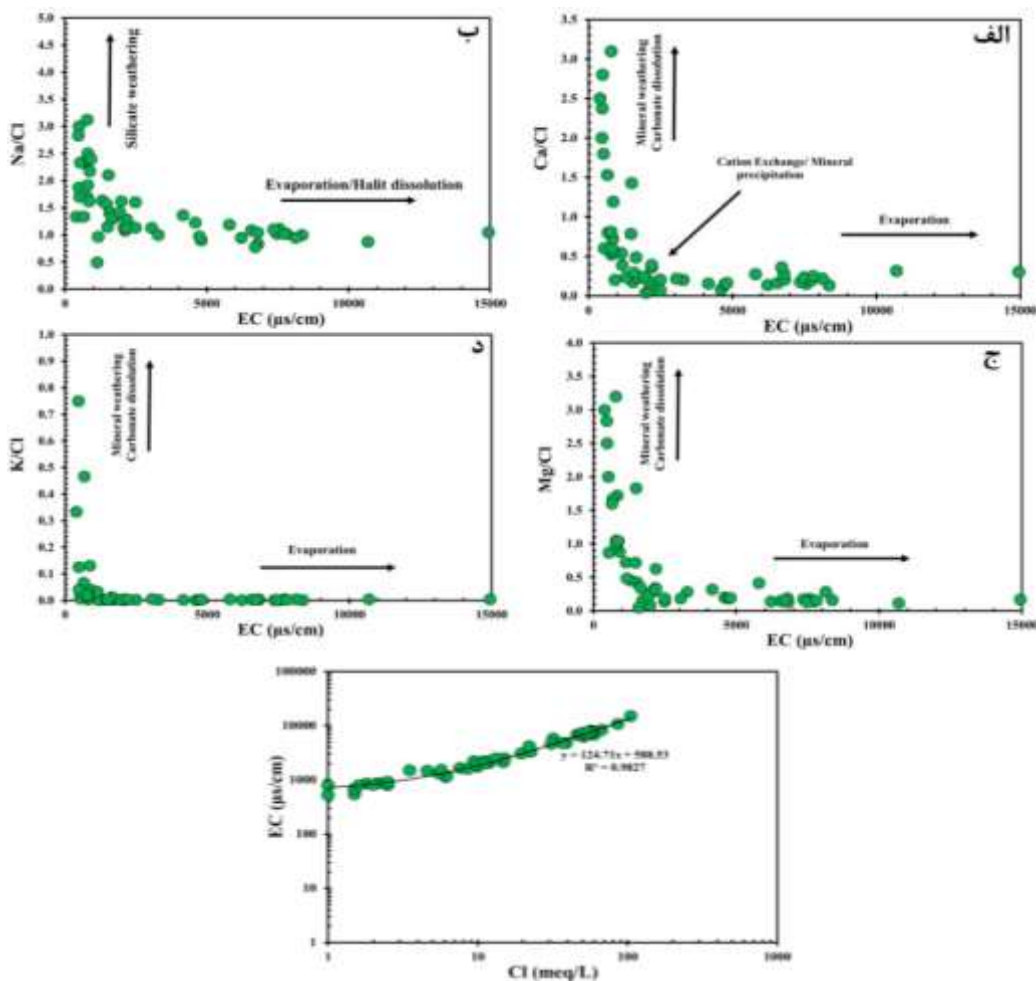
ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین مشخصه کیفی منابع آب، هدایت الکتریکی است که به‌عنوان شاخصی برای پی‌بردن به وضعیت کیفیت منابع آب استفاده می‌شود. نقشه توزیع هدایت الکتریکی در آبخوان دشت نیشابور (شکل ۲) نشان می‌دهد که در نواحی شمال شرق دشت



شکل ۲- نقشه توزیع هدایت الکتریکی در نمونه‌های آب‌برزمینی دشت نیشابور (الف) و نمودار تغییرات هدایت الکتریکی (کموگراف) دشت نیشابور بین سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۴ (ب)



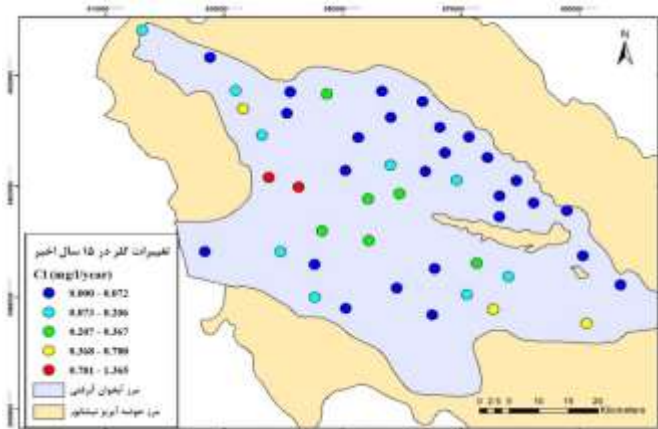
شکل ۳- نمودار پایپر نمونه‌های آب‌برزمینی محدوده مطالعاتی نیشابور



شکل ۴- نمودار نسبت های مختلف کاتیون ها و هدایت الکتریکی در برابر EC

می باشد. با پایین رفتن سطح آب زیرزمینی، چاه ها از لایه های پایین تر آبخوان که دارای شوری بیشتری می باشند آب می گیرند. در ادامه، چگونگی پیشروی آب های شور در آبخوان توسط مدل ریاضی شبیه سازی شده است.

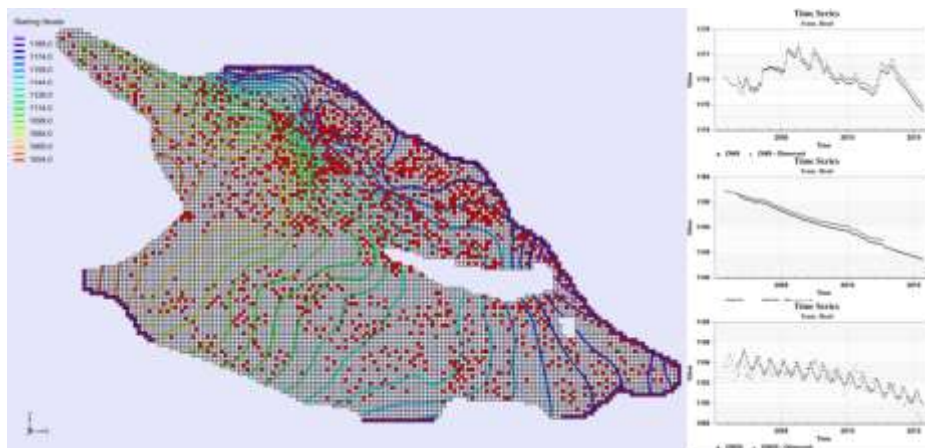
بررسی سری زمانی ۱۵ ساله یون کلر در آب زیرزمینی دشت نیشابور نشان می دهد بیشترین افزایش کلر در حاشیه های غربی و شرقی دشت مشاهده شده است (شکل ۵). در این نواحی سنگ کف مارنی و آبرفت ریزدانه تر بوده و ضخامت اشباع کمتر از مرکز دشت



شکل ۵- نقشه تغییرات زمانی یون کلر در نمونه های آب زیرزمینی دشت نیشابور

۶). سپس مدل جریان آب‌یرزمینی برای یک دوره ۴ ساله (مهرماه ۱۳۹۰ تا شهریورماه ۱۳۹۴) صحت‌سنجی شد. نتایج مدل نشان داد که مطابقت خوبی بین تراز آب‌یرزمینی شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای در زمان شبیه‌سازی دیده می‌شود بطوریکه در دوره واسنجی و صحت‌سنجی مقادیر خطا (برحسب RMSE) به ترتیب به مقادیر ۱/۹۲ و ۱/۶۵ متر کاهش یافت.

همانطور که قبلاً گفته شد، پس از تهیه مدل مفهومی کمی و کیفی، شبیه‌سازی جریان آب‌یرزمینی در آبخوان آبرفتی دشت نیشابور با استفاده از کد MODFLOW بر اساس از نتایج مطالعه ایزدی (۱۳۹۲) انجام شد و مدل جریان تهیه شده در مطالعات قبلی با داده‌های جدید بروزرسانی و مدل در شرایط ناماندگار برای دوره ۱۰ ساله مهرماه ۱۳۸۰ تا شهریورماه ۱۳۹۰ با گام زمانی یک ماهه و با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای سطح آب‌یرزمینی واسنجی شد (شکل

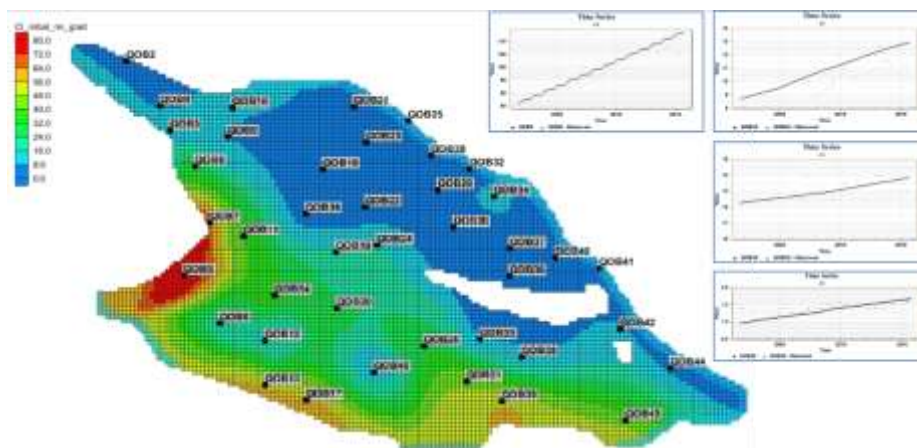


شکل ۶- سطح آب اولیه و شرایط مرزی در مدل جریان به همراه مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی در چند چاه مشاهده‌ای

بصورت اولیه برای محدوده مدل‌سازی تعریف گردید. با توجه به این موضوع واسنجی مدل کیفی با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای تاثیرگذار در مدل کیفی شامل تغذیه، شرایط مرزی و پخشودگی طولی تا حصول به دقت مورد نیاز انجام گردید. شبیه‌سازی کیفی در آبخوان نیشابور برای دوره ۱۴ ساله مهرماه ۱۳۸۰ تا شهریورماه ۱۳۹۴ انجام گرفت و خطای محاسبه شده (برحسب RMSE) برای یون کلر در ایستگاه‌های پایش در حدود ۱/۷۸ میلی‌گرم در لیتر بدست آمد (شکل ۷).

پس از تهیه مدل جریان، به منظور بررسی تغییرات شوری (کیفیت آب‌یرزمینی) با استفاده از کد MT3DMS، انتقال یون کلر بصورت محلول در آبخوان شبیه‌سازی شد. سری زمانی یون کلر در ایستگاه‌های پایش کیفیت آب‌یرزمینی به عنوان داده مشاهده‌ای به مدل کیفی وارد شد.

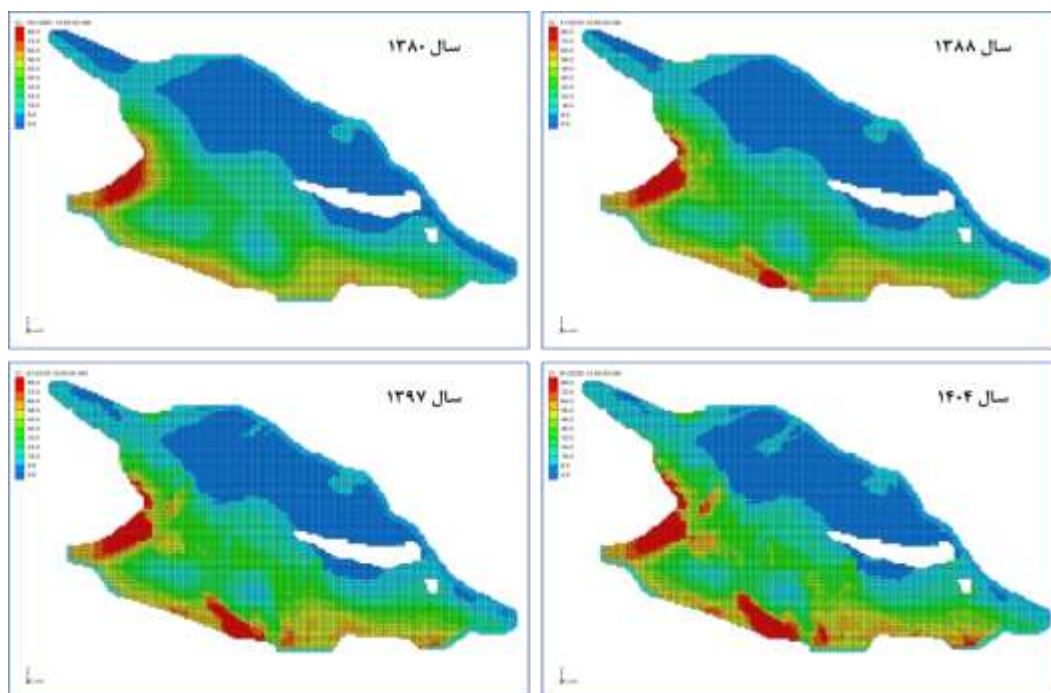
با توجه به عدم وجود داده‌های مربوط به پخش (شامل پخش طولی و عرضی) در محدوده آبخوان، مقدار اولیه این پارامترها با توجه به نوع دانه‌بندی رسوبات آبخوان و استفاده از مراجع معتبر موجود



شکل ۷- غلظت یون کلر در شرایط اولیه مدل انتقال جرم به همراه مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی غلظت یون کلر در چند نقطه پایش

افزایش شوری آبخوان ادامه خواهد یافت (شکل‌های ۸ و ۹). بطوریکه مساحت قسمت‌هایی از آبخوان که دارای آب با کیفیت است به تدریج کمتر خواهد شد و آب شور از حاشیه‌های جنوب شرق تا غربی آبخوان به سمت مرکز و شمال پیشروی خواهد داشت (شکل ۸).

پس از واسنجی مدل‌های جریان و انتقال جرم در آبخوان نیشابور، دو سناریو در مدل تعریف شد و اثرات آن تا شهریورماه سال ۱۴۰۴ توسط مدل بررسی شد. در سناریوی اول فرض شده است طی دوره - پیش‌بینی (۱۳۹۴ تا ۱۴۰۴) مقدار برداشت از آبخوان و میزان تغذیه مشابه شرایط کنونی باقی بماند. در این سناریو افت سطح آب و



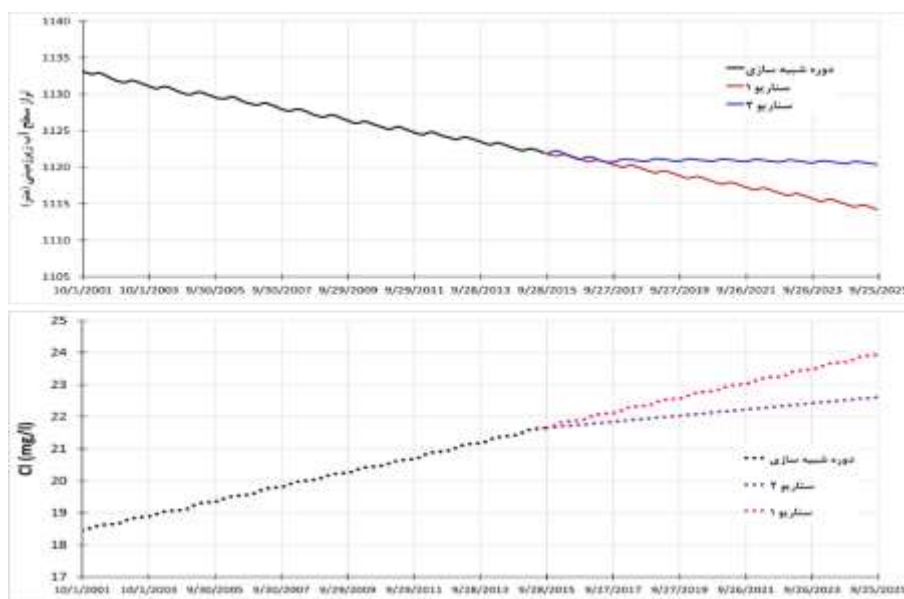
شکل ۸- تغییرات زمانی- مکانی غلظت یون کلر در آب‌زیرزمینی دشت نیشابور در دوره شبیه‌سازی و پیش‌بینی در سناریوی اول (ادامه روند کنونی)

سلول‌های فعال تعریف شدند. مطالعات هیدروژئوشیمی نشان داد که افزایش شوری آبخوان به دلیل وجود کانی‌های تیخیری و آب برگشت کشاورزی است. مدل جریان در شرایط نامانگار برای دوره ۱۰ ساله مهرماه ۱۳۸۰ تا شهریورماه ۱۳۹۰ با گام زمانی یک ماهه و با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای سطح آب‌زیرزمینی واسنجی و برای یک دوره ۴ ساله (مهرماه ۱۳۹۰ تا شهریورماه ۱۳۹۴) صحت‌سنجی شد. نتایج مدل نشان داد که مطابقت خوبی بین تراز آب‌زیرزمینی شبیه‌سازی- شده و مشاهده‌ای در زمان شبیه‌سازی دیده می‌شود. در مرحله بعد، اثر دو سناریوی ادامه روند کنونی و شرایط ۴۰ درصد کاهش برداشت از آبخوان تا سال ۱۴۰۴ پیش‌بینی شد. تحت سناریوی یک و ادامه روند کنونی تا افق ۱۴۰۴، هیدروگراف معرف آبخوان برای کل دشت افتی معادل ۰/۷۹ متر در سال نشان داد. همچنین سطح محدوده مدل‌سازی در جنوب‌شرق دشت بخاطر خشک‌شدن آبخوان در آن نواحی به سمت داخل پیشروی کرده و به تدریج کوچک و کوچک‌تر می‌گردد و شوری آب‌زیرزمینی بطور پیوسته افزایش می‌یابد.

سناریوی دوم، کاهش برداشت از آبخوان به منظور رسیدن تعادل در بیلان آب‌زیرزمینی می‌باشد. نتایج نشان داد که برداشت از آبخوان بایستی به میزان تقریبی ۴۰ درصد کاهش یابد تا بتوان به شرایط تعادلی دست یافت. در این سناریو فرض شد که مقدار تغذیه در طول دوره پیش‌بینی ثابت باشد و تخلیه‌ی کلیه‌ی چاه‌ها بطور مساوی در کل دشت کاهش یابد. حتی با در نظر گرفتن شرایط تعادلی در این سناریو، تراز آب‌زیرزمینی در نواحی شرق و جنوب شرق دشت همچنان دارای روندی کاهشی است و میانگین شوری آبخوان افزایش می‌یابد اما نرخ افزایش شوری ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۹).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل مفهومی و مدل ریاضی جریان آب‌زیرزمینی و انتقال جرم بصورت محلول برای شبیه‌سازی پیشرفت شوری در آبخوان نیشابور با استفاده از کدهای MODFLOW و MT3DMS انجام شد. پس از کسب شناخت از هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی منطقه، مدل عددی ایجاد شد و مرزهای مدل و تنش‌های وارد بر



شکل ۹- میانگین سطح آب زیرزمینی و غلظت یون کلر (شوری) در آبخوان نیشابور طی دوره‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی

پژوهش آب ایران، دوره ۶، شماره ۱۰.

سبحان اردکانی، س. ۱۳۹۵. ارزیابی آلودگی آرسنیک، روی، سرب، کادمیوم، کروم، مس و منگنز در منابع آب زیرزمینی دشت رزن همدان توسط شاخص‌های کیفیت آب. مجله دانشکده علوم پزشکی نیشابور. ۴ (۴): ۳۳-۴۵.

شفیعی، م. ۱۳۸۸. مدل سازی هیدرولوژیکی آب سطحی توسط مدل SWAT و GIS: مطالعه موردی حوضه آبریز نیشابور. پایان نامه دوره کارشناسی ارشد. دانشگاه فردوسی مشهد.

صابری مهر ص.، اصغری مقدم ا. و ندیری، ع. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و نفوذ آب شور در آبخوان ساحلی دشت شبستر با استفاده از نرم‌افزار GMS. فصلنامه کواترنری ایران. ۳ (۱): ۴۱-۵۱.

طائی سمیرمی، س.، مرادی، ح. خداعلی، م. ۱۳۹۳. بررسی تغییرات جریان رودخانه بار نیشابور تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم. فصلنامه انسان و محیط زیست، ۲۹: ۱-۱۹.

فرزانه، م.، باقری، علی. و رمضانی قوام آبادی، م. ۱۳۹۵. بنیان‌های نهادی بحران در مدیریت منابع آب زیرزمینی ایران. فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی، ۶۴: ۹۴-۵۷.

قبادیان، ر.، بهرامی، ز. ۱۳۹۵. بررسی عددی اعمال سناریوهای کمی و کیفی بر آبخوان دشت خزل استان همدان با مدل های MODFLOW و MT3DMS مرتع و آبخیزداری، ۶۹ (۴): ۱۰۶۲-۱۰۴۳.

تحت سناریوی دوم که هدف کاهش برداشت از آبخوان بمنظور نیل به وضعیت تعادلی در بیلان آب زیرزمینی می‌باشد، نتایج نشان داد که برداشت از آبخوان بایستی به میزان تقریباً ۴۰ درصد کاهش یابد تا بتوان به شرایط تعادلی دست یافت. همچنین بر اساس هیدروگراف واحد آبخوان، تراز آب زیرزمینی حداکثر تا ۰/۶۸ متر در انتهای دوره (شهریور ۱۴۰۴) افزایش نشان می‌دهد. نکته قابل توجه ادامه روند افزایش شوری آبخوان البته با نرخ به اندازه ۵۰ درصد کمتر از سناریوی اول می‌باشد. این موضوع نشان دهنده این واقعیت است که کاهش برداشت از آبخوان با نرخ یکسان برای همه چاه‌های بهره‌برداری ممکن است اهداف مدیریت منابع آب را برآورده نکند و برای مدیریت آبخوان نیاز به اطلاعات توزیعی می‌باشد.

مراجع

ایزدی، ع. ۱۳۹۲. کاربرد و ارزیابی یک مدل توسعه‌یافته تلفیقی آب زیرزمینی-آب سطحی در حوضه آبریز نیشابور. پایان نامه دوره دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد.

چیت‌سازان، م.، موسوی، ف.، میرزائی، ی. و رستگرازاده، س. ۱۳۹۱. مدیریت کمی و کیفی آبخوان دشت رامهرمز با استفاده از مدل ریاضی در MODFLOW و MD3DMS. زمین شناسی کاربردی پیشرفته. ۵ (۲): ۱-۸.

زمزم ع. و رهنما م. ب. ۱۳۹۱. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با مدل ریاضی MT3DMS (مطالعه موردی دشت رفسنجان). نشریه

- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A. N., Alipoor, A., Joodavi A. and Brusseau, M.L. 2013. A framework toward developing a groundwater conceptual model. *Arabian Journal of Geosciences*.
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A.N., Akhavan, S., Alipoor, A., Joodavi, A. and Brusseau, M.L. 2015. Groundwater conceptualization and modeling using distributed SWAT-based recharge for the semi-arid agricultural Neishaboor plain, Iran. *Hydrogeology Journal*. 23.1: 47-68.
- Karimi, L., Motagh, M., Entezam, I. 2019. Modeling groundwater level fluctuations in Tehran aquifer: Results from a 3D unconfined aquifer model. *Groundwater for Sustainable Development*. 8:439-449. DOI: 10.1016/j.gsd.2019.01.003
- Morán-Ramírez, J., Ledesma-Ruiz, R., Mählknecht, J. and Ramos-Leal, J.A. 2016. Rock-water interactions and pollution processes in the volcanic aquifer system of Guadalajara, Mexico, using inverse geochemical modeling. *Applied geochemistry*. 68: 79-94.
- Mukhopadhyay, A., Al-Sulaimi, J. and Marie Barrat, J. 1994. Numerical Modeling of Groundwater Resource Management Option in Kuwait, *Journal of groundwater*. 32(6).
- Negm A.M. and Eltarabily M.G.A. 2016. Modeling of Fertilizer Transport Through Soil, Case Study: Nile Delta. In: Negm A. (eds) *The Nile Delta. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 55. Springer, Cham.
- Yousefi, H., Zahedi, S., Niksokhan, M.H. et al. 2019. Ten-year prediction of groundwater level in Karaj plain (Iran) using MODFLOW2005-NWT in MATLAB. *Environmental Earth Sciences*. 78: 343. DOI: 10.1007/s12665-019-8340-y
- مشهدی میقانی، ل. و باغوند، ا. ۱۳۸۹. بررسی و مدل‌سازی آلودگی ناشی از زباله‌های محل دفن بر آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی آبخوان امان‌آباد). چهارمین همایش تخصصی مهندسی محیط - زیست، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط‌زیست.
- میبدی، ج. ۱۳۹۴. طرح تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی کشور، کارگاه حقوق آب ایران، پژوهشکده مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس.
- نظری، ر. و جودوی، ع. ۱۳۹۳. مدل‌سازی کاربردی جریان و انتقال آلاینده در آبخوان. چاپ اول، نشر آفتاب عالم‌تاب، مشهد، ۲۴۰ صفحه.
- Ansarifar, M.M., Salarijazi, M., Ghorbani, K. and Kaboli A.R. 2019a. Simulation of groundwater level in a coastal aquifer, *Marine Georesources & Geotechnology*, DOI: 10.1080/1064119X.2019.1639226
- Ansarifar, M.M., Salarijazi, M., Ghorbani, K. and Kaboli A.R. 2019b. Spatial estimation of aquifer's hydraulic parameters by a combination of borehole data and inverse solution. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. DOI: 10.1007/s10064-019-01616-w
- Baiwei, L. and Zhonghua, T. 2008. Investigation and Modeling of the Environment Impact of Landfill Leachate on Groundwater Quality at Jiaying, Southern China, *Journal of Environmental Technology and Engineering*.
- Chitrakar, P. and Sana, A. 2015. Groundwater Flow and Solute Transport Simulation in Eastern Al Batinah Coastal Plain, Oman: Case Study. *Journal of Hydrologic Engineering*.

Modeling the Groundwater Quality (Salinity) Variations in Neyshabour Plain Using MODFLOW and MT3DMS

P. Taherian¹, H. Ansary*², K. Davari³, A. Naghi Ziai, A. Beheshti⁵

Received: Oct.30, 2019

Accepted: Dec.03, 2019

Abstract

In this study, MODFLOW and MT3DMS codes were used to evaluate changes in groundwater quality in Neyshabour plain under different scenarios. During developing the conceptual model, it was found that the aquifer salinity increased due to the presence of fine alluvium and evaporite minerals in the margins of the plain and agricultural return flow. Groundwater models was calibrated under transient condition for 10 years from October 2001 to September 2011 and validated for a 4-year period (October 2011 to September 2015). Quantitative comparison of the head and Cl data in all the observation points indicated a reasonable match between the observed and the calculated values. The root mean squared error (RMSE) was 1.92 m and 1.65 m for the calibration and validation periods in the flow model, and the RMSE was 2 mg/l for the mass transport model in Neyshabour aquifer. The MODFLOW and MT3DMS models were used to simulate the effect of the two scenarios: (1) continue the current trend in groundwater withdrawals and (2) 40% reduction in groundwater withdrawals has been examined by the model. In the first scenario, the average groundwater level showed annual loss of 0.79 m and increasing in the groundwater salinity. Under the second scenario, which aimed to achieve equilibrium status in the groundwater balance, pumping rate for all wells were reduced by 40%. The results showed that although the average water level in the aquifer does not decrease, the groundwater salinity is still increasing, with a rate of 50% lower than in comparison to the first scenario. This reflects the fact that reduced groundwater withdrawals at the same rate for all wells may not meet water resource management goals and groundwater management requires distributed information about the aquifer.

Keywords: Mass transport modeling in aquifer, Groundwater salinity, MODFLOW, MT3DMS, Neyshabour plain

1- PhD Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

4- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

5- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

(* - Corresponding Author Email: ansary@um.ac.ir)

مقاله علمی-پژوهشی

پیش‌بینی مقادیر دما و بارش استان اصفهان براساس دو مدل ریزمقیاس نمایی Lars_WG و SDSM و روش شبکه عصبی مصنوعی

آرین زرفشانی^۱، محمدحسین جهانگیر^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴

چکیده

گام‌های زمانی و مکانی مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) در مقیاس قاره‌ای و جهانی است. بنابراین برای آگاهی از وضعیت یک ایستگاه محلی با استفاده از این مدل‌ها نیاز است که مدل‌ها براساس رفتارهای محلی داده‌های ایستگاه عمل کنند. بنابراین ریزمقیاس‌سازی انجام می‌گیرد. در این مطالعه با استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی SDSM، Lars_WG و روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به وسیله داده‌های مشاهداتی به دست آمده از ۶ ایستگاه سینوپتیک استان اصفهان به پیش‌بینی دما و بارش این ایستگاه‌ها از سال ۱۴۰۰ تا سال ۱۴۲۸ پرداخته شده است. ضریب همبستگی پیرسون (r) و ضریب تعیین (R^2) و بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های منتخب سناریوی CanESM2 در تمامی ایستگاه‌ها بالای ۰/۶ است و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز در تمامی ایستگاه‌ها قابل قبول است و از این رو شبیه‌سازی خوبی صورت گرفته است. براساس نتایج به دست آمده دمای استان اصفهان از سال ۱۴۰۰ تا سال ۱۴۲۸ افزایش تدریجی داشته و براساس مدل‌سازی توسط SDSM در سال ۱۳۸۴ دارای کمترین مقدار و در سال ۱۴۲۶ بیشترین مقدار را داشته است و اختلاف دمای این سال‌ها تقریباً برابر ۲/۳ درجه سانتی‌گراد است که بیان می‌کند دما به این میزان افزایش خواهد یافت و مقادیر بارش در سال ۱۴۰۵ و ۱۴۰۶ بیشترین هستند که ایستگاه داران که بارندگی بیشتری نسبت به دیگر ایستگاه‌ها دارد، تقریباً برابر ۲/۳ میلی‌متر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه سینوپتیک، زمانی، مکانی، همبستگی پیرسون، GCM

مقدمه

شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی ناشی از گازهای گلخانه‌ای ارائه شد (مساح بوانی و مرید، ۱۳۸۴). بررسی نشان می‌دهند که کمترین تغییر در میزان بارش و دما، زیان‌های بسیار زیادی به کشاورزی و اقتصاد وارد می‌کند (زابل عباسی و همکاران، ۱۳۸۹)، انتظار می‌رود که تغییرات در دما و بارش تأثیر قابل توجهی بر منابع آب در دسترس آینده بگذارد (آشفته و حداد، ۱۳۹۲). کاربرد پیش‌بینی -های اقلیمی در برنامه‌ریزی‌های کلان‌کشوری است و در مدیریت بحران در هنگام وقوع بلاهای طبیعی آگاهی از اقلیم آینده ضروری است. مدل‌های گردش‌های عمومی جو (GCM) سه بعدی بوده و قادرند سیستم‌های اقلیمی را با لحاظ نمودن اکثر فرایندها در مقیاس جهانی و قاره‌ای شبیه‌سازی کنند. مدل‌های گردش عمومی، خود شامل دودسته کلی می‌شوند: مدل‌های AGCMs که برهمکنش اتمسفر را در نظر می‌گیرند و مدل‌های OGCMs که تأثیر متقابل اقیانوس‌ها را در نظر می‌گیرند و معمولاً مدل‌های گردش عمومی ترکیبی از دودسته AGCM و OGCM را شامل می‌شوند. از به هم پیوستن مدل‌های

موضوع تغییر اقلیم از اواخر قرن نوزدهم میلادی با روند گرم شدن هوا به صورت جدی به میان آمد. عوامل گوناگونی که بر اقلیم اثرگذارند می‌توانند باعث تغییرات به شکل سالیانه و دراز مدت شوند. این تغییرات دراز مدت اقلیمی تحت تأثیر گرمایش جهانی ناشی از تشدید گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. از این‌رو به منظور شبیه‌سازی دما و بارش که در بررسی تغییر اقلیم نقش عمده‌ای دارند، مدل‌های گردش‌های عمومی جو (GCM) در دهه‌ی ۵۰ میلادی به منظور

۱- کارشناسی ارشد اکوهیدرولوژی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، ایران

۲- استادیار گروه انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، ایران

* نویسنده‌ی مسئول: (Email: mh.jahangir@ut.ac.ir)

روش ریزمقیاس‌نمایی دو مدل SDSM و شبکه عصبی براساس داده‌های بارش در جنوب شرقی ایران انجام گرفت براساس نتایج حاصل مدلسازی SDSM کارایی بیشتری دارد (Karamouz et al., 2009). در پژوهشی در سال ۲۰۱۱، تغییرات فصلی بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعات آفتابی استان خراسان در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ با استفاده از مدل LARS_WG ریزمقیاس‌شده‌است و شبیه‌سازی انجام گرفته‌است (Ashraf et al., 2011). در سال ۱۳۹۰، اثر گرمایش جهانی بر متغیرهای بارش و دما و شاخص‌های الگوی کشاورزی با استفاده از مدل LARS_WG بررسی شد (باباییان و همکاران، ۱۳۸۶). در سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱ روی داده SDSM و الگوی ریزمقیاس‌نمایی آماری را که عبارتند از: مدل مارکف پنهان-نا-همگن NHMM و مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM روی داده‌های بارش روزانه دریاچه‌ی خشک شده‌ی تاریخیم در چین ارزیابی کردند. ابزار مقایسه در این پژوهش توابع باقیمانده، تحلیل‌های همبستگی و توابع چگالی و توزیع احتمالی بود. براساس نتایج این پژوهش، عملکرد مدل‌سازی بارش ماهانه‌است؛ به طوری که کاربر قادر خواهد بود بارش را به خوبی برای همه‌ی ماه‌ها شبیه‌سازی کند (Liu et al. 2011). در مطالعه‌ی از SDSM برای داده‌های مشاهداتی دما و بارش روزانه از سال ۱۹۸۷ تا سال ۲۰۰۶ با استفاده از الگوی جهانی HadCM3 استفاده شد و براساس نتایج به‌دست‌آمده مقادیر داده‌های مشاهداتی و داده‌های مدلسازی شده به یکدیگر نزدیک بوده‌است (Nury and Alam, 2014). در مطالعه‌ی، برای کاهش فاصله بین خروجی‌های مدل گردش عمومی با مقیاس بزرگ (GCM) و نیاز به اطلاعات آب و هوایی با وضوح بالا در یک منطقه نیمه خشک، از کوچک‌سازی آماری و پویا (SD و DD) استفاده شده‌است و تغییرات روزهای مرطوب و مقدار بارش از طریق هر دو روش، تجزیه و تحلیل شده‌است و نتایج نشان داده‌است که روش SD نسبت به DD به زمان و قدرت محاسباتی کمتری نیاز دارد. روش DD با توجه به کارایی در طول دوره ارزیابی عملکرد بهتری داشته‌است (Salehnia et al., 2019). براساس مطالعه‌ی که بر روی شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSM) انجام گرفت، وضعیت خشکسالی استان فارس در ایران با توجه به داده‌های هواشناسی از شش ایستگاه هواشناسی در استان ارزیابی شد. برای اعمال نتایج خروجی مدل گردش عمومی در استان فارس، از SDSM استفاده شد. نتایج نشان داد که دوره‌های خشک در سه دهه آینده در مقایسه با داده‌های گذشته افزایش می‌یابد، همچنین بالاترین خشکسالی در ایستگاه‌های هواشناسی آباد و لار در طول دوره پیش‌بینی تحت دو سناریوی آینده RCP4/5 و RCP8/5 رخ داده‌است (Dehghan et al., 2020). در مقاله‌ی، به منظور کوچک‌سازی حداکثر دما و پیش‌بینی‌های بارش، عملکرد سه تکنیک کوچک‌سازی آماری شامل SDSM، LARS-WG، ANN در شمال غربی ایران مقایسه شد.

اقیانوسی و مدل‌های جوی، مدل‌های اقیانوسی - جوی (AOGCM) به وجود می‌آیند و در شبیه‌سازی تغییر اقلیم استفاده می‌شوند. محاسبات این مدل‌ها به این شکل است که در شبکه‌های سه بعدی، با مقیاس مکانی افقی ۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر و ۱۰ تا ۲۰ لایه در بخش جوی و ۳۰ لایه در بخش اقیانوسی انجام می‌گیرد. وضوح مکانی افقی مدل‌ها در سطح خشکی‌های کره‌ی زمین ۲۵۰ کیلومتر و دقت مکانی قائم آن برابر یک کیلومتر است. درحالی‌که وضوح مکانی قائم در مدل‌های اقیانوسی ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر و وضوح مکانی افقی برابر ۱۲۵ تا ۲۵۰ کیلومتر است. مدل‌های گردش عمومی اقیانوسی - جوی در چند دهه اخیر با افزایش قدرت رایانه‌ها توسعه چشم‌گیری یافته‌اند. پس از انتخاب مدل گردش عمومی جو، ضروری است که از مدل ریزمقیاس‌شده‌ای استفاده شود که بتوان رفتارهای اقلیمی را درمقیاس ایستگاهی شبیه‌سازی کرد (مدرسی و همکاران، ۱۳۹۰). کلیه روش‌های ریزمقیاس‌نمایی را می‌توان در چهار گروه پویا، سینوپتیکی، آماری و تابع انتقالی، جای داد (Wilby et al., 2002). شبیه‌سازی توسط شبکه عصبی به دلیل توانایی بالای آن در فراهم کردن روابط غیر خطی بین پیش‌بینی‌کننده و پیش‌بینی شونده کاربرد وسیعی دارد (احمدی باصری و همکاران، ۱۳۹۲). در مطالعه‌ی در انگلستان در سال ۲۰۰۵، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مدل (SDSM) اندازه‌ی بارندگی را در انگلستان پیش‌بینی نمودند (Harpham and Wilby, 2005). در سال ۲۰۰۶ در مطالعه‌ی، سه روش ریزمقیاس‌نمایی که عبارتند از: مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM)، مدل مولد آب و هوایی ایستگاه تحقیقاتی لانگ آستن (LARS_WG) و الگوی شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)، از راه آزمون‌های عدم قطعیت برای سه مؤلفه، بارش روزانه، کمینه و بیشینه‌ی دمای روزانه، با یکدیگر مقایسه شدند و براساس نتایج مطالعه مدل SDSM بیشترین کارایی را داشته است (Khan et al., 2006). مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری بوده و از مزیت‌های این مدل می‌توان به، باصرفه بودن، سادگی و سرعت بالا در فرایند ریزمقیاس‌سازی ناحیه‌ای اشاره کرد (Xu, 1999). در سال ۱۳۸۴ به منظور ریزمقیاس‌نمایی مدل گردش عمومی از شبکه عصبی مصنوعی و SDSM استفاده شد و نتیجه حاصل نشان داد که برای ریزمقیاس‌نمایی بارش شبکه عصبی مصنوعی کاربرد بیشتری دارد (مساح بوانی و مرید ۱۳۸۴). در سال ۱۳۸۶ در مطالعه‌ی اقلیمی ایران را در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ را با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری خروجی مدل ECHO_G با بکارگیری مدل LARS_WG مدلسازی شده‌است، براساس نتایج به دست آمده، بارش کل کشور کاهش ۹ درصدی خواهد داشت و افزایش میانگین سالانه‌ی دما به مقدار ۰/۵ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد (باباییان و کوهی ۱۳۹۱). در سال ۲۰۰۹ با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بارش ماهانه‌ی اردن پیش‌بینی شده‌است (Aksoy and Dahamsheh, 2009). در سال ۲۰۰۹

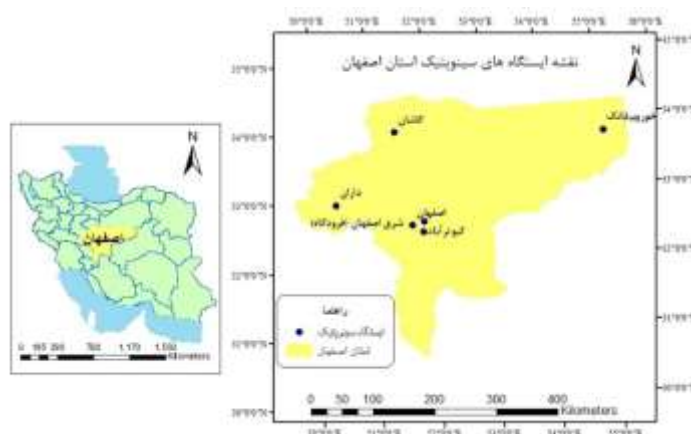
واقع شده است که مرکز آن شهر اصفهان است. این استان از شمال به سمنان، قم و مرکزی، از جنوب به یزد و فارس، از مشرق به خراسان و از مغرب به لرستان، خوزستان، چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد محدود می شود. مساحت این استان تقریباً ۶/۶ درصد از مساحت کل کشور را تشکیل داده است. استان اصفهان ششمین استان پهناور و سومین استان پرجمعیت ایران است. این استان بین ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی خط استوا و ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی نصف النهار گرینویچ، واقع شده است. در شکل ۱ نقشه‌ی منطقه‌ی مطالعه‌ی مطالعاتی به همراه ایستگاه‌های سینوپتیک، آورده شده است. در جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک آورده شده است.

یافته‌ها عملکرد برتر مدل ANN را برای حداقل و حداکثر دما نشان می‌دهد، در حالی که برای پیش‌بینی بارش، SDSM بهترین عملکرد را در بین مدل‌ها داشته است (Baghanam et al., 2020). در این مطالعه با استفاده از مدل‌های SDSM, LARS_WG و شبکه عصبی مصنوعی، با استفاده از داده‌های مشاهداتی به دست آمده از ایستگاه‌های سینوپتیک استان اصفهان، پیش‌بینی پارامترهای دما و بارش تا سال ۱۴۲۸ (۲۹ سال آینده) انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان اصفهان با مساحت ۱۰۷۰۲۷ کیلومتر مربع در مرکز کشور



شکل ۱ - نقشه‌ی مورد مطالعه‌ی استان اصفهان، موقعیت مکانی ۶ ایستگاه سینوپتیک

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه و دقیقه)	عرض جغرافیایی (درجه و دقیقه)	ارتفاع (متر)
اصفهان	۵۱٫۶۶	۳۲٫۶۱	۱۵۵۰٫۴
شرق اصفهان (فرودگاه)	۵۱٫۸۶	۳۲٫۶۶	۱۵۴۳
کاشان	۵۱٫۴۵	۳۳٫۹۸	۹۲۸٫۳
داران	۵۰٫۳۶	۳۲٫۹۶	۲۲۹۰
خوروویابانک	۵۵٫۰۸	۳۳٫۷۸	۸۴۵
کبوترآباد	۵۱٫۸۵	۳۲٫۵۱	۱۵۴۵

آب‌وهوایی آماری می‌باشد. این روش دارای چهار بخش اصلی می‌باشد که شامل تعیین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، واسنجی مدل، صحت‌سنجی مدل و شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی تحت سناریوهای گزارش پنجم برای دوره‌ی آینده می‌باشد. برای بررسی وضعیت تغییر اقلیم یک منطقه به داده‌های اقلیمی حداقل سی سال نیاز است که بر همین اساس ایستگاه‌های سینوپتیک فوق انتخاب شده‌اند.

به منظور بررسی اقلیم استان اصفهان، پیش‌بینی مقادیر دما و بارش از سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۴۲۸ توسط مقادیر روزانه شش ایستگاه سینوپتیک واقع در این استان طی دوره‌ی سی ساله از سال ۱۳۶۸-۱۳۹۸ انجام گرفت.

مدل SDSM

روش SDSM ترکیب دو روش رگرسیون خطی چندگانه و مولد

مدل CanESM2

داده‌های CanESM2 سری‌های زمانی روزانه بلندمدت استاندارد شده هستند که برای هر گریڈسل تهیه شده‌است. این مدل نسل دوم مدل کانادایی سامانه زمین می‌باشد که به وسیله‌ی CCCma ارائه شده‌است. ریزمقیاس‌نمایی مدل CanESM2 با کاربرد روش SDSM به عنوان یک روش آماری ریزمقیاس‌نمایی، به منظور ایجاد رابطه‌ی کمی بین متغیرهای بزرگ مقیاس، مدل گردش عمومی جو و متغیرهای مشاهداتی ریزمقیاس، انجام می‌شود. برای انتخاب بهترین سناریو از مدل CanESM2 که مقادیر آن بیشترین نزدیکی و کمترین خطا را با داده‌های مشاهداتی داشتند از شبیه‌ساز SDSM استفاده شد که محاسبه خطا به وسیله‌ی ضریب تعیین (R^2) و ضریب همبستگی پیرسون r و RMSE بررسی شده‌است و در نهایت با کمک سناریوی (RCP8.5) و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ی ncps500gl و ncptempgl ریزمقیاس‌نمایی انجام شده‌است. یکی از مهم‌ترین مراحل مدل ریزمقیاس‌نمایی، انتخاب متغیرهای توضیحی است که به‌طور قابل‌قبولی بتواند تغییرات و ویژگی‌های پارامترهای ایستگاهی موردنظر را توصیف کند؛ که این متغیرها باید از متغیرهای NCEP انتخاب شود. متغیرهای NCEP شامل ۲۶ متغیر اتمسفری است و از میان آن‌ها متغیر یا متغیرهایی انتخاب می‌شوند که دارای بالاترین میزان همبستگی می‌باشد و به عنوان متغیرهای توضیحی جهت پیش‌بینی پارامترهای دما و بارش وارد معادله‌ی رگرسیونی مدل SDSM می‌شوند.

ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)

RMSE مخفف کلمه Root Mean Square Error و به معنی میانگین مربع خطاها می‌باشد. RMSE میزان خطای بین دو مجموعه داده را اندازه‌گیری می‌کند. این پارامتر معمولاً مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده را با یکدیگر مقایسه می‌کند. هرچه مقادیر RMSE کمتر باشند، همبستگی داده‌ها دارای بیشترین دقت است (Chai and Draxler, 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^t (p_i - o_i)^2}{n}} \quad (1)$$

در رابطه فوق p_i مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر o_i مقادیر مشاهده شده هستند.

ضریب تعیین (R^2)

اندازه‌گیری آماری نزدیک داده‌ها به خط رگرسیون برآزش شده می‌باشد. ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیر وابسته به وسیله متغیر مستقل تبیین می‌شود. (Alexander et al., 2015).

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^k (X_k Y_k)}{\sum_{k=1}^k (X_k)^2 \sum (Y_k)^2} \quad (2)$$

در رابطه فوق، X_k مقادیر مشاهداتی و Y_k مقادیر پیش‌بینی شده

و k تعداد داده‌ها می‌باشند.

ضریب همبستگی پیرسون (r)

ضریب همبستگی پیرسون بین ۱ و -۱ تغییر می‌کند $r=1$ بیانگر رابطه مستقیم کامل بین دو متغیر است، رابطه مستقیم یا مثبت به این معناست که اگر یکی از متغیرها افزایش پیدا کند، متغیر دیگر نیز افزایش می‌یابد $r=-1$ وجود یک رابطه معکوس کامل بین دو متغیر را نشان می‌دهد که با افزایش یک متغیر، متغیر دیگر کاهش می‌یابد. در این پژوهش به دلیل اینکه مقدار همبستگی داده‌های مشاهداتی با سناریوهای اقلیمی مدنظر است از مثبت یا منفی بودن این ضریب در نظر گرفته نشده‌است و سناریوهای منتخب براساس نزدیکی به +۱ یا -۱ در نظر گرفته شده‌اند (Wang, 2012):

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n(\sum x^2) - (\sum x)^2][n(\sum y^2) - (\sum y)^2]}} \quad (3)$$

در رابطه فوق، X_k مقادیر مشاهداتی و Y_k مقادیر پیش‌بینی شده و k تعداد داده‌ها می‌باشند.

به‌منظور استفاده از مدل CanESM2 که دارای سناریوهایی با دو بازه زمانی ۱۹۶۱-۲۰۰۶ و ۲۰۰۶-۲۱۰۰ است، ابتدا داده‌های مشاهداتی دما و بارش ایستگاه‌های سینوپتیک از سال ۱۹۸۹-۲۰۰۶ را با داده‌های حاصل از سناریوی (RCP8.5) در سال‌های ۱۹۸۹-۲۰۰۶ مقایسه کرده و سناریوهایی که بیشترین ضریب همبستگی پیرسون و ضریب تعیین را داشتند، انتخاب شدند (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ی ncps500gl و ncptempgl)، سپس به وسیله مقادیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ی منتخب، ریزمقیاس‌نمایی انجام شده‌است.

مدل Lars_WG

این مدل نیز یک مدل ریزمقیاس‌نمایی است که به وسیله‌ی آن در این مطالعه، مدل EC-EARTH ریزمقیاس‌سازی شده‌است و پیش‌بینی داده‌های دما و بارش به صورت ۱۰ ساله ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه، توسط مدل Lars_WG و مدل EC-EARTH انجام گرفت. این مدل از سه بخش تشکیل شده‌است؛ کالیبراسیون، ارزیابی و تولید یا شبیه‌سازی داده‌های دهه‌های آینده. به منظور کالیبراسیون لازم است که فایلی که مشخص‌کننده‌ی رفتار اقلیمی گذشته است را در اختیار داشت این فایل با استفاده از داده‌های روزانه بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعات آفتابی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه به تولید و پیش‌بینی بارش و دمای این ایستگاه‌ها پرداخته است.

شبکه عصبی مصنوعی

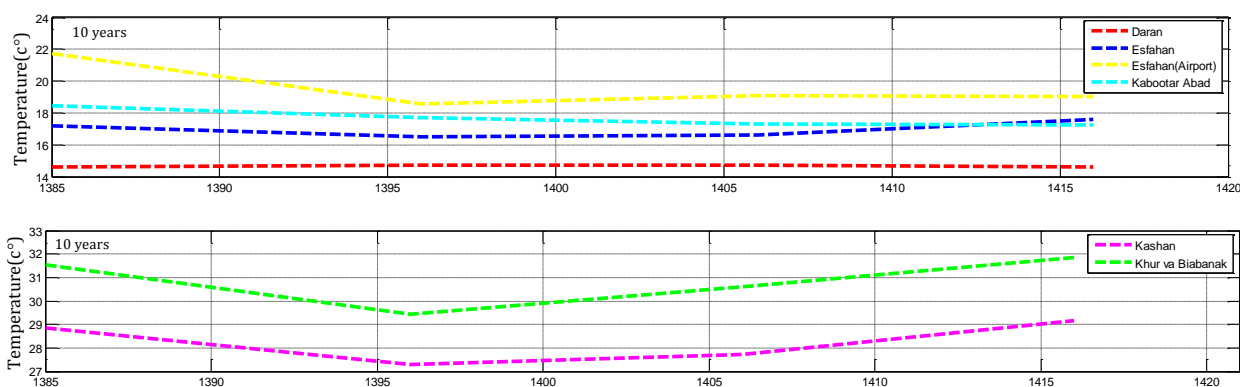
یک شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network - ANN) ایده‌ای برای پردازش اطلاعات است که از سیستم عصبی زیستی الهام گرفته‌است و همانند مغز به پردازش اطلاعات می‌پردازد.

نتایج و بحث

نمودارهای حاصل از نتایج از سال ۱۴۱۶-۱۴۰۰ هستند زیرا به منظور پیش‌بینی از ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش مدل استفاده شده‌است و ۳۰٪ داده‌ها به منظور امتحان و صحت‌سنجی استفاده شده‌اند، بنابراین پیش‌بینی از سال ۱۴۰۰ شروع شده‌است و پیش‌بینی تا سال ۱۴۱۶ توسط (LARS-WG) و ۱۴۲۸ توسط (SDSM) انجام گرفته‌است.

نتایج به‌دست‌آمده از مدل LARS_WG:

شکل ۲، نشان‌دهنده‌ی مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی دما به صورت دهه‌ای در بازه زمانی ۱۳۸۵-۱۴۱۶ است که توسط مدل EC-EARTH، مدل‌سازی انجام شده‌است.



شکل ۲- نمودارهای پیش‌بینی مقادیر دما در بازه‌ی زمانی ۱۴۱۶-۱۳۸۵ به صورت ده ساله

شکل ۳، حاصل نتایج پیش‌بینی بارش به صورت ۱۰ ساله، در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۴-۱۴۱۶ است و توسط مدل EC-EARTH، مدل‌سازی انجام شده‌است.

براساس پیش‌بینی‌های انجام گرفته در شکل ۳، ایستگاه داران در سال ۱۴۰۵ دارای بیشترین مقدار بارش در مقایسه با دیگر ایستگاه‌هاست و همچنین دارای بیشترین مقدار بارش در بازه‌ی زمانی موردنظر است، که مقدار بارش برابر با ۲/۳۵ میلی‌متر خواهد بود و ایستگاه خوروبابانک دارای کمترین بارش به نسبت دیگر ایستگاه‌هاست و مقدار بارش در سال ۱۳۸۵ برابر با ۰/۳ میلی‌متر بوده است، در حالت کلی سال ۱۴۱۵ بیشترین مقدار بارش در بازه‌ی زمانی موردنظر در تمامی ایستگاه‌ها رخ خواهد داد و در ایستگاه‌های داران، کبوترآباد، فرودگاه اصفهان، کاشان و خور و بیابانک در سال ۱۳۸۵ کمترین مقدار بارش رخ داده‌است و در ایستگاه‌های اصفهان کمترین مقدار بارش در بازه‌ی زمانی بین ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ رخ داده‌است.

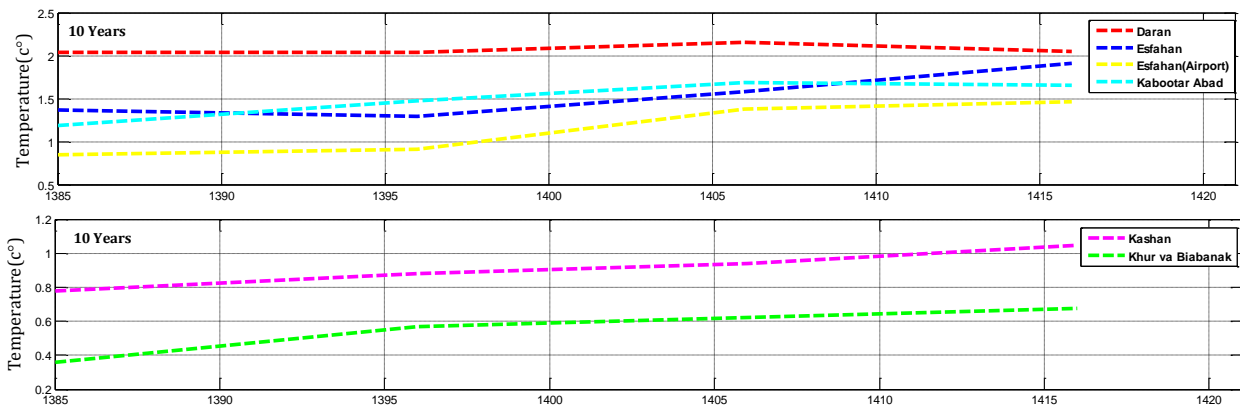
این سیستم از شمار زیادی عناصر پردازشی پیوسته به یکدیگر به نام نورون‌ها تشکیل شده‌است که برای حل یک مسأله هم‌انگ با یکدیگر عمل می‌کنند. یک شبکه عصبی همانند مغز انسان یاد آموزش می‌بیند، یاد می‌گیرد و در نهایت نتیجه‌گیری می‌کند. در این مطالعه از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مقادیر دمای روزانه استفاده شد، در این مطالعه از شبکه عصبی با ۲۰ لایه برای رسیدن به نتیجه دقیق‌تر استفاده شده‌است. برای این منظور ۷۰٪ داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های مورد مطالعه به منظور آموزش، ۱۵٪ آنها برای صحت‌سنجی و ۱۵٪ آنها برای امتحان استفاده شده‌اند. داده‌های دمای روزانه‌ی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه را به‌منظور آموزش در اختیار شبکه عصبی قرار گرفته‌اند و توسط آنها داده‌های دمایی برای سال‌های آینده به‌دست‌آمده‌است.

شکل ۲، نشان می‌دهد که دمای ایستگاه‌های کاشان و خوروبابانک به نسبت ایستگاه‌های دیگر بیشتر است و اختلاف دمای ایستگاه داران و خور و بیابانک در سال‌هایی، ۱۴ درجه سانتی‌گراد است و در سال‌های بین ۱۳۹۵ و ۱۴۰۰ کمترین دما در این بازه‌ی زمانی (۱۳۸۴-۱۴۱۸) در کل ایستگاه‌های مورد مطالعه اتفاق خواهد افتاد و میانگین دمای سالانه در ایستگاه داران که سردترین ایستگاه است تقریباً به صورت دائم ۱۴ درجه‌ی سانتی‌گراد است، همچنین ایستگاه‌ها در سال ۱۳۸۵ و ۱۴۱۵ بیشترین دما را در این بازه داشته‌اند و میانگین دمای سالانه در ایستگاه خور و بیابانک که گرم‌ترین ایستگاه است به ۳۲ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید، تغییرات دما در ایستگاه داران دارای نوسان کمی است و ایستگاه‌های خوروبابانک و کاشان دارای بیشترین تغییرات دما در مقایسه با دیگر ایستگاه‌های مورد مطالعه هستند و اختلاف کم‌ترین و بیشترین دمای میانگین سالانه در ایستگاه خور و بیابانک برابر با ۴ درجه سانتی‌گراد و در ایستگاه کاشان برابر ۳ درجه سانتی‌گراد است.

نتایج به دست آمده از مدل SDSM

ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه آورده شده‌است که بیانگر دلیل انتخاب سناریوهای مدنظر است.

در جدول ۲، ضریب همبستگی پیرسون و ضریب تعیین برای هر



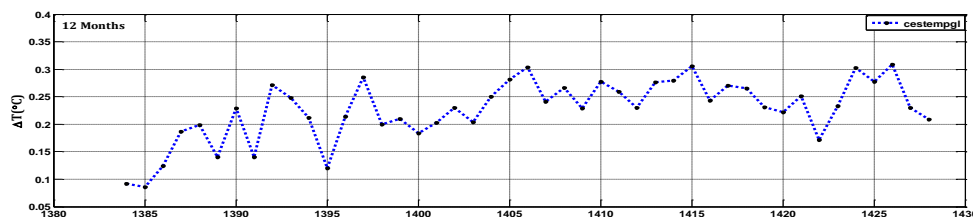
شکل ۳- نمودارهای پیش‌بینی مقادیر بارش در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۵-۱۴۱۶ به صورت ده ساله

جدول ۲- مقادیر r و R² و RMSE داده‌های مشاهداتی و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ی منتخب، ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceptempgl		متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceps500gl		ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)
	ضریب همبستگی پیرسون (r)	ضریب تعیین (R ²)	ضریب همبستگی پیرسون (r)	ضریب تعیین (R ²)	
اصفهان	۰/۹۲	۰/۸۹	۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۵۵
شرق اصفهان	۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۳۸
کاشان	۰/۶۸	۰/۶۲	۰/۸۱	۰/۸۹	۰/۳
داران	۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۷۲	۰/۷	۰/۴۶
خوروبیابانک	۰/۹۳	۰/۸۸	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۵۱
کبوترآباد	۰/۸۴	۰/۸	۰/۷۲	۰/۶۶	۰/۴۹

همانطور که در جدول ۲، مشاهده می‌شود مقادیر ضرایب تعیین و همبستگی پیرسون، نسبت به متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceptempgl، در ایستگاه‌های اصفهان، داران، خور و بیابانک و کبوترآباد بسیار بالا و نزدیک به ۱ هستند و در مقایسه با مقادیر ضرایب به‌دست‌آمده برای متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceps500gl از مقادیر بالاتری برخوردار هستند و مقادیر RMSE نیز قابل قبول است، همچنین مقادیر ضرایب به‌دست‌آمده در ایستگاه‌های شرق اصفهان و کاشان نسبت به متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceps500gl از نتیجه مطلوب‌تری برخوردار هستند، بنابراین در ایستگاه‌های اصفهان، داران، خور و بیابانک و کبوترآباد به منظور مدل‌سازی مقادیر دما از متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی

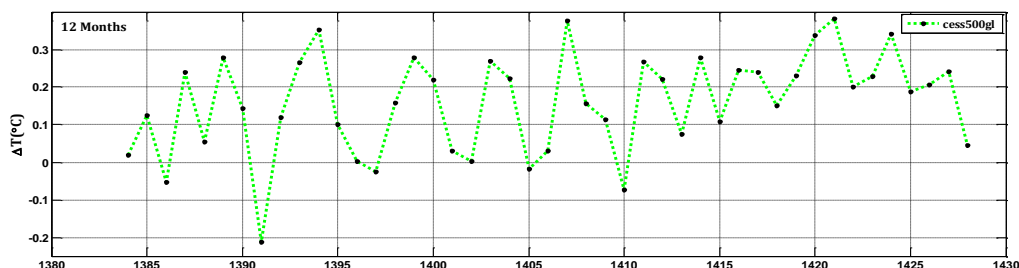
نceptempgl و در ایستگاه‌های شرق اصفهان و کاشان از متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceps500gl به منظور مدل‌سازی دما استفاده شده‌است. شکل ۴، تغییرات دما را به وسیله‌ی متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceptempgl نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۴، مدل‌سازی به‌وسیله‌ی مدل SDSM و مدل CanESM2 انجام شده‌است، مقادیر مشاهداتی ایستگاه‌های اصفهان، داران، خور و بیابانک و کبوترآباد، در سال‌های ۱۳۳۹-۱۳۸۴ با مقادیر سال‌های مشابه در متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceptempgl دارای ضریب همبستگی پیرسون و ضریب تعیین و RMSE بسیار خوبی هستند که در جدول ۲ این مقادیر آورده شده‌است.



شکل ۴- تغییرات دما در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۴-۱۴۲۸ به صورت سالانه با استفاده از متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceptempgl

در شکل ۴، متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceptempgl به منظور مدل‌سازی دما برای ایستگاه‌های اصفهان، داران، خورویابانک و کبوترآباد، انتخاب شد. به دلیل اینکه مقادیر ضرایب r و R^2 و RMSE حاصل از مقایسه مقادیر مشاهداتی این ایستگاه‌ها و مقادیر به‌دست‌آمده از متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceptempgl مطلوب هستند، می‌توان مدل‌سازی خوبی انجام داد. براساس نتایج شکل ۴، دما در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۴-۱۴۲۸ در ایستگاه‌های اصفهان، داران، خورویابانک و کبوترآباد، به تدریج افزایش می‌یابد و در سال ۱۴۲۶ ایستگاه‌های مذکور دارای بیشترین دمای خود هستند و در سال ۱۳۸۵ کمترین دما را داشته‌اند و اختلاف دما بین سردترین سال و گرم‌ترین سال برابر با $0/23$ درجه سانتی‌گراد است. به عبارتی سال

۱۴۲۶ دما به نسبت سال ۱۳۸۵ به مقدار $0/23$ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. شکل ۵، تغییرات دما را به وسیله‌ی متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceps500gl نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی SDSM و مدل CanESM2، مقادیر مشاهداتی ایستگاه‌های شرق اصفهان (فرودگاه) و کاشان در سال‌های ۱۳۸۴-۱۳۳۹ با مقادیر سال‌های مشابه با متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceps500gl دارای ضریب همبستگی پیرسون و ضریب تعیین و RMSE بسیار خوبی هستند. بنابراین با استفاده از مقادیر سال‌های ۱۳۸۴-۱۴۲۸ و متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceps500gl مدل CanESM2، تغییرات دما در ایستگاه‌های شرق اصفهان (فرودگاه) و کاشان به دست آمده‌است.



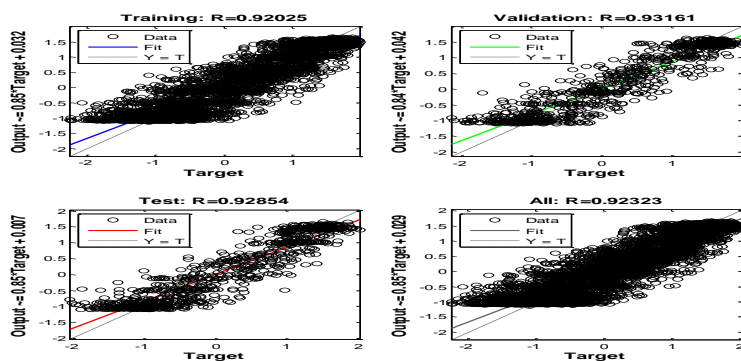
شکل ۵- تغییرات دما در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۴-۱۴۲۸ به صورت سالانه با استفاده از متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceps500gl

در بازه‌ی زمانی، سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۴۱۹ است. شکل ۷، میانگین مربعات خطا (mse) را بین داده‌های مشاهداتی دما و داده‌های پیش‌بینی‌شده‌ی دما در ایستگاه سینوپتیک اصفهان، در بازه‌ی زمانی، سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۴۱۹، نشان می‌دهد. در شکل ۶، آشکار است که داده‌های مشاهداتی و داده‌های پیش‌بینی‌شده با یکدیگر همبستگی بسیار خوبی دارند. همانطور که در قسمت مواد و روش‌ها گفته شد، مقدار R هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد، بیانگر تشابه بیشتر بین رفتار داده‌های تولیدشده و رفتار داده‌های مشاهداتی است، که با توجه به شکل ۶ مقدار R برابر $0/92$ است. بنابراین می‌توان گفت پیش‌بینی انجام‌شده احتمال وقوع بسیار زیادی دارد.

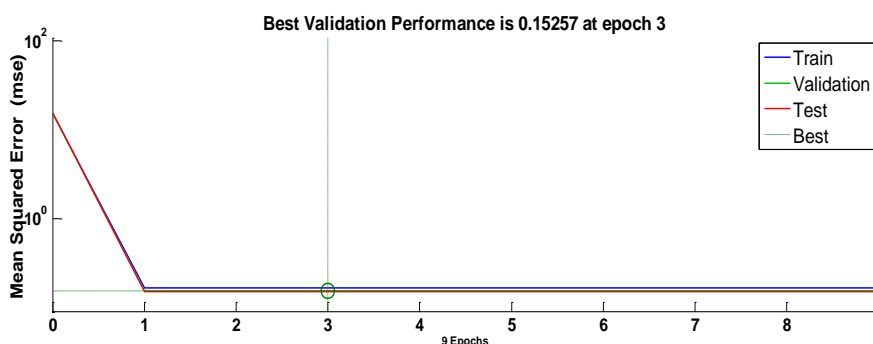
براساس نتایج شکل ۵ می‌توان دریافت که نوسانات دمایی زیادی در بازه‌ی زمانی موردنظر در دو ایستگاه کاشان و شرق اصفهان (فرودگاه)، رخ می‌دهد و سال ۱۳۹۱ کمترین دما اتفاق افتاده است و سال ۱۴۲۱ بیشترین دما اتفاق خواهد افتاد و اختلاف دما بین سردترین سال و گرم‌ترین سال $0/6$ درجه سانتی‌گراد است، به عبارتی سال ۱۴۲۶ دما به نسبت سال ۱۳۸۶ به مقدار $0/23$ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت.

نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی؛

شکل ۶، نشان‌دهنده‌ی ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی دما و داده‌های پیش‌بینی‌شده‌ی دما، در ایستگاه سینوپتیک اصفهان،



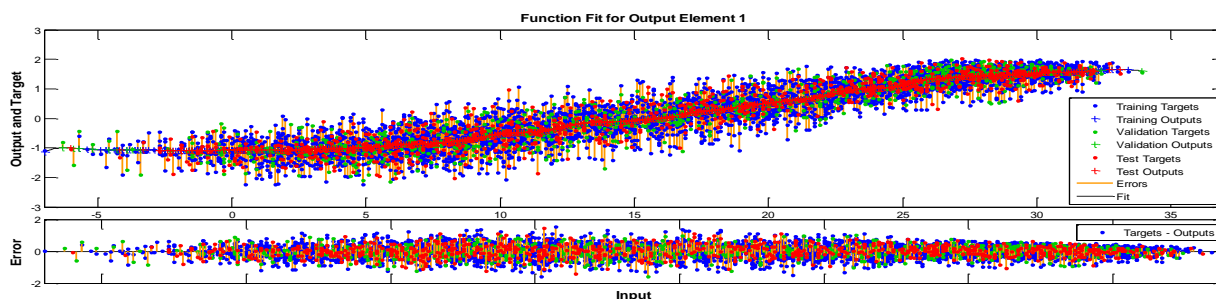
شکل ۶- مقادیر R داده‌های مشاهداتی و داده‌های پیش‌بینی شده ایستگاه اصفهان



شکل ۷- بهترین نتیجه صحت‌سنجی با استفاده از روش mse در ایستگاه اصفهان

دما از سال ۱۳۸۴ تا ۱۴۱۹، در ایستگاه سینوپتیک اصفهان انجام شده‌است. بازه‌ی زمانی انتخاب شده به مقدار داده‌های مشاهداتی گذشته ارتباط دارد به طوری که هرچه داده‌های گذشته بیشتر باشند و داده‌های ناقص کمتری داشته باشند، سال‌هایی را که می‌توان پیش‌بینی کرد، افزایش می‌یابد.

نقطه‌ی مشخص شده در شکل ۷، بیانگر این است که بهترین صحت‌سنجی بین داده‌های آموزش داده شده، صحت‌سنجی شده و امتحان شده بعد از ۳ تکرار اتفاق افتاده است و مقدار آن برابر ۰/۱۵ است، هرچه مقدار mse به صفر نزدیک‌تر باشد، نتایج به دست آمده دقیق‌تر هستند و با توجه به شکل ۷، می‌توان دریافت که پیش‌بینی داده‌ها با دقت بسیاری انجام شده‌است. در نهایت در شکل ۸، پیش‌بینی



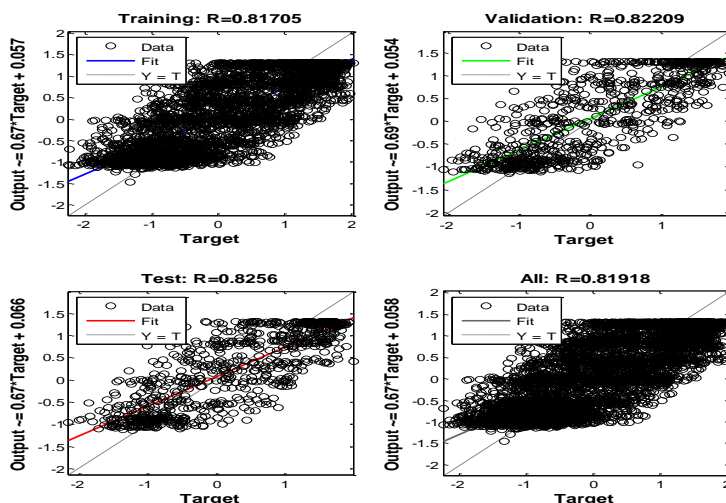
شکل ۸- پیش‌بینی دما ایستگاه سینوپتیک اصفهان ۱۴۱۹-۱۳۸۴

در نهایت شکل (سیاه)، به این صورت رسم شده‌است. در قسمت پایین شکل، مقدار خطاها به صورت بزرگ شده برای هر نقطه نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده نشان داده شده‌است و همانطور که مشخص

شکل ۸، بیانگر پیش‌بینی دما از سال ۱۳۸۴ تا ۳۵ سال بعد از آن، یعنی سال ۱۴۱۹ است و داده‌های آموزش داده شده (آبی)، صحت‌سنجی داده‌ها (سبز)، امتحان داده‌ها (قرمز)، خطاها (نارنجی) و

دهنده‌ی ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی دما و داده‌های پیش‌بینی شده‌ی دما، در ایستگاه سینوپتیک خور و بیابانک، در بازه‌ی زمانی، سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۴۲۴ است. شکل ۱۰، میانگین مربعات خطا (mse) را بین داده‌های مشاهداتی دما و داده‌های پیش‌بینی شده‌ی دما در ایستگاه سینوپتیک اصفهان در بازه‌ی زمانی سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۴۲۴ نشان می‌دهد.

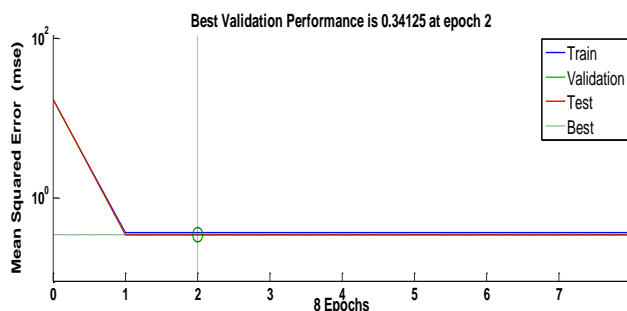
است مقدار خطاها بسیار نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده است و نتیجه مطلوب است. براساس نتایج شکل ۸، دما به صورت تدریجی تا سال ۱۴۱۹ در افزایش می‌یابد به‌طوری‌که اختلاف دما از سالی که پیش‌بینی آغاز شده است تا سالی که پیش‌بینی اتمام یافته است. تقریباً برابر با ۲ درجه سانتی‌گراد است به عبارتی میانگین دما از سال ۱۳۸۴ تا ۱۴۱۹، ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. شکل ۹، نشان-



شکل ۹- مقادیر R داده‌های مشاهداتی و داده‌های پیش‌بینی شده ایستگاه خور و بیابانک

داده‌های دما با دقت بالایی انجام شده است. در شکل ۱۰، در نقطه‌ی مشخص شده بهترین صحت‌سنجی بین داده‌های آموزش داده شده، صحت‌سنجی شده و امتحان شده بعد از ۲ تکرار اتفاق افتاده است و میانگین مربعات خطا (mse) برابر ۰/۳۴ است.

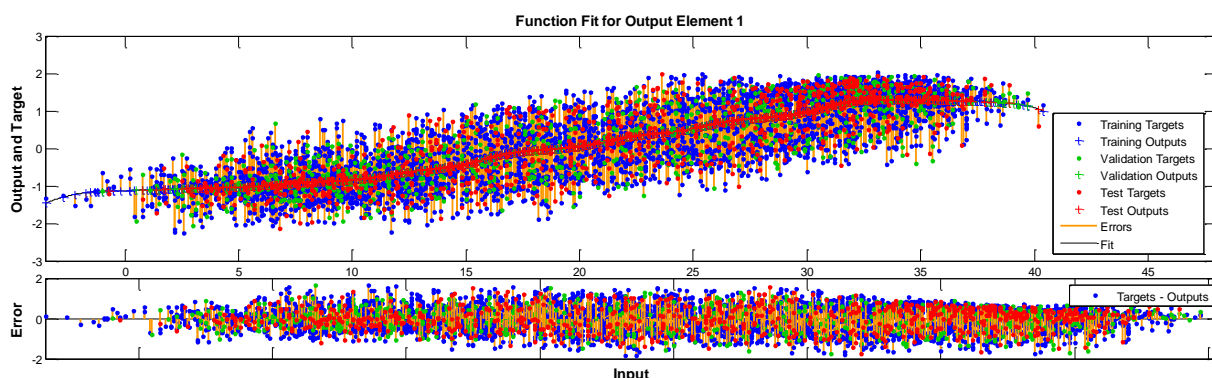
شکل ۹، نشان‌دهنده‌ی ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی دما و داده‌های پیش‌بینی شده‌ی دما است و R به دست آمده، برابر با ۰/۸۱ و نشان‌دهنده‌ی این است که داده‌های مشاهداتی دما و داده‌های پیش‌بینی شده‌ی دما با یکدیگر همبستگی بسیار خوبی دارند و احتمال وقوع داده‌های پیش‌بینی شده، زیاد است و پیش‌بینی



شکل ۱۰- بهترین نتیجه صحت‌سنجی با استفاده از روش mse در ایستگاه خور و بیابانک

انتخاب شده به مقدار داده‌های مشاهداتی گذشته ارتباط دارد به‌طوری‌که هرچه داده‌های گذشته بیشتر باشند و داده‌های دارای نواقص کمتری باشند، سال‌های قابل پیش‌بینی افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۰، به دلیل اینکه مقدار mse کمتر از ۰/۵ و به صفر نزدیک‌تر است. پیش‌بینی داده‌های دما با دقت مناسبی انجام گرفته است. در شکل ۱۱، پیش‌بینی دما از سال ۱۳۸۴ تا ۱۴۲۴، در ایستگاه سینوپتیک خور و بیابانک انجام شده است. بازه‌ی زمانی



شکل ۱۱- پیش‌بینی دما ایستگاه سینوپتیک خوروبابانک در سال های ۱۴۲۴-۱۳۸۴

مقادیر به‌دست‌آمده از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ی nceptempgl و nceps500gl، دما تا سال ۱۴۲۸ به تدریج افزایش خواهد یافت. در ایستگاه‌های اصفهان، داران، خوروبابانک و کیوترباد که از متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceptempgl پیروی می‌کنند اختلاف دما بین سال ۱۳۸۴ که سال شروع مدل‌سازی و سال ۱۴۲۸ که سال اتمام مدل-سازی است، $0/2$ درجه سانتی‌گراد است و به عبارتی میانگین دمای سالانه به مقدار $0/2$ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرده‌است. همچنین در ایستگاه‌های شرق اصفهان (فرودگاه) و کاشان که از متغیر پیش‌بینی‌کننده‌ی nceps500gl پیروی می‌کنند. در سال ۱۳۹۱ کمترین دما اتفاق افتاده است و سال ۱۴۲۱ بیشترین دما اتفاق خواهد افتاد و اختلاف دما بین سردترین سال و گرم‌ترین سال $0/6$ درجه سانتی‌گراد است.

نتایج مدل‌سازی دما به وسیله شبکه عصبی؛ در روش شبکه‌ی عصبی، مدل‌سازی به وسیله‌ی مقادیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ی منتخب جدول ۲، انجام شده‌است و در نتیجه مقادیر میانگین دمای سالانه در کلیه ایستگاه‌ها در حال افزایش است، به‌طوری‌که اختلاف دما بین سال ۱۳۸۴ که سال شروع پیش‌بینی است و سال‌های پایانی پیش‌بینی که بسته به میزان کیفیت داده‌های مشاهداتی و میزان نواقص آماری هر ایستگاه متغیر هستند، تقریباً به ۲ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید.

براساس نتایج فوق، دمای استان اصفهان تا سال ۱۴۲۸ به تدریج افزایش می‌یابد و نوسانات بارش تقریباً یکسان است، بنابراین احتمال وقوع کم‌آبی در استان اصفهان وجود دارد زیرا با افزایش دما، آب مورد استفاده در مصارف خانگی و صنعتی و کشاورزی، افزایش می‌یابد و از طرفی با ثبات تقریبی بارش، احتمال کم‌آبی به وجود می‌آید، لذا می‌توان با انتخاب راهکارهای مدیریتی مناسب، به مصرف آب در سال‌های پیش‌رو بیشتر توجه کرد تا از این احتمال پیشگیری به عمل آید.

شکل ۱۱، بیانگر پیش‌بینی دما از سال ۱۳۸۴ تا ۴۰ سال بعد از آن، یعنی سال ۱۴۲۴ است و داده‌های آموزش داده‌شده (آبی)، صحت‌سنجی داده‌ها (سبز)، امتحان داده‌ها (قرمز)، خطاها (نارنجی) و در نهایت شکل (سیاه)، به این صورت رسم شده‌است. مقدار خطاها به صورت بزرگ‌شده برای هر نقطه نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده نشان داده شده‌است و همانطور که مشخص است مقدار خطاها نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده‌است و نتیجه مطلوب است. به دلیل اینکه داده‌های مشاهداتی در این ایستگاه دارای نواقص کمتری بوده‌است به همین دلیل تا ۴۰ سال آینده پیش‌بینی انجام شده‌است. براساس نتایج این شکل، دما به صورت تدریجی تا سال ۱۴۲۴ درافزایش می‌یابد و از سال ۱۳۸۴ تا ۱۴۲۴ میانگین دما تقریباً $2/5$ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری

نتایج مدل‌سازی مقادیر دما و بارش توسط مدل Lars_WG؛ براساس نتایج به دست آمده از مدل‌سازی مقادیر دما و بارش توسط مدل Lars_WG، ایستگاه سینوپتیک داران به نسبت سایر ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی دارای بیشترین مقدار بارندگی و همچنین کم‌ترین دمای میانگین، به مقدار ۱۴ درجه‌ی سانتی‌گراد است و بیشترین مقدار میانگین بارندگی سالانه در این ایستگاه در سال ۱۴۰۵ برابر با $2/35$ میلی‌متر خواهد بود و در مقابل ایستگاه خور و بیابانک دارای کم‌ترین میزان بارندگی و بیشترین دمای میانگین سالانه است و کم‌ترین مقدار میانگین بارندگی سالانه در این ایستگاه در سال ۱۳۸۵ برابر با $0/3$ میلی‌متر است و بیشترین مقدار میانگین دمای سالانه در این ایستگاه در سال ۱۴۲۲ به مقدار $32/5$ درجه سانتی‌گراد خواهد بود و تا سال ۱۴۲۸ دما و بارش دارای نوسان هستند و این نوسانات متوسط است و شدید نخواهد بود. نتایج مدل‌سازی مقادیر دما توسط مدل SDSM؛ با توجه به

منابع

- statistical downscaling methods. *Theoretical and Applied Climatology*. 141: 1135–1150.
- Chai, T. and Draxler, R. 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? *Geosci. Model Dev.*, 7. <https://doi.org/10.5194/gmdd-7-1525-2014>.
- Dehghan, S., Salehnia, N., Sayari, N. and Bakhtiari, B. 2020. Prediction of meteorological drought in arid and semi-arid regions using PDSI and SDSM: a case study in Fars Province, Iran. *Journal of Arid Land*. 12: 318–330.
- Harpham, C. and Wilby, R. L. 2005. Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts. *Journal of Hydrology*. 312(1–4): 235–255.
- Karamouz, M., FALAHI, M., Nazif, S. and RAHIMI, F. M. 2009. Long lead rainfall prediction using statistical downscaling and artificial neural network modeling.
- Khan, M. S., Coulibaly, P. and Dibike, Y. 2006. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*, 319(1–4), 357–382.
- Liu, Z., Xu, Z., Charles, S. P., Fu, G. and Liu, L. 2011. Evaluation of two statistical downscaling models for daily precipitation over an arid basin in China. *International Journal of Climatology*. 31(13): 2006–2020.
- Nury, A. H. and Alam, M. J. B. 2014. Performance study of global circulation model HADCM3 using SDSM for temperature and rainfall in North-Eastern Bangladesh. *Journal of Scientific Research*. 6(1): 87–96.
- Salehnia, N., Hosseini, F., Farid, A., Kolsoumi, S., Zarrin, A. and Hasheminia, M. 2019. Comparing the performance of dynamical and statistical downscaling on historical run precipitation data over a semi-arid region. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 55(4): 737–749.
- Wang, J. 2012. On the relationship between Pearson correlation coefficient and Kendall's tau under bivariate homogeneous shock model. *ISRN Probability and Statistics*.
- Wilby, R. L., Dawson, C. W. and Barrow, E. M. 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*. 17(2): 145–157.
- Xu, C. 1999. From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. *Progress in Physical Geography*. 23(2): 229–249.
- آشفته، پ. و حداد، ا. ب. (۱۳۹۲). ارائه ی رویکرد احتمالاتی ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب. مهندسی منابع آب. ۶ (۱۹): ۵۱–۶۶
- احمدی باصری، ن.، شیروانی، ا. و ناظم السادات، م. (۱۳۹۲). کاربرد مدل شبکه عصبی مصنوعی در خرد مقیاس نمودن برون داده‌های مدل GCM برای پیش‌بینی بارش در پهنه‌ی جنوبی ایران. آب و خاک. ۲۸(۵): ۱۰۳۷–۱۰۴۷.
- بابائیان، ا. و کوهی، م. (۱۳۹۱). ارزیابی شاخص‌های اقلیم کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در ایستگاه‌های منتخب خراسان رضوی. آب و خاک، ۲۶(۴): ۹۵۳–۹۶۷.
- زابل عباسی، ف.، ملبوسی، ش.، بابائیان، ا.، اثمیری، م. و برهانی، ر. (۱۳۸۹). پیش‌بینی تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی در دوره ۲۰۲۹–۲۰۱۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری خروجی شبیه‌ساز ECHO_G. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۴(۲): ۲۱۸–۲۳۳.
- مدرسی، ف.، عراقی نژاد، ش.، ابراهیمی، ک. و خلقی، م. (۱۳۹۰). بررسی اثر تغییر اقلیم بر میزان آبدهی سالانه رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه گرگانرود). آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۶): ۱۳۶۵–۱۳۷۷.
- مساح یوانی، ع. و مرید، س. (۱۳۸۴). اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده رود اصفهان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۹(۴): ۱۷–۲۷.
- Aksoy, H. and Dahamsheh, A. 2009. Artificial neural network models for forecasting monthly precipitation in Jordan. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 23(7): 917–931.
- Alexander, D. L. J., Tropsha, A. and Winkler, D. A. (2015). Beware of R 2: simple, unambiguous assessment of the prediction accuracy of QSAR and QSPR models. *Journal of Chemical Information and Modeling*. 55(7): 1316–1322.
- Ashraf, B., Mousavi-Baygi, M., Kamali, G. A., & Davari, K. 2011. Prediction of seasonal variations of climatological parameters over next 20 years by using statistical downscaling method of HADCM3 data (Case study: Khorasan Razavi province). *J. Water Soil*. 25(4): 945–957.
- Baghanam, A. H., Eslahi, M., Sheikhabaei, A. and Seifi, A. J. 2020. Assessing the impact of climate change over the northwest of Iran: an overview of

The Isfahan values of Temperature and Precipitation Forecast Based on Two Fine Scale Models Lars_WG and SDSM and Artificial Neural Network Method

A. Zarfeshani¹, MH. Jahangir^{2*}

Recived: Jul.27, 2020

Accepted: Jun.03, 2020

Abstract

The scales of temporal and spatial steps of Atmosphere General Circulation Models GCM are continental and global. Therefore, it is necessary the models act on the local behavior of the station data, to understand the status of a local station using these models. In this study using SDSM, LARS_WG models and artificial neural network method Based on observational data obtained from 6 synoptic stations in Isfahan province, temperature and precipitation forecasts of these stations from 2021 to 2050 have been investigated. Pearson's correlation coefficient (r) and coefficient of determination (R^2) between observational data and scenario data at all stations are above 0.6, and root-mean-square error (RMSE) is acceptable, then good simulation has been performed. Based on the results, the temperature of Isfahan province increased from 2021 to 2050 and based on SDSM, In 2005 it had the lowest value and in 2050 it had the highest value And the temperature difference of these years is about $2/3$ ° C, which indicates that the temperature will rise and Precipitation changes are almost similar to current changes and We will have the highest amount of precipitation in 1405 and 1406 which, in daran station which, It has more rainfall than other stations, it will be about 2.3 mm.

Keywords: GCM, Pearson's correlation, Synoptic stations, Spatial, Temporal,

1- M.Sc, Ecohydrology, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of New Energy and environment, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: mh.jahangir@ut.ac.ir)

مقاله علمی-پژوهشی

مقایسه دو مدل فیزیکی بر پایه مویبندی-جذب سطحی برای تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع در هر دو ناحیه رطوبت‌های نزدیک به خشک و اشباع

اشکان طهرانی^۱، عبدالمجید لیاقت^{۲*}، صارم نوروزی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۱۹

چکیده

منابع نشان داده‌اند که فرض حرکت مویبند در مجموعه‌ای از منافذ استوانه‌ای شکل، منجر به کم‌برآورد شدن هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک در پتانسیل‌های پایین می‌گردد که نتیجه نادیده گرفتن نیروهای جذب سطحی و فیلم نازک مایع است. در این پژوهش عملکرد دو مدل فیزیکی تولر-آر و لیو-کانراد که نیروهای جذب سطحی و مویبندی را در نظر می‌گیرند و همچنین مدل مویبندی شناخته شده ون گنوختن-معلم در مدل‌سازی منحنی مشخصه آب-خاک و تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی شش خاک جمع‌آوری شده از منابع که شامل طیف وسیعی از بافت و خصوصیات هیدرولیکی است، استفاده شد. نتایج برتری مدل‌های مویبندی-جذب سطحی در مدل‌سازی منحنی مشخصه آب-خاک و تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع را نسبت به مدل مویبندی ون گنوختن-معلم نشان داد. از میان دو مدل فیزیکی بر پایه جذب سطحی و مویبندی، مدل لیو-کانراد نتایج بهتری را نشان داد. نتایج نشان داد که مدل لیو-کانراد هدایت هیدرولیکی غیراشباع را در ناحیه نزدیک به اشباع کم‌برآورد می‌کند و بهترین عملکرد مدل تولر-آر مربوط به خاک‌های لومی بود. از آن‌جا که مدل تولر-آر تحلیلی‌ترین و جامع‌ترین مدلی است که تاکنون برای مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی غیراشباع توسعه داده شده است، پژوهش‌های آتی باید معطوف به بهبود انعطاف‌پذیری این مدل از طریق تعمیم آن به سایر توزیع‌های اندازه منافذ به‌جز توزیع گاما شامل توزیع‌های لوگ-نرمال، گامای ناقص و ویبال گردد.

واژه‌های کلیدی: مدل فیزیکی، مدل تولر-آر، مدل لیو-کانراد، منحنی مشخصه آب-خاک

مقدمه

معرض خطر قرار دهند (Birdsell et al., 2015; Tiktak et al., 2012). از آن‌جا که اندازه‌گیری مستقیم هدایت هیدرولیکی بالالخص در رطوبت‌های پایین که نرخ حرکت آب در خاک به شدت کند می‌گردد بسیار زمان‌بر می‌باشد، یکی از روش‌های جایگزین، تخمین منحنی هدایت هیدرولیکی بر اساس منحنی مشخصه خاک است (Weber et al., 2017; Sadeghi et al., 2012). در این روش که شروع آن به پژوهش پورسل باز می‌گردد و در طی سالیان توسط دیگر پژوهشگران تکامل و توسعه یافته است، منافذ درون خاک به‌صورت مجموعه‌ای از لوله‌های مویبند در نظر گرفته می‌شود که دارای توزیع مشخصی از اندازه‌ها بوده و هر منفذ با شعاع مشخص، متناظر با یک مکش مویبندی معین می‌باشد (Wyllie and Gardner, 1958; Mualem, 1976a; Burdine, 1953; Purcell, 1949). پس از تعیین منحنی اندازه منافذ با استفاده از منحنی مشخصه خاک، قانون

تخمین دقیق هدایت هیدرولیکی خاک همواره یکی از چالش برانگیزترین موضوعات در حیطه مطالعات مربوط به ناحیه ریشه می‌باشد (Or and Assouline, 2013). هدایت هیدرولیکی نقش مهمی در انتقال آلاینده‌ها، مواد معدنی و سموم کشاورزی درون خاک داشته که می‌توانند منجر به آلودگی منابع آبی شده و کیفیت منابع آبی را در

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

* نویسنده مسئول: (Email: aliaghat@ut.ac.ir)

ارائه گردید که همانند مدل قبل شامل دو بخش می‌باشد: (۱) مجموعه‌ای از لوله‌های مویینه با قطرهای مختلف که از آب یا هوا پر شده‌اند، (۲) لایه (فیلم) نازکی از آب که بر سطح ذرات جامد پوشیده شده است. هر دو مدل ذکر شده قابلیت برآورد هدایت هیدرولیکی از منحنی مشخصه خاک را دارا می‌باشند. اگرچه مدل تولر-آر از پایه‌ی علمی قابل توجهی برخوردار است اما از نظر ریاضی بسیار پیچیده می‌باشد. در مقابل، مدل لیوو-کانراد تئوری و فرضیات بسیار ساده‌تری نسبت به مدل تولر-آر را داراست و از نظر ریاضی نیز ساده‌تر می‌باشد. هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد این دو مدل فیزیکی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر و با مدل رایج و تجربی ون گنوختن (Van Genuchten, 1980) و همچنین ارزیابی عملکرد آنها در تخمین منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی شش خاک (طیف وسیعی از بافت‌ها، شامل خاک بسیار شنی تا بسیار رسی) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل تولر-آر

در این مدل ذرات خاک از سلول‌هایی با دو بخش منفذ مرکزی (نشانگر مویینگی) و شکاف‌های نازک (اسلیت) در دو طرف آن تشکیل شده‌اند که منافذ مرکزی را می‌توان مانند چندضلعی‌هایی دلخواه (مثلثی، مربعی، ...، n ضلعی) فرض کرد (شکل ۱). هر ذره توسط سه پارامتر توصیف می‌گردد که عبارت‌اند از: طول منفذ مرکزی L (m) و دو پارامتر بدون بعد α و β به ترتیب برای فاصله و طول اسلیت‌ها که نسبتی از طول منفذ مرکزی را شامل می‌شوند. برای مثال در خاک‌های رسی طول منفذ مرکزی کوچک و طول اسلیت زیاد (بزرگ) می‌باشد (به دلیل سطح ویژه بالا) و در خاک‌های شنی طول منفذ مرکزی زیاد (نشانگر سازوکار مویینگی بیشتر) و طول اسلیت کوچک (به دلیل سطح ویژه بسیار کم) است. برخلاف تئوری لوله‌های مویین که در آن منافذ کاملاً پر یا خالی از مایع می‌باشند، در این مدل بعد از تخلیه منفذ مرکزی از مایع، هنوز در گوشه‌های منفذ مایع وجود دارد.

درجه اشباع $S_w(\mu)$ (نسبت مساحتی از منافذ که توسط مایع پر شده است به سطح مقطع منافذ) در پتانسیل شیمیایی مشخص با تقسیم‌بندی طول منافذ در نقاط مختلفی از درجه اشباع و انتگرال‌گیری از آن‌ها از معادله‌های (۱-الف تا ۱-و) محاسبه می‌گردد (Tuller and Or, 2001):

$$S_w(\mu) = S_{w1}(\mu) + S_{w2}(\mu) + S_{w3}(\mu) + S_{w4}(\mu) + S_{w5}(\mu) \quad (1-الف)$$

$$S_{w1}(\mu) = \int_{L_{\min}}^{L_1(\mu)} \frac{A_n L^2}{2\alpha\beta(L_{\max} - L) + A_n L^2} f(L) dL \quad (1-ب)$$

هیگن-پوازی^۱ بکار گرفته شده و منحنی هدایت هیدرولیکی تخمین زده می‌شود (Mualem, 1976b; Burdine, 1953). با وجود ساده-سازی بسیاری که در نحوه بیان هندسه و توزیع منافذ درون خاک صورت گرفته می‌شود، نتایج نشان می‌دهد که منحنی هدایت هیدرولیکی بدست آمده از این روش، در ناحیه نزدیک به اشباع که نیروهای کاپیلاری غالب می‌باشند در انطباق مناسبی با مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد، اگر چه در رطوبت‌های پایین که نیروهای جذب سطحی و پخشیدگی بخار آب غالب می‌باشند، نتایج مدل به صورت سیستماتیک هدایت هیدرولیکی را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند (Sakai et al., 2009). از عمده محدودیت‌های این دسته از روش‌های بر پایه لوله‌های موازی می‌توان به تر یا خشک در نظر گرفتن منافذ خاک و عدم در نظر گرفتن حالت بینابینی (نیمه‌تر)، بدون سطح^۲ در نظر گرفتن منافذ خاک و همچنین عدم در نظر گرفتن جهت جریان و نحوه ارتباط منافذ اشاره نمود (Ghabarian et al. 2013; Hunt, Ewing et al. 2015). تصاویر میکروسکوپی و مطالعات توموگرافی درون خاک نیز نشان می‌دهد که هندسه منافذ خاک نه تنها دارای زاویه می‌باشد بلکه درز و شکاف‌های موجود در خلل و فرج، به ویژه در خاک‌های ریز بافت، که دارای سطح ویژه بالایی می‌باشند، فرض لوله‌های مویین را با چالش اساسی مواجه می‌سازد (Zhao et al., 2020; Sleutel et al., 2008).

به منظور غلبه بر مشکلات ذکر شده در مورد مدل‌های بر مبنای لوله‌های موازی درون خاک، دسته‌ی دیگری از مدل‌ها توسعه یافته‌اند که سعی در بهبود تخمین هدایت هیدرولیکی خاک با استفاده از فرضیات ساده شونده کمتر در مورد هندسه منافذ خاک داشته‌اند. در این میان دو مدلی که بیش از دیگران مورد استقبال قرار گرفته است، مدل فیزیکی-تحلیلی تولر-آر و دیگری مدل ساده‌تر لیوو-کانراد می‌باشد (Lebeau and Konrad, 2010; Tuller and Or, 2001; Or and Tuller, 1999). مدل تولر-آر یکی از مدل‌های فیزیکی-تحلیلی بوده که شامل دو بخش مکمل می‌باشد: (۱) رویکردی واحد برای جداسازی نقش نیروهای مویینگی و جذب سطحی در پتانسیل ماتریک (Philip, 1977) و (۲) پیاده‌سازی آن در یک هندسه جدید از اندازه منافذ (سلول واحد) شامل یک منفذ مرکزی زاویه‌دار^۳ برای سازوکار مویینگی که به فضاهایی شکاف مانند^۴ با سطح ویژه برای سازوکار جذب سطحی متصل شده است. در این مدل پس از هوادار شدن منفذ مرکزی جریان گوشه‌ای شکل می‌گیرد و با هوادار شدن شکاف‌های چسبیده به منفذ مرکزی جریان از حالت مویینگی به غشایی تبدیل می‌شود. پس از آن مدل دیگری توسط لیوو و کانراد

- 1- Hagen-Poiseuille
- 2- Surfaceless
- 3- Angular Central Pore
- 4- Slit-Shaped spaces

$$L_1(\mu) = -\frac{\eta}{\rho\mu} C_n \quad (9-1)$$

$$L_2(\mu) = \frac{3}{\alpha} \sqrt[3]{\frac{A_{svl}}{6\pi\rho\mu}} \quad (10-1)$$

$$h(\mu) = \frac{\alpha L}{3} \quad (11-1)$$

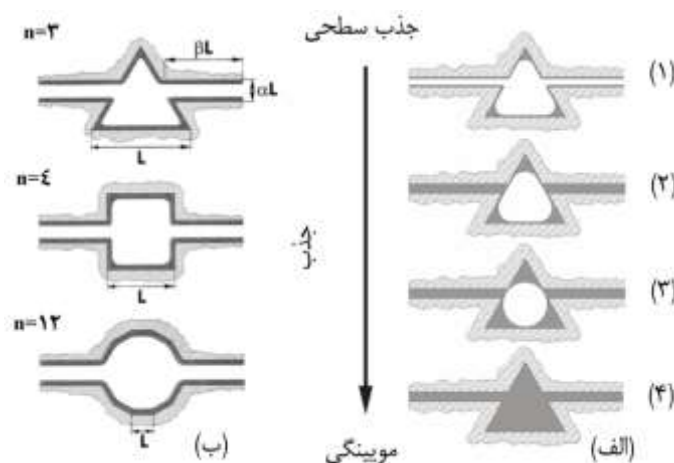
$$f(L) = \frac{L^\xi}{\xi! \omega^{\xi+1}} \exp\left(\frac{-L}{\omega}\right), L \geq 0 \quad (12-1)$$

$$S_{w2}(\mu) = \int_{L_{min}}^{L_2(\mu)} \frac{2\alpha\beta L(L_{max}-L)}{2\alpha\beta L(L_{max}-L) + A_n L^2} f(L) dL \quad (13-1)$$

$$S_{w3}(\mu) = \int_{L_2(\mu)}^{L_{max}} \frac{4\beta(L_{max}-L)h(\mu)}{2\alpha\beta L(L_{max}-L) + A_n L^2} f(L) dL \quad (14-1)$$

$$S_{w4}(\mu) = \int_{L_1(\mu)}^{L_{max}} \frac{nh(\mu)[L-h(\mu)]}{2\alpha\beta L(L_{max}-L) + A_n L^2} f(L) dL \quad (15-1)$$

$$S_{w5}(\mu) = \int_{L_1(\mu)}^{L_{max}} \frac{r(\mu)^2 F_n}{2\alpha\beta L(L_{max}-L) + A_n L^2} f(L) dL$$



شکل ۱- الف) شماتیکی از وضعیت منافذ خاک در مدل تولر-آر در شرایط مختلف: (۱) منفذ غیراشباع که فیلمی نازک در اسلیت‌ها و مایع در گوشه‌های منفذ مرکزی تجمع پیدا کرده است. (۲) وضعیت منفذ مرکزی بعد از پر شدن اسلیت‌ها. (۳) وضعیت منفذ مرکزی هنگام پر شدن سلول واحد با انحنا دایره‌ای. (۴) منفذ اشباع. (ب) سلول واحد با اشکال مختلف به همراه اسلیت‌ها که نشان‌گر منافذ خاک هستند (برگرفته شده از (Tuller and Or, 2002).

رطوبت در اسلیت‌های اشباع، ترم سوم $S_{w3}(\mu)$ رطوبت فیلم نازک مایع جذب شده در اسلیت‌ها پس از هوادار شدن از $L_2(\mu)$ تا بزرگ‌ترین طول L_{max} را در بر می‌گیرد، ترم چهارم $S_{w4}(\mu)$ رطوبت مربوط به فیلم مایع جذب شده در منافذ مرکزی پس از هوادار شدن از طول $L_1(\mu)$ تا L_{max} است و ترم پنجم $S_{w5}(\mu)$ نیز رطوبت باقی‌مانده در گوشه‌های منافذ مرکزی ناشی از نیروهای موینگی را محاسبه می‌کند که از طول $L_1(\mu)$ تا L_{max} را در بر می‌گیرد.

برای محاسبه هدایت هیدرولیکی غیراشباع نیز جریان به دو بخش کناره‌ها^۲ و مجرای مرکزی^۳ تقسیم می‌گردد. به همین ترتیب هدایت هیدرولیکی غیراشباع در محیط متخلخل $K(\mu)$ (m/s) از روابطی مشابه روابط ذکر شده حاصل می‌گردد (Tuller and Or, 2002).

که در آن μ پتانسیل شیمیایی (J/kg)، $h(\mu)$ ضخامت فیلم در پتانسیل شیمیایی معین (m) ، $r(\mu)$ شعاع انحنا در گوشه‌های منافذ (m) ، ρ چگالی مایع (kg/m^3) ، C_n ضریب انحنا زهکشی، η کشش سطحی مایع (N/m) ، n تعداد گوشه‌ها، F_n فاکتور زاویه، A_n فاکتور سطح منافذ مرکزی، حداکثر طول منافذ (m) ، L_{min} حداقل طول منافذ (m) ، $L_1(\mu)$ و $L_2(\mu)$ طول منافذ (m) ، تابع چگالی گاما برای طول منافذ مرکزی، ω و ξ دو پارامتر وابسته در تابع چگالی (در این پژوهش $\xi=2$) و A_{svl} ثابت هاماکر^۱ است که مقدار آن برابر با -6×10^{-20} (J) می‌باشد.

در سمت راست معادله‌ی (۱) ترم اول $S_{w1}(\mu)$ مقدار مورد پیش‌بینی برای منافذ مرکزی در حالت اشباع، $S_{w2}(\mu)$ مربوط به مقدار

2- Corner Flow
3- Duct Flow

1- Hamaker constant

$$w_1 \sum_{i=1}^x (Sw_m - Sw_e)^2 + w_2 \left(\frac{SA_e}{SA} - 1 \right)^2 + w_3 \left[\int_{L_{\min}}^{L_{\max}} f(L) dL - 1 \right]^2 \quad (2001)$$

$$1.1 > \frac{SA_e}{SA} > 0.9, \beta > 0, \omega > 0 \quad (3)$$

که در آن، Sw_m درجه اشباع اندازه‌گیری شده، Sw_e درجه اشباع تخمین زده شده، SA سطح ویژهی اندازه‌گیری شده (m^2/g) ، SA_e سطح ویژهی تخمین زده شده (m^2/g) ، w_1 ، w_2 و w_3 نیز پارامترهای وزن‌دهی با مقدار دلخواه (در این پژوهش مقدار آن‌ها برابر با ۱ در نظر گرفته شد) می‌باشند که در نهایت چهار پارامتر β ، μ_b ، ε و ω توسط بهینه‌سازی بدست می‌آیند. از آنجایی که اندازه‌گیری سطح ویژه خاک دشوار است، برای تخمین آن می‌توان از توابع زودیاقت استفاده کرد (Tuller and Or, 2001). برآورد سطح ویژه نیز با رابطه (۴) صورت می‌گیرد (Or and Tuller, 1999):

$$SA_e = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \left[\frac{4\beta(L_{\max} - L) + nL}{2\alpha\beta L(L_{\max} - L) + A_n L^2} \phi_T \right] f(L) dL \quad (4)$$

مدل لیو-کانراد

در این مدل فاز مایع از دو بخش لوله‌های مویب با اندازه‌های مختلف که از آب پر شده است (بیانگر مویبگی) و یک فیلم نازک با ضخامت مختلف که بر سطح ذرات پوشیده شده است (بیانگر جذب سطحی) تشکیل می‌شود. شعاع منافذ مویبگی از طریق جزء مویبگی در تابع رطوبت-مکش با استفاده از معادله‌ی یانگ-لاپلاس استخراج می‌گردد. هرچه رطوبت افزایش یابد، ضخامت فیلم نیز افزایش می‌یابد و محدوده فیلم تابعی از جزء مویبگی در مکش آب در محیط متخلخل می‌باشد. شکل (۲) اجزاء فاز مایع برای مکش‌های مختلف را در محیط متخلخل نشان می‌دهد.

در این مدل رطوبت حجمی خاک θ به دو بخش رطوبت مربوط به مویبگی و جذب سطحی تقسیم شده است:

$$\theta = \theta_c + \left(1 - \frac{\theta_c}{\theta_s}\right) \theta_a \quad (5-الف)$$

که در آن رطوبت حجمی، θ_c رطوبت حجمی مربوط به نیروی مویبگی، θ_s رطوبت حجمی اشباع و θ_a رطوبت حجمی مربوط به نیروی جذب سطحی می‌باشد. همچنین برای رطوبت مربوط به مویبگی می‌توان از توابع یگانه و چندگانه در ساختار منافذ استفاده کرد که در این مدل از تابع دو پارامتره کوسوگی با رطوبت باقیمانده صفر استفاده شده است (Kosugi, 1996):

$$\theta_c = \theta_s \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln(h_m / h_{m,median})}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (5-ب)$$

که در آن $erfc(x)$ تابع خطای مکمل، h_m مکش ماتریک (m)، $h_{m,median}$ مکش ماتریک مربوط به متوسط قطر منافذ مویب (m) و σ

$$K(\mu) = K_1(\mu) + K_2(\mu) + K_3(\mu) + K_4(\mu) + K_5(\mu) \quad (2-الف)$$

$$K_1(\mu) = \int_{L_{\min}}^{L_1(\mu)} \frac{A_r L^4 K_d \phi}{(A_n - 2\alpha\beta)L^2 + 2\alpha\beta L_{\max} L} f(L) dL \quad (2-ب)$$

$$K_2(\mu) = \int_{L_{\min}}^{L_2(\mu)} \frac{2\alpha\beta L^3 (L_{\max} - L) K_s \phi}{(A_n - 2\alpha\beta)L^2 + 2\alpha\beta L_{\max} L} f(L) dL \quad (2-ج)$$

$$K_3(\mu) = \int_{L_2(\mu)}^{L_{\max}} \frac{4h(\mu)\beta(L_{\max} - L) K_F(\mu)\phi}{(A_n - 2\alpha\beta)L^2 + 2\alpha\beta L_{\max} L} f(L) dL \quad (2-د)$$

$$K_4(\mu) = \int_{L_1(\mu)}^{L_{\max}} \frac{nh(\mu)\beta(L - \frac{2r(\mu)}{\tan(\gamma/2)}) K_F(\mu)\phi}{(A_n - 2\alpha\beta)L^2 + 2\alpha\beta L_{\max} L} f(L) dL \quad (2-ه)$$

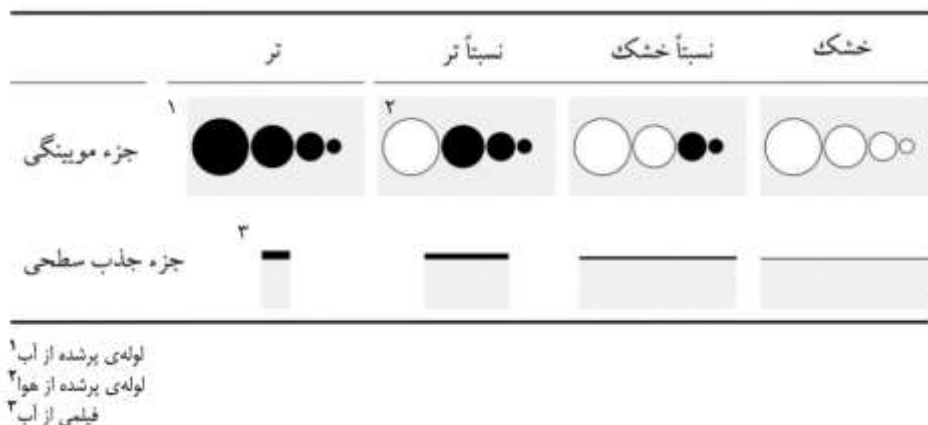
$$K_5(\mu) = \int_{L_1(\mu)}^{L_{\max}} \frac{r(\mu)^2 F_n K_C(\mu)\phi}{(A_n - 2\alpha\beta)L^2 + 2\alpha\beta L_{\max} L} f(L) dL \quad (2-و)$$

که در آن K_d (m/s) ترمی برای محاسبه هدایت هیدرولیکی در مجرای مرکزی، K_s (m/s) ترمی برای محاسبه جریان در صفحات موازی (اسلیت‌ها)، $K_F(\mu)$ (m/s) هدایت هیدرولیکی مربوط به فیلم، $K_C(\mu)$ (m/s) هدایت هیدرولیکی مربوط به کناره‌ها، γ زاویه گوشه‌ها در منافذ مرکزی و ϕ تخلخل می‌باشد. در سمت راست معادله (۲-الف) ترم اول $K_1(\mu)$ (m/s) هدایت هیدرولیکی در منافذ مرکزی اشباع (مجرای مرکزی) از طول L_{\min} تا $L_1(\mu)$ ، ترم دوم $K_2(\mu)$ (m/s) مربوط به محاسبه هدایت هیدرولیکی در اسلیت‌های اشباع از L_{\min} تا $L_2(\mu)$ ، ترم سوم $K_3(\mu)$ (m/s) هدایت هیدرولیکی در فیلم جذب شده در دیواره‌ی اسلیت‌ها از طول $L_2(\mu)$ تا L_{\max} ، ترم چهارم $K_4(\mu)$ (m/s) هدایت هیدرولیکی مربوط به فیلم در قسمت‌های صاف منافذ مرکزی از طول $L_1(\mu)$ تا L_{\max} و در نهایت، ترم آخر $K_5(\mu)$ (m/s) جریان در کناره‌های منافذ مرکزی غیراشباع از طول $L_1(\mu)$ تا L_{\max} است.

لازم به ذکر است که برای محاسبه انتگرال‌ها می‌توان از حل تحلیلی ارائه شده با $\gamma=2$ استفاده نمود. برای استفاده از این مدل در هر خاک، نیاز به بهینه کردن یک تابع هدف است که در آن با تغییر پارامترهای β ، μ_b ، ε و ω تابع هدفی که در معادله (۳) ارائه شده است کمینه می‌گردد (Or and Tuller, 1999):

$$\theta_a = \theta_o \left[1 - \frac{\ln|h_m|}{\ln|h_{m,dry}|} \right] \quad (ج-۵)$$

انحراف استاندارد از توزیع اندازه منافذ موئین لگاریتمی شده می‌باشد. رطوبت حجمی مربوط به جذب سطحی از طریق رابطه‌ی زیر توسط کمپبل و شیوزوا حاصل می‌گردد (Campbell and Shiozowa, 1992):



شکل ۲- توصیف اجزای فاز مایع برای مکش آب در محیط متخلخل در مدل لیو-کانراد (برگرفته شده از Lebeau and Konrad, 2010).

بوسیله‌ی حل معادلات ناویر-استوکس^۱ برای جریان ماندگار و آرام در لایه‌ای سطحی از مایع بدست آمده است. در نهایت معادله هدایت هیدرولیکی مربوط به جذب سطحی به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$k_{r,a} = \frac{k_a}{k_s} = \begin{cases} \frac{1}{k_s} \left[\frac{4\rho_o g}{\pi\mu_o D} (1-\phi)\delta^3 \right] & \delta \geq 10nm \\ \frac{1}{k_s} \left[\frac{\rho_o g B}{\pi\mu_o D} (1-\phi) \right] & \delta < 10nm \end{cases} \quad (ج-۶)$$

که در آن k_a هدایت هیدرولیکی مربوط به جریان فیلم δ ، (m/s) ضخامت فیلم ρ_o ، (m) وزن مخصوص مایع g ، (g/cm³) شتاب گرانش μ_o ، (m/s²) لزجت دینامیکی مایع B ، (g/m.s) تابعی از ضخامت فیلم و دما ϕ ، (m³) تخلخل و D قطر ذرات کروی (m) می‌باشد.

مدل ون گنوختن - معلم

مدل ون گنوختن از رایج‌ترین مدل‌های تجربی منحنی مشخصه رطوبتی است که به‌طور گسترده نیز مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha |h|)^{n_{VG}}]^m \quad (الف-۷)$$

که در آن h مکش ماتریک (Cm)، θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع، α تقریباً برابر عکس مکش در نقطه ورود هوا (Cm⁻¹)، n_{VG} و m پارامترهای شکل منحنی می‌باشند که ($n_{VG} > 1$) و $m = 1 - 1/n_{VG}$ در نظر گرفته شد. دقت شود که ضرایب

که در آن θ_o رطوبت حجمی مربوطه به جذب سطحی در مکش ماتریک ۱- متر و $h_{m,dry}$ مکش ماتریک در آن (m) می‌باشد. با جایگذاری معادلات مربوط به رطوبت موئینگی و جذب سطحی در معادله عمومی رطوبت (معادله ۵)، سه پارامتر θ_o ، σ و $h_{m,median}$ از طریق داده‌های اندازه‌گیری شده بهینه‌سازی می‌گردند. همانند رطوبت، هدایت هیدرولیکی غیراشباع به دو بخش تقسیم شده است: (۱) جریان موئینگی و (۲) جریان فیلم. در این مدل هدایت هیدرولیکی نسبی (K_r) با توجه به مدل پیشنهادی که هدایت هیدرولیکی را به صورت میانگین وزنی از جریان موئینگی و فیلم در نظر می‌گیرد، پیشنهاد شده است:

$$K_r = K_{r,c} + (1 - \frac{\theta_c}{\theta_s}) K_{r,a} \quad (الف-۶)$$

که در آن K_r هدایت هیدرولیکی نسبی، $K_{r,c}$ هدایت هیدرولیکی نسبی مربوط به جریان موئینگی و $K_{r,a}$ هدایت هیدرولیکی نسبی مربوطه به جریان فیلم نازک (جذب سطحی) می‌باشد. با به‌کارگیری معادله (۵-ب) در مدل معلم هدایت هیدرولیکی نسبی بصورت زیر حاصل می‌گردد:

$$K_{r,c} = \frac{k_c}{k_s} \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln(h_m / h_{m,median})}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right]^2 \cdot \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln(h_m / h_{m,median})}{\sqrt{2}\sigma} + \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \right) \right]^2 \quad (ب-۶)$$

که در آن k_c هدایت هیدرولیکی مربوط به جریان موئینگی k_s ، (m/s) هدایت هیدرولیکی اشباع (m/s) و l ضریب اعوجاج محیط متخلخل می‌باشد. مدل جریان در فیلم نازک در محیط متخلخل

که در آن O_i داده‌ی اندازه‌گیری شده i ام، P_i داده برآورد شده i ام، \bar{O} میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و z تعداد داده‌ها می‌باشد. در محاسبه این دو شاخص برای منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع از لگاریتم داده‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

در برازش هر یک از مدل‌ها به مقادیر اندازه‌گیری شده و یافتن پارامترهای برازشی بهینه از الگوریتم‌های بهینه‌سازی درون Excel استفاده گردید (Wraith and Or, 1998). پس از برازش منحنی مشخصه، با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده، منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع پیش‌بینی شد. به‌منظور برازش مدل تولر-آر (معادله ۳) که برای حالت $\alpha = 2$ در توزیع اندازه منافذ گاما جواب فرم بسته دارد، هر دو نسخه حل تحلیلی و حل عددی تهیه گردید که با توجه به سرعت بالاتر جواب‌های فرم بسته در طی فرآیند بهینه‌سازی، از نسخه حل تحلیلی برای برازش مدل استفاده گردید. خصوصیات فیزیکی و ضرایب برازشی حاصل از هر سه مدل مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مدل تولر که هر یک از ثابت‌های برازشی دارای تفسیری فیزیکی می‌باشند، این ضرایب به طرز معناداری وابسته به شرایط خاک می‌باشند. به عنوان مثال، ضریب β که تعیین‌کننده طول اسلیت بوده (شکل ۱) و به مقدار سطح ویژه خاک مرتبط است، معمولاً در خاک‌های درشت‌بافت که دارای سطح ویژه کمتری می‌باشند، دارای مقادیر کوچک‌تری نسبت به خاک‌های با بافت ریز و سطح ویژه بالاتر، دارد. همچنین مکش ورود هوا به خاک در خاک‌های با بافت ریز افزایش می‌یابد که مورد انتظار می‌باشد.

مدل ون‌گنوختن-معلم کاملاً تجربی بوده و بر خلاف دو مدل فیزیکی در بالا هیچ توضیح و تفسیر فیزیکی ندارد. همچنین هدایت هیدرولیکی نسبی از طریق رابطه (۷-ب) محاسبه می‌گردد:

$$K_r = \frac{K(h)}{K_s} = S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (7-b)$$

که در آن S_e درجه اشباع، l ضریب اعوجاج محیط متخلخل و $K(h)$ هدایت هیدرولیکی در مکش معین می‌باشد (cm/s).

داده‌های پژوهش

به‌منظور مقایسه عملکرد مدل‌های مورد نظر در این پژوهش از داده‌های منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده ۶ خاک که طیف وسیعی از بافت‌ها را شامل می‌شود استفاده گردید. داده‌های مورد استفاده شامل دو خاک با کدهای ۴۶۵۰ و ۳۰۹۰ به ترتیب با بافت‌های شنی و لوم سیلت‌دار از بانک خاک آنسودا (Names et al., 2001)، دو خاک با بافت‌های لوم شنی و لوم رسی (Pachepsky et al., 1984) و دو خاک دیگر با بافت‌های لومی و رسی (Mualem, 1976b) است.

ارزیابی

برای ارزیابی نتایج حاصله دو شاخص ضریب تعیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) مورد استفاده قرار گرفت که از روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (O_i - P_i)^2}{\sum_i (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

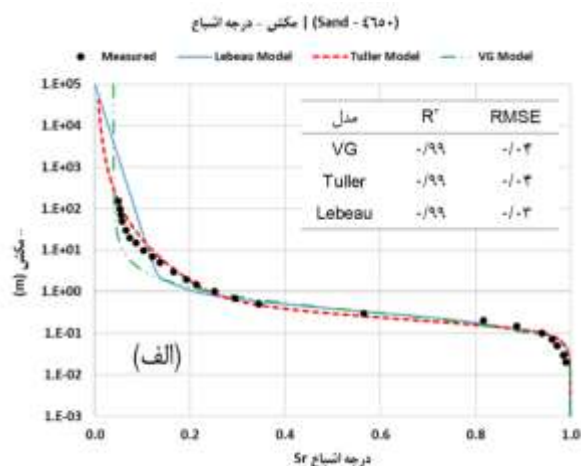
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{z}} \quad (9)$$

جدول ۱- اطلاعات خاک‌های مورد استفاده در پژوهش و پارامترهای بهینه‌سازی شده برای مدل‌های مختلف

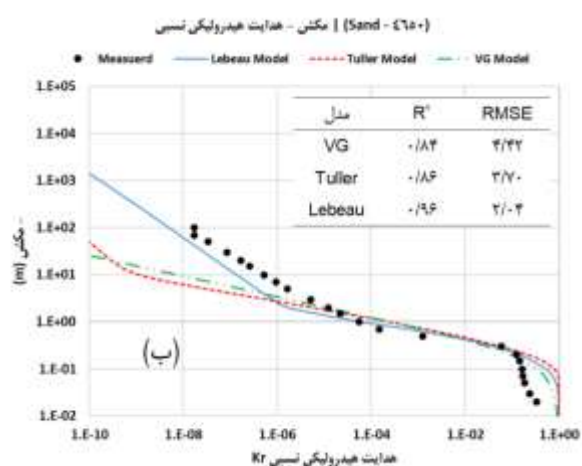
هدایت هیدرولیکی اشباع (k_s)	تخلخل (ϕ)	مدل (VG-M)			مدل (Lebeau and Konrad)			مدل (Tuller and Or)						
		α	n_{VG}	θ_r	θ_o	σ	$h_{m, median}$	سطح ویژه تخمین زده شده بر اساس بافت خاک (SA_m)	سطح ویژه تخمین زده شده (معادله ۴ - SA_e)	تعداد گوشه/ضلع (n)	ω	ε	μ_b	β
cm/day	-	cm ⁻¹	-	-	m	m ³ /g	m ³ /g	m ³ /g	m ³ /g	-	-	-	kg	-
Sand الف	۰/۳۸	۲/۰۲۲	۰/۰۴۵	۰/۰۱۵	۰/۰۵۳	۰/۸۰۶	۰/۳۲۳	۱-۲۰	۹	۶	۰/۰۰۰۲۴	۰/۰۰۰۲۴	۰/۴۹۱	۳۱۸
Silt loam الف	۱۹/۵	۰/۴۵۶	۱/۱۹۱	۰/۰۰۰	۰/۲۴۱	۱/۸۸۵	۰/۸۱۷	۳۰-۹۰	۴۸	۴	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۶	۰/۱۵۶	۵۰۰۰۰۰۰
Sandy loam ب	۸/۰	۰/۴۰۴	۱/۴۶۴	۰/۰۰۰	۰/۰۶۴	۱/۶۳۲	۰/۰۴۰	۲۳-۳۴	۲۷	۳	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۷	۰/۴۰۳	۶۰۰۰
Loam ج	۱۷/۳	۰/۵۲۸	۱/۷۱۷	۰/۰۲۰	۰/۱۵۲	۰/۵۵۵	۰/۶۸۹	۲۸-۷۷	۵۴	۳	۰/۰۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۰۲۶	۰/۹۸۰	۲۵۰۰۰۰
Clay loam د	۰/۷	۰/۴۴	۱/۲۴۱	۰/۰۰۵	۰/۲۰۹	۲/۶۵۴	۰/۹۴۸	۶۹-۱۷۳	۸۳	۳	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۸۵۰	۵۵۰۰۰
Clay ه	۰/۱	۰/۴۴۶	۱/۱۷۱	۰/۰۰۲	۰/۳۷۹	۲/۴۶۵	۰/۴۵۲	۱۰۰-۳۴۸	۱۲۸	۳	۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۷۳۰	۲۰۰۰۰۰۰

الف: بانک خاک UNSODA (Names et al., 2001) / ب: (Pachepsky et al., 1984) / ج: (Mualem, 1976b) / د: پارامتر بهینه شده / ه: سطح ویژه تخمین زده شده بر اساس بافت خاک با استفاده از توابع زودیاقت (Or and Wraith, 1999)

کانراد در بخش نزدیک به خشک که سهم جریان فیلم بیشتر است عملکرد بهتری را نشان داده و نسبت به دو مدل دیگر برتر بوده است. با توجه به اینکه مدل ون گنوختن-معلم، جریان فیلم را در نظر نمی‌گیرد، روندی خطی را در ناحیه‌ی خشک از خود نشان می‌دهد، همچنین مدل تولر-آر انعطاف قابل قبولی را در محدوده رطوبتی خشک که جذب سطحی پدیده‌ی غالب است از خود نشان نداده است.



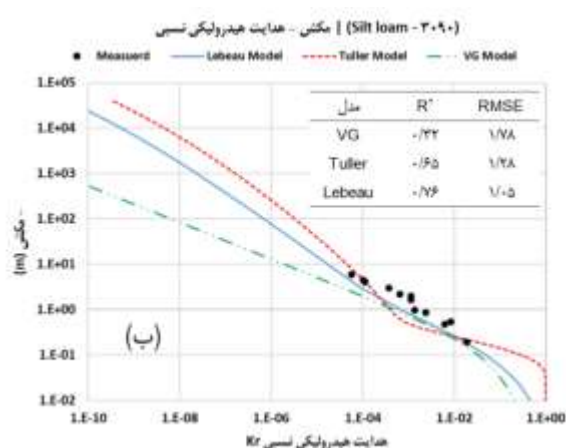
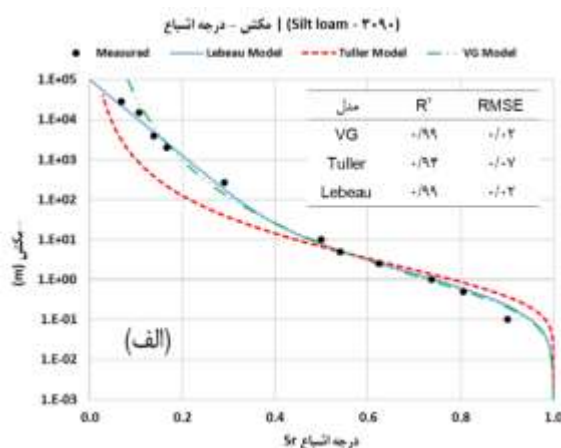
شکل (۳) منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری و برآورد شده با سه مدل ون گنوختن، تولر-آر و لیبو-کانراد را برای خاک شنی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود، اختلاف زیادی بین آماره‌ها در هر سه مدل وجود ندارد و هر سه مدل موفق به برازش منحنی مشخصه بر داده‌های اندازه‌گیری شده بودند. در شکل (۳-ب) هر سه مدل در ناحیه نزدیک به اشباع بیش‌برآورد و در ناحیه نزدیک به خشک کم‌برآورد را نشان داده‌اند، اما مدل لیبو-



شکل ۳- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده برای خاک "Sand". الف) منحنی مشخصه، ب) منحنی هدایت هیدرولیکی.

انحراف بیشتری دارد. در شکل (۳-ب) علی‌رغم اینکه داده‌های موجود، بازه‌ی رطوبتی را خوب پوشش نمی‌دهند اما در محدوده‌ای که داده‌ها ثبت شده است در هر سه مدل کم‌برآورد صورت گرفته است، باین وجود آماره‌های R² و RMSE نمایانگر برتری مدل لیبو نسبت به سایر مدل‌ها است.

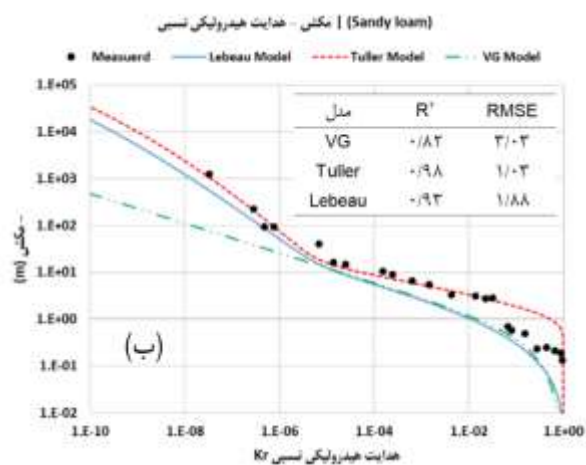
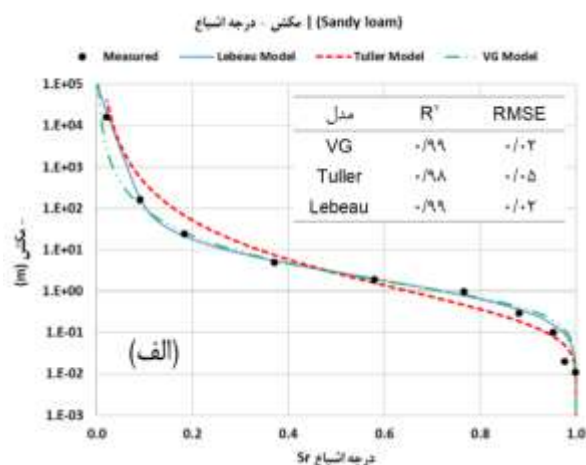
شکل (۴) منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری و برآورد شده با سه مدل ون گنوختن، تولر-آر و لیبو-کانراد را برای خاک لوم سیلت دار نشان می‌دهد. در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود که مدل لیبو و ون گنوختن با دقت بسیار خوبی به مقادیر آزمایشگاهی برازش پیدا کرده است و آماره‌های R² و RMSE نیز این نتیجه را تأیید می‌کنند؛ اما مدل تولر در بازه‌های تر و خشک نسبت به داده‌ها،



شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده برای خاک "Silt loam". الف) منحنی مشخصه، ب) منحنی هدایت هیدرولیکی.

شکل (۵) منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری و برآورد شده با سه مدل ون گنوختن، تولر-اُر و لیبو-کانراد را برای خاک لوم شنی نشان می‌دهد. در نمونه خاک شکل (۵-الف) هر سه مدل با دقت بسیار خوبی برازش یافته‌اند و مدل لیبو-کانراد بهترین عملکرد را داشته و خطی بودن منحنی مشخصه در ناحیه‌ای که نیروهای جذب سطحی غالب هستند قابل مشاهده است اما مدل تولر باز هم در قسمت‌های خیلی خشک و اشباع انعطاف لازم را نداشته است؛ در شکل (۵-ب) مدل تولر بهتر از سایر مدل‌ها و با $R^2=0/98$ و

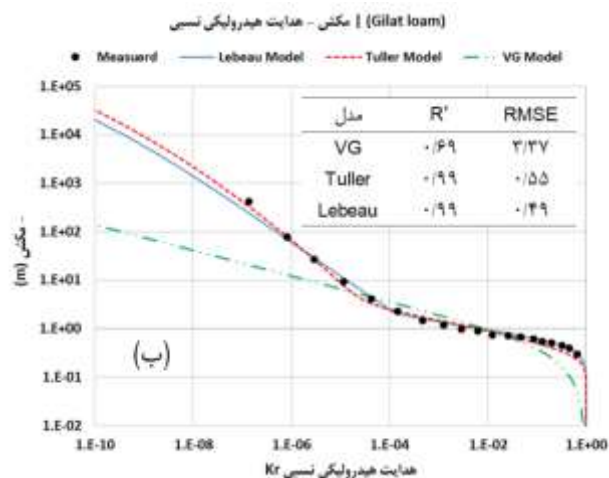
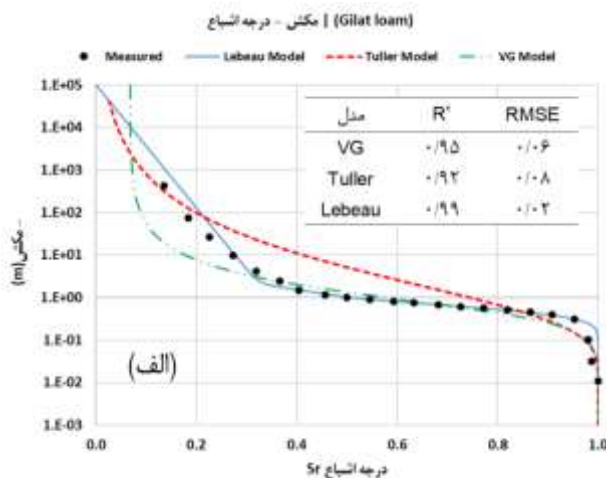
شکل (۵) منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری و برآورد شده با سه مدل ون گنوختن، تولر-اُر و لیبو-کانراد را برای خاک لوم شنی نشان می‌دهد. در نمونه خاک شکل (۵-الف) هر سه مدل با دقت بسیار خوبی برازش یافته‌اند و مدل لیبو-کانراد بهترین عملکرد را داشته و خطی بودن منحنی مشخصه در ناحیه‌ای که نیروهای جذب سطحی غالب هستند قابل مشاهده است اما مدل تولر باز هم در قسمت‌های خیلی خشک و اشباع انعطاف لازم را نداشته است؛ در شکل (۵-ب) مدل تولر بهتر از سایر مدل‌ها و با $R^2=0/98$ و



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده برای خاک "Sandy loam". (الف) منحنی مشخصه، (ب) منحنی هدایت هیدرولیکی.

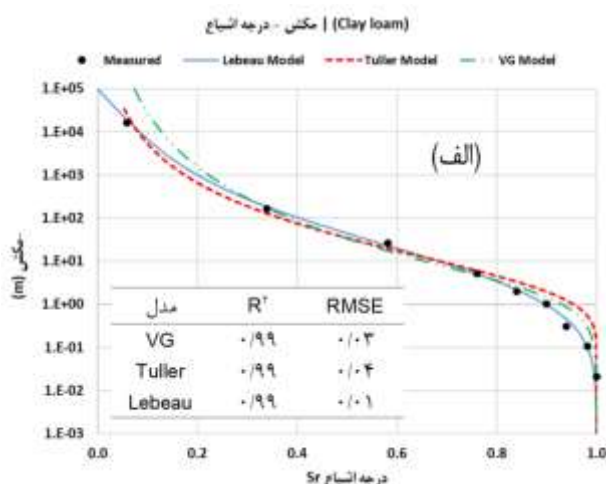
انعطاف‌پذیری در دونیمه‌ی نمودار واضح است؛ اما در شکل (۶-ب) هر دو مدل فیزیکی، بسیار خوب به نقاط برازش یافته‌اند، با این تفاوت که مدل تولر در تخمین جریان فیلم و مدل لیبو در تخمین جریان مویبگی بهتر عمل کرده است. مدل ون گنوختن-معلم نیز عملکرد نامناسبی را داشته و همان‌طور که انتظار می‌رفت در بازه‌ای که جریان فیلم غالب است ناتوان بوده است. بدین ترتیب مدل لیبو هر دو منحنی را با R^2 و RMSE بسیار خوب تخمین زده است.

منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری و برآورد شده با سه مدل ون گنوختن، تولر-اُر و لیبو-کانراد برای خاک لوم در شکل (۶) نمایش داده شده است. مدل لیبو-کانراد در شکل (۶-الف) بسیار بهتر از سایر مدل‌ها قادر به برازش نقاط اندازه‌گیری شده بوده و همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل ون گنوختن در انتهای خشک بازه که جذب سطحی تأثیرگذار است (مکش حدود ۱- متر) عملکرد نامناسبی را نداشته است. همچنین در مدل تولر باز هم ضعف

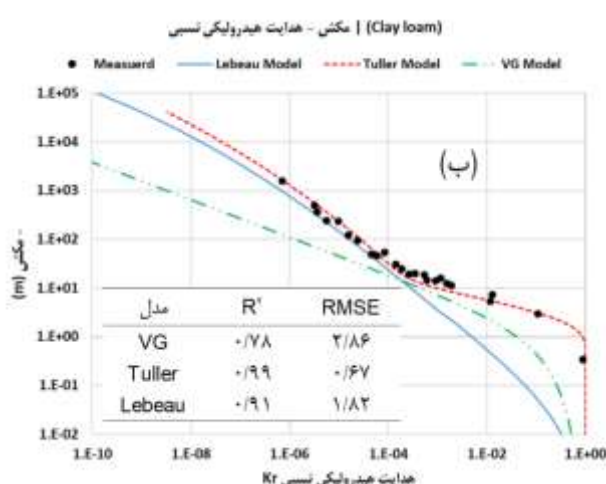


شکل ۶- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده برای خاک "loam". (الف) منحنی مشخصه، (ب) منحنی هدایت هیدرولیکی.

شاخص‌های آماری آن نیز حاکی از این نتیجه است، اما مدل لیبو-کانراد به دلیل عملکرد ضعیف مدل کوسوگی در ناحیه جریان مویبندی نتوانسته به خوبی آن را برآورد کند و انحنای لازم را نداشته است (Kosugi, 1996). مدل ون گنوختن-معلم نیز در بازه‌ای که جریان مویبندی غالب است، عملکرد متوسطی داشته $R^2=0/78$ و $RMSE=2/86$ و باز هم قادر به برآورد جریان در بازه‌ای که تحت تأثیر جذب سطحی می‌باشد، نبوده است.



منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری و برآورد شده با سه مدل ون گنوختن، تولر-آر و لیبو-کانراد برای خاک لوم رسی در شکل (۷) نمایش داده شده است. در شکل (۷-الف) نیز هر سه مدل در برازش توانا بوده اما مدل لیبو-کانراد بهترین نتایج در آماره‌های R و $RMSE$ را دارد. دو مدل تولر-آر و ون گنوختن، در دو قسمت انتهایی و ابتدایی کمی انحراف داشته‌اند. در مقابل شکل (۷-ب) نشان می‌دهد که مدل تولر بسیار بهتر از سایر مدل‌ها عمل کرده است و



شکل ۷- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده برای خاک "Clay loam". الف) منحنی مشخصه، ب) منحنی هدایت هیدرولیکی.

سطحی در نتایج بسیار تأثیرگذار می‌باشد؛ اما در مقایسه دو مدل فیزیکی مذکور برای برازش منحنی مشخصه، مدل لیبو-کانراد در تمامی نمونه خاک‌ها قادر به برازش نقاط با دقت بسیار خوبی بوده و از مدل دیگر برتر می‌باشد. در تخمین هدایت هیدرولیکی با اینکه تمامی مدل‌ها دقت قابل قبولی را از خود نشان داده‌اند، مدل لیبو-کانراد به دلیل استفاده از مدل کوسوگی و ضعف آن در ناحیه مویبندی، در تخمین هدایت هیدرولیکی خاک‌هایی با بافت رسی در ناحیه نزدیک به اشباع کم‌برآورد می‌کند، لذا به کارگیری سایر مدل‌ها در قسمتی که جریان مویبندی غالب است می‌تواند به بهبود این ضعف کمک کند. مدل تولر-آر نیز در خاک‌های لومی عملکرد قابل قبولی داشته و مدل ون گنوختن-معلم در اکثر خاک‌ها ضعیف‌تر از سایرین عمل کرده است. با وجود اینکه مدل لیبو-کانراد نسبت به مدل تولر-آر دارای تنوعی بسیار ساده‌تر، تعداد پارامترهای بهینه‌سازی کمتر (سه پارامتر در مقابل چهار) و اطلاعات ورودی کمتری می‌باشد، عملکرد مناسب‌تری در تخمین منحنی مشخصه داشته و در تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع نیز قابل قبول بوده است. در صورتی که بهینه‌سازی پارامترها با توجه به داده‌های هدایت هیدرولیکی صورت پذیرد، هر دو مدل فیزیکی توانایی برازش بهتر منحنی هدایت

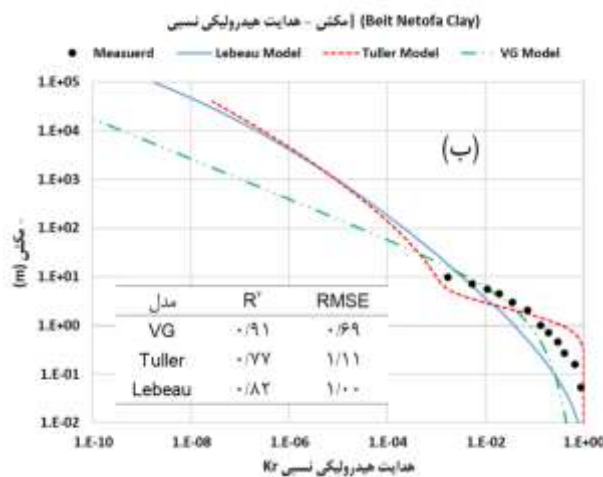
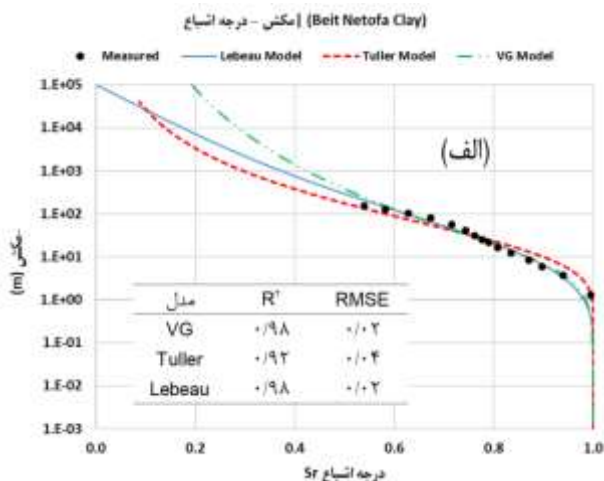
شکل (۸) منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری و برآورد شده با سه مدل ون گنوختن، تولر-آر و لیبو-کانراد را برای خاک رسی نشان می‌دهد. نتایج خاک با بافت رسی در شکل (۸-الف) نشان می‌دهد که دو مدل لیبو-کانراد و ون گنوختن عملکرد بهتری را نسبت به مدل تولر-آر داشته‌اند؛ اما در ناحیه جذب سطحی به دلیل کمبود اطلاعات اندازه‌گیری شده، مقایسه مدل‌ها ممکن نیست. همچنین در شکل (۸-ب) مدل لیبو همان رفتار شکل (۷-ب) را از خود نشان داده است و در قسمت اشباع کم‌برآورد صورت گرفته است که نشان از عملکرد نامناسب مدل مویبندی برای نواحی نزدیک به اشباع می‌باشد. مدل تولر-آر نیز عملکرد مناسبی را در قسمت اشباع نداشته است و مدل ون گنوختن-معلم در بازه‌ای که داده‌ها در دسترس است نسبت به دو مدل فیزیکی بهتر عمل کرده و از R^2 و $RMSE$ بهتری برخوردار است.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان دهنده برتری دو مدل فیزیکی تولر-آر و لیبو-کانراد نسبت به مدل تجربی ون گنوختن-معلم در مدل‌سازی منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی است و در نظر گرفتن پدیده جذب

در انعطاف‌پذیری مدل می‌گردد. لذا پیش‌بینی می‌شود که با تعمیم مدل به دیگر توابع توزیع برای اندازه منافذ همچون تابع توزیع لوگ-نرمال، توزیع گامای ناقص و یا توزیع ویبال، برازش بهتری به منحنی مشخصه خاک بدست آید و به‌تبع آن تخمین بهتری از هدایت هیدرولیکی غیراشباع حاصل گردد.

هیدرولیکی را دارا می‌باشند. با این وجود اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی در تمام بازه رطوبتی دشوارتر از اندازه‌گیری رطوبت خاک می‌باشد. در برخی از خاک‌ها پارامتر β در مدل تولر-آر از حساسیت کمی در تخمین منحنی مشخصه برخوردار است، اما در تغییر منحنی هدایت هیدرولیکی بسیار تأثیرگذار است، لذا بهینه‌سازی این پارامتر مشکل می‌باشد. یکی از محدودیت‌های عمده مدل تولر استفاده از توزیع گاما با ضریب ثابت $\gamma = 2$ می‌باشد که باعث ایجاد محدودیت



شکل ۸- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده برای خاک "Clay". (الف) منحنی مشخصه، (ب) منحنی هدایت هیدرولیکی.

Lebeau, M., & Konrad, J. M. 2010. A new capillary and thin film flow model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. 46(12).

Mualem, Y. 1976a. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*. 12(3): 513-522.

Mualem, Y. 1976b. A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils.

Nemes, A. D., Schaap, M. G., Leij, F. J., & Wösten, J. H. M. 2001. Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. *Journal of Hydrology*. 251(3-4): 151-162.

Or, D., & Assouline, S. 2013. The foam drainage equation for unsaturated flow in porous media. *Water Resources Research*. 49(10): 6258-6265.

Or, D., & Tuller, M. 1999. Liquid retention and interfacial area in variably saturated porous media: Upscaling from single-pore to sample-scale model. *Water Resources Research*. 35(12): 3591-3605.

Or, D., & Wraith, J. M. 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model. *Water*

مراجع

Birdsell, D. T., Rajaram, H., Dempsey, D., & Viswanathan, H. S. 2015. Numerical model of hydraulic fracturing fluid transport in the subsurface with pressure transient and density effects. In 49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.

Burdine, N. 1953. Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Journal of Petroleum Technology*. 5(03): 71-78.

Campbell, G. S., & Shiozawa, S. 1992. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils, 317-328.

Ghanbarian, B., Hunt, A. G., Skinner, T. E., & Ewing, R. P. 2015. Saturation dependence of transport in porous media predicted by percolation and effective medium theories. *Fractals*. 23(01): 1540004.

Hunt, A. G., Ewing, R. P., & Horton, R. 2013. What's wrong with soil physics?. *Soil Science Society of America Journal*. 77(6): 1877-1887.

Kosugi, K. I. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resources Research*. 32(9): 2697-2703.

- distributed model of pesticide movement in Dutch macroporous soils. *Journal of hydrology*. 470: 316-327.
- Tuller, M., & Or, D. 2001. Hydraulic conductivity of variably saturated porous media: Film and corner flow in angular pore space. *Water Resources Research*. 37(5): 1257-1276.
- Tuller, M., & Or, D. 2002. Unsaturated Hydraulic Conductivity of Structured Porous Media A Review of Liquid Configuration-Based Models. *Vadose Zone Journal*: 1(1): 14-37.
- Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*. 44(5): 892-898.
- Weber, T. K., Iden, S. C., & Durner, W. 2017. Unsaturated hydraulic properties of Sphagnum moss and peat reveal trimodal pore-size distributions. *Water Resources Research*. 53(1): 415-434.
- Wraith, J. M., & Or, D. 1998. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. *Journal of Natural Resources and Life Sciences Education*. 27(1): 13-19.
- Wyllie, M. R. J., & Gardner, G. H. F. 1958. The generalized kozeny-carman equation. *World oil*. 146(4): 121-128.
- Zhao, Y., Hu, X., & Li, X. 2020. Analysis of the intra-aggregate pore structures in three soil types using X-ray computed tomography. *CATENA*. 193: 104622.
- Resources Research*. 35(2): 371-383.
- Pachepsky, Y. A., Shcherbakov, R. A., Varallyay, G., & Rajkai, K. 1984. On obtaining soil hydraulic conductivity curves from water retention curves. *Pochvovedenie*. 10: 60-72.
- Philip, J. R. 1977. Unitary approach to capillary condensation and adsorption. *The Journal of Chemical Physics*. 66(11): 5069-5075.
- Purcell, W. R. 1949. Capillary pressures-their measurement using mercury and the calculation of permeability therefrom. *Journal of Petroleum Technology*. 1(02): 39-48.
- Sadeghi, M., Ghahraman, B., Ziaei, A. N., Davary, K., & Reichardt, K. 2012. Invariant solutions of Richards' equation for water movement in dissimilar soils. *Soil Science Society of America Journal*. 76(1): 1-9.
- Sakai, M., Toride, N., & Šimůnek, J. 2009. Water and vapor movement with condensation and evaporation in a sandy column. *Soil Science Society of America Journal*. 73(3): 707-717.
- Sleutel, S., Cnudde, V., Masschaele, B., Vlassenbroek, J., Dierick, M., Van Hoorebeke, L., ... & De Neve, S. 2008. Comparison of different nano-and micro-focus X-ray computed tomography set-ups for the visualization of the soil microstructure and soil organic matter. *Computers & Geosciences*. 34(8): 931-938.
- Tiktak, A., Hendriks, R. F. A., Boesten, J. J. T. I., & Van der Linden, A. M. A. 2012. A spatially

Comparison of Two Physically Capillary-Adsorption Based Models for Estimation of Unsaturated Hydraulic Conductivity at Both near Dry and Saturated Water Contents

A. Tehrani¹, A. Liaghat^{2*}, S. Norouzi³

Received: Aug.06, 2020

Accepted: Sep.09, 2020

Abstract

It has been documented that the assumption of capillary movement of water in a bundle of cylindrical tubes often leads to systematically underestimation of soil unsaturated hydraulic conductivity at low potentials which is due to ignoring the contribution of adsorptive forces and liquid films. In this study, the performance of two physical models of (Tuller-Or) and (Lebeau-Konrad) that take into account the contribution of both adsorptive and capillary forces and the well-known capillary-based model of (Van Genuchten-Mualem) for modeling the soil-water retention curve and estimation of the unsaturated hydraulic conductivity were evaluated. To that end, experimental data gathered from literature including six soils that cover a broad range of texture and hydraulic behavior. The results showed the superiority of the two capillary-adsorption models over the capillary-based Van Genuchten-Mualem model in estimating the soil-water characteristic curve and unsaturated hydraulic conductivity. Among the two physically capillary-adsorption based models, the Lebeau-Konrad model performed better. The results showed that the Lebeau-Konrad model underestimates the hydraulic conductivity of clayey soils in the near saturation range and the best performance of the Tuller-Or model was shown to be for loamy soils. Because the Tuller-Or model is the most comprehensive and physics-based model for modeling the unsaturated hydraulic conductivity up to date, future studies should be devoted to improving the flexibility of this model via extending the model to other pore size distribution than the original Gamma distribution, such as lognormal, incomplete gamma and Weibull distributions.

Keywords: Lebeau-Konrad model, Physical model, Soil-water characteristic curve, Tuller-or model

1- MSc Student, Department of Irrigation and Reclamation, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran

2- Professor, Department of Irrigation and Reclamation, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran

3- PhD Candidate, Department of Irrigation and Reclamation, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: aliaghat@ut.ac.ir)

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی جریان در سازه ترکیبی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای تک سیکل - دریچه

بهزاد خلیلی^۱، اکرم عباسپور^{۲*}، داود فرسادی‌زاده^۳، جواد پارسا^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۸

چکیده

سرریزهای توام با دریچه سازه مهم و کلیدی در مدیریت آب در کانال‌های آبیاری می‌باشند. از طرف دیگر استفاده از سرریزهای کنگره‌ای به دلیل طول تاج بیش‌تر نسبت به سرریزهای خطی، در یک دبی ثابت، موجب کاهش نوسانات سطح آب می‌گردد. از آنجایی که با انباشت مواد رسوبی در بالادست سرریزها، شرایط جریان تغییر یافته و دقت روابط استخراج شده کاهش می‌یابد، به همین منظور، استفاده از ترکیب سرریز با دریچه می‌تواند راه‌حلی مفید برای عبور مواد شناور از روی سرریز و انتقال مواد رسوبی از زیر دریچه باشد. در تحقیق حاضر، به بررسی آزمایشگاهی جریان در سازه‌ی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای تک سیکل همراه با دریچه برای سه زاویه رأس ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه و با بازشدگی‌های دریچه ۲، ۴ و ۶ سانتی‌متر و سه ارتفاع سرریز ۱۴، ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متر در یک کانال مستطیلی پرداخته شده است. با توجه به پارامترهای مؤثر بر مدل ترکیبی، مقدار ضریب دبی اندازه‌گیری شده به طور متوسط در محدوده ۰/۶۱-۰/۷۵ به دست آمد. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت H/P ، ضریب دبی روند نزولی را طی می‌کند و به ازای $H/P > 0.6$ ضریب دبی به مقدار ثابت ۰/۶۱ می‌رسد. ضریب دبی مدل ترکیبی با افزایش زوایای رأس سرریز، افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد ضریب دبی مدل سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای تک سیکل - دریچه با زاویه رأس سرریز ۲۵ درجه و بازشدگی ۲ سانتی‌متر، در مقایسه با مدل‌های ترکیبی با زاویه رأس سرریز ۱۵ و ۲۰ درجه بیشترین مقدار ضریب دبی را دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: زاویه رأس، سرریز کنگره‌ای - دریچه، ضریب دبی، مدل آزمایشگاهی

مقدمه

واقع محور تاج آن‌ها غیرمستقیم است. به دلیل غیرمستقیم بودن تاج آن‌ها نسبت به سرریزهای با تاج مستقیم، طول تاج مؤثر بیش‌تری دارند. بنابراین برای یک ارتفاع آب بالادست ثابت نسبت به سرریزهای با تاج مستقیم دبی بیش‌تری را عبور می‌دهند. این مزیت در کانال‌ها و رودخانه‌ها باعث می‌شود که ارتفاع آزاد کم‌تری در کانال مورد نیاز باشد و مقدار خاکریزی برای حفاظت زمین‌های بالادست را کاهش می‌دهد (Lux, 1984).

با توجه به مزیت‌های سرریز کنگره‌ای کاربرد اصلی این سرریزها در مناطقی است که دارای عرض ثابت کم بوده و سرریز مستقیم جوابگوی نیاز دبی موجود نیست. با این مسئله در مخازن سدها و شبکه‌های آبیاری ممکن است مواجه شد. برای طراحی سرریزها آگاهی از عملکرد هیدرولیکی آن‌ها مورد نیاز است. پروژه سرریز کنگره‌ای برآزون روی دریاچه واکوس ۵ در تگزاس با افزایش جریان عبوری ارتفاع آزاد کمتری در مقایسه با سرریزهای خطی نیاز دارد و هوادهی مناسب و افزایش راندمان استهلاک از مزایای استفاده از این سرریز می‌باشد (Crookston, 2010). اکثر پژوهش‌های سرریزهای

اندازه‌گیری میزان جریان عبوری در شبکه‌های انتقال آب و فاضلاب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا روش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری دبی آب در کانال‌های روباز وجود دارد. انواع سرریزها، دریچه‌ها و پارشال فلوم‌ها به صورت عمده در اندازه‌گیری جریان و کنترل سطح آب استفاده می‌شوند. از مهم‌ترین دلایل استفاده از این سازه‌ها به عنوان وسایل اندازه‌گیری داشتن رابطه دبی - اشل ساده است (Chow, 1959). سرریزهای کنگره‌ای، سرریزهایی می‌باشند که در پلان دارای خطوط شکسته و دیواره‌ای پیوسته هستند. در

۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

۴- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

(* نویسنده مسئول: Email akabbaspour@yahoo.com)

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.6.6

Gharahgezlou, 2014). فتاحی (۱۳۹۴)، به بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سازه ترکیبی سرریز دریچه لبه تیز - قوسی در پلان پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش پارامترهای h/a (نسبت عمق بالادست جریان به بازشدگی دریچه) و H/a (نسبت هد آب روی سرریز به بازشدگی دریچه) منجر شده است تا ضریب دبی به ازای بازشدگی ۱ و ۲ سانتی‌متر کاهش و در بازشدگی ۳ سانتی‌متر افزایش یابد. پاشازاده و همکاران (۱۳۹۵)، خصوصیات هیدرولیکی ۱۸ مدل ترکیبی سرریز - دریچه‌ی دوزنقه‌ای را در سه گروه متفاوت با سه بازشدگی مختلف دریچه در انتهای کانال باز با مقطع دایره‌ای بررسی کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ضریب دبی به‌دست آمده مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. موسویان شیراز (۱۳۹۶)، ضریب دبی در مدل ترکیبی سرریز-دریچه منشوری را با استفاده از نرم‌افزار FLUENT بررسی نمودند. نتایج نشان داد ضریب دبی در سرریز-دریچه منشوری برای مدل منشوری رو به پایین نسبت به مدل‌های منشوری متقارن و منشوری رو به بالا بیش‌تر بود. پسر کلو و عمادی (۱۳۹۷)، هیدرولیک جریان در سازه‌ی ترکیبی سرریز دریچه با سرریز مرکب دایره‌ای - دوزنقه‌ای - مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که براساس داده‌های آزمایشگاهی، ضریب دبی در سرریز-دریچه مرکب، در محدوده $0/38$ تا $0/78$ است. فو و همکاران به بررسی آزمایشگاهی دبی جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز-دریچه پرداختند. نتایج حاصل با شاخص‌های آماری مورد بررسی قرار گرفت و نشان داد روابط تجربی مدل‌های مختلف با مقادیر آماری $RMSE=0.053$ ، $AMCC=0.870$ و $MAPE=0.058$ تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت (Fu et al., 2018). صالحی و عظیمی، شش مدل ترکیبی سرریز-دریچه را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و خصوصیات دبی جریان را ارزیابی کردند. در نهایت، براساس هندسه و دبی سرریز-دریچه، معادلات تجربی عمومی برای تخمین بار آبی نرمال برای کاربردهای مهندسی عملی تهیه شد (Salehi and Azimi, 2019).

با توجه به این‌که استفاده از سرریزها در سیستم انتقال آب در رودخانه‌ها و کانال‌های خاکی نیز انجام می‌گیرد و با توجه به درصد رسوب و مواد معلق بالا در این مکان‌ها و با مطالعه در پژوهش‌های انجام شده، تاکنون تحقیقات اندکی بر روی جریان‌های ترکیبی سرریزهای کنگره‌ای صورت گرفته است. از آن‌جا که تلفیق دو سازه سرریز و دریچه برخی از نواقص کاربرد جداگانه سرریز و دریچه را برطرف نموده و نتایج ارزشمندی از آن حاصل شده است و با در نظر گرفتن نتایج قابل‌توجهی که از کاربرد سرریزهای کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای مستقیم حاصل شده است، لذا در این تحقیق به بررسی سازه ترکیبی سرریزهای کنگره‌ای همراه با دریچه کشویی پرداخته شده است.

کنگره‌ای برای شکل نمای از بالای مستطیلی و مثلثی انجام گرفته است. مقدار دبی عبوری از سرریزها با ارتفاع آب روی سرریز به توان $1/5$ متناسب است ولی در دریچه‌ها این توان برابر $0/5$ می‌باشد (حسینی و ابریشمی، ۱۳۸۴). بنابراین سرریزها نسبت به تغییرات ارتفاع آب روی سرریز نسبت به دریچه‌ها حساس‌تر می‌باشند، اما دقت سرریز در تنظیم ارتفاع بالادست خود نسبت به دریچه بیش‌تر است. تجمع مواد رسوبی در بالادست وسائل کنترل و اندازه‌گیری دبی در لوله‌ها، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، کانال‌های آبیگری و همچنین فاضلاب از معضلات اندازه‌گیری دبی می‌باشد. مدل سرریز-دریچه در مقایسه با وسایل رایج امکان نزدیک نمودن شرایط واقعی را به فرضیات اصلی تئوری با توجه به کاهش نوسانات سطح آب و افت انرژی، استخراج روابط و تخمین دبی را با دقت بیش‌تر میسر می‌نماید. در این مدل مواد قابل‌تنه‌نشین شدن به راحتی از قسمت دریچه خارج و مواد معلق به شکل بهتری از سرریز تخلیه می‌شوند. برای کم‌تر کردن مشکلات و نواقص سرریزها و دریچه‌ها و همچنین استفاده از مزایای هر کدام می‌توان از این دو سازه به‌صورت ترکیبی استفاده کرد.

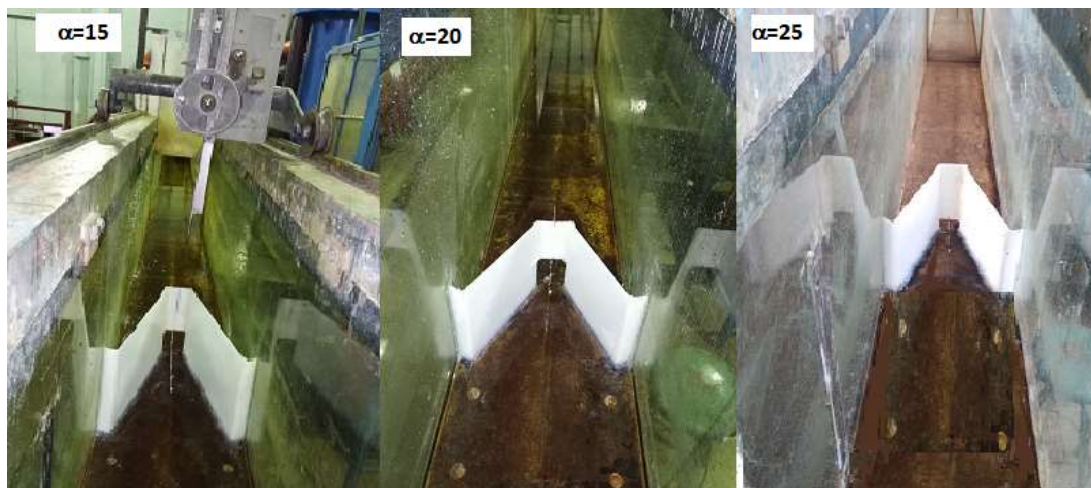
در زمینه ترکیب سرریز با دریچه تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. از جمله در ارتباط با دریچه‌ها می‌توان به تحقیقات راجاراتنام و سویرامانیا و راجاراتنام، اشاره نمود (Rajaratnam and Subramaniya, 1967, 1976; Rajaratnam, 1977) در ارتباط با جریان از روی سرریزها هم می‌توان به تحقیقات کیندرواثر و کارتر، آکرز و همکاران و سوامی، اشاره کرد (Kindsvater and Carter, 1957; Ackers et al., 1978; Swamee, 1988) سازه‌های ترکیبی را اولین بار احمد معرفی کرد (Ahmad, 1985).

هایاوی و همکاران به بررسی سازه ترکیبی سرریز مثلثی و دریچه مستطیلی پرداختند و نتیجه حاصل از مطالعه آنان نشان داد که با افزایش نسبت P/H_w (نسبت ارتفاع سرریز به هد آب روی سرریز) ضریب دبی کاهش می‌یابد (Hayawi et al., 2008). سامانی و همکاران جریان ترکیبی بر روی سرریز دریچه مستطیلی لبه تیز بدون فشرده‌گی جانبی را در دو حالت استغراق (سرریز آزاد و دریچه مستغرق، سرریز و دریچه مستغرق) مدل‌سازی نمودند. در هر دو حالت مشاهده شد که پایاب بر عمق بالادست جریان و در نتیجه بر دبی جریان تأثیر می‌گذارد (Samani et al., 2009). قره‌گزلو و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی آزمایشگاهی اثر سرریز روی ضریب دبی دریچه استوانه‌ای در مدل ترکیبی پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که روند تغییرات ضریب دبی دریچه با پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر بر آن، در مدل ترکیبی و استفاده جداگانه، متفاوت خواهد بود. مسعودیان و همکاران سازه ترکیبی استوانه‌ای و لبه تیز را در شرایط مختلف استغراق مورد آزمون قرار دادند و نشان دادند که علاوه بر موارد فوق، نسبت عمق پایاب به عمق بالادست نیز روی ضریب دبی مؤثر است (Masoudian and

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام پذیرفت. جنس فلوم فلزی بوده که دیواره‌های آن در فاصله ۲ متری از مخزن تأمین فشار، از جنس شیشه می‌باشد. طول فلوم ۱۰ متر و عرض آن ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع

آن ۵۰ سانتی‌متر بوده و شیب فلوم ۰/۰۰۲ می‌باشد. مدل‌های مورد آزمایش در فاصله ۲/۷ متری از مخزن فلوم و ۷۰ سانتی‌متری پایین‌تر از دیواره شیشه‌ای فلوم نصب می‌شدند. در شکل ۱، مدل‌های سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای تک سیکل - درپچه مورد استفاده در این آزمایش‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایی از مدل‌های سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای تک سیکل - درپچه

اندازه‌گیری گردید. رابطه دبی در این سرریز به صورت زیر بدست آمده است:

$$Q = 0.6918(H)^{2.5} \quad (1)$$

که H ارتفاع آب روی تاج سرریز بر حسب متر و Q دبی بر حسب متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

تحلیل ابعادی جریان عبوری از مدل ترکیبی سرریز- درپچه

در این تحقیق ابتدا از روش پی- باکینگهام برای تعیین پارامترهای بی بعد استفاده شده است. پارامترهای سرعت (V)، چگالی (ρ) و عمق آب بالادست سرریز (y) به عنوان متغیر تکراری انتخاب شده که پارامترهای بی بعد ارائه شده در رابطه‌های ۲ و ۳، به- دست می‌آید:

$$f(P, L, W, \alpha, a, b, H_t, y, v, g, \sigma, \mu, \rho, C_d) = 0 \quad (2)$$

$$(3)$$

در رابطه ۲، P ارتفاع سرریز، H_t بار آبی بالادست، L طول مؤثر سرریز، W عرض کانال، α زاویه رأس سرریز، a ارتفاع درپچه، b عرض درپچه، σ کشش سطحی، μ لزجت دینامیکی سیال، g شتاب ثقل، C_d ضریب دبی می‌باشند.

در رابطه فوق پس از جایگزین نمودن اعداد وبر، فرود و رینولدز،

پس از اینکه مدل‌ها در داخل فلوم مستطیلی نصب گردید، با روشن کردن پمپ و تنظیم شیر فلکه، آب از روی سرریز عبور کرده و پس از اینکه جریان به حالت پایدار رسید، عمق آب در بالادست سرریز با استفاده از سطح سنج متحرک با دقت ۰/۱ میلی‌متر و دبی جریان از رابطه دبی- اشل سرریز مثلثی انتهایی فلوم اندازه‌گیری شد. این آزمایشات با ترکیب حالت‌های مختلف متغیرهای آزمایش شامل زوایای مختلف (α)، ارتفاع‌های مختلف (P)، بازشدگی‌های متفاوت درپچه (a)، طول مؤثر سرریز (L)، دبی (Q) و عمق جریان (y)، در شرایط مختلف از سرریز کنگره‌ای انجام شد. برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای با وجود درپچه و بررسی تأثیر پارامتر H_t/P (تغییرات ضریب دبی با پارامتر بدون بعد نسبت بار آبی بالادست به ارتفاع سرریز)، در این پژوهش تعداد ۲۸۸ آزمایش صورت گرفت. برای مشاهده جریان عبوری از زیر درپچه و روی سرریز، عمق جریان و همچنین مشاهده پروفیل سطح آب، مدل‌های ساخته شده ۲/۷ متر پایین‌تر از ابتدای فلوم (در قسمتی از فلوم با دیواره شیشه‌ای) نصب گردید. پس از اطمینان کامل از نصب صحیح سرریزها در داخل فلوم و آب‌بندی کامل، آب پشت سرریز جمع شده و با عبور از زیر درپچه و بالای سرریز، در نهایت در پایین‌دست از سرریز مثلثی عبور کرده و مجدداً به مخزن برمی‌گردد، لذا در هر آزمایش اندازه‌گیری سطح آب در بالادست سرریز و تاج سرریز به وسیله سطح سنج متحرک انجام گرفته و در پایین‌دست فلوم دبی جریان توسط سرریز مثلثی

سیکل - دریچه (شکل ۲)، تابعی از پارامترهای بدون بعد در رابطه ۶ می‌باشد:

$$C_d = f\left(\text{Fr}, \frac{H_t}{P}, \frac{L}{H_t}, \frac{H_t}{a}, \alpha\right) \quad (۶)$$

در جدول ۱، مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای تک سیکل - دریچه و در شکل ۲، پلان و جریان عبوری از روی مدل ترکیبی سرریز - دریچه ارائه شده است. با ترکیب رابطه‌های سرریز و دریچه، معادله مدل ترکیبی به دست می‌آید.

$$C_d = \frac{Q}{a b \sqrt{2gh} + \frac{2}{3}L \sqrt{2g} H_t^{3/2}} \quad (۷)$$

که در این رابطه Q دبی عبوری از سازه ترکیبی، a میزان بازشدگی دریچه، b عرض دریچه، L طول مؤثر سرریز، h بار آبی بالادست دریچه و C_d ضریب دبی سازه ترکیبی است.

به جای سه پارامتر بی بعد اول رابطه ۳، رابطه را به فرم زیر می‌توان نوشت:

$$f\left(\text{Re}, \text{We}, \text{Fr}, \frac{H_t}{b}, \frac{H_t}{P}, \frac{L}{H_t}, \frac{H_t}{W}, \frac{H_t}{a}, \alpha, C_d\right) = 0 \quad (۴)$$

اگر جریان روی مدل ترکیبی ورقه‌ای نباشد و به‌ازای اعداد رینولدز بالا تأثیرات لزجت در الگوی جریان را نادیده گرفت (Chow, 1959). بدین ترتیب عدد بی بعد رینولدز از رابطه بالا حذف می‌شود.

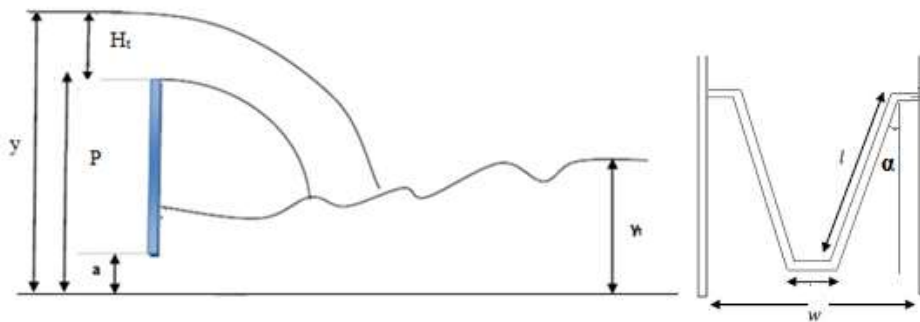
چنانچه مقدار محدودیت حداقل ارتفاع آب روی سرریز مدل ترکیبی ($H_t > 3 \text{ cm}$) رعایت شود، می‌توان کشش سطحی (عدد وبر) را نیز نادیده گرفت (به نقل از سامانی و جواهری، ۱۳۹۰). بدین ترتیب در آزمایش‌های انجام گرفته عرض دریچه (b) و عرض کانال (w) ثابت در نظر گرفته شده است و رابطه فوق را می‌توان به فرم ساده‌تری نوشت:

$$f\left(\text{Fr}, \frac{H_t}{P}, \frac{L}{H_t}, \frac{H_t}{a}, \alpha, C_d\right) = 0 \quad (۵)$$

در نتیجه، ضریب دبی در مدل سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای تک

جدول ۱- مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای تک سیکل - دریچه

دبی جریان (lit/s)	زاویه رأس سرریز (α)	ارتفاع سرریز (a) (cm)	ارتفاع سرریز (H_t) (cm)	بار آبی (b) (cm)	عرض دریچه (cm)
۵-۳۰	۱۵-۲۰-۲۵	۲-۴-۶	۱۴-۱۷-۲۰	۳-۱۰	۵



شکل ۲- شماتیک پلان و جریان عبوری از مدل سرریز - دریچه (حیدری و همکاران، ۱۳۹۱)

به مقدار ثابتی میل می‌کند. مدل ترکیبی با زاویه تاج سرریز ۲۵ درجه دارای بیشترین ضریب دبی می‌باشد. همانگونه که در شکل‌ها نیز دیده می‌شود، به‌ازای یک H_t/P ثابت، ضریب دبی مدل ترکیبی با زاویه تاج سرریز ۲۵ درجه در مقایسه با زاویه تاج سرریز ۱۵ و ۲۰ درجه، به ترتیب ۱۱ و ۶ درصد افزایش می‌یابد.

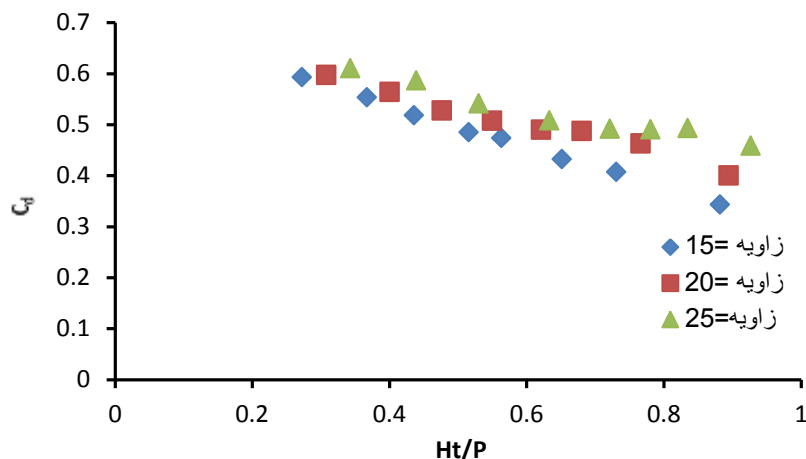
همچنین مدل ترکیبی با زاویه تاج سرریز ۲۵ درجه و بازشدگی دریچه ۲ سانتی‌متر دارای بیشترین ضریب دبی می‌باشد، همانگونه که در شکل‌ها نیز دیده می‌شود، به‌ازای یک H_t/P ثابت، با کاهش بازشدگی دریچه و افزایش زاویه تاج سرریز، ضریب دبی مدل ترکیبی افزایش می‌یابد.

نتایج و بحث

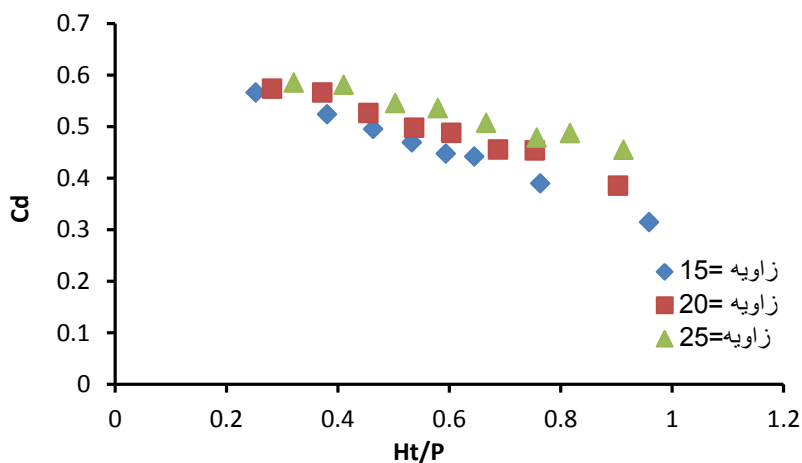
تأثیر زاویه سرریز و بازشدگی‌های مختلف دریچه بر روی ضریب دبی مدل ترکیبی

در شکل‌های ۳ تا ۵، تغییرات ضریب دبی به‌ازای H_t/P های مختلف برای مدل‌های ترکیبی با زوایای تاج سرریز ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه و بازشدگی‌های دریچه ۲، ۴ و ۶ سانتی‌متر به‌ازای ارتفاع ثابت ۱۴ سانتی‌متر مورد مقایسه قرار گرفته است.

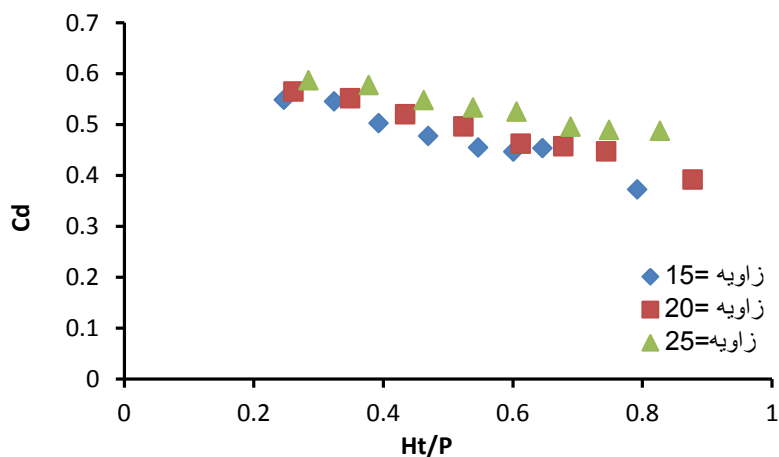
با توجه به شکل‌های ۳ تا ۵ می‌توان استنباط کرد که ضریب دبی مدل ترکیبی مقدار نزولی داشته و با افزایش مقدار H_t/P ، ضریب دبی



شکل ۳- مقایسه ضریب دبی مدل ترکیبی با زوایای مختلف برای بازشدگی درپچه ۲ سانتی متر



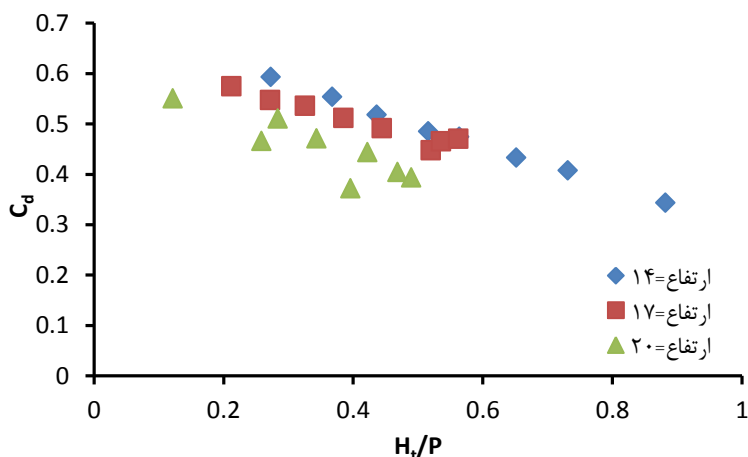
شکل ۴- مقایسه ضریب دبی مدل ترکیبی با زوایای مختلف برای بازشدگی درپچه ۴ سانتی متر



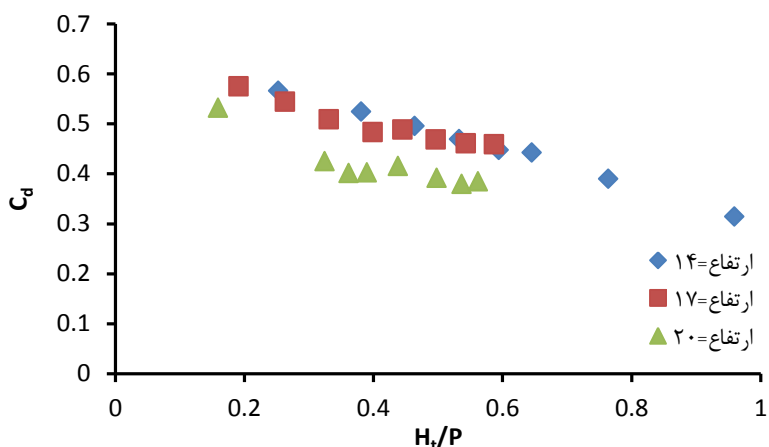
شکل ۵- مقایسه ضریب دبی مدل ترکیبی با زوایای مختلف برای بازشدگی درپچه ۶ سانتی متر

تأثیر ارتفاع و زوایای راس سرریز بر ضریب دبی مدل ترکیبی در شکل‌های ۶ تا ۱۱، تغییرات ضریب دبی به ازای H_t/P در سرریزها با ارتفاع‌های ۱۴، ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متری برای سه زاویه ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه نشان داده شده است.

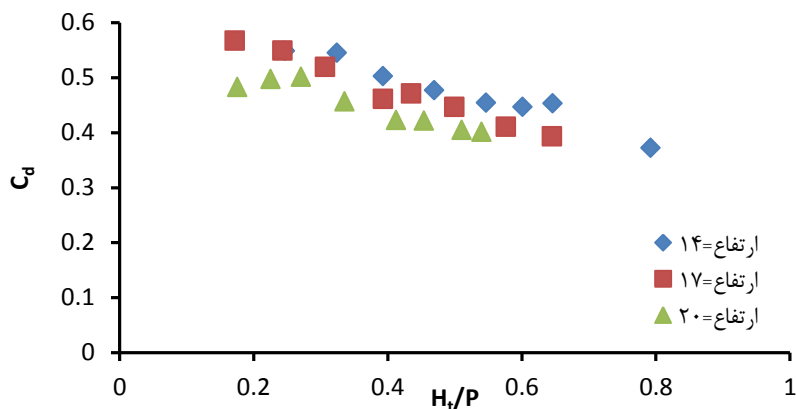
زیرا با افزایش زاویه، طول سرریز کاهش می‌یابد و با کاهش طول تداخل جریان ضریب دبی افزایش یافته است. همچنین با کاهش بازشدگی دریچه دبی خروجی از دریچه کاهش یافته و بار آبی بالایی سرریز افزایش می‌یابد. در نتیجه جریان تخلیه شده از روی سرریز افزایش می‌یابد ($Q \propto H_t^{3/2}$).



شکل ۶- تغییرات ضریب دبی به ازای ارتفاع‌های مختلف سرریز با زاویه تاج ۱۵ درجه و ارتفاع بازشدگی ۲ سانتی‌متر



شکل ۷- تغییرات ضریب دبی به ازای ارتفاع‌های مختلف سرریز با زاویه تاج ۱۵ درجه و ارتفاع بازشدگی ۴ سانتی‌متر

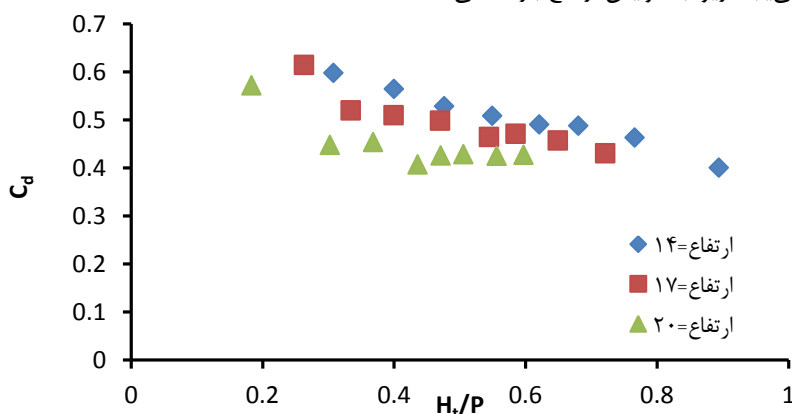


شکل ۸- تغییرات ضریب دبی به ازای ارتفاع‌های مختلف سرریز با زاویه تاج ۱۵ درجه و ارتفاع بازشدگی ۶ سانتی‌متر

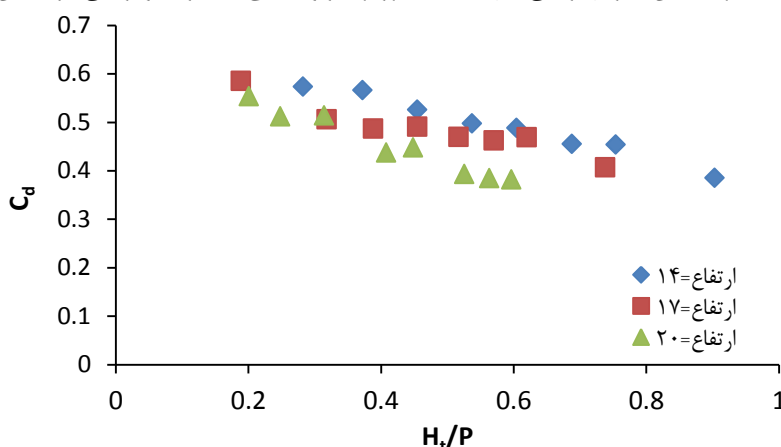
دریچه دبی خروجی از دریچه افزایش یافته و بار آبی بالای سرریز کاهش می‌یابد. در نتیجه سهم جریان تخلیه شده از روی سرریز کاهش می‌یابد.

در شکل‌های ۹ تا ۱۱، تغییرات ضریب دبی به ازای H_t/P در سرریزها با ارتفاع‌های ۱۴، ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متری برای زاویه تاج ۲۰ درجه نشان داده شده است.

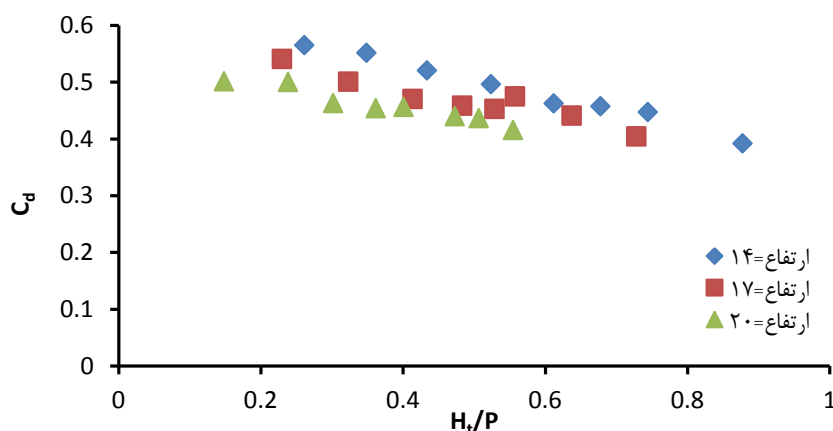
با توجه به شکل‌های ۶ تا ۸، مشاهده می‌شود که به‌ازای یک H_t/P ثابت و زاویه تاج ۱۵ درجه، ضریب دبی سرریز با ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر بیش‌تر از سرریز با ارتفاع ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متر است. در تمامی نمودارها می‌توان نتیجه گرفت ضریب دبی مدل ترکیبی با افزایش H_t/P روند نزولی طی می‌کند. هم‌چنین با افزایش بازشدگی دریچه (۲ تا ۶ سانتی‌متر)، ضریب دبی مدل ترکیبی با ارتفاع‌های مختلف سرریز اندکی کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش ارتفاع بازشدگی



شکل ۹- تغییرات ضریب دبی به‌ازای ارتفاع‌های مختلف سرریز با زاویه تاج ۲۰ درجه و ارتفاع بازشدگی ۲ سانتی‌متر



شکل ۱۰- تغییرات ضریب دبی به‌ازای ارتفاع‌های مختلف سرریز با زاویه تاج ۲۰ درجه و ارتفاع بازشدگی ۴ سانتی‌متر



شکل ۱۱- تغییرات ضریب دبی به‌ازای ارتفاع‌های مختلف سرریز با زاویه تاج ۲۰ درجه و ارتفاع بازشدگی ۶ سانتی‌متر

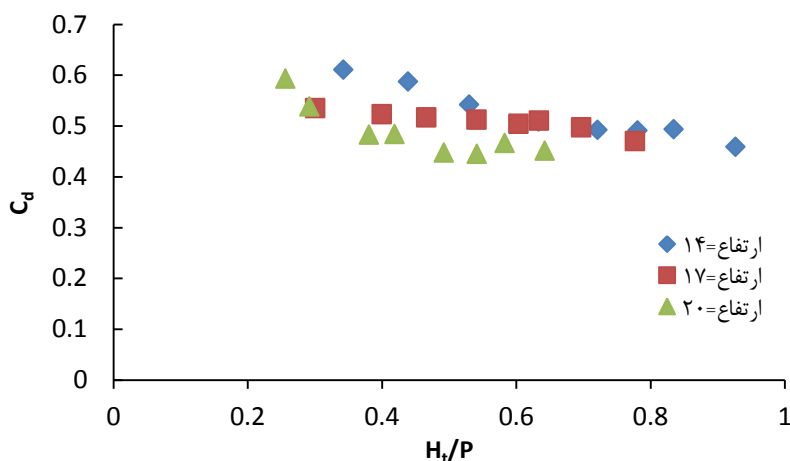
مدل‌های ترکیبی با همان زاویه و بازشدگی‌های ۴ و ۶ سانتی‌متر به ترتیب دارای افزایش ۱/۸ و ۳/۳ درصدی در مقدار ضریب دبی می‌باشد که می‌تواند ناشی از خطای آزمایشگاهی باشد در نتیجه با افزایش ارتفاع باز شدگی دریچه، ضریب دبی مدل ترکیبی تغییر چندانی نمی‌یابد.

تأثیر زاویه تاج سرریز و بازشدگی‌های مختلف دریچه بر دبی مدل ترکیبی

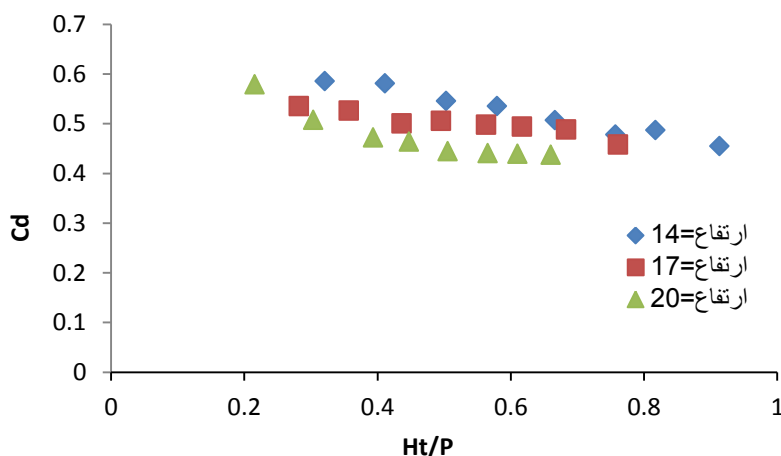
در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷، تغییرات دبی مدل ترکیبی به‌ازای بارهای آبی و ارتفاع بازشدگی مختلف نشان داده شده است.

با توجه به این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که سرریز با ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر در مقایسه با دو ارتفاع ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متری مورد بررسی، ضریب دبی بالاتری دارد. همچنین با افزایش بازشدگی دریچه، ضریب دبی کاهش می‌یابد. که این مقدار در مدل ترکیبی با بازشدگی دریچه ۶ سانتی‌متر به پایین‌ترین حد خود می‌رسد. در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، تغییرات ضریب دبی به‌ازای H_t/P در سرریزها با ارتفاع‌های ۱۴، ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متری برای زاویه تاج ۲۵ درجه ارائه شده است.

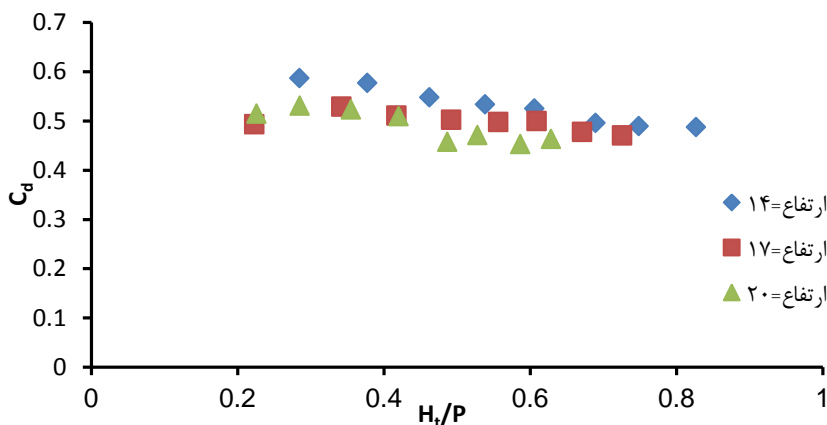
همانگونه که از شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، مشخص است، ضریب دبی در تمامی مدل‌ها به‌ازای H_t/P روند نزولی داشته و در نهایت به مقدار ثابتی میل می‌کند. در بین مدل‌های ترکیبی مورد بررسی سرریز با ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر و بازشدگی دریچه ۲ سانتی‌متر در مقایسه با



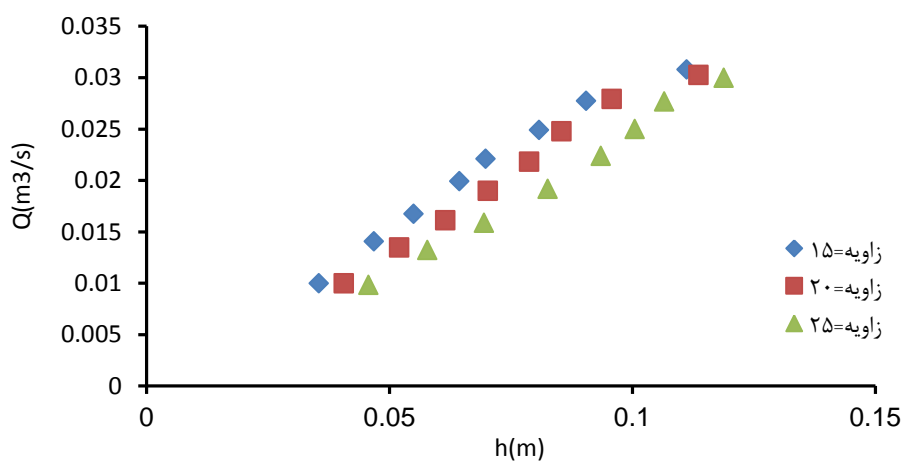
شکل ۱۲- تغییرات ضریب دبی به‌ازای ارتفاع‌های مختلف سرریز با زاویه تاج ۲۵ درجه و ارتفاع بازشدگی ۲ سانتی‌متر



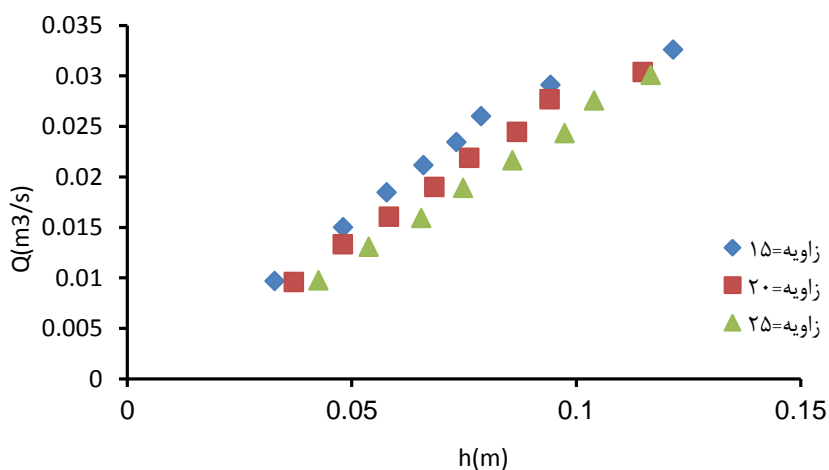
شکل ۱۳- تغییرات ضریب دبی به‌ازای ارتفاع‌های مختلف سرریز با زاویه تاج ۲۵ درجه و ارتفاع بازشدگی ۴ سانتی‌متر



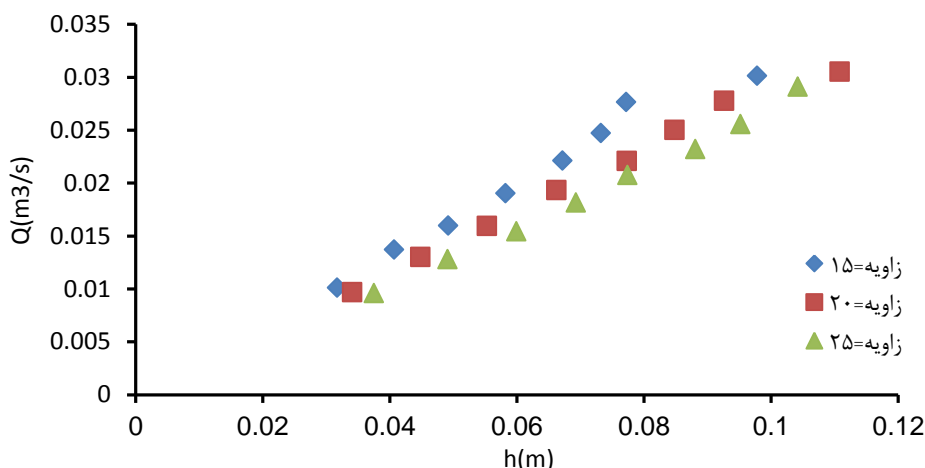
شکل ۱۴- تغییرات ضریب دبی به ازای ارتفاع های مختلف سرریز با زاویه تاج ۲۵ درجه و ارتفاع بازشدگی ۶ سانتی متر



شکل ۱۵- نمودار دبی- بار آبی جریان در مدل ترکیبی سرریز دریاچه با زوایای مختلف تاج سرریز و ارتفاع بازشدگی ۲ سانتی متر



شکل ۱۶- نمودار دبی- بار آبی جریان در مدل ترکیبی سرریز دریاچه با زوایای مختلف تاج سرریز و ارتفاع بازشدگی ۴ سانتی متر

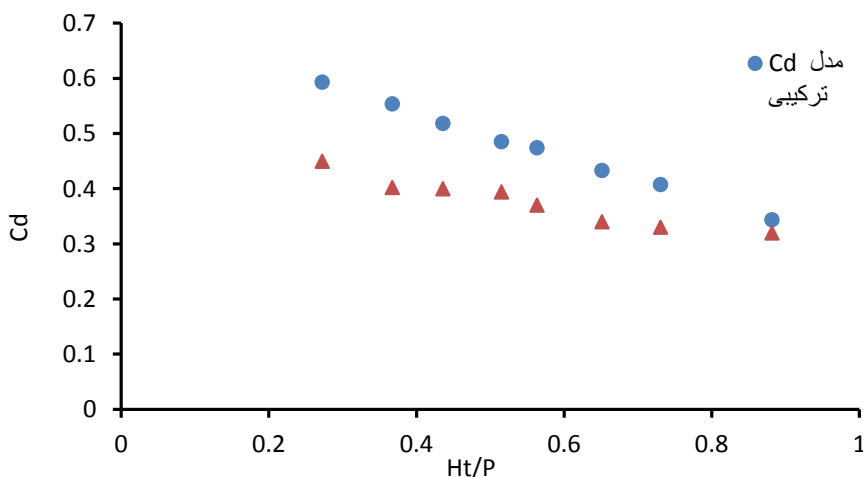


شکل ۱۷- نمودار دبی- بار آبی جریان در مدل ترکیبی سرریز دریچه با زوایای مختلف تاج سرریز و ارتفاع بازشدگی ۶ سانتی‌متر

در شکل ۱۸، روند تغییرات ضریب دبی مدل ترکیبی سرریز دریچه‌دار با شرایط بدون دریچه کروکستون (۲۰۱۰) به‌ازای H_t/P نشان داده شده است. با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که ضریب دبی در مدل ترکیبی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای دریچه‌دار بیش‌تر از مدل سرریز کنگره‌ای بدون دریچه است. در واقع وجود دریچه در یک سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای ضریب دبی را افزایش می‌دهد. از طرفی این تفاوت در افزایش ضریب دبی تقریباً در تمام محدوده‌های H_t/P ثابت بوده و یک روند افزایشی را طی می‌کند.

با توجه به این شکل‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش بار آبی، مقدار دبی افزایش می‌یابد و به‌ازای $h > 0.03$ مدل سرریز ترکیبی عملکرد بیش‌تری را نشان می‌دهد. هرچه زاویه تاج سرریز کاهش یافته، دبی نیز افزایش یافته است، زیرا با کاهش زاویه، طول سرریز افزایش می‌یابد. همچنین بیش‌ترین مقدار دبی مربوط به مدل ترکیبی با بازشدگی ۲ سانتی‌متر و زاویه تاج سرریز ۱۵ درجه است.

مقایسه نتایج مدل ترکیبی سرریز کنگره‌ای توام با دریچه با نتایج کروکستون (۲۰۱۰)



شکل ۱۸- مقایسه ضریب دبی به‌ازای H_t/P های مختلف در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای ترکیبی و مدل کنگره‌ای تک سیکل ($\alpha=15$)

فلوم مستطیلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش نسبت H_t/P باعث کاهش ضریب دبی مدل ترکیبی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای- دریچه می‌شود که ناشی از افزایش تداخل جریان به‌ازای

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر زاویه راس و ارتفاع سرریز بر ضریب دبی مدل ترکیبی سرریز- دریچه کنگره‌ای دوزنقه‌ای تک سیکل در یک

ترکیبی سرریز دریاچه منشوری. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، گرایش سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

میرناصری، م. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی جریان هم‌زمان از مدل ترکیبی سرریز کنگره‌ای مستطیلی همراه با دریاچه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، گرایش سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

Ackers, A., White, W. R. and Perkins, J. A. 1978. Weirs and Flumes for Flow Measurements. John Wiley & Sons Pub., New York.

Swamee, P. K. 1988. Generalized rectangular weir equations, Journal of Hydraulic Engineering. 114(8): 945-949.

Ahmed, F. H. 1985. Characteristics of discharge of the combined flow through sluice gates and over weirs. Journal Engineering and Technology. Iraq. 3(2) 49-63.

Chow, V.T. 1959. Open -channel hydraulics. McGraw Hill Book Company, New York.

Fu, Z. F., Cui, Z.h., Dai, W. H. and Chen, Y. J. 2018. Discharge coefficient of combined orifice-weir flow. Water. 10(699): doi: 10.3390/w10060699.

Hayawi, H. A. M. Yahia, A. A. G. and Hayawi. G. A. M. 2008. Free combined flow over a triangular weir and under rectangular gate. Journal of Damascus University. 24(1): 9-22.

Lux, F. 1984. Discharge characteristics of labyrinth weirs, Proceedings of conference on Water for Resource Development. Coeur d' Alene, ID, Aug., ASCE.

Crookston, B.M. 2010. Labyrinth Weirs, graduate theses, Utah State University.

Kindsvater, C. E. and Carter, R. W. 1957. Discharge characteristics of thin plate weirs. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 83(6): 31- 36.

Masoudian, M. and Gharahgezlou, M. 2014. Flow characteristics of cylindrical weirs in a small laboratory canal. Journal of Science Series Data Report. 4(4): 12- 23.

Rajaratnam, N. and Subramaniya, K. 1967. Flow equation for sluice gates. Journal Irrigation and Drainage (ASCE). 93(3): 167- 186.

Rajaratnam, N. and subramaniya, K. 1976. Flow Equation for sluice gates. Journal of Irrigation and Drainage Division, Proc. ASCE. 93(3): 167-186.

Rajaratnam, N. 1977. Free flow immediately below sluice gates. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE). 103 (4): 345- 351.

دبی‌های بالا است. از بین مدل‌های سرریز مورد مطالعه بیش‌ترین مقدار ضریب دبی جریان مربوط به مدل با زاویه تاج سرریز ۲۵ درجه و باز شدگی دریاچه برابر با ۲ سانتی‌متر می‌باشد. در بین مدل‌های ترکیبی مورد بررسی سرریز با ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر و باز شدگی دریاچه ۲ سانتی‌متر در مقایسه با مدل‌های ترکیبی با همان زاویه و باز شدگی‌های ۴ و ۶ سانتی‌متر به ترتیب دارای افزایش ۱/۸ و ۳/۳ درصدی در مقدار ضریب دبی می‌باشد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت ارتفاع سرریز تاثیر چندانی بر روی ضریب دبی ندارد. هم‌چنین با افزایش زوایای رأس سرریز مقدار ضریب دبی افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش زاویه تاج سرریز طول مؤثر سرریز کاهش یافته و در نتیجه ضریب دبی افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد ضریب دبی در مدل ترکیبی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای-دریاچه بیش‌تر از مدل سرریز بدون دریاچه است. در واقع تأثیر وجود دریاچه در یک سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای در جهت افزایش ضریب دبی مشخص است.

منابع

حسینی، س.م. و ابریشمی، ج. ۱۳۸۴. هیدرولیک کانال‌های باز. انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.

پاشازاده، م.، حیدرپور، م.، سقائیان‌نژاد، س.ح. و رضویان، س.ح. ۱۳۹۵. بررسی جریان هم‌زمان از زیر دریاچه‌ی کشویی و روی سرریز دوزنقه‌ای در کانال دایره‌ای. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۷ (۶۷): ۳۳-۴۶.

پسر کلو، م. و عمادی، ع. ر. ۱۳۹۷. مطالعه‌ی هیدرولیک جریان در سازه‌ی ترکیبی سرریز دریاچه با سرریز مرکب-دایره‌ای دوزنقه‌ای مستطیلی. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۹ (۷۱): ۹۹-۱۱۲.

سامانی، م. و جواهری، ا. ۱۳۹۰. تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی در حالت جریان آزاد. اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس سد و نیروگاه‌های برقی.

فتاحی، م. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سازه ترکیبی سرریز دریاچه لبه تیز- قوسی در پلان. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۹۴ صفحه.

قره‌گزلو، م.، مسعودیان، م.، هابر، ب.، و صالحی نیشابوری، س.ع.ا. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی مدل ترکیبی سرریز دریاچه استوانه‌ای و نیم استوانه‌ای در کانال‌های کوچک. فصلنامه پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۸ (۱۱): ۸۶-۹۵.

موسویان شیراز، ف. ۱۳۹۶. بررسی عددی ضریب دبی جریان در مدل

characteristics of weir-orifice and weir-gate structures. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 145(11): 45-54.

Samani, J. M. V. and Mazaheri, M. 2009. Combined flow over weir and under gate. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(3): 224- 227.

Salehi, S. and Azimi, A. H. 2019. Discharge

Experimental Study of Combined Flow Trapezoidal Labyrinth Weir-Gate with One Cycle

B. Khalili¹, A. Abbaspour^{2*}, D. Farsadizadeh³, J. Parsa⁴

Received: Sep.06, 2020

Accepted: Jun.07, 2021

Abstract

The combined weir- gate is important hydraulic structure in management of irrigation canals. On the other hand, the use of labyrinth weirs can reduce water level fluctuations due to longer crest lengths than linear weirs for a specific discharge. Because of the sediments deposition in upstream of the weirs the flow conditions change and the accuracy of the presented relationship is reduced. Therefore, the use of combined flow trapezoidal labyrinth weir-gate can be a useful solution for passage of floating substances over the weir and sediment transport under the gate. In this research, experimental study of combined flow trapezoidal labyrinth weir-gate with one cycle has done for three sidewall angles of 15, 20 and 25 degrees, three gate openings 2, 4 and 6 cm and three weir heights of 14 , 17 and 20 cm in a rectangular channel. Based on the effective parameters of the combined models, the mean discharge coefficient has obtained in the range of 0.61-0.75. The results show that the discharge coefficient decreases with increasing the ratio of Ht/P , and it reaches a constant discharge coefficient of 0.61 for $Ht/P > 0.6$. The discharge coefficient of the combined model increases by increasing the angle of weir. Also the results show that the discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weir-gate has the highest value for weirs with a sidewall angle of 25° and gate opening of 2 cm.

Key words: Discharge coefficient, Experimental model, Labyrinth weir-gate, Sidewall angle

1- M.Sc. Student, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2- Associate Prof, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3- Prof, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
4- Assistant Prof, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
(* - Corresponding Author Email: akabbaspour@yahoo.com)

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی اقتصادی مدیریت کم آبیاری - مطالعه موردی: باغ پرتقال

محمد اسماعیل کمالی^۱، حسین انصاری^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳

چکیده

در این تحقیق ارزیابی اقتصادی کم آبیاری پرتقال و تأثیر آن بر روی درآمد باغدار با استفاده از بهینه‌سازی انجام شده بر اساس تحلیل‌های ریاضی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور آزمایشی میدانی به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در ۵ تکرار در سال ۱۳۹۷ اجرا شد. تیمارهای اصلی دو نوع مدیریت آبیاری شامل دور آبیاری متغیر و دور آبیاری ۴ روز بود. تیمار فرعی ۴ سطح آبیاری شامل ۱۰۰٪، ۸۰٪، ۶۵٪ و ۵۰٪ رطوبت سهل‌الوصول خاک (RAW) بود. جهت ارزیابی اقتصادی، توابع تولید، هزینه، درآمد و عمق‌های بهینه آب مصرفی به روش English محاسبه شد. نتایج نشان داد که برای دور آبیاری متغیر و ۴ روز به ترتیب با مصرف ۱۴۸/۳ و ۱۸۶/۵ میلی‌متر عملکرد و درآمد خالص از واحد سطح بیشینه شده است. در شرایط محدودیت زمین نیز بهترین عمق آب ۱۴۶/۲ و ۱۸۴/۰ میلی‌متر بوده است. عمق آب آبیاری در حالت محدودیت آب نیز به ترتیب ۱۰۹/۳ و ۱۳۶/۹ میلی‌متر بود که باعث بیش از ۱۶ درصد افزایش درآمد خالص به ازای واحد حجم آب برای هر دو حالت مدیریت آبیاری شد. با این مقدار آب صرفه‌جویی شده در صورت عدم محدودیت زمین می‌توان ۳۶ و ۳۶ درصد سطح زیر کشت را افزایش داد. نتایج نشان داد که بهینه‌ترین مدیریت آب آبیاری (در شرایط بدون محدودیت)، دور آبیاری ۴ روز و عمق آبیاری به میزان ۸۰٪ رطوبت سهل‌الوصول است که میزان عملکرد در این حالت ۵۵/۰ تن در هکتار می‌باشد. میزان درآمد خالص نیز بیش از ۴۸۳ میلیون ریال در هکتار و شاخص B/C برابر ۱/۷۸ می‌باشد. بیشترین درآمد خالص در صورتی که محدودیت زمین نباشد (برای عمق آبیاری معادل آبیاری کامل)، آبیاری به اندازه WW (شرایط محدودیت آب) می‌باشد که درآمد خالص آن برای دور آبیاری متغیر و دور آبیاری ۴ روز به ترتیب بیش از ۴۷۶ و ۶۱۱ میلیون ریال می‌باشد. این حالت بیشترین درآمد خالص از واحد حجم آب مصرفی را نیز ایجاد می‌نماید. نتایج نشان می‌دهد چه در شرایط بدون محدودیت و چه در شرایط محدودیت آب، رعایت یک برنامه آبیاری مشخص و نیز اعمال کم آبیاری تأثیر مثبتی بر روی درآمد باغدار ایجاد می‌نماید که در حالت کم آبیاری در شرایط بدون محدودیت میزان حجم آب آبیاری مورد نیاز ۱۴۹۲ و در شرایط با محدودیت آب ۱۳۶۹ متر مکعب در هکتار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تابع تولید، رطوبت سهل‌الوصول، روش English، عمق بهینه، کم آبیاری

مقدمه

طول سال نیاز به آب دارد. منبع اصلی تأمین نیاز آبی آن نیز بارش است. اما آمار ۲۰ ساله بارش منتهی به سال ۱۳۹۷ در شهرستان ساری نشان می‌دهد که تنها ۳۰ درصد از میزان بارش سالانه در ۶ ماه اول سال (با شروع رشد ریشه‌های جدید و شاخه‌های جوان) و ۱۸ درصد از میزان بارش در ۴ ماه بین خرداد تا شهریور که زمان اصلی تشکیل و رشد میوه و نیاز آبی درخت است، رخ می‌دهد. این در حالی است که میزان تبخیر در این بازه‌های زمانی به ترتیب ۸۱۴ و ۶۲۳ میلی‌متر می‌باشد. در نتیجه آبیاری باید در زمان کمبود بارش و به مقدار نیاز آبی درختان مخصوصاً در مراحل گلدهی و تشکیل میوه که مرکبات به کم‌آبی حساس‌اند، انجام گیرد (Ginestar and Castel, 1996; Doorenbos and Kassam, 1979). از طرفی دیگر منبع آب برای بسیاری از باغات مرکبات استان مازندران آب‌های زیرزمینی

مرکبات یکی از محصولات اصلی کشت شده در استان مازندران می‌باشد. به طوری که با سطح زیر کشت بیش از ۱۱۶ هزار هکتار و تولید بیش از ۲/۳۶ میلیون تن، تقریباً نصف تولید مرکبات کشور و گردش مالی ۳ هزار میلیارد تومانی در استان را داراست (احمدی، ۱۳۹۸). با توجه به اینکه مرکبات جز درختان همیشه‌سبز است در تمام

۱- استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

* - نویسنده مسئول: (Email: ansary@um.ac.ir)

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.7.7

می‌باشد که باغداران با حفر چاه‌های سطحی یا نیمه عمیق و به صورت قانونی یا غیرقانونی از آن استحصال می‌کنند. لذا با توجه به شرایط بارش در ۶ ماه نخست سال و نیز افت سطح آب در چاه‌ها و در نتیجه کاهش حجم آب قابل استفاده از چاه‌ها، برنامه‌ریزی آبیاری و اعمال سیاست‌های کم آبیاری غیرقابل اجتناب است که با انجام صحیح آن می‌توان از کاهش محصول نیز جلوگیری نمود. این عمل در شرایط محدودیت آب یا گران بودن هزینه تأمین آب می‌تواند سبب افزایش درآمد خالص شود (English and Roja, 1996). در ایران جهت افزایش راندمان آبیاری، دولت طرح‌های حمایتی جهت تجهیز باغات به سامانه‌های نوین آبیاری ارائه کرده است. اما راندمان آبیاری به میزان قابل انتظار بهبود نیافته است. بررسی‌ها نشان داده است که یکی از دلایل اصلی آن عدم وجود برنامه مناسب آبیاری می‌باشد که تأثیر مستقیم بر عملکرد باغ و در نتیجه درآمد باغدار می‌گذارد. از طرفی دیگر سیاست‌های کم آبیاری به دلیل ارتباط آن با اقتصاد باغدار، توسط آنها استقبال نمی‌شود. لذا در مدیریت کم آبیاری باغات، تعیین حد بهینه کم آبیاری (Ballester et al., 2011; Ginestar and Castel, 1996) and نیز تعیین سود اقتصادی (English and Raja, 1996) امری ضروری است.

بر طبق موارد مطروحه و با توجه به اهمیت مدیریت آبیاری در باغات (از جمله مدیریت کم آبیاری و سطح بهینه کم آبیاری) از یک طرف و نیز اقتصاد باغدار از طرف دیگر، در این تحقیق ارزیابی اقتصادی مدیریت‌های مختلف آبیاری و نیز سطوح مختلف کم آبیاری در شرایط مختلف محدودیت آب و زمین مدنظر قرار گرفته است تا با توجه به توابع تولید، هزینه و درآمد، بهترین برنامه آبیاری در شرایط مختلف فراهمی آب ارائه گردد. یکی از روش‌ها جهت تحلیل اقتصادی توابع تولید-آب و هزینه-آب، روش (English, 1990) است. در این روش تابع تولید ابتدا حالت خطی دارد و به تدریج به صورت یک منحنی درجه دوم تبدیل می‌شود که دلیل آن تلفات آب به صورت نفوذ عمقی و رواناب است که هرچه عمق آب آبیاری بیشتر شود، میزان تلفات نیز بیشتر می‌شود. این موضوع توسط محققان دیگری نیز اثبات شده است (Doorenbos and Kassam, 1979; Hargreaves and Samani, 1984; Shalhevet et al., 1985; Sepaskhah and Kashefipour, 1994; Capra et al., 2011; Hughes, 2011). در این روش با محاسبه عمق‌های بهینه آبیاری، مقدار هزینه و سود با تحلیل‌های ریاضی برآورد می‌شود. با استفاده از این روش، تحلیل اقتصادی مدل‌های فصلی و درون فصلی کم آبیاری محصول سورگوم (سیاسخواه و همکاران، ۱۳۸۵) و ذرت (قهرمان و همکاران، ۱۳۸۰) مقایسه شدند و نتایج نشان داد که روش درون فصلی (تصمیم‌گیری بر اساس تخصیص آب در مراحل مختلف رشد گیاه) مقدار بالاتری از کاهش بهینه آب (۲۳٪) و در نتیجه مصرف اقتصادی‌تر آب را ایجاد می‌نماید. همچنین از این روش برای

مدیریت‌های مختلف کم آبیاری گندم در شمال غربی آمریکا، پنبه در کالیفرنیا و ذرت در زیمباوه نیز استفاده شد و نشان داد که کاهش ۱۵ تا ۵۹ درصد آب از نظر اقتصادی قابل قبول است (English and Raja, 1996). ارزیابی اقتصادی اجرای کم آبیاری مرکبات با استفاده از نتایج ۲۰ باغ در ایتالیا نشان داد که میزان مناسب کم آبیاری برای شرایط محدودیت زمین و آب، به ترتیب ۱۲/۷ و ۲۵/۶ درصد عمق آب آبیاری برای عملکرد بیشینه است (Capra et al., 2011). همچنین با اعمال عمق آب آبیاری در شرایط محدودیت زمین، درآمد خالص ۱۰۰٪ و شاخص سود به هزینه ۶۵٪ نسبت به شرایط فعلی آبیاری افزایش خواهد داشت. در تحقیقی در اسپانیا، کم آبیاری پرتقال به میزان ۳۰ درصد باعث افزایش ۴۶/۶ درصدی درآمد خالص به ازای واحد آب مصرفی شد (Pérez-Pérez et al., 2010). تحقیقی دیگر در اسپانیا نیز نشان داد که آبیاری درختان نارنگی به میزان ۸۰٪ نیاز آبی، سبب کاهش درآمد ناخالص و بهره‌وری آب نشده است (Ballester et al., 2011). اعماق بهینه مصرف آب در کشت چغندرقد با بهینه‌سازی توابع تولید و هزینه به دست آمد (Shabani et al., 2018). نتایج نشان داد که با مصرف عمق بهینه آب آبیاری در شرایط محدودیت آب، درآمد خالص در واحد حجم آب آبیاری، ۱۲ درصد افزایش یافت. همچنین با مصرف بهینه آب در شرایط محدودیت زمین، درآمد خالص در واحد سطح ۱/۲ درصد افزایش یافت که تغییر معنی‌داری نسبت به آبیاری کامل نداشت. در ایران نیز در تحقیقی عمق‌های آستانه‌ای آب آبیاری برای تولید مرکبات در رامسر به دست آمد (عبادی و همکاران، ۱۳۹۴). عمق آبیاری در حالت عملکرد بیشینه ۱۹۹/۸ میلی‌متر به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با عمق آبیاری در حالت محدودیت زمین نداشت. نتایج نشان داد با کاربرد عمق آب در حالت محدودیت آب، مصرف آب ۳۶٪ کاهش یافت و بهره‌وری آب و درآمد خالص به ازای واحد حجم آب، ۴۲٪ و ۲۳٪ افزایش یافت. ارزیابی اقتصادی کم آبیاری چغندرقد پاییزه در خوزستان با استفاده از بهینه‌سازی توابع تولید و هزینه انجام شد (خرمیان و حسین پور، ۱۳۹۵). نتایج نشان داد که هرچند بیشترین عملکرد از آبیاری کامل حاصل شد، اما نسبت به تیمارهای ۷۵٪ و ۵۰٪ نیاز آبی اختلاف معنی‌داری نداشت. بیشترین درآمد خالص از واحد حجم آب مصرفی نیز از تیمار آبیاری در شرایط محدودیت آبی (Ww) به دست آمد که موجب کاهش ۴۳ درصدی مصرف آب شده بود. بهینه‌سازی مصرف آب در کشت ذرت با استفاده از آزمون رگرسیون چندگانه توابع تولید و هزینه بدست آمد (علیزاده و عباسی، ۱۳۹۵). نتایج نشان داد که سطح بهینه مصرف آب در شرایط محدودیت زمین و محدودیت آب به ترتیب ۹۴۰ و ۷۷۴ میلی‌متر بوده است. بهینه‌سازی مصرف آب در کشت چغندرقد در اصفهان با بهینه‌سازی توابع تولید و هزینه بدست آمد (شمشیری و همکاران، ۱۳۹۸). نتایج نشان داد که عمق بهینه مصرف آب در شرایط آبیاری کامل،

زمانی که میزان رطوبت به حد پایین رطوبت سهل الوصول رسید، آبیاری بعدی انجام شد. برای تیمار A_2 ، در روز موردنظر، رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و با استفاده از فرمول ۱ و ۲ میزان عمق آبیاری (D) و حجم آبیاری (V) محاسبه شد.

$$D=(FC-\theta) \times pb \times MAD \times Z \times PW \quad (1)$$

$$V=D \times A \quad (2)$$

در این رابطه FC = رطوبت در حد ظرفیت زراعی، θ رطوبت اندازه‌گیری شده خاک، pb = چگالی ظاهری خاک، MAD = تخلیه مجاز رطوبتی، Z = عمق ریشه، Pw = درصد خیس شدگی و A = مساحت در نظر گرفته شده برای هر درخت می‌باشد. برای تعیین مشخصات خاک، از خاک منطقه نمونه‌برداری شد (شکل ۱) و بافت خاک در آزمایشگاه به روش هیدرومتری تعیین شد که خاک سطحی دارای بافت لومی رسی (CL) با چگالی ظاهری $1/34 \text{ gr/cm}^3$ و خاک عمیق تر دارای بافت لومی (L) با چگالی ظاهری $1/38 \text{ gr/cm}^3$ بوده است. جهت تعیین میزان کیفیت آب نیز از آب مورد استفاده نمونه‌برداری شده که نتایج نشان داد میزان EC و pH به ترتیب $2/17$ دسی‌زیمنس بر متر و $7/74$ بود. شایان ذکر است که در صورت وقوع بارندگی، دور آبیاری بعدی با احتساب روز بارندگی به‌عنوان روز آبیاری مدنظر قرار گرفت. عملیات داشت شامل کوددهی، سم‌پاشی و مبارزه با آفت و بیماری‌ها برای تمام تیمارها به‌طور یکسان انجام شد.



شکل ۱ - نمونه‌برداری از خاک در باغ مورد مطالعه



محدودیت آب و محدودیت زمین به ترتیب ۱۸۷۰، ۱۵۲۰ و ۱۷۷۰ میلی‌متر بوده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در یکی از باغات شهرستان ساری با مختصات جغرافیایی 53° درجه و $4/69$ دقیقه شرقی و 36° درجه و $45/11$ دقیقه شمالی و بر روی 60 درخت 25 ساله پرتقال تامسون ناول با پایه نارنج در سال 1397 انجام شد. فاصله درختان 6×6 متر و متوسط بارش و تبخیر سالانه در منطقه مورد مطالعه بر اساس آمار هواشناسی 20 ساله منتهی به سال 1397 به ترتیب 750 و 1100 میلی‌متر بوده است. روش آبیاری مورد استفاده در این باغ، روش آبیاری قطره‌ای بوده است. این آزمایش به صورت اسپلینت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در 5 تکرار اجرا شد. تیمارهای آبی دو نوع مدیریت آبیاری شامل A_1 = دور آبیاری متغیر (آبیاری در زمان رسیدن رطوبت خاک به حد پایین رطوبت RAW) و A_2 = دور آبیاری ثابت 4 روز بود. تیمارهای فرعی شامل 4 سطح آبیاری B_1 = آبیاری به‌اندازه 100% رطوبت سهل الوصول خاک، B_2 = آبیاری به‌اندازه 80% رطوبت سهل الوصول خاک، B_3 = آبیاری به‌اندازه 65% رطوبت سهل الوصول خاک و B_4 = آبیاری به‌اندازه 50% رطوبت سهل الوصول خاک بود. برای تیمار A_1 ، میزان رطوبت خاک به‌صورت روزانه پایش شد و

(Hughes, 2011; Capra et al., 2011; 1985). درآمد خالص در کل سطح و کل سطح قابل آبیاری نیز توسط روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌گردند.

$$y(w) = c_1 w^2 + b_1 w + a_1 \quad (3)$$

$$c(w) = b_2 w + a_2 \quad (4)$$

$$i_L(w) = Pc.y(w) - c(w) \quad (5)$$

$$i_f(w) = A \times [Pc.y(w) - c(w)] \quad (6)$$

جهت ارزیابی اقتصادی مدیریت‌های مختلف آبیاری مورد استفاده در این پژوهش، از روش (English, 1990) استفاده شد که در آن مقدار بهینه آب مصرفی فصل رشد به روش تحلیل اقتصادی توابع تولید-آب مصرفی و هزینه-آب مصرفی بدست می‌آید. در این روش تابع تولید $y(w)$ ، هزینه $c(w)$ و درآمد $i_L(w)$ به ترتیب به‌صورت روابط ۳، ۴ و ۵ می‌باشند که توسط محققان دیگر نیز اثبات شده است (Sepaskhah and Kashefipour, 1994; Shalhevet et al.,

در شرایطی که آب عامل محدودکننده باشد، مشتق مساحت کل به صورت رابطه ۱۴ و تابع بهینه درآمد خالص به صورت رابطه ۱۵ محاسبه می شود. در نتیجه عمق بهینه آبیاری در شرایط محدودیت آب به صورت رابطه ۱۶ بدست می آید.

$$\frac{\partial A}{\partial w} = \frac{-W_t}{w^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial i_f(w)}{\partial w} = A \times \frac{\partial i_l}{\partial w} + i_l \times \frac{-W_t}{w^2} = 0 \quad (15)$$

$$W_w = \sqrt{\frac{a_1 \times P_c - a_2}{P_c \times c_1}} \quad (16)$$

عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب (W_{ew}):

این عمق، عمقی است که در آن درآمد خالص به ازای واحد آب مصرفی، برابر با درآمد خالص به ازای واحد آب مصرفی در عمق آبیاری کامل باشد (رابطه ۱۷). در این صورت عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب (W_{ew}) به صورت رابطه ۱۸ محاسبه می شود.

$$\frac{i_l(W_{ew})}{W_{ew}} = \frac{i_l(W_m)}{W_m} \quad (17)$$

$$(18)$$

$$W_{ew} =$$

$$\frac{-\left(\frac{P_c \cdot b_1^2 + 4P_c a_1 c_1 - 4a_2 c_1}{2b_1}\right) + \sqrt{\left(\frac{P_c \cdot b_1^2 + 4P_c a_1 c_1 - 4a_2 c_1}{2b_1}\right)^2 - 4P_c c_1 (P_c a_1 - a_2)}}{2P_c c_1}$$

عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت زمین (W_{el}):

این عمق، عمقی است که با آن درآمد خالص در واحد سطح برابر با درآمد خالص در واحد سطح با عمق آبیاری کامل باشد (رابطه ۱۹). در این صورت عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت زمین به صورت رابطه ۲۰ بدست می آید.

$$i_l(W_{el}) = i_l(W_m) \quad (19)$$

$$W_{el} = \frac{-(P_c b_1 - b_2) + Z_1}{2P_c c_1} \quad (20)$$

عمق آب در حالت سر به سر (W_k):

این عمق، عمقی است که درآمد ناخالص برابر با هزینه ها می باشد (رابطه ۲۱) و به صورت رابطه ۲۲ محاسبه می گردد.

$$i_l(W_k) = 0 \quad (21)$$

$$W_k = \frac{-(P_c b_1 - b_2) + \sqrt{(P_c b_1 - b_2)^2 - 4P_c c_1 (P_c a_1 - a_2)}}{2P_c b c_1} \quad (22)$$

$$A = \frac{W_t}{w} \quad (Y)$$

که در آن $y(w)$ عملکرد در واحد سطح (kg/ha)، w عمق آب مصرفی (میلی متر)، $c(w)$ هزینه تولید در واحد سطح (ریال بر هکتار)، $i_l(w)$ درآمد خالص (سود) در واحد سطح (ریال بر هکتار)، P_c قیمت واحد وزن محصول (ریال بر کیلوگرم)، $i_f(w)$ درآمد خالص در کل سطح (ریال)، A کل سطح، W_t کل آب موجود (قابل دسترس) و a_1 ، b_1 ، c_1 ، a_2 و b_2 ضرایب ثابت می باشند. هزینه های متغیر شامل هزینه آب، کود، روغن، سم (حشره کش، کنه کش و قارچ کش)، علف کش، عملیات کودپاشی، عملیات سم پاشی، عملیات علف کش (شامل مبارزه مکانیکی و اجرای مبارزه شیمیایی با علف های هرز)، هرس، استهلاک تجهیزات آبیاری، حمل نهاده ها، برق و برداشت میوه بوده است. هزینه های ثابت نیز شامل هزینه های آماده سازی زمین، حفر چاله، کاشت نهال، خرید نهال و زمین (اجاره زمین) بوده است. پس از محاسبه توابع تولید، هزینه و درآمد، بهینه سازی آنها بر اساس حصول درآمد خالص بیشینه انجام شد. برای این منظور مشتق تابع درآمد خالص در کل سطح باید صفر شود که به صورت رابطه ۸ می باشد.

$$\frac{\partial i_f(w)}{\partial w} = A \times \frac{\partial i_l}{\partial w} + i_l \times \frac{\partial A}{\partial w} = 0 \quad (8)$$

سپس شش عمق بهینه آب آبیاری (OIW) به صورت زیر تعیین شد.

عمق آب لازم برای حداکثر محصول (W_m):

برای این منظور مشتق تابع تولید باید برابر صفر گردد (شکل ۲ و معادله ۹). در نتیجه عمق آب لازم برای حداکثر محصول به صورت رابطه ۱۰ بدست می آید.

$$\frac{\partial (y(w))}{\partial w} = 0 \quad (9)$$

$$W_m = \frac{-b_1}{2c_1} \quad (10)$$

عمق بهینه آب آبیاری در شرایط محدودیت زمین (W_1):

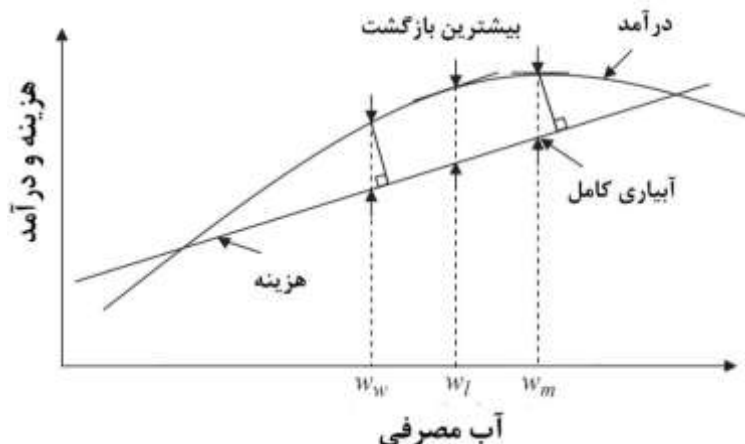
در شرایطی که زمین عامل محدودکننده باشد، رابطه ۱۱ برقرار می باشد. در نتیجه تابع بهینه درآمد خالص به صورت رابطه ۱۲ و عمق بهینه آبیاری در شرایط محدودیت زمین به صورت رابطه ۱۳ بدست می آید.

$$\frac{\partial A}{\partial w} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial i_f(w)}{\partial w} = A \times \frac{\partial i_l}{\partial w} = 0 \rightarrow P_c \times \frac{\partial (y(w))}{\partial w} = \frac{\partial (C(w))}{\partial w} \quad (12)$$

$$W_1 = \frac{b_2 - b_1 P_c}{2c_1 P_c} \quad (13)$$

عمق بهینه آب در شرایط محدودیت آب (W_w):



شکل ۲- نمای ریاضی از اعماق بهینه در شرایط محدودیت آب و زمین

درآمد خالص به ازای واحد محصول (IUY) (ریال بر کیلوگرم)

$$IUY = \frac{i_L(w)_{OWD} \times 100}{Y_{OWD}} \quad (28)$$

که در آن $i_L(w)_{OWD}$ درآمد خالص به ازای واحد زمین و Y_{OWD} میزان محصول برای عمق‌های بهینه است.

کاهش درآمد خالص به ازای واحد محصول (IRUY) (%)

$$IRUY = \frac{(IUY_{W_m} - IUY_{OWD}) \times 100}{IUY_{W_m}} \quad (29)$$

که در آن IUY_{W_m} و IUY_{OWD} میزان درآمد خالص به ازای واحد محصول برای عمق‌های W_m و عمق‌های بهینه می‌باشد.

نسبت درآمد به هزینه (BCR)

$$BCR = \frac{Income}{Cost} \quad (30)$$

که در آن Income میزان درآمد و Cost میزان هزینه می‌باشد. باید توجه نمود که برای اینکه یک پروژه، ارزش اقتصادی داشته باشد، نسبت منافع به هزینه آن (شاخص B/C) باید بیشتر از یک باشد. شایان ذکر است که با کاربرد عمق آب $W_w, W_l, W_m, W_{ew}, W_k$ و صرف آب در واحد سطح (یک هکتار) نسبت به حالت W_m کاهش می‌یابد و لذا مساحت قابل آبیاری بیش از واحد سطح قبلی (یک هکتار) خواهد شد که این مساحت قابل آبیاری (IA)، میزان تولید معادل (EY، کیلوگرم) و درصد تولید اضافه شده (IEY) با استفاده از روابط ۳۱، ۳۲ و ۳۳ بدست می‌آیند. همچنین نسبت درآمد به هزینه معادل (EBCR) و نسبت افزایش درآمد خالص به ازای واحد زمین (IIUL) وقتی که میزان آب مصرفی معادل با W_m باشد نیز محاسبه شده است.

$$IA_{OWD} = \frac{W_m}{W_{OWD}} \quad (31)$$

$$EY_{OWD} = IA_{OWD} \times Y_{OWD} \quad (32)$$

$$IEY_{OWD} = \frac{(EY_{OWD} - EY_{W_m}) \times 100}{EY_{W_m}} \quad (33)$$

برای ارزیابی عمق‌های بهینه آبیاری بدست آمده از شاخص‌هایی

استفاده شده است که به صورت زیر می‌باشد.

درصد صرفه‌جویی در مصرف آب (WS):

$$WS = \frac{(W_m - W_{OWD}) \times 100}{W_m} \quad (23)$$

که W_m عمق آب آبیاری که بیشترین عملکرد را نتیجه می‌دهد و W_{OWD} عمق‌های بهینه آبیاری بدست آمده می‌باشد.

درصد کاهش عملکرد نسبت به عملکرد بیشینه (YR):

$$YR = \frac{(Y_{W_m} - Y_{OWD}) \times 100}{Y_{W_m}} \quad (24)$$

که Y_{OWD} و Y_{W_m} تابع تولید به ترتیب به ازای W_m و سایر عمق‌های بهینه آبیاری می‌باشند.

درصد کاهش درآمد خالص از واحد سطح (IRUL):

$$IRUL = \frac{(i_L(w)_{W_m} - i_L(w)_{OWD}) \times 100}{i_L(w)_{W_m}} \quad (25)$$

که $i_L(w)_{OWD}$ و $i_L(w)_{W_m}$ به ترتیب درآمد خالص در واحد سطح (ریال بر هکتار) برای عمق آبیاری ماکزیمم (W_m) و سایر عمق‌های بهینه آبیاری می‌باشد.

درآمد خالص به ازای واحد حجم آب مصرفی (IIUW) (ریال بر مترمکعب)

$$IIUW = \frac{i_L(w)_{OWD}}{W_{OWD}} \quad (26)$$

که در آن $i_L(w)_{OWD}$ درآمد خالص در واحد سطح (ریال بر هکتار) و W_{OWD} مقدار آب مصرفی در واحد سطح برای عمق‌های بهینه (مترمکعب در هکتار) می‌باشد.

درصد افزایش درآمد خالص به ازای واحد حجم آب مصرفی (IIUW) (بر حسب درصد)

$$IIUW = \frac{(IIUW_{OWD} - IIUW_{W_m}) \times 100}{IIUW_{W_m}} \quad (27)$$

که $IIUW_{W_m}$ و $IIUW_{OWD}$ درآمد خالص به ازای واحد حجم آب مصرفی با کاربرد اعماق بهینه و W_m می‌باشد (ریال بر هکتار).

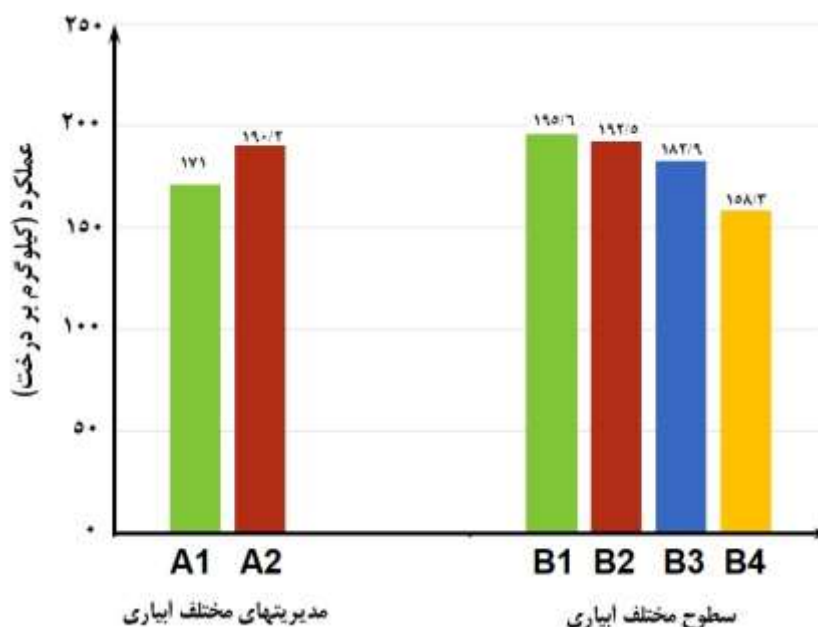
نتایج

پس از اتمام آبیاری، مقدار کل آب مصرفی در تیمارهای مختلف محاسبه شد که برای تیمار آبیاری کامل در دور آبیاری متغیر و ۴ روز به ترتیب ۱۶۲ و ۲۰۷ میلی‌متر می‌باشد (جدول ۱). در تحقیق میری و همکاران (۱۳۹۳) برای دور آبیاری ۳ روز این مقدار ۲۴۳ میلی‌متر بدست آمده بود. در تحقیق شهاییان و همکاران نیز آب مصرفی در دور آبیاری متغیر برای تیمار آبیاری کامل در سال اول ۳۶۶ میلی‌متر و در سال دوم ۲۸۵ میلی‌متر بوده است (Shahabian et al., 2012). از

دلایل اختلاف می‌تواند میزان بارش و نحوه اندازه‌گیری نیاز آبی درختان بود که در تحقیقات مذکور به روش غیرمستقیم و با محاسبه تبخیر-تعرق مرجع و استفاده از ضریب گیاهی پیشنهادی فائو بوده است. در صورتی که در این تحقیق نیاز آبی درختان به روش مستقیم و با اندازه‌گیری بیلان رطوبتی خاک بدست آمده است. همچنین میزان عملکرد در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد که به صورت شکل ۳ می‌باشد.

جدول ۱- مقدار کل آب مصرفی در تیمارهای مختلف (میلی‌متر)

دور آبیاری ۴ روز				دور آبیاری متغیر			
0.5RAW	0.65RAW	0.8RAW	RAW	0.5RAW	0.65RAW	0.8RAW	RAW
۱۰۳/۵	۱۳۴/۵	۱۶۵/۶	۲۰۷	۸۱/۱	۱۰۵/۴	۱۲۹/۷	۱۶۲/۱

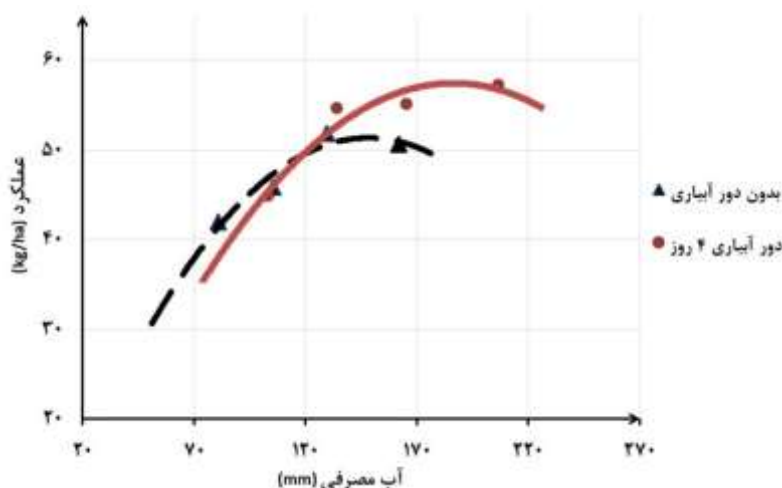


شکل ۳- میزان عملکرد درخت پرتقال در سطوح و مدیریت‌های مختلف آبیاری

افزایش ۱۲ درصدی محصول می‌شود. این امر موجب افزایش درآمد خالص به میزان ۲۷٪ می‌شود که بیش از ۱۱۳ میلیون ریال در هکتار می‌باشد. در تحقیق عبادی و همکاران (۱۳۹۴) مقدار آب مصرفی برای دور آبیاری متغیر ۱۹۹/۸ میلی‌متر بدست آمده است. دلیل اختلاف آن این است که در تحقیق مذکور میزان آب مصرفی بر اساس درصدی از نیاز آبی درخت محاسبه شده بود که نیاز آبی به روش غیرمستقیم و بر اساس روش فائو و با استفاده از ضرایب گیاهی فائو بدست آمده بود. در صورتی که میزان نیاز آبی در این تحقیق به روش مستقیم و با اندازه‌گیری بیلان رطوبتی خاک محاسبه گردید.

جهت ارزیابی اقتصادی تیمارهای مختلف، ابتدا تابع تولید برای هر یک از مدیریت‌های آبیاری بدست آمد (شکل ۴). سپس توابع هزینه و درآمد محاسبه شد که به صورت جدول ۲ می‌باشد. پس از تعیین توابع تولید-آب، هزینه-آب و درآمد-آب، اعماق بهینه برای شرایط مختلف مدیریت آبیاری محاسبه شد و سپس تحلیل‌های اقتصادی بر روی آنها انجام گرفت که نتایج آن در جداول ۳ الی ۶ ارائه گردیده است.

نتایج نشان داد که در شرایط دور آبیاری متغیر، عمق آب آبیاری جهت رسیدن به حداکثر محصول دهی ۱۴۸/۳ میلی‌متر است که در صورت رعایت دور آبیاری ۴ روز، ۱۸۶/۵ میلی‌متر می‌باشد که موجب



شکل ۴- نمودار تابع تولید-آب مصرفی برای مدیریت‌های مختلف آبیاری

جدول ۲- توابع تولید، هزینه و درآمد در مدیریت‌های مختلف آبیاری

تیمار	تابع تولید	تابع هزینه	تابع درآمد
دور آبیاری متغیر	$Y(w) = -0.00219w^2 + 0.64989w + 3.1397$ $R^2=0.93, RMSE=1.01$	$C(w) = 189.416w + 586428$ $R^2=0.86, RMSE=2294.5$	$i_i(w) = -43.8w^2 + 13187.2w + 649222$
دور آبیاری ۴ روز	$Y(w) = -0.00174w^2 + 0.64929w - 3.1303$ $R^2=0.93, RMSE=1.29$	$C(w) = 179.525w + 589763$ $R^2=0.84, RMSE=2963.6$	$i_i(w) = -34.8w^2 + 13165.3w + 527157$

درصد کمتر از به کارگیری عمق آب در حالت عملکرد بیشینه (W_m) می‌باشد. دلیل آن اختلاف زیاد قیمت واحد میوه نسبت به قیمت واحد آب می‌باشد و باعث می‌شود در میزان درآمد خالص در واحد سطح، عملکرد نقش بیشتری را نسبت به آب داشته باشد و با کاهش عملکرد، درآمد خالص در واحد سطح کاهش چشمگیری داشته باشد. به همین دلیل به کارگیری عمق W_{ew} علی‌رغم آنکه باعث کاهش مصرف آب به میزان ۴۵/۷ و ۴۶/۱ درصد می‌شوند، چون ۱۹/۶ و ۲۲/۴ درصد عملکرد را کاهش می‌دهند، باعث کاهش درآمد خالص از واحد سطح به میزان ۴۵/۷ و ۴۶/۱ درصد می‌شوند. این حالت در به کارگیری عمق W_w نیز صادق می‌باشد.

در زمینه بهره‌وری آب هرچه میزان مصرف آب کمتر شود، بهره‌وری آب بیشتر می‌شود. بطوریکه پس از W_k ، بهترین بهره‌وری آب از W_{ew} و بعد W_w بدست آمد که در شرایط دور آبیاری متغیر و دور آبیاری ۴ روز برای W_{ew} به میزان ۵۱/۲ و ۴۴/۳ و برای W_w به میزان ۴۳/۹ و ۳۸/۸ کیلوگرم بر مترمکعب بود. این مقادیر در مقابل تحقیق عبادی و همکاران (۱۳۹۴) که برای دور آبیاری متغیر به میزان ۲۴/۷ برای W_{ew} و ۱۹/۲ برای W_w می‌باشد، بیشتر است. دلیل آن سن بیشتر درختان و عملکرد بیشتر آنها از یک طرف و عمق آب مصرفی کمتر از طرف دیگر در این تحقیق نسبت به تحقیق مذکور است.

در صورت محدودیت آب، بهترین عمق آب آبیاری برای تیمارهای A_1 و A_2 به ترتیب ۱۰۹/۳ و ۱۳۶/۹ میلی‌متر می‌باشد. این حالت موجب کاهش مصرف آب به میزان ۲۶/۳ و ۲۶/۹ درصد و کاهش عملکرد به میزان ۶/۵ و ۷/۵ درصد می‌شود. اما این شرایط موجب کاهش درآمد خالص در واحد سطح به ترتیب به میزان ۱۴/۴ و ۱۴/۶ درصد می‌شود. در این حالت اگر محدودیت زمین وجود نداشت، با این میزان آب ذخیره شده می‌توان ۳۶ و ۳۶ درصد زمین بیشتری را آبیاری کرد که موجب ۲۶/۹ و ۲۶/۱ درصد افزایش تولید و ۱۶/۲ و ۱۶/۳ درصد افزایش درآمد خالص می‌شود.

در صورت محدودیت زمین، بهترین عمق آب آبیاری برای تیمارهای A_1 و A_2 به ترتیب ۱۴۶/۲ و ۱۸۴/۰ میلی‌متر می‌باشد. این حالت تقریباً در میزان مصرف آب، عملکرد و بهره‌وری آب تأثیر محسوسی ندارد. زیرا از نظر فراهمی آب مشکلی وجود ندارد و در نتیجه آبیاری به اندازه آبیاری کامل صورت می‌پذیرد. بیشترین درآمد خالص در واحد سطح از عمق آب در حالت محدودیت زمین (W_1) بدست آمد که با اختلاف ناچیزی (۰/۰۲ درصد) بیشتر از حالت استفاده از W_m می‌باشد که این نتیجه با نتایج عبادی و همکاران (۱۳۹۴) و Ballester و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد. کمترین درآمد خالص در واحد سطح (به غیر از حالت سر به سری) از عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب (W_{ew}) بدست آمد که برای دور آبیاری متغیر و دور آبیاری ۴ روز به ترتیب ۴۵/۷ و ۴۶/۱

جدول ۳- عمق‌های بهینه در مدیریت‌های مختلف آبیاری

تیمار	W_m (میلی متر)	Y_m (تن بر هکتار)	W_l (میلی متر)	W_w (میلی متر)	W_{el} (میلی متر)	W_{ew} (میلی متر)	W_k (میلی متر)
دور آبیاری متغیر	۱۴۸/۳	۵۱/۳	۱۴۶/۲	۱۰۹/۳	۱۴۴/۰	۸۰/۶	۴۹/۱
دور آبیاری ۴ روز	۱۸۶/۵	۵۷/۴	۱۸۴/۰	۱۳۶/۹	۱۸۱/۴	۱۰۰/۵	۶۱/۱

جدول ۴- تحلیل اقتصادی عمق‌های بهینه در مدیریت‌های مختلف آبیاری

تیمار	شاخص موردنظر	W_m	W_w	W_l	W_{el}	W_{ew}	W_k
دور آبیاری متغیر	WS (%)	--	۲۶/۳	۱/۵	۲/۹	۴۵/۷	۶۶/۹
دور آبیاری ۴ روز		--	۲۶/۶	۱/۴	۲/۸	۴۶/۱	۶۷/۳
دور آبیاری متغیر	YR (%)	--	۶/۵	۰/۰۲	۰/۱	۱۹/۶	۴۲/۰
دور آبیاری ۴ روز		--	۷/۵	۰/۰۲	۰/۱	۲۲/۴	۴۷/۷
دور آبیاری متغیر	$i_L(w)$	۴۱۲,۲۰۴,۶۳۴	۳۵۲,۹۳۷,۸۷۱	۴۱۲,۴۰۹,۳۴۴	۴۱۲,۲۰۴,۶۳۴	۲۲۳,۹۲۰,۴۳۴	۰
دور آبیاری ۴ روز	(ریال بر هکتار)	۵۲۵,۲۹۴,۵۴۱	۴۴۸,۴۵۵,۸۸۱	۵۲۵,۵۲۶,۰۲۰	۵۲۵,۲۹۴,۵۴۱	۲۸۲,۹۴۲,۲۷۸	۰
دور آبیاری متغیر	IRUL	--	۱۴/۴	۰	۰	۴۵/۷	۱۰۰
دور آبیاری ۴ روز	(%)	--	۱۴/۶	۰	۰	۴۶/۱	۱۰۰
دور آبیاری متغیر	IUW	۲۷۷,۹۱۱	۳۲۲,۸۵۰	۲۸۲,۱۶۱	۲۸۶,۲۵۴	۲۷۷,۹۱۱	۰
دور آبیاری ۴ روز	(ریال بر مترمکعب)	۲۸۱,۶۰۷	۳۲۷,۵۷۶	۲۸۵,۶۸۰	۲۸۹,۶۱۵	۲۸۱,۶۰۷	۰
دور آبیاری متغیر	IIUW	--	۱۶/۲	۱/۵	۳/۰	۰	-۱۰۰
دور آبیاری ۴ روز	(%)	--	۱۶/۳	۱/۶	۲/۸	۰	-۱۰۰
دور آبیاری متغیر	هزینه واحد تولید	۱۱,۹۷۱	۱۲,۶۴۸	۱۱,۹۶۵	۱۱,۹۶۴	۱۴,۵۷۶	۲۰,۰۰۰
دور آبیاری ۴ روز	(ریال بر کیلوگرم)	۱۰,۸۵۳	۱۱,۵۶۱	۱۰,۸۴۷	۱۰,۸۴۵	۱۳,۶۴۷	۲۰,۰۰۰
دور آبیاری متغیر	IUY	۸,۰۲۹	۷,۳۵۲	۸,۰۳۵	۸,۰۳۶	۵,۴۲۴	۰
دور آبیاری ۴ روز	(ریال بر کیلوگرم)	۹,۱۴۷	۸,۴۳۹	۹,۱۵۳	۹,۱۵۵	۶,۳۵۳	۰
دور آبیاری متغیر	IRUY	--	۸/۴	۰	۰	۳۲/۴	۱۰۰
دور آبیاری ۴ روز	(%)	--	۷/۷	۰	۰	۳۰/۵	۱۰۰
دور آبیاری متغیر	BCR	۱/۶۷	۱/۵۸	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۳۷	۱/۰
دور آبیاری ۴ روز		۱/۸۴	۱/۷۳	۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۴۷	۱/۰

جدول ۵- میزان افزایش سطح آبیاری و تولید با استفاده از عمق‌های بهینه آبیاری نسبت به آبیاری کامل

تیمار	شاخص موردنظر	W_m	W_w	W_l	W_{el}	W_{ew}
دور آبیاری متغیر	(IA)	--	۱/۳۶	۱/۰۱	۱/۰۳	۱/۸۴
دور آبیاری ۴ روز	(هکتار)	--	۱/۳۶	۱/۰۱	۱/۰۳	۱/۸۶
دور آبیاری متغیر	(EY)	۵۱/۳	۶۵/۱	۵۲/۱	۵۲/۸	۷۶/۰
دور آبیاری ۴ روز	(تن در هکتار)	۵۷/۴	۷۲/۴	۵۸/۲	۵۹/۰	۸۲/۷
دور آبیاری متغیر	(IEY)	--	۲۶/۹	۱/۵	۲/۹	۴۸/۰
دور آبیاری ۴ روز	(%)	--	۲۶/۱	۱/۴	۲/۸	۴۴/۰
دور آبیاری متغیر	IIUL	--	۱۶/۲	۱/۵	۳/۰	۰
دور آبیاری ۴ روز	(%)	--	۱۶/۳	۱/۴	۲/۸	۰
دور آبیاری متغیر	EBCR	۱/۶۷	۱/۷۹	۱/۶۸	۱/۶۹	۱/۶۹
دور آبیاری ۴ روز		۱/۸۴	۲/۰۰	۱/۸۶	۱/۸۷	۱/۸۶

جدول ۶ استفاده کرد. بر این اساس بیشترین درآمد خالص در صورتی که محدودیت زمین نباشد (برای آبیاری معادل با عمق

با توجه به موارد بررسی شده، جهت انتخاب عمق بهینه آبیاری بر اساس بیشترین درآمد خالص در شرایط مختلف محدودیت، می‌توان از

آبیاری (W_m)، آبیاری به اندازه W_w (شرایط محدودیت آب) می‌باشد که درآمد خالص آن برای شرایط دور آبیاری متغیر و ۴ روز به ترتیب بیش از ۴۷۶ و ۶۱۱ میلیون ریال می‌باشد. این حالت بیشترین درآمد

خالص از واحد حجم آب مصرفی را نیز ایجاد می‌نماید. این نتیجه با نتایج عبادی و همکاران (۱۳۹۴) بر روی پرتقال، انصاری (۱۳۸۷) بر روی ذرت و توکلی و فرداد (۱۳۷۸) بر روی چغندر قند همخوانی دارد.

جدول ۶- اولویت‌بندی عمق آب آبیاری و درآمد خالص معادل آنها در شرایط مختلف محدودیت

نوع محدودیت	گزینه‌های انتخابی	دور آبیاری	عمق آب (میلی‌متر)	درآمد خالص از واحد سطح (ریال)	درآمد خالص از واحد حجم آب (ریال)	درآمد خالص واحد تولید (ریال)	مساحت قابل آبیاری با عمق معادل W_m (ها)	درآمد خالص با عمق آبیاری (ریال)
محدودیت زمین و آب نباشد	W_m	نامشخص	۱۴۸/۳	۴۱۲,۲۰۴,۶۳۴	۲۷۷,۹۱۱	۸,۰۲۹	۱	۴۱۲,۲۰۴,۶۳۴
		۴	۱۸۶/۵	۵۲۵,۲۹۴,۵۴۱	۲۸۱,۶۰۷	۹,۰۱۴۷	۱	۵۲۵,۲۹۴,۵۴۱
محدودیت زمین باشد و محدودیت آب نباشد	W_{el}	نامشخص	۱۴۴/۰	۴۱۲,۲۰۴,۶۳۴	۲۸۶,۲۵۴	۸,۰۳۶	۱	۴۱۲,۲۰۴,۶۳۴
		۴	۱۸۱/۴	۵۲۵,۲۹۴,۵۴۱	۲۸۹,۶۱۵	۹,۰۱۵۵	۱	۵۲۵,۲۹۴,۵۴۱
محدودیت زمین و محدودیت آب نباشد	W_1	نامشخص	۱۴۶/۲	۴۱۲,۴۰۹,۳۴۴	۲۸۲,۱۶۱	۸,۰۳۵	۱	۴۱۲,۴۰۹,۳۴۴
		۴	۱۸۴/۰	۵۲۵,۵۲۶,۰۲۰	۲۸۵,۶۸۰	۹,۰۱۵۳	۱	۵۲۵,۵۲۶,۰۲۰
محدودیت زمین نباشد و محدودیت آب باشد	W_{ew}	نامشخص	۱۰۹/۳	۳۵۲,۹۳۷,۸۷۱	۳۲۲,۸۵۰	۷,۳۵۲	۱/۳۶	۴۷۸,۸۵۹,۱۹۸
		۴	۱۳۶/۹	۴۴۸,۴۵۵,۸۸۱	۳۲۷,۵۷۶	۸,۴۳۹	۱/۳۶	۶۱۱,۰۴۳,۶۶۴
محدودیت زمین و محدودیت آب نباشد	W_{ew}	نامشخص	۸۰/۶	۲۲۳,۹۲۰,۴۳۴	۲۷۷,۹۱۱	۵,۴۲۴	۱/۸۴	۴۱۲,۲۰۴,۶۳۴
		۴	۱۰۰/۵	۲۸۲,۹۴۲,۲۷۸	۲۸۱,۶۰۷	۶,۳۵۳	۱/۸۶	۵۲۵,۲۹۴,۵۴۱
محدودیت زمین و محدودیت آب نباشد	W_w	نامشخص	۱۰۹/۳	۳۵۲,۹۳۷,۸۷۱	۳۲۲,۸۵۰	۷,۳۵۲	۱	۳۵۲,۹۳۷,۸۷۱
		۴	۱۳۶/۹	۴۴۸,۴۵۵,۸۸۱	۳۲۷,۵۷۶	۸,۴۳۹	۱	۴۴۸,۴۵۵,۸۸۱
محدودیت زمین و محدودیت آب نباشد	W_{ew}	نامشخص	۸۰/۶	۲۲۳,۹۲۰,۴۳۴	۲۷۷,۹۱۱	۵,۴۲۴	۱	۲۲۳,۹۲۰,۴۳۴
		۴	۱۰۰/۵	۲۸۲,۹۴۲,۲۷۸	۲۸۱,۶۰۷	۶,۳۵۳	۱	۲۸۲,۹۴۲,۲۷۸

نتیجه‌گیری

در این تحقیق عمق‌های بهینه آبیاری در شرایط مختلف فراهمی آب و زمین جهت حصول حداکثر درآمد خالص از باغ مرکبات به روش English محاسبه گردید. نتایج نشان داد که رعایت یک برنامه آبیاری مدون، تأثیر معنی‌داری بر روی عملکرد ایجاد می‌نماید که با نتایج مقبلی دامنه و همکاران (۱۳۹۷) و عبادی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت داشت. میزان عمق آب آبیاری در حالت آبیاری کامل و برای شرایط دور آبیاری متغیر و دور آبیاری ۴ روز به ترتیب ۱۴۸/۳ و ۱۸۶/۵ میلی‌متر می‌باشد. بیشترین مقدار عملکرد و درآمد خالص از واحد زمین از عمق‌های آبیاری W_m ، W_1 و W_{el} بدست آمد و برای این سه عمق، اختلاف معنی‌داری نداشته‌اند که با نتایج عبادی و همکاران (۱۳۹۴)، سهرابی مشک‌آبادی (۱۳۷۸)، جانباز (۱۳۷۵) همخوانی داشته است. در شرایط محدودیت زمین، میزان عمق آب موردنیاز برای شرایط دور آبیاری متغیر و دور آبیاری ۴ روز به ترتیب ۱۴۶/۲ و ۱۸۴/۰ میلی‌متر می‌باشد که تفاوت معنی‌داری با عمق آب آبیاری کامل ندارد. در این حالت درآمد خالص از واحد سطح و مقدار شاخص BRC بیشینه می‌گردد. در شرایط محدودیت آب، میزان عمق آب موردنیاز برای شرایط دور آبیاری متغیر و دور آبیاری ۴ روز به

ترتیب ۱۰۹/۳ و ۱۳۶/۹ میلی‌متر می‌باشد. در این حالت میزان آب مصرفی ۲۶/۳ و ۲۶/۹ درصد کاهش می‌یابد. عملکرد به میزان ۶/۵ و ۷/۵ درصد کاهش می‌یابد. اما درآمد خالص از واحد حجم آب مصرفی به میزان ۱۶/۲ و ۱۶/۳ درصد افزایش می‌یابد. در شرایط محدودیت آب با به‌کارگیری عمق آب مصرفی معادل که برای شرایط دور آبیاری متغیر و دور آبیاری ۴ روز به ترتیب ۸۰/۶ و ۱۰۰/۵ میلی‌متر می‌باشد، می‌توان ۴۶ و ۴۶ درصد در میزان مصرف آب صرفه‌جویی کرد و همچنان میزان درآمد خالص از واحد آب مصرفی برابر با درآمد خالص از واحد آب مصرفی به ازای عمق آبیاری بیشینه را بدست آورد. در شرایط دور آبیاری متغیر و دور آبیاری ۴ روز با مصرف ۴۹/۱ و ۶۱/۱ میلی‌متر آب آبیاری، میزان درآمد خالص صفر می‌گردد.

نتایج نشان می‌دهد چه در شرایط بدون محدودیت و چه در شرایط محدودیت آب، رعایت یک برنامه آبیاری مشخص و نیز اعمال کم آبیاری تأثیر مثبتی بر روی درآمد باغدار ایجاد می‌نماید. در شرایط بدون محدودیت، بهترین مدیریت آبیاری دور آبیاری ۴ روز و عمق آبیاری RAW ۸۰٪ است که در این حالت کل عمق آب آبیاری در فصل رشد ۱۴۹/۲ میلی‌متر است. میزان عملکرد برای این عمق ۵۵/۰ تن در هکتار و میزان درآمد خالص برای این حالت بیش از ۴۸۳ میلیون ریال در هکتار می‌باشد. برای اعمال این مقدار از کم آبیاری

عمق‌های آستانه‌ای آب آبیاری برای تولید مرکبات در مناطق مرطوب ایران. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۹۰(۶): ۹۲۶-۹۱۸.

علیزاده، ح. ع. و عباسی، ف. ۱۳۹۵. بهینه سازی مصرف آب و کود در کودآبیاری ذرت دانه ای. نشریه پژوهش آب در کشاورزی/ب. ۳۰ (۴): ۴۵۵-۴۴۵.

قهرمان، ب.، زندپارسا، ش. و سپاسخواه، ع. ۱۳۸۰. کم آبیاری ذرت: مقایسه دو روش. مجله تحقیقات کشاورزی ایران. ۲۰ (۱): ۱۶-۱.

مقبلی دامنه، ا.، فتاحی، ر.، قربانی، ب.، ربیعی، غ. ر. و اسفندیاری، ص. ۱۳۹۷. تأثیر کم آبیاری بر رشد رویشی، عملکرد و کارایی مصرف آب پرتقال مارس ارلی در جنوب کرمان. نشریه به زراعی کشاورزی، ۲۰ (۳): ۷۱۸-۷۰۷.

میری، ف. س.، شاهنظری، ع.، ضیاء تبار احمدی، م. خ. و زبردست رستمی، ح. ع. ۱۳۹۳. اثر کم آبیاری تنظیم شده و آبیاری ناقص ریشه بر عملکرد کمی و کیفی میوه پرتقال. نشریه علوم باغبانی (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۸ (۱): ۸۶-۸۰.

Ballester, C., Castel, J., Intrigliolo, D.S and Castel, J.R. 2011. Response of Clementina de Nules citrus trees to summer deficit irrigation, Yield components and fruit composition. *Agricultural Water Management*. 98: 1027-1032

Capra, A., Consoli, S and Scicolone, B. 2011. Economic Analysis of Citrus Orchards under Deficit Irrigation in South Italy. P 209-215, In: Fernandez, J. E. and Ferreira, M.I. (eds), *Proceeding XXVIIIth IHC - International Symposium on horticultural use of water in a changing climate*, Acta Horticulture. 922, ISHS, Lisbon, Portugal.

Doorenbos, J. and Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper No. 33*, FAO, Rome.

English, M. 1990. Deficit irrigation. I: Analytical framework. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 399-411.

English, M. and Raja, S.N. 1996. Perspective on deficit irrigation. *Journal of Agricultural Water Management*. 32: 1-14.

Ginestar C., and Castel J.R. 1996. Responses of young Clementine citrus trees to water stress during different phenological periods. *Journal of Horticultural Sciences*. 71.4: 551-559.

Hughes, N. 2011. Estimating irrigation farm production function with ABARES survey data. ABARES conference. 9.11 February 2011, Melbourne, Victoria.

Shabani, A., Sepaskhah, A.R., and Khorramian, M.

می‌توان قبل از آبیاری میزان رطوبت را اندازه‌گیری کرد و به میزان ۸۰٪ رطوبت سهل‌الوصول آبیاری را انجام داد و یا اینکه به این نسبت دور آبیاری را بیشتر و یا زمان آبیاری را کمتر کرد. در شرایط با محدودیت آب نیز بهترین مدیریت آبیاری دور آبیاری ۴ روز است که کل عمق آب آبیاری مورد نیاز در فصل رشد ۱۳۶/۹ میلی‌متر است. از آنجایی که تجزیه و تحلیل فنی کم آبیاری در این تحقیق بر اساس حصول بیشترین سود اقتصادی است، نتایج آن می‌تواند برای باغداران قابل استفاده باشد. شایان ذکر است که بازدهی اقتصادی و سادگی اجرای برنامه آبیاری دو عامل مهم علاوه بر تجزیه و تحلیل فنی می‌باشد که کارشناسان در تعیین یک برنامه آبیاری قابل قبول آنها را باید در نظر بگیرند.

منابع

احمدی، ک.، عبادزاده، ح. ر.، حاتمی، ف.، حسینیپور، ر. و عبدشاه، ه. ۱۳۹۸. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۷، جلد سوم: محصولات باغبانی. انتشارات وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات. ۱۵۹ ص.

انصاری، ح. ۱۳۸۷. تعیین عمق شاخص و بهینه آبیاری در ذرت‌های زودرس با هدف احتساب حداکثر سود. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۲ (۲): ۱۱۶-۱۰۷.

توکلی، ع. ر. و فرداد، ح. ۱۳۷۸. ارزیابی اقتصادی کم آبیاری روی محصول چغندر قند جهت بهینه‌سازی مصرف آب. مجله علوم کشاورزی ایران. ۳ (۳): ۵۸۴-۵۷۵.

خرمیان، م. و حسین پور، م. ۱۳۹۵. بهینه سازی آب آبیاری کشت پاییزه چغندر قند بر اساس توابع تولید و هزینه در شمال استان خوزستان. مجله علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی - پژوهشی). ۳۹ (۳): ۱۰۶-۹۵.

سپاسخواه، ع.، قهرمان، ب.، زندپارسا، ش. و قاسمی، م. م. ۱۳۸۵. مقایسه دو روش کم آبیاری سورگوم. مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۲ (۲): ۹-۱.

سهرابی مشک‌آبادی، ب. ۱۳۷۸. بررسی کم آبیاری به روش بارانی بر روی خواص کمی و کیفی پنبه. گزارش پژوهشی مؤسسه تحقیقات پنبه کشور.

شمشیری، غ.، شعبانی، ع. سپاسیان، ع. ر.، عزیزیان، ا. و سپاسخواه، ع. ر. ۱۳۹۸. بهینه سازی آب مصرفی چغندر قند در شرایط شوری آب آبیاری و وابستگی قیمت به کیفیت محصول. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳ (۶): ۱۷۷۳-۱۷۶۲.

عبادی، ه.، رائینی سرجاز، م. و غلامی سفیدکوهی، م. ع. ۱۳۹۴. تعیین

Sepaskhah, A.R. and Kashefipour, S.M., 1994. Relationships between leaf water potential, CWSI, yield and fruit quality of sweet lime under drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 25 (1): 13-21.

Shalhevet, J., Mantell, A., Bielorai, H and Shimshi, D. 1985. Irrigation of field and orchard crops under semi-arid conditions. International Irrigation Information Centre.

2018. Mathematical-economic analysis to determine optimal applied water in case of crop price depends on its quality. *International Journal of Plant Production*. 12:191-202.

Shahabian M., Samar S. M., Talaie A. and Emdad M. R. 2012. Response of orange trees to deficit irrigation strategies in the north of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science journal*. 58 (3): 267-276.

Economical analysis of deficit irrigation management: A case study in an orange orchard

M. I. Kamali¹, H. ansari^{*2}

Received: Oct.13, 2020

Accepted: Jan.02, 2021

Abstract

In the current experimental study, economic analysis of deficit irrigation was conducted for an orange orchard and results were evaluated based on the highest net income. This experiment was performed as a split plot in the form of a randomized complete block design with five replications in 2018. The main treatments were two types of irrigation management including variable irrigation interval and 4 days irrigation interval. Sub factor was 4 irrigation levels including 100%, 80%, 65% and 50% of soil readily available water (RAW). For economic evaluation, production, cost and income functions and optimum water use depths were calculated using English method. Results showed that irrigation water depth for maximum yield for two types of irrigation management was 148.3 and 186.5 mm, respectively. When land is limiting, the best irrigation water depths were 146.2 mm and 184.0 mm. When water is limiting, the irrigation water depths are 109.3 and 136.9 mm, respectively, which caused more than 16 percent increase in net income per unit volume of water both two types of irrigation managements. With this amount of saved water, if land is not limited, the cultivated area can be increased up to 36% and 36%. Results showed that the optimum irrigation water management (in unlimited conditions) is 4 days irrigation interval and 80% RAW irrigation depth. For this situation, the yield was 55 ton/ha. The net income for this case is more than 483 million Rials per hectare and B/C equals to 1.78. The highest net income (for no land limitation and irrigation depth equivalent to full irrigation), is irrigation as large as Ww (water limitation conditions) that net income for the without and 4 days irrigation interval are more than 476 and 611 million Rials, respectively. This case generates the most net income per unit volume of used water. Results showed that in both unlimited condition and in water limitation condition, having an irrigation schedule and also applying deficit irrigation has a positive effect on the gardener's income that for deficit irrigation in unlimited condition 1492 and in water limitation condition 1369 m³/ha water is needed.

Keywords: Deficit irrigation, English method, Optimum water use depth, Production function, Readily available water

1- Assistant Professor, Department of Soil and Water Research, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran

2- Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(* - Corresponding Author Email: ansary@um.ac.ir)

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی عملکرد، اجزاء عملکرد و بهره‌وری آب گندم در سه سامانه آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای نواری

سیروس صفرزاده^۱، مریم صارمی^{۲*}، امیر فرشید^۳، منیر دهقانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۲۳

چکیده

آب مهم‌ترین عامل محدودکننده کشاورزی است و استفاده بهینه از آن از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف از این مطالعه، بررسی اثر روش‌های مختلف آبیاری بر عملکرد و اجزاء عملکرد گندم (رقم پیش‌تاز) و ارزیابی بهره‌وری آب بود. تیمارها شامل سه روش آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای نواری بودند. آزمایش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در شهرستان خرم‌آباد اجرا شد. نتایج پژوهش نشان داد که روش آبیاری، اثر معنی‌داری ($P < 0.01$) بر تعداد سنبله، تعداد دانه در سنبله، ارتفاع ساقه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و بهره‌وری آب داشت. مقدار عملکرد دانه در روش آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای نواری به ترتیب $7/870$ ، $6/83$ و $5/017$ تن در هکتار بود، به عبارت دیگر آبیاری سطحی باعث افزایش $13/21$ و $36/25$ درصدی عملکرد دانه نسبت به روش‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای نواری شد. همچنین بیشترین حجم آب کاربردی (6411 m^3) و کمترین بهره‌وری آب ($1/227 \text{ kg/m}^3$) مربوط به تیمار آبیاری سطحی بود. تیمار آبیاری قطره‌ای نواری با حدود 3333 مترمکعب آب آبیاری، باعث 59 درصد صرفه‌جویی در مصرف آب نسبت به آبیاری سطحی شد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری کرتی، آبیاری موضعی، حجم آب مصرفی، روش آبیاری، گندم

مقدمه

گندم به عنوان غذای اصلی اغلب جوامع از جمله ایران، یک کالای راهبردی بوده و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین به دلیل سازگاری گسترده با شرایط مختلف آب و هوایی، سهولت کشت،

امکان نگهداری طولانی مدت، ارزش غذایی بالا و قابلیت مصرف در اشکال مختلف، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است (ریاحی و همکاران، ۱۳۹۷). براساس آخرین آمارنامه کشاورزی (سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶) کل سطح زیر کشت محصول گندم در ایران 5400310 هکتار و میزان تولید 13300001 تن می‌باشد. در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ رتبه دوم میزان تولید آبی از بین محصولات زراعی مربوط به گندم با تولید حدود $8/4$ میلیون تن و سهم $11/3$ درصد از کل میزان تولید محصولات زراعی بود (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۸). حدود 90 درصد آب تجدیدپذیر کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود و در مقابل کمبود آب عامل اصلی محدود کننده تولید است. از طرفی رشد جمعیت و افزایش نیاز غذایی، نیازمند افزایش تولید از همان منابع محدود آب است. بر همین اساس در آینده نزدیک توجه جدی به افزایش کارایی مصرف آب (WUE)^۵ و راهکارهای مربوطه جزء چالش‌های مهم خواهد شد (Smith et al, 2002). واضح است که

۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم آب شوشتر، کارشناس و ناظر پروژه‌های معاونت آب و خاک، سازمان جهاد کشاورزی استان لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

۳- کارشناس مهندسی کشاورزی (علوم و مهندسی آب)، دانشگاه اهواز، کارشناس و ناظر پروژه‌های معاونت آب و خاک، سازمان جهاد کشاورزی استان لرستان، خرم‌آباد، ایران

۴- کارشناس مهندسی کشاورزی علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت‌الله آملی آمل، کارشناس سازمان جهاد کشاورزی استان لرستان، خرم‌آباد، ایران
(* نویسنده مسئول: Email: m.saremi2008@gmail.com)

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.8.8

محصول مربوط به تیمار آبیاری فارو بود (شیرین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶). نتایج تحقیق دهقانیان و افضل‌نیا (۱۳۹۷) در ارزیابی تأثیر سه روش آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای نواری بر عملکرد و بهره‌وری آب محصول ذرت در تناوب با گندم در شهرستان مرودشت نشان داد که روش‌های آبیاری تحت فشار بیشترین عملکرد را دارند. در آبیاری قطره‌ای نواری نسبت به آبیاری بارانی و سطحی به ترتیب ۳۴ و ۵۷ درصد در حجم آب آبیاری صرفه‌جویی شد. همچنین بیشترین بهره‌وری آب آبیاری (میانگین ۱/۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب) مربوط به آبیاری قطره‌ای نواری و کمترین آن (میانگین ۰/۳۴ کیلوگرم بر مترمکعب) مربوط به روش سطحی بود. مقایسه اثر کاربرد سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و جویچه‌ای بر عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری گندم در اکباتان نشان داد که میانگین عملکرد دانه در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و نشتی به ترتیب ۷۴۴۳ و ۵۹۹۶ کیلوگرم در هکتار و بهره‌وری آب ۱/۸۹ و ۱ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد و بدین ترتیب آبیاری قطره‌ای با کاهش ۳۳ درصدی در آب مصرفی باعث افزایش ۷۳ درصدی در بهره‌وری آب شد (قدیمی فیروزآبادی و باغانی، ۱۳۹۸). در شهرستان خواف بررسی عملکرد گندم و بهره‌وری آب در سیستم آبیاری قطره‌ای در مقابل آبیاری سنتی نشان داد که میانگین عملکرد در روش‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای به ترتیب ۳۵۶۶ و ۴۵۵۷ کیلوگرم در هکتار و بهره‌وری آب ۱/۰۵ و ۱/۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد. آبیاری قطره‌ای علاوه بر کاهش مصرف آب به میزان ۱۶ درصد، باعث افزایش عملکرد به میزان ۲۸ درصد شد که این دو مورد باعث گردید بهره‌وری آب ۵۰ درصد افزایش یابد (طاووسی و تواناپور، ۱۳۹۹).

ارزیابی سیستم آبیاری بارانی در پنجاب پاکستان نشان داد که میزان بهره‌وری آب گندم ۵/۲۱ کیلوگرم بر مترمکعب اندازه‌گیری شد و همچنین آبیاری بارانی باعث ۳۵ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب نسبت به روش سنتی شد (Kahlowan et al., 2007). عبدالرحمان در پژوهشی در منطقه المغاره مصر میزان عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری سه رقم گندم (giza7، sakha8 و giza69) را به ترتیب ۲۱۴۵، ۲۱۲۰ و ۲۰۸۵ کیلوگرم در هکتار و ۱/۲۰، ۱/۱۷ و ۱/۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد کرد (Abd El-Rahman., 2009). مقایسه سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و جویچه‌ای در پاکستان نشان داد که عملکرد گندم در آبیاری قطره‌ای ۱۱/۵۶ درصد بیشتر از آبیاری جویچه‌ای بود، ضمن اینکه آبیاری قطره‌ای ۱۶/۵۶ درصد مصرف آب کمتر و ۳۳/۳۶ درصد بهره‌وری آب آبیاری بالاتری نسبت به آبیاری جویچه‌ای داشت (Saleem et al., 2010). بر اساس نتایج تحقیق وانگ و همکاران در شمال چین، روش آبیاری بر عملکرد دانه و بهره‌وری آب گندم تأثیر معنی‌داری داشت و این مقادیر در آبیاری قطره‌ای نواری بیشتر از آبیاری کرتی بود. بیشترین بهره‌وری آب در روش آبیاری قطره‌ای نواری با رطوبت خاک ۵۰ تا ۶۰ درصد ظرفیت زراعی بدست آمد

استفاده بهینه از این مایع حیاتی و افزایش بهره‌وری آن در تمامی بخش‌ها از جمله استحصال و مصرف، مستلزم مدیریت صحیح منابع آبی، دانش کافی و آشنایی با روش‌های نوین آبیاری است (کبیری سامانی و باقری، ۱۳۹۳).

در توسعه روش‌های نوین آبیاری طی یک قرن گذشته دو عامل نقش اساسی داشته‌اند. یکی از این عوامل و شاید مهمترین آن‌ها کمبود منابع آب شیرین برای تولید محصولات زراعی و باغی بوده است. عامل دیگر پیشرفت تکنولوژی و فناوری‌های صنعتی است که موجب گردید بسیاری از ایده‌ها و نظریات در زمینه روش‌های آبیاری از قوه به فعل درآمده و از روش‌هایی بهره گرفته شود که راندمان بالاتر داشته و در جهت افزایش بهره‌وری آب باشند. با توجه به این دو موضوع اکثر نوآوری‌ها در ابداع روش‌های جدید آبیاری بر این مفهوم استوار بوده‌اند که آب به اندازه و فقط به گیاه داده شود و از آبیاری بخش‌هایی از زمین که خارج از محدوده رشد گیاه است جلوگیری شود. در سیستم‌های سنتی آبیاری مانند روش‌های سطحی معمولاً آب در تمام سطح مزرعه پخش شده و خاک در تمام قسمت‌های زمین خیس می‌شود و این امر موجب تلف شدن آب می‌گردد. در صورتیکه اکثر روش‌های نوین آبیاری مانند سیستم‌های بارانی و قطره‌ای متمرکز بر آبیاری گیاه است نه آبیاری زمین (علیزاده، ۱۳۸۹). مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که تکنولوژی‌های آبیاری آب اندوز به ذخیره و صرفه‌جویی آب کمک می‌کنند. همچنین این تکنولوژی باعث کاهش آثار منفی تغییر اقلیم بر روی تولیدات کشاورزی می‌شود (Zou et al, 2012).

تحقیقات متعددی در سرتاسر دنیا و از جمله ایران در رابطه با مقایسه سامانه‌های آبیاری سطحی و آبیاری نوین از نظر میزان مصرف آب، بهره‌وری آب و عملکرد محصول گندم صورت گرفته است. قدیمی فیروز آبادی و همکاران (۱۳۹۶) در همدان اثر سه سیستم آبیاری بارانی، قطره‌ای نواری (تیپ) و جویچه‌ای را بر عملکرد و بهره‌وری آب چند رقم گندم بررسی کردند. نتایج نشان داد تفاوت بین رقم‌ها از نظر عملکرد معنی‌دار نبود. مقدار بهره‌وری آب آبیاری در روش آبیاری قطره‌ای نواری، بارانی و جویچه‌ای (بدون در نظر گرفتن بارندگی مؤثر) به ترتیب ۱/۶، ۱/۱ و ۰/۶۹ کیلوگرم به ازای واحد آب مصرفی بود. به عبارت دیگر، آبیاری قطره‌ای نواری باعث افزایش ۱۳۲ و ۴۵ درصدی بهره‌وری آب نسبت به روش جویچه‌ای و بارانی گردید. بررسی اثر روش‌های مختلف آبیاری بر محصول گندم در منطقه مغان نشان داد که بیشترین عملکرد محصول مربوط به روش آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) با سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه بود و بیشترین بهره‌وری آب مربوط به روش آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) با ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه شد. همچنین کمترین عملکرد

همزمان سه روش آبیاری و بررسی اجزاء عملکرد گندم را می‌توان وجه تمایز این تحقیق قلمداد کرد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در شهرستان خرم‌آباد به مختصات ۳۳ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی با ارتفاع ۱۱۴۸ متر از سطح دریا در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ انجام گردید. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز برای اجرای تحقیق (شامل درجه حرارت و بارندگی در طی دوره رشد گیاه گندم) از ایستگاه سینوپتیک واقع در فرودگاه خرم‌آباد که نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه است، اخذ گردید. منطقه مورد مطالعه براساس طبقه‌بندی آمبروزه دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد، همراه با روزهای یخبندان در زمستان است (صارمی و همکاران، ۱۳۹۴) بطوریکه سرمای نسبتاً زیاد از اواسط آذرماه تا اواخر بهمن‌ماه از عوامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی در این منطقه است. معمولاً در این منطقه به علت طولانی بودن دوره رشد از ارقام مقاوم به سرما استفاده می‌شود. گندم رقم پیشناز علاوه بر مقاومت به سرما دارای عملکرد و تولید بالایی است و به همین دلیل در این منطقه و در تحقیق مذکور از این رقم استفاده شد. با توجه به توضیحات فوق و همچنین انجام عملیات خاک‌ورزی مناسب، کشت گندم در پاییز صورت گرفت.

(Wang et al., 2013). برای بررسی تأثیر روش آبیاری قطره‌ای و کرتی بر عملکرد و میزان بهره‌وری آب گندم، تحقیقی در هند انجام شد. براساس نتایج تحقیق در سامانه آبیاری قطره‌ای میزان صرفه‌جویی در مصرف آب و بهره‌وری آب به ترتیب ۲۸/۴۲ و ۲۴/۲۴ درصد بیشتر از روش آبیاری کرتی بود ضمن اینکه روش آبیاری قطره‌ای باعث کاهش ۱۰/۸ درصدی عملکرد دانه شد (Chouhan et al., 2015). فنگ و همکاران گزارش کردند در شمال چین بهره‌وری اقتصادی آب گندم زمستانه در روش‌های آبیاری تحت فشار نسبت به روش آبیاری سطحی کمتر بود (Fang et al., 2018).

روش‌های آبیاری به دلیل داشتن راندمان متفاوت، میزان مصرف آب آبیاری و بهره‌وری آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با توجه به اهمیت آب بایستی راهکارهایی برای افزایش بهره‌وری و تولید در واحد حجم آب مصرفی داشته باشیم و لذا استفاده از روش‌های آبیاری نوین امری ضروری است. میزان تولید محصول گندم در استان لرستان ۴۵۶۸۵۵ تن در سال می‌باشد که ۵۰ درصد آن از اراضی آبی حاصل می‌شود (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۸). علیرغم اینکه استان لرستان یکی از استان‌های تولید کننده گندم است ولی تاکنون مطالعه‌ای در خصوص بررسی همزمان تأثیر سه روش آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای نواری (تیپ) بر عملکرد، اجزاء عملکرد و بهره‌وری آب این محصول در استان انجام نگرفته است. لازم به ذکر است در اکثر مطالعات به مقایسه سامانه آبیاری قطره‌ای یا بارانی با سامانه آبیاری سطحی به منظور ارزیابی عملکرد و بهره‌وری آب محصولات پرداخته شده و اجزاء عملکرد بررسی نشده است. بنابراین اجرای



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

تکرار اجرا گردید. قبل از کاشت به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی از خاک محل آزمایش نمونه‌برداری شد. نتایج مربوط به

این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار سامانه آبیاری (شامل آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای نواری) در سه

شد. با توجه به جدول ۳ آب آبیاری مورد استفاده طبق تقسیم‌بندی ویل کاکس، در طبقه CIS1 قرار می‌گیرد که بهترین و مناسب‌ترین حالت برای آبیاری است (Wilcox., 1960).

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش تا عمق ۳۰ سانتی‌متری در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. آب آبیاری از یک حلقه چاه عمیق کشاورزی برداشت شد که در کلیه تیمارها از آن استفاده

جدول ۱- بافت خاک محل آزمایش

عمق (سانتی‌متر)	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	بافت خاک
۳۰	۳۴	۲۷	۳۹	لومی

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی خاک محل آزمایش

عمق (سانتی‌متر)	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	K (mg/kg)	P (mg/kg)	N (mg/kg)	EC (dS/m)	pH (-)
۳۰	۸/۳	۰/۷۳	۰/۶۷	۲/۱۶	۱۴۵	۸/۶	۰/۰۵۹	۱/۶۹	۷/۴۱

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب آبیاری

EC (dS/m)	SAR	Na ⁺ (meq/L)	Cl ⁻ (meq/L)	HCO ₃ ⁻ (meq/L)	SO ₄ ⁻ (meq/L)	Ca ⁺⁺ (meq/L)	Mg ⁺⁺ (meq/L)	T.D.S (meq/L)	pH (-)
۰/۵۹	۱/۸۴	۲/۱	۰/۴	۵/۶	۱	۱/۷	۰/۹	۲۶۹	۷/۰۶

بلوک‌های مجاور در آبیاری سطحی و قطره‌ای فاصله‌ی ۲ متر و در آبیاری بارانی به منظور جلوگیری از تلفات پاشش و بادبردگی و عدم تأثیر بر روش‌های دیگر فاصله‌ی ۱۰ متر به عنوان ضریب اطمینان عدم نفوذ آب زیر سطحی در نظر گرفته شد. مساحت تیمار آبیاری بارانی یک هکتار و سیستم آبیاری از نوع کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک بود. در این سامانه از آبپاش‌های آمبو اصلی ساخت شرکت Sim ایتالیا در فشار کارکرد ۴ بار و آرایش ۲۵×۲۰ متر استفاده شد. در اطراف تیمارهای آبیاری بارانی از آبپاش‌های تنظیمی استفاده شد و به منظور محاسبه دقیق حجم آب مصرفی و جلوگیری از هدر رفت آب، حداکثر دقت به عمل آمد. در روش آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ)، ابعاد کرت‌ها ۳۰×۱۰ متر بود. در این تیمار با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققین و دانشجویان و در جهت تأمین نیاز آبی محصول، از فواصل خطوط ۵۰ سانتی‌متری و فاصله روزنه‌های ۳۰ سانتی‌متر در فشار کارکرد ۱ بار با دبی ۲ لیتر بر ساعت و از لوله‌های قطره‌ای نواری (تیپ) از نوع بغل دوخت با ضخامت ۱۷۵ میکرون استفاده شد. در تیمار آبیاری سطحی نیز روش آبیاری از نوع شیاری و ابعاد کرت‌ها ۳۰×۱۰ متر بود. حجم کل آب ورودی به هر تیمار در طول دوره کشت ثبت شد و بدین منظور از کنتورهای حجمی جداگانه استفاده گردید. تعداد آبیاری‌ها در روش‌های آبیاری سطحی و بارانی برابر با ۳ نوبت در دور آبیاری ۱۰ روز بود و در آبیاری قطره‌ای نواری ۸ نوبت آبیاری در دور آبیاری ۴ روز اجرا گردید. زمان برداشت محصول اوایل تیرماه ۱۳۹۸ بود. نمونه‌ها بطور جداگانه داخل کیسه‌های مخصوص (با نصب مشخصات روی هر نمونه) قرار داده شد و بلافاصله به

در اواخر مهرماه سال ۱۳۹۷ عملیات آماده‌سازی اراضی مورد نظر از جمله آبیاری قبل از کاشت (این آبیاری در محاسبات حجم آبیاری‌ها منظور نشد) انجام شد. آبیاری اولیه منجر به آماده‌سازی زمین جهت شخم اولیه و جوانه زدن تعدادی از علف‌های هرز گردید. عملیات شخم در ۹ آبان‌ماه سال ۱۳۹۷ انجام گرفت. بذر گواهی شده گندم رقم پیشناز پس از کنترل از نظر سلامت و سم‌زدایی شدن، در ۲۳ آبان‌ماه ۱۳۹۷ با استفاده از دستگاه ردیف کار کشت گردید. رقم کشت‌شده دارای سابقه کشت در منطقه و مناسب محل اجرای طرح است. اولین بارندگی مؤثر در ۲۴ آبان‌ماه رخ داد که باعث جوانه زدن و سبز شدن گندم در مزرعه شد. کلیه شرایط اقلیمی، محیطی و تغذیه-ای برای تیمارها یکسان بود. سایر عملیات دوره داشت از قبیل مبارزه با آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز و کوددهی نیز بطور یکنواخت در کلیه تیمارها انجام شد. بر اساس نتایج آزمایش خاک، مقدار ۲۲۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره در طی چند مرحله (مقدار ۷۵ کیلوگرم همزمان با کاشت و مابقی آن طی دو مرحله در زمان چند برگی شدن و ابتدای ساقه رفتن) در سطح مزرعه پخش گردید. همچنین مقدار ۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل و ۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هر هکتار همزمان با کاشت توزیع شد. در تاریخ ۲۳ اسفند ماه ۱۳۹۷ عملیات مبارزه با علف‌های هرز پهن برگ و باریک برگ با ترکیب سموم تاپیک و گرانستار انجام گرفت. اراضی کشت‌شده در منطقه‌ی مورد مطالعه نسبتاً مسطح بودند. طرح آزمایشی شامل سه بلوک (تکرار) و هر بلوک نیز شامل سه کرت (تیمار) بود. بین کرت‌های مجاور در هر بلوک فاصله‌ی ۲ متر و بین

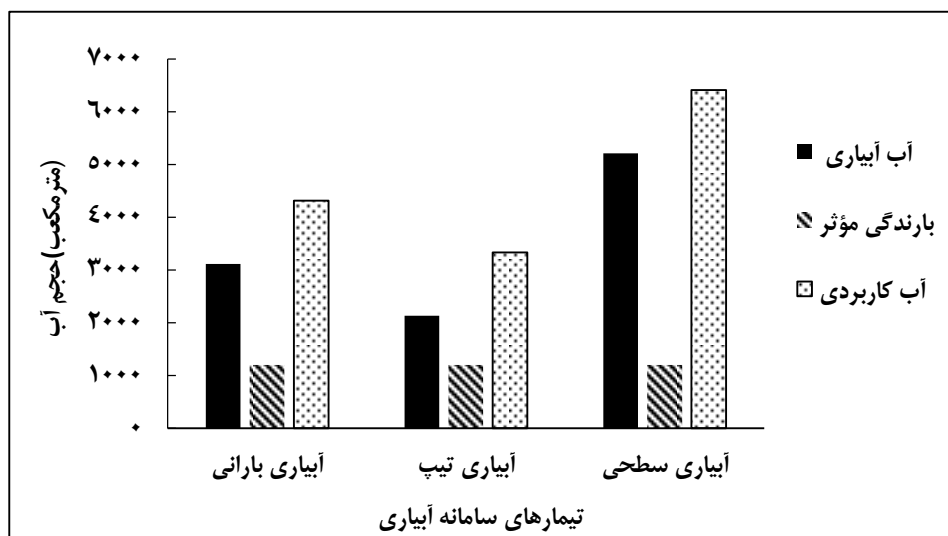
درصد و با استفاده از نرم‌افزار MSTATC انجام شد.

نتایج و بحث

آب کاربردی

با توجه به نزولات جوی، متوسط بارندگی سالانه در محل اجرای تحقیق ۴۹۹ میلی‌متر بود و میزان بارندگی مؤثر ۱۲۰۰ مترمکعب در طی دوره رشد اندازه‌گیری شد. در طول دوره رشد گیاه گندم، تیمار آبیاری بارانی ۳۱۱۰/۴ مترمکعب، تیمار آبیاری قطره‌ای نواری ۲۱۳۳/۳۴ مترمکعب و تیمار آبیاری سطحی ۵۲۱۱ مترمکعب آب دریافت نمود. حجم کل آب کاربردی با احتساب بارندگی مؤثر برای تیمارهای مختلف در شکل ۲ ارائه شده است.

آزمایشگاه انتقال یافتند و فاکتورهای تولید شامل تعداد سنبله، تعداد دانه در سنبله، ارتفاع ساقه، وزن هزار دانه، عملکرد محصول و نهایتاً بهره‌وری آب اندازه‌گیری و محاسبه شدند. برای تعیین وزن هزار دانه، دانه‌های مربوط به گیاهان نمونه برداری شده را از سنبله‌ها جدا کرده و وزن هزار دانه با ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شد. برای تعیین عملکرد محصول، دانه‌های تفکیک شده مربوط به هر تیمار در داخل پاکت‌های کاغذی (بصورت مجزا) قرار داده شد و به داخل آون انتقال و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو تا سه روز نگهداری گردید. بعد از اطمینان از خشک شدن نمونه‌ها وزن خشک دانه‌ها توسط ترازوی دیجیتالی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. بعد از آن وزن دانه در سطح نمونه برداری شده به عملکرد در هکتار تبدیل گردید. در نهایت تجزیه و تحلیل آماری شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج



شکل ۲- حجم آب آبیاری، بارندگی مؤثر و آب کاربردی تحت تیمارهای مختلف سامانه آبیاری در طی انجام پژوهش

اجزاء عملکرد

پس از برداشت نمونه‌ها قسمت‌های مختلف گیاه از یکدیگر تفکیک و تعداد سنبله شمارش گردید. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین تیمارهای سامانه آبیاری از نظر تعداد سنبله تفاوت معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) وجود داشت (جدول ۴). میانگین تعداد سنبله مربوط به تیمارهای سامانه آبیاری در جدول ۵ ارائه شده است. مقایسه میانگین تعداد سنبله نشان داد که بیشترین تعداد سنبله مربوط به تیمار آبیاری سطحی با میانگین ۴۰۰ بود که با تیمار آبیاری بارانی و قطره‌ای نواری اختلاف معنی‌داری داشت. بطور کلی می‌توان گفت تعداد سنبله تحت تأثیر نوع سامانه آبیاری قرار گرفت بطوریکه با کاهش مقدار آب مصرفی، تعداد سنبله کاهش یافت. در آبیاری قطره‌ای نواری ۵۹ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب، باعث کاهش ۷

در این پژوهش استفاده از سامانه آبیاری قطره‌ای نواری نسبت به سامانه آبیاری بارانی و سطحی به ترتیب باعث ۳۲ و ۵۹ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب شد. همچنین استفاده از سامانه آبیاری بارانی منجر به ۴۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب نسبت به آبیاری سطحی شد. نتایج پژوهش حاضر با نتایج تحقیقات دهقانیان و افضل‌نیا (۱۳۹۷) مبنی بر کاهش حجم آب مصرفی در سامانه آبیاری قطره‌ای همخوانی دارد. بر اساس نتایج تحقیق خارو و همکاران اجرای سامانه آبیاری قطره‌ای در زراعت گندم، باعث ۲۰ درصد صرفه‌جویی در آب مصرفی نسبت به آبیاری سطحی شد (Kharrou et al., 2011). مصطفی و همکاران نیز ۶/۷ درصد ذخیره آب در سامانه آبیاری قطره‌ای نسبت به آبیاری سطحی را در کشت گندم گزارش کردند (Mostafa et al., 2018).

درصدی تعداد سنبله نسبت به آبیاری سطحی شد. در آبیاری بارانی نیز ۴۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب، منجر به کاهش ۲ درصدی تعداد سنبله نسبت به آبیاری سطحی گردید. کاهش تعداد سنبله در اثر کاهش حجم آب آبیاری در تحقیقات باقری و حیدری شریف‌آباد تأیید شده است (Bagheri and Heidari Sharif Abad., 2007). کیخانی و گنجی خرم‌دل (۱۳۹۵) با مطالعه روی گندم به این نتیجه رسیدند که با کاهش مقدار آب آبیاری، تعداد سنبله در متر مربع بطور معنی‌داری کاهش یافت به گونه‌ای که بیشترین و کمترین تعداد سنبله به ترتیب در تیمار نیاز آبی ۱۰۰ و ۵۵ درصد مشاهده شد، آن‌ها کاهش تعداد سنبله را به کاهش تعداد پنجه‌های بارور در واحد سطح نسبت دادند.

تعداد دانه در سنبله نیز همانند تعداد سنبله شمارش گردید. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین تیمارهای سامانه آبیاری از نظر تعداد دانه در سنبله تفاوت معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) وجود داشت (جدول ۴). میانگین تعداد دانه در سنبله مربوط به تیمارهای سامانه آبیاری در جدول ۵ ارائه شده است. مقایسه میانگین تعداد دانه در سنبله نشان داد که بیشترین تعداد دانه در سنبله مربوط به تیمار آبیاری سطحی با میانگین ۴۸ بود که با تیمار آبیاری قطره‌ای نواری اختلاف معنی‌داری داشت و با تیمار آبیاری بارانی اختلاف معنی‌داری از خود نشان نداد. کمترین تعداد دانه در سنبله مربوط به تیمار آبیاری قطره‌ای نواری با میانگین ۳۹ بود. همانطور که مشاهده می‌شود در این پژوهش بیشترین تعداد دانه در سنبله مربوط به روش آبیاری سطحی و کمترین میزان مربوط به روش آبیاری قطره‌ای نواری است، بطوریکه این کاهش در آبیاری قطره‌ای نواری نسبت به آبیاری سطحی ۱۸ درصد است. نتایج پژوهش حاضر با نتایج تحقیقات کیخانی و گنجی خرم‌دل (۱۳۹۵) و کریمی و قدسی (۱۳۹۸) در مورد کاهش تعداد دانه در سنبله در اثر کاهش حجم آب مصرفی در محصول گندم مطابقت دارد.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین تیمارهای سامانه آبیاری از نظر ارتفاع ساقه تفاوت معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) وجود داشت

(جدول ۴). میانگین ارتفاع ساقه‌های مربوط به تیمارهای سامانه آبیاری در جدول ۵ ارائه شده است. مقایسه میانگین ارتفاع ساقه‌ها نشان داد که بیشترین ارتفاع ساقه مربوط به تیمار آبیاری سطحی با میانگین ۹۲/۲۷ سانتی‌متر بود که با تیمار آبیاری قطره‌ای نواری اختلاف معنی‌داری داشت و با تیمار آبیاری بارانی اختلاف معنی‌داری از خود نشان نداد. کمترین ارتفاع ساقه مربوط به تیمار آبیاری قطره‌ای نواری با میانگین ۸۳/۰۹ سانتی‌متر بود. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، ارتفاع ساقه با کاهش آب مصرفی روندی کاهشی داشت. در آبیاری قطره‌ای نواری ۳۲ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب، کاهش ۱۰ درصدی ارتفاع ساقه را نسبت به آبیاری بارانی داشت. نتایج تحقیق پورمنصور و همکاران (۱۳۹۸)، که در شیراز انجام گرفت نشان داد که ارتفاع گیاه گندم در تیمارهای آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد به ترتیب ۱۹ و ۱۰ درصد نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد کاهش می‌یابد. در واقع کاهش پتانسیل آب بافت‌های مرستمی در طول روز موجب نقصان پتانسیل فشاری شده و در نتیجه مانع بزرگ شدن سلول‌ها می‌شود. به طور کلی در بسیاری از گیاهان خانواده گندمیان کاهش آب سبب تأخیر در تولید شدن ساقه می‌شود که این امر موجب کاهش فاصله میان‌گره‌ها و در نتیجه کاهش ارتفاع گیاه می‌شود (نباتی، ۱۳۸۳).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین تیمارهای سامانه آبیاری از نظر وزن هزار دانه تفاوت معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) وجود داشت (جدول ۴). میانگین وزن هزار دانه مربوط به تیمارهای سامانه آبیاری در جدول ۵ ارائه شده است. مقایسه میانگین وزن هزار دانه نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه مربوط به تیمار آبیاری سطحی با میانگین ۴۱/۱۴ گرم بود که با دو تیمار آبیاری بارانی و قطره‌ای نواری اختلاف معنی‌داری داشت. کمترین وزن هزار دانه مربوط به تیمار آبیاری قطره‌ای نواری با میانگین ۳۴/۰۳ گرم بود. در آبیاری قطره‌ای نواری و بارانی وزن هزار دانه گندم به ترتیب ۱۷ و ۸ درصد کمتر از آبیاری سطحی شد. همانطور که مشاهده می‌شود در این پژوهش با کاهش میزان آب آبیاری، وزن هزار دانه کاهش بیشتری یافت.

جدول ۴- تجزیه واریانس عملکرد و برخی صفات اندازه‌گیری شده گندم در اجرای آزمایش

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		تعداد سنبله	تعداد دانه در سنبله	ارتفاع ساقه	وزن هزار دانه	عملکرد محصول
تکرار	۲	۱۴/۷۸۷ ^{ns}	۱/۱۴۱ ^{ns}	۱/۷۹۲ ^{ns}	۰/۵۱۶ ^{ns}	۰/۰۰۶ ^{ns}
تیمار	۲	۵۳۸/۳۹۱ ^{**}	۵۹/۰۰۴ ^{**}	۷۹/۳۳۸ ^{**}	۳۸/۰۰۶ ^{**}	۶/۲۶۶ ^{**}
خطا	۴	۰/۴۵۳	۰/۷۰۳	۰/۶۰۶	۰/۱۳۴	۰/۰۱۰
ضریب تغییرات (درصد)		۰/۱۷	۱/۸۹	۰/۸۷	۰/۹۷	۱/۵۴

ns و * و ** به ترتیب عدم معنی دار، معنی دار در سطح احتمال پنج درصد و معنی دار در سطح احتمال یک درصد

جدول ۵- مقایسه میانگین عملکرد و برخی صفات اندازه‌گیری شده گندم تحت تأثیر تیمارهای آبیاری

تیمارها	تعداد سنبله	تعداد دانه در سنبله	ارتفاع ساقه (سانتی‌متر)	وزن هزار دانه (گرم)
آبیاری بارانی	۳۹۱b	۴۶a	۹۱/۷۰a	۳۷/۹۴b
آبیاری تیپ	۳۷۳c	۳۹b	۸۳/۰۹b	۳۴/۰۳c
آبیاری سطحی	۴۰۰a	۴۸a	۹۲/۲۷a	۴۱/۱۴a

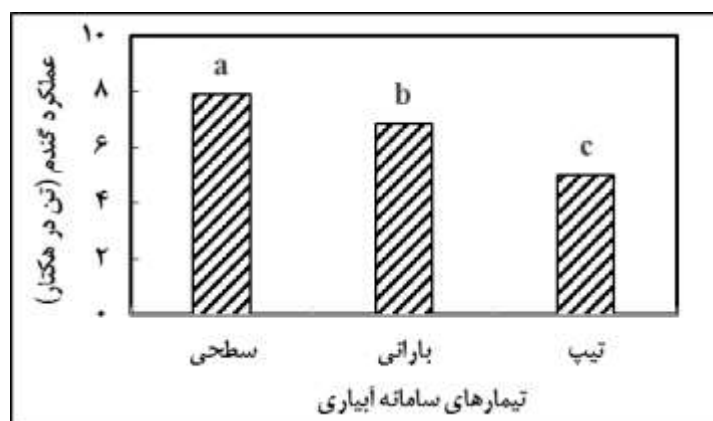
در هر ستون اعدادی که دارای حروف مشترک هستند تفاوت معنی داری به روش دانکن و در سطح ۵ درصد با هم ندارند

یافت، بطوریکه در سامانه آبیاری قطره‌ای نواری و بارانی نسبت به آبیاری سطحی به ترتیب با ۵۹ و ۴۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب، کاهش عملکرد گندم حدود ۳۶ و ۱۳ درصد بود. عملکرد کمتر دانه در تیمارهای با مقادیر کمتر آب می‌تواند به علت تعداد کمتر دانه باشد. کاهش عملکرد دانه در تیمارهای با مقادیر کمتر آبیاری را می‌توان به اثر کمبود آب که با تسریع پیری و کاهش طول پر شدن دانه گیاه همراه است و همچنین به علائم ارسالی از ریشه به برگ و القای بسته شدن روزنه‌ها و در نهایت کاهش فتوسنتز خالص، نسبت داد (کافی و مهدوی دامغانی، ۱۳۸۶). مطالعات دلاورپور و همکاران (۱۳۹۷) مؤید این مطلب است که آبیاری نشتی، باعث افزایش عملکرد محصول گندم (۵۵۰۰ کیلوگرم در هکتار) نسبت به آبیاری قطره‌ای (۳۰۰۵ کیلوگرم بر هکتار) شد. همچنین تحقیقات واسیف و همکاران نشان داد که عملکرد دانه گندم در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی نسبت به سامانه آبیاری بارانی به ترتیب حدود ۳۳/۳۳ و ۲۶/۵۷ درصد کاهش یافت (Wasif et al., 2009) که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد (آبیاری قطره‌ای نواری نسبت به آبیاری بارانی باعث ۲۷ درصد کاهش عملکرد دانه گندم شد).

براساس نتایج تحقیق باغبان خلیل‌آباد و همکاران (۱۳۹۸) بیشترین وزن هزار دانه گندم، در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی بدست آمد که با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی تفاوت معنی‌داری نداشت و کمترین وزن هزار دانه نیز مربوط به تیمار ۲۵ درصد نیاز آبی بود. آراس و همکاران عنوان کردند که کاهش مقدار آب آبیاری در مرحله پر شدن دانه‌ها باعث چروکیدگی و کاهش وزن هزار دانه گندم شد (Araus, et al., 2002).

عملکرد محصول

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین تیمارهای سامانه آبیاری از نظر عملکرد دانه اختلاف معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) وجود داشت (جدول ۴). نتایج میانگین عملکرد محصول مربوط به تیمارهای سامانه آبیاری در شکل ۳ ارائه شده است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمار آبیاری سطحی با ۷/۸۷ تن در هکتار بیشترین عملکرد دانه را داشت که با هر دو تیمار آبیاری بارانی و قطره‌ای نواری اختلاف معنی‌داری از خود نشان داد، همچنین تیمار آبیاری قطره‌ای نواری با ۵/۰۱۷ تن در هکتار کمترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد. در این پژوهش با کاهش حجم آب آبیاری عملکرد محصول کاهش



شکل ۳- عملکرد دانه گندم تحت تأثیر سامانه‌های مختلف آبیاری

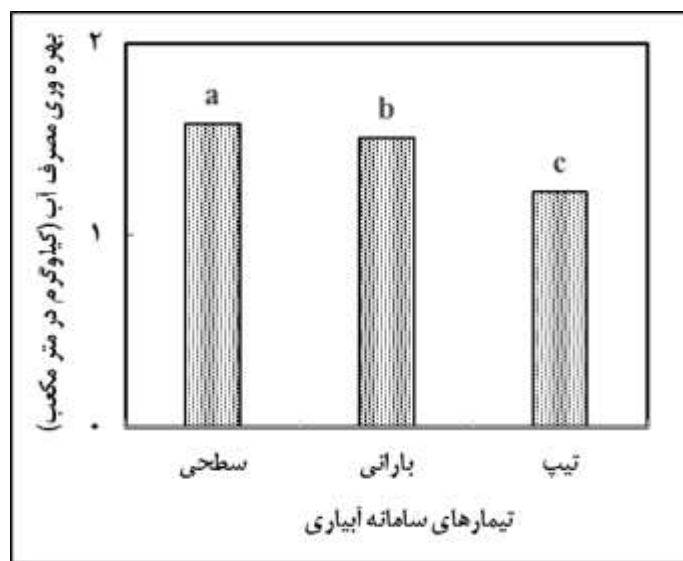
دهد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین تیمارهای سامانه آبیاری از نظر بهره‌وری آب اختلاف معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) وجود داشت (جدول ۴). نتایج میانگین بهره‌وری آب مربوط به تیمارهای

بهره‌وری آب

در این تحقیق بهره‌وری آب، مقدار محصول تولید شده (گندم) به ازای مقدار کل آب کاربردی (آب آبیاری + باران مؤثر) را نشان می‌-

از سامانه آبیاری قطره‌ای نواری بود. چوهان و همکاران نیز در تحقیق خود افزایش ۲۴ درصدی بهره‌وری آب در سامانه آبیاری قطره‌ای نسبت به روش سطحی را عنوان کردند (Chouhan et al., 2015). نتایج تحقیق معیری (۱۳۹۲) بر روی بررسی بهره‌وری آب ارقام گندم، در سه نوع سامانه آبیاری (سطحی، بارانی و قطره‌ای) نشان داد که استفاده از سامانه‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای باعث ۴۰ درصد افزایش در بهره‌وری آب می‌شود که یافته‌های ما این تحقیق را تأیید می‌نماید. فان و همکاران میزان بهره‌وری آب گندم در روش شیاری را ۰/۸۷ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش کردند (Fan et al., 2014).

سامانه آبیاری در شکل ۴ ارائه شده است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمار آبیاری بارانی با میانگین ۱/۵۸۰ کیلوگرم در مترمکعب بیشترین بهره‌وری آب را داشت که با هر دو تیمار آبیاری قطره‌ای نواری و سطحی اختلاف معنی‌داری از خود نشان داد. پس از آن تیمار آبیاری قطره‌ای نواری با میانگین ۱/۵۰۴ کیلوگرم در مترمکعب بالاترین بهره‌وری آب را داشت و کمترین مقدار نیز مربوط به تیمار آبیاری سطحی با میانگین ۱/۲۲۷ کیلوگرم در مترمکعب بود. در این تحقیق میزان بهره‌وری آب در سامانه‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای نواری نسبت به روش جویچه‌ای به ترتیب ۲۸ و ۲۲ درصد افزایش داشت. همچنین بهره‌وری آب در سامانه آبیاری بارانی ۵ درصد بیشتر



شکل ۴- بهره‌وری آب آبیاری تحت تأثیر سامانه‌های مختلف آبیاری

نتیجه‌گیری

توسط سامانه آبیاری قطره‌ای نواری (۲۱۳۳/۳۴ مترمکعب) باشد استفاده از این سامانه در مناطقی با اقلیم مشابه منطقی به نظر می‌رسد. استفاده از سامانه آبیاری بارانی ضمن ۴۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب، بالاترین بهره‌وری آب را داشت و از نظر عملکرد تنها ۱۳ درصد کاهش نسبت به آبیاری سطحی نشان داد، بنابراین در مناطقی که منابع آبی بیشتری در دسترس می‌باشد و حصول عملکرد بالا مد نظر است استفاده از این سامانه پیشنهاد می‌شود.

منابع

باغبان خلیل‌آباد، ص.، خزاعی، ح. ر. و کافی، م. ۱۳۹۸. اثر کم‌آبیاری بر عملکرد، اجزای عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک ارقام مختلف گندم نان و گندم دوروم. نشریه پژوهش‌های کاربردی زراعی. ۳۲ (۱): ۱-۱۲.

پورمنصور، س.، رزاقی، ف.، سپاسخواه، ع. و موسوی، س. ع. ا. ۱۳۹۸.

در تحقیق حاضر بیشترین عملکرد دانه، اجزاء عملکرد و حجم آب کاربردی و همچنین کمترین بهره‌وری آب متعلق به سامانه آبیاری سطحی بود که با توجه به خشکسالی‌های اخیر در کشور و نیاز روزافزون جامعه به مواد غذایی استفاده بهینه از منابع آبی و افزایش بهره‌وری آب امری اجتناب‌ناپذیر است. بر اساس نتایج بدست آمده، استفاده از روش‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای نواری باعث صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب می‌شود. در این تحقیق کمترین حجم آب کاربردی مربوط به سامانه قطره‌ای نواری بود و بهره‌وری آب در این روش تنها ۵ درصد کمتر از روش آبیاری بارانی بود و لذا استفاده از این روش در مناطقی که با محدودیت آب روبرو هستند پیشنهاد می‌شود. با توجه به اینکه نیاز آبی گیاه گندم در این تحقیق بطور کامل تأمین شد، حتی اگر مشکلات کم‌آبی تشدید شود بطوریکه میزان آب موجود در طول دوره رشد گندم برابر با آب مصرف شده

کافی، م. و مهدوی دامغانی، ع. ۱۳۸۶. مکانیسم‌های مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ۴۷۲ صفحه.

کبیری سامانی، ع. ا. و باقری، س. ۱۳۹۳. طراحی کانال‌ها و سازه‌های انتقال آب. اصفهان. انتشارات ارکان دانش. ۹۰۴ صفحه.

کریمی، م. و قدسی، م. ۱۳۹۸. عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گندم در تناوب زراعی پنبه- گندم در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی و بقایای گیاهی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۳ (۱): ۸۲-۹۳.

کیخانی، ف. و گنجی خرم‌دل، ن. ۱۳۹۵. تأثیر کم‌آبیاری با دو روش نواری و شیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم هامون. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۰ (۱): ۱-۱۱.

معیری، م. ۱۳۹۲. تعیین پتانسیل کارایی مصرف آب ارقام گندم در روش‌های مختلف آبیاری (بارانی، قطره‌ای و سطحی) در شرایط اقلیمی مختلف کشور. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. گزارش نهایی. شماره ثبت ۴۳۵۵۳.

نباتی، ج. ۱۳۸۳. اثر فواصل آبیاری بر خصوصیات زراعی، مورفولوژیکی و کیفی ارزن، سورگوم و ذرت علوفه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه فردوسی مشهد.

وزارت جهاد کشاورزی. ۱۳۹۸. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۷. معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی. مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات. جلد اول محصولات زراعی. تهران. چاپ اول. ۸۷ صفحه.

Abd El-Rahman, G. 2009. Water use efficiency of wheat under drip irrigation system at Al-Maghara area, North Sinai, Egypt. American-Eurasian. Journal of Agricultural and Environment Sciences. 5 (5): 664-670.

Araus, J. L., Bort, J., Steduto, P., Villegas, D. and Royo, C. 2003. Breeding cereals for Mediterranean conditions: ecophysiological clues for biotechnology application. Annals of Applied Biology. 142: 129-141.

Bagheri, A. and Heidari Sharif Abad, H. 2007. Effect of drought and salt stresses on yield components and ion content of Hull-less barley (*Hordeum sativum* L.). Journal of New Agricultural Sciences. 3 (7): 3-11.

Chouhan, S. S., Awasthi, M. K. and Nema, R. K. 2015. Studies on water productivity and yields responses of wheat based on drip irrigation systems in clay loam soil. Indian Journal of Science and Technology. 8 (7): 650.

Fan, Y., Wang, C. and Nan, Z. 2014. Comparative evaluation of crop water use efficiency, economic analysis and net household profit simulation in arid Northwest China. Agricultural Water Management.

بررسی رشد و محصول گندم تحت سطوح مختلف بیوپار و کم-آبیاری در شرایط گلخانه‌ای. مدیریت آب و آبیاری. ۹ (۱): ۱۵-۲۸.

دل‌آورپور، ع.، ذاکری‌نی، م. و حسام، م. ۱۳۹۷. بررسی تأثیر فواصل مختلف نوارهای آبیاری قطره‌ای (tape) بر عملکرد گندم و کارایی مصرف آب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲ (۶): ۱۵۶۳-۱۵۷۳.

دهقانیان، س. ا. و افضل‌نیا، ص. ۱۳۹۷. بهره‌وری آب و عملکرد ذرت در تناوب با گندم در روش‌های مختلف آبیاری و خاک‌ورزی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۲ (۱): ۱۶-۲۷.

ریاحی، ف.، نجفی علمدارلو، ح. و وکیل‌پور، م. ح. ۱۳۹۷. ارزیابی آثار رفاهی خودکفایی پایدار در بازار گندم ایران. اقتصاد کشاورزی و توسعه. ۲۶ (۱۰۱): ۱۲۵-۱۴۳.

شیرین‌زاده، ن.، بیگلویی، م. ح.، اخوان، ک. و محمدی، ع. ۱۳۹۶. اثر روش‌های آبیاری در سطوح مختلف نیاز آبی گیاه گندم بر عملکرد و بهره‌وری آب در منطقه مغان. هشتمین کنفرانس علمی پژوهشی آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک. کرمان، انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران.

صارمی، م.، فرهادی بانسوله، ب.، ملکی، ع. و فراستی، م. ۱۳۹۴. تعیین ضرایب گیاهی و نیاز آبی عدس به روش بیلان آبی (مطالعه موردی: خرم‌آباد). نشریه پژوهش‌های حبوبات ایران. ۶ (۲): ۸۷-۹۸.

طاووسی، م. و تواناپور، ا. ۱۳۹۹. مقایسه عملکرد گندم و بهره‌وری فیزیکی آب در آبیاری سطحی و قطره‌ای. دهمین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار. تهران، مؤسسه آموزش عالی بینالود مشهد- مرکز مطالعات و تحقیقات علوم فنون بنیادین در جامعه- مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار.

علیزاده، ا. ۱۳۸۹. آبیاری قطره‌ای (اصول و عملیات). دانشگاه امام رضا (ع). مشهد. چاپ دوم. ۴۹۴ صفحه.

قدمی فیروزآبادی، ع. و باغانی، ج. ۱۳۹۸. اثر آرایش‌های مختلف کشت در آبیاری نواری قطره‌ای بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب آبیاری گندم در همدان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳ (۲): ۵۲۸-۵۳۹.

قدمی فیروزآبادی، ع.، چایچی، م. و سیدان، س. م. ۱۳۹۶. اثر سامانه‌های آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب سه ژنوتیپ گندم و ارزیابی اقتصادی آن‌ها در همدان. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۳۱ (۲): ۱۳۹-۱۴۹.

- Comparison of three wheat varieties with different irrigation systems for water productivity. *International Journal of Agriculture and Applied Sciences (Pakistan)*. 2(1).
- Smith, M., Kivumbi, D. and Heng, L. K. 2002. Use of the Cropwat model in deficit irrigation Studies. *Water rep, FAO, Rome, Italy*. 17-27.
- Wang, J., Gong, S., Xu, D., Yu, Y. and Zhao, Y. 2013. Impact of drip and level-basin irrigation on growth and yield of winter wheat in the North China Plain. *Irrigation science*. 31 (5): 1025-1037.
- Wasif, Yasser E., Arafa Essam, A. and Hazem, E. 2009. Maximizing water use efficiency in wheat yields based on drip irrigation systems. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 3(2): 790-796.
- Wilcox, L. V. 1960. Boron Injury to Plants. U.S. Dept. of Agriculture, Information Bulletin No. 211.
- Zou, X., Li, Y. E., Gao, Q. Z. and Yunfan, W. 2012. How water saving irrigation contributes to climate change resilience— a case study of practices in China. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 17 (2): 111-132.
- 146: 335-345.
- Fang, Q., Zhang, X., Shao, L., Chen, S. and Sun, H. 2018. Assessing the performance of different irrigation systems on winter wheat under limited water supply. *Agricultural Water Management*. 196: 133-143.
- Kahlowan, M. A., Raoof, A., Zubair, M. and Doral Kemper, W. 2007. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. *Agricultural Water Management*. 87 (3): 292-298.
- Kharrou, M. H., Er-Raki, S., Chehbouni, A., Duchemin, B., Simonneaux, V., LePage, M., Ouzine, L. and Jarlan, L. 2011. Water use efficiency and yield of winter wheat under different irrigation regimes in a semi-arid region. *Agricultural Sciences in China*. 2 (3): 273-282.
- Mostafa, H., El-Nady, R., Awad, M. and El-Ansary, M. 2018. Drip irrigation management for wheat under clay soil in arid conditions. *Ecological Engineering*. 121: 35-43.
- Saleem, M., Wagas, A. and Ahmad, R. N. 2010.

Investigation Yield, Yield Components and Water Efficiency of Wheat in Three Systems: Surface, Sprinkler and Strip Drip Irrigation

S. Safarzadeh¹, M. Saremi^{2*}, A. Farshid³, M. Deghani⁴

Received: Sep.09, 2020

Accepted: Dec.13, 2020

Abstract

Water is the most important limiting factor for agriculture and its optimal use with special importance. The purpose of this study was investigating of the effect of different irrigation methods on yield and yield components of wheat (Pishtaz cultivar) and evaluate of water efficiency. The following treatments included three methods of surface, sprinkler and strip drip irrigation. The experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications in 2018_2019 in Khorramabad city. The research results demonstrated that type of irrigation method had a significant effect ($p < 0.01$) on the number of spikes, number of seeds per spike, stem height, 1000-seed weight, grain yield and water efficiency. Grain yield in surface, sprinkler and drip irrigation methods were 7.870, 6.83 and 5.017 tons per hectare, respectively, in other words, surface irrigation increased grain yield by 13.21 and 36.25 percent compared to sprinkler and drip irrigation methods, respectively. Also, the highest volume of applied water (6411 m^3) and the lowest water efficiency (1.22 m^3) were related to surface irrigation treatment. Strip drip irrigation treatment with about 3333 m^3 of water irrigation, saved 59% of water compared with surface irrigation and therefore.

Keywords: Irrigation Method, Sprinkler Irrigation, Topical Irrigation, Volume of Water Consumption, Wheat.

1- Master of Hydraulic Structures, Shushtar University of Water Sciences, Expert and supervisor of water and soil deputy projects, Agricultural Jihad Organization of Lorestan Province, Khorramabad, Iran
2- PhD student, Department of Irrigation and Drainage, Isfahan University of Technology, Iran
3- Expert of Agricultural Engineering (Sciences and water engineering), Ahvaz University, Expert and supervisor of water and soil deputy projects, Agricultural Jihad Organization of Lorestan Province, Khorramabad, Iran
4- Expert of Agricultural Engineering, Food Science and Industry, Islamic Azad University, Ayatollah Amoli Branch in Amol, Expert of Lorestan Agricultural Jihad Organization, Iran
(* - Corresponding Author: Email: m.saremi2008@gmail.com)

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و زمان اولین آبیاری بر کمیت و کیفیت زعفران

یحیی چوپان^{۱*}، ابوطالب هزار جریبی^۲، خلیل قربانی^۲، موسی حسام^۲ و عباس خاشعی سیوکی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰

چکیده

در مناطق شمال شرقی کشور با توجه شرایط آب و هوایی و همچنین کمبود شدید آب، کشت محصولاتی که نیاز آبی پایین و در عین حال بازده اقتصادی مصرفی آب مطلوب داشته باشند، ضروری است. این پژوهش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با دو تیمار نوع سیستم آبیاری شامل، سطحی کرتی (S₁) و زیرسطحی قطره‌ای (S₂) و زمان اولین آبیاری شامل، آبیاری با ۱۵ مهرماه (T₁)، آبیاری با ۱۵ روز تأخیر (T₂) و آبیاری با ۳۰ روز تأخیر (T₃)، در سه تکرار در منطقه تربت‌حیدریه انجام شد. صفات مورد بررسی شامل تعداد گل، وزن گل تازه، شاخص درشتی گل خشک، وزن خشک خامه، وزن خشک کلاله، ارزیابی طعم، رنگ و عطر در هر کرت بود. نتایج نشان داد صفات کمی زعفران (تعداد گل، وزن تازه گل، وزن خشک کلاله، وزن خشک خامه و شاخص درشتی گل) در اثر متقابل روش آبیاری و زمان اولین آبیاری، غیر معنی‌دار شدند و تنها صفت وزن خشک خامه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد. نتایج صفات کیفی زعفران (پیکروکسین، کروسین، سافرانال، رطوبت، کپک و کلیفرم کل) در تیمار زمان آبیاری و تقابل تیمار زمان آبیاری در نوع سیستم آبیاری، غیر معنی‌دار شدند. همچنین مطلوب‌ترین مقدار در بین صفات کمی مورد بررسی برای تعداد گل و وزن خشک کلاله در تیمار S₁T₂، به ترتیب با مقادیر ۵۳/۱ عدد گل و ۰/۷۹ گرم در یک مترمربع حاصل شد. در بین صفات کیفی نیز، به ترتیب بیش-ترین مقدار برای پیکروکسین، کروسین، سافرانال و کلیفرم کل در تیمار S₂T₁ با مقادیر ۹۲/۱، ۲۶۲/۱، ۳۳/۱ (حداکثر جذب) و ۱۰۲۳۳ عدد در هر گرم به دست آمد و بهترین روش آبیاری و زمان آبیاری، سیستم سطحی و زمان ۱۵ روز تأخیر حاصل گردید.

واژه‌های کلیدی: سیستم آبیاری، کلاله، کلیفرم کل، مدیریت آبیاری

مقدمه

آبی مواجه نمی‌باشند. این گیاه در زمان خواب به آبیاری نیاز نداشته و رویش آن در فصل سرد پاییز و زمستان موجب کاهش و یا عدم وجود آفات و بیماری‌های مهم می‌شود (امیدبگی و همکاران، ۱۳۸۰، چگنی، ۱۳۹۵).

گیاه زعفران در بسیاری از مناطق ایران کشت می‌شود، لیکن بیش‌ترین مقدار زعفران در استان‌های خراسان رضوی، جنوبی و شمالی تولید می‌گردد (امیرقاسمی، ۱۳۸۷، چگنی، ۱۳۹۵). زعفران شناسنامه استان خراسان رضوی است و سال‌هاست که برای آن تبلیغات خوبی انجام شده و پشتیبانی‌های دولتی مناسبی هم از آن صورت گرفته است. به همین دلایل است که سطح زیر کشت زعفران در استان خراسان رضوی در حال رشد و افزایش است.

طبق بررسی‌های انجام شده، نیاز آبی زعفران در طول سال حدود ۳۰۰۰ مترمکعب می‌باشد (مسافری ضیاءالدینی، ۱۳۸۰). به‌طور سنتی آبیاری مزارع زعفران محدود به چهار آبیاری می‌باشد، اما در فاصله ماه‌های مهر و اردیبهشت، نیاز آبی زعفران همانند هر گیاه دیگر بایستی تأمین گردد. گلدهی زعفران وابسته به زمان شروع اولین

زعفران با نام عمومی Saffron و نام علمی *Crocus sativus* L. گیاهی علفی، چند ساله و متعلق به خانواده زنبقیان Iridaceae است (بهینیا، ۱۳۷۰، Gresta et al., 2009). با توجه به شرایط اقلیمی کشور ایران که آب یکی از عوامل اصلی محدود کننده توسعه کشاورزی است، کشت زعفران به عنوان گیاهی با بازده اقتصادی بالا، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا مصرف آب در زراعت زعفران زمانی است که اکثر گیاهان به آبیاری نیازی نداشته یا با مشکل کم

- ۱- دانشجوی دکتری آبیاری زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
 - ۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
 - ۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
- (* نویسنده مسئول: Email: Yahyachoopan68@gmail.com
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.9.9

آزمایشی مشابه که در دانشگاه شاهد تهران انجام شد، گزارش شد که آبیاری تابستانه موجب بهبود صفات پیکروکروسین، سافرناز و کروسین در محصول زعفران و همچنین اثر متقابل آبیاری تابستانه و استفاده از پوشش کدو، موجب افزایش وزن خشک کلاله زعفران گردیده است (توسط املشی و همکاران، ۱۳۹۳).

چوپان و همکاران (۱۳۹۸) با اعمال تیمارهای آبیاری در زمان عرف منطقه (۱۵ روز قبل از برداشت به عنوان تیمار شاهد)، آبیاری با ۱۵ روز تأخیر و آبیاری با ۳۰ روز تأخیر، گزارش کردند که بیش‌ترین مقدار برای صفات عملکرد گل زعفران و تعداد گل در تیمار ۳۰ روز تأخیر حاصل شد. بهدانی و همکاران گزارش کردند همبستگی بالایی بین فواصل آبیاری، عملکرد گل و بنه زعفران وجود دارد، به طوری که براساس پژوهشات انجام شده، عملکرد بالاتر با فواصل کم‌تر آبیاری به‌دست آمد (Behdani et al., 2008). یرامی و سپاسخواه نشان دادند عملکرد زعفران در روش آبیاری نشتی نسبت به کرتی ۳/۵ برابر افزایش می‌یابد (Yarami and Sepaskhah, 2015). بازوکی و همکاران تأثیر الگوی کاشت (مقایسه روش شیاری و کرتی) را بر عملکرد و برخی صفات زراعی در زعفران بررسی و گزارش کردند الگوی کاشت تفاوت معنی‌دار و همچنین افزایش، بر عملکرد و سایر صفات زعفران داشت (Pazoki et al., 2013). ملافیلابی و همکاران طی مطالعه‌ای تأثیر استفاده از روش‌های مختلف آبیاری، از جمله، آبیاری قطره‌ای، بارانی، شیاری و کرتی بر وزن خشک کلاله، کیفیت و راندمان مصرف آب را در محصول زعفران بررسی و نتیجه گرفتند که حداکثر وزن خشک کلاله و بازده مصرف آب در سومین فصل رشد با استفاده از روش آبیاری قطره‌ای حاصل شد (Mollafilabi et al., 2020).

با بررسی مطالعات انجام شده پیشین مشخص گردید پژوهشی در زمینه آبیاری زیر سطحی و زمان اولین آبیاری در منطقه مورد مطالعه صورت نگرفته است و با توجه به اهمیت بهبود مدیریت زراعی محصول زعفران، این پژوهش با هدف اجرا و معرفی روش آبیاری زیرسطحی و مدیریت زمان اولین آبیاری بر خصوصیات کمی و کیفی محصول زعفران در منطقه تربت حیدریه انجام شده است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با دو تیمار نوع سیستم آبیاری (سطحی کرتی S_1 و زیر سطحی قطره‌ای S_2) و زمان آبیاری (عرف منطقه یا ۱۵ مهرماه T_1 ، آبیاری با ۱۵ روز تأخیر T_2 و آبیاری با ۳۰ روز تأخیر T_3) در سه تکرار در منطقه تربت حیدریه در طی سال زراعی ۹۸-۱۳۹۹ انجام شد. منطقه تربت حیدریه در مدار ۵۹ درجه و ۱۲ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی در ارتفاع ۱۳۳۳ متر از سطح دریا قرار دارد. وضعیت اقلیمی تربت

آبیاری می‌باشد. علت شکستن خواب پیاز زعفران خنکی هوا در شهریور ماه نیست، در مناطق سرد سیر گلدهی زودتر و در مناطق گرمسیر گل‌دهی دیرتر صورت می‌پذیرد (جوادزاده، ۱۳۸۷، ستوده، ۱۳۹۶). مطلوب‌ترین زمان آبیاری برای زعفران با توجه به دمای هوا در منطقه خراسان، ۱۵ مهرماه می‌باشد. دور آبیاری ۱۵ روزه نیز مناسب‌ترین دور آبیاری گزارش شده است (مسافری ضیاءالدینی، ۱۳۸۰).

اخیرا روش آبیاری زیرسطحی که قادر است از بروز مشکلاتی از جمله تبخیر سطحی خاک و هدر رفت آب جلوگیری کند در جهان کاربرد پیدا کرده است. با توجه به تابش شدید آفتاب و بالا بودن تبخیر سطحی در مناطق خشک ایران، آبیاری زیرسطحی می‌تواند در کاهش تبخیر بسیار مفید باشد، از طرفی با اعمال کم‌آبیاری اصولی و تنظیم شده می‌توان ضمن افزایش کیفیت محصول، استفاده بهینه‌ای از آب داشت.

در پژوهشی که در ایستگاه پژوهش‌های مرکز پژوهشات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان طی سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ به اجرا درآمد، تأثیر روش‌های مختلف کم‌آبیاری (آبیاری با ۸۰٪ نیاز آبی، ۱۰۰-۶۰٪ و ۱۰۰٪ نیاز آبی) در سه روش آبیاری قطره‌ای سطحی، قطره‌ای زیرسطحی و زیرسطحی عمقی بر رشد سبزینه‌ای (طول شاخه اصلی، طول شاخه‌های فرعی، تعداد جوانه‌ها، قطر تنه، ارتفاع درخت و حجم کانوبی) و عملکرد مرکبات (پرتقال) بررسی شد و مشاهده شد آبیاری زیرسطحی عمقی از لحاظ خصوصیات رویشی و عملکرد محصول اختلاف معنی‌داری با آبیاری کامل تحت سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی ندارد و نیز ۶۵/۳۳ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب داشته است (مقبلی دامنه و همکاران، ۱۳۹۷). استفاده از آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با سطوح مختلف آب و شوری در سورگوم علوفه‌ای نشان داد با آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی با شوری آب ۵ دسی‌زیمنس بر متر عملکرد کاهش پیدا نخواهد کرد (Piri and Parsa, 2016). در پژوهشی نتیجه گرفته شد تعداد بنه‌ها در روش آبیاری جویچه‌ای به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از روش آبیاری کرتی بود و وزن بنه‌ها نیز در اکثر دوره‌ها در روش آبیاری جویچه‌ای بیش‌تر بود (خزائی و همکاران، ۱۳۹۲).

در پژوهشی تأثیر زمان آبیاری و کنترل علف هرز بر عملکرد، رشد و نمو زعفران زراعی مورد بررسی قرار گرفت (چگنی، ۱۳۹۵). نتایج نشان داد آبیاری تابستانه و پاییزه و کنترل علف هرز، بیش‌ترین تأثیر مثبت را بر وزن خشک کلاله و در نهایت عملکرد اقتصادی زعفران داشته است. فیضی و همکاران در طی پژوهشی که در پژوهشکده زعفران دانشگاه تربت حیدریه بر روی آبیاری تابستانه زعفران انجام دادند، اعلام کردند که در سال اول اجرای آزمایش، آبیاری در تیر ماه و مرداد ماه بیش‌ترین تأثیر را در افزایش تعداد گل، عملکرد گل و وزن خشک کلاله زعفران داشته است (Feizi et al., 2015). در

متوسط رطوبت نسبی ۴۵٪، متوسط بارش سالانه ۲۵۳ میلی‌متر و متوسط تبخیر سالانه ۱۱۴۳/۱۳ میلی‌متر می‌باشد (ایستگاه هواشناسی تربت حیدریه). متوسط بارش سالانه ۲۶۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن ۲۱ درجه می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت ماهوراه‌ای محل انجام پژوهش نشان داده شده است.

حیدریه بر اساس طبقه‌بندی آمبرژه، اقلیم خشک سرد و بر اساس طبقه‌بندی دکتر کریمی دارای اقلیم نیمه خشک می‌باشد (اداره کل هواشناسی خراسان رضوی). بر اساس داده‌های هواشناسی آمار ۲۰ ساله ایستگاه هواشناسی شهرستان تربت حیدریه، متوسط درجه حرارت روزانه در ایستگاه تربت حیدریه ۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد، حداقل و حداکثر دما به ترتیب برابر ۲۴/۶- و ۴۰/۴ درجه سانتی‌گراد،



شکل ۱- موقعیت ماهوراه‌ای محل انجام پژوهش

خاک توسط آزمایشگاه آب و خاک و بررسی خاک مزرعه، برای یک هکتار، مقدار ۲۰ تن کود حیوانی از نوع گاوی پوسیده و ۱۲۰ کیلوگرم کود اوره در سه مرحله اضافه گردید. هم‌چنین ۱۰۰ کیلوگرم کود فسفر و ۲۵ کیلوگرم سولفات پتاسیم به‌صورت یک‌جا و در ابتدای کشت اعمال شد. آنالیز شیمیایی آب آبیاری و آنالیز شیمیایی و فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

جهت به دست آوردن کاتیون‌ها (کلسیم، پتاسیم، منیزیم و سدیم) و آنیون‌های (کربنات، بیکربنات، کلر، سولفات، شوری و اسیدیته) از روش و دستگاه‌های آزمایشگاهی استفاده شد. شوری با استفاده از دستگاه EC متر مدل ۱۱۰ در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد و اسیدیته توسط دستگاه pH متر مدل ۲۱۲ اندازه‌گیری گردید. نسبت جذب سدیم (SAR) توسط روش استات سدیم به‌دست آمد. برای تعیین کلسیم و منیزیم از روش تتراسیون (اتیلن دی آمین تترا استات) با غلظت ۰/۰۲ مولار و سدیم و پتاسیم از دستگاه فلیم فتومتر با محلول‌های استاندارد استفاده شد (چوپان و همکاران، ۱۳۹۷).

مقدار بنه مصرفی جهت کاشت، بنه‌های ۸ تا ۱۲ گرم بود که برای کرت‌های ۴ مترمربعی مقدار ۳/۶ کیلوگرم بنه در عمق ۲۰ سانتی‌متری به‌وسیله دست کاشته شد. آبیاری به‌وسیله لوله پلی‌اتیلن تا ابتدای هر کرت انتقال یافت. برای آبیاری زیر سطحی قطره‌ای در داخل کرت به‌وسیله دو خط مسیر لوله ۲۰ میلی‌متر به فاصله ۰/۷ متر از یکدیگر و فواصل قطره‌چکان‌ها در هر خط آبیاری ۰/۷ متر در نظر گرفته شد. میزان آب مصرفی به‌وسیله حجم سنجی (کنتور) با دقت لیتر اندازه‌گیری شد. برای محاسبه نیاز آبی با به‌دست آوردن رطوبت حجمی خاک و با داشتن رطوبت در حالت ظرفیت مزرعه در عمق ریشه که در ابتدای فصل رشد ۴۵ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود، کمبود رطوبت مشخص شد و با معلوم‌بودن مساحت هر کرت، حجم آب آبیاری برای هر کرت محاسبه شد. آبیاری در هر نوبت ۱۵ روزه برای آبیاری سطحی کرتی ۱۵۰ لیتر و برای آبیاری زیر سطحی ۵۰ لیتر در هر نوبت ۵ روزه اعمال شد. قابل ذکر است که زمین مورد استفاده در سال‌های قبل به‌صورت آیش بوده و پس از مراحل آماده‌سازی زمین (شخم عمقی و شخم سطحی) و براساس آنالیز

جدول ۱- آنالیز شیمیایی آب آبیاری.

سولفات SO ₄ ²⁻	کلر Cl ⁻	بی‌کربنات HCO ₃ ⁻	کربنات CO ₃ ⁻	سدیم Na ⁺	منیزیم Mg ²⁺	کلسیم Ca ²⁺	نسبت جذب سدیم (SAR)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC	
meq.l ⁻¹										
۱۰/۸	۱۰/۵	۳/۴	-	۱۸/۴	۲/۸	۱/۲	۱۳/۴	۶/۸	۲/۵	

جدول ۲- آنالیز شیمیایی خاک مزرعه (۰-۴۰ سانتی متری).

نوع آزمایش	واحد اندازه گیری	نتایج آزمایش
پتاسیم	kg ⁻¹ .mg	۱۳۰
فسفر	kg ⁻¹ .mg	۳/۵
هدایت الکتریکی	dS.m ⁻¹	۳/۸
اسیدیته	-	۷/۲
آهک	(%)	۱۶/۴
مواد آلی	(%)	۱/۲
شن	(%)	۳۸
رس	(%)	۲۲
سیلت	(%)	۳۰
درصد اشباع	(%)	۳۹

جدول ۳- صفات کیفی، روش های آزمایش و حدود قابل قبول صفات کیفی زعفران

صفات کیفی	حداکثر رطوبت (درصد جرمی)	حداقل پیگروکسین (حداکثر جذب در طول موج ۲۵۷ نانومتر)	سافرانال (حداکثر جذب در طول موج ۳۳۰ نانومتر)	حداقل کروسین (حداکثر جذب در طول موج ۴۴۰ نانومتر)	میکرو ارگانیسیم کل (تعداد در گرم)	اشربیشیا کلی (تعداد در گرم)	کپک (تعداد در گرم)
حد قابل قبول روش آزمایش (استاندارد ملی)	۱۲-۱۰	۸۰-۷۰	۵۰-۲۰	۲۰۰-۱۴۰	۳۰۰۰۰۰	منفی	۱۰۰۰
	۲-۲۵۹	۲-۲۵۹	۲-۲۵۹	۲-۲۵۹	۵۲۷۲	۲۹۴۶	۳-۱۰۸۹۹

سافرانال (عامل عطر) به روش اسپکتروفتومتری طبق استاندارد ملی ایران شماره ۲ - ۲۵۹ اندازه گیری شدند (استاندارد ملی ایران). تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS 9.4 و Excel انجام شد. هم‌چنین مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد صفات کمی زعفران شامل تعداد گل، وزن گل تازه و شاخص درشتی گل خشک شده در تیمار نوع سیستم غیر معنی‌دار شده و صفات وزن خشک خامه و وزن خشک

تاریخ کاشت ۵ شهریور، اولین آبیاری ۵ مهر و اولین ظهور گل ۲۵ آبان بود. صفات کمی زعفران (تعداد گل، وزن تازه گل، وزن خشک کلاله، وزن خشک خامه و شاخص درشتی گل) به صورت روزانه از یک مترمربع وسط هر کرت برداشت شد. صفات کیفی زعفران (پیگروکسین، کروسین، سافرانال، رطوبت، کپک و کلیفرم کل) نیز توسط آزمایشگاه کنترل کیفی انجام گردید که روش‌های آزمایش و محدوده قابل قبول صفات کیفی در جدول ۳ ارائه شده است. هم‌چنین به منظور تعیین صفات کمی و کیفی، برداشت از هر کرت پس از حذف اثر حاشیه‌ای انجام شد. پس از جمع‌آوری نمونه‌های گیاهی، نمونه‌ها در دمای اتاق و به دور از نور، خشک شدند. متابولیت‌های ثانویه اصلی کروسین (عامل رنگ)، پیگروکروکوسین (عامل طعم) و

سطح احتمال ۵٪ شدند که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد (چوپان و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین نتایج تجزیه واریانس صفات کیفی زعفران شامل رطوبت، پیکروکسین، سافرانال، کروسین، کلیفرم کل و میکروارگانیزم کل و کپک، در تیمار نوع سیستم آبیاری غیر معنی‌دار، صفت پیکروکسین در سطح احتمال ۵ درصد و بقیه صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند. در تیمار زمان آبیاری و تقابل تیمار زمان آبیاری در نوع سیستم آبیاری، تمامی صفات کیفی غیر معنی‌دار شدند (جدول ۵).

کلاله در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند. در تیمار زمان آبیاری، تمامی صفات کمی به جز وزن خشک خامه، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار و بقیه صفات تفاوت معنی‌دار نداشتند. در اثر متقابل دو تیمار در صفات کمی نیز تمامی صفات تفاوت معنی‌داری نداشتند و تنها صفت وزن خشک خامه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج تجزیه واریانس مطالعات مشابهی نیز نشان داد که صفات عملکرد و مقدار علفه زعفران در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار ولی صفات تعداد گل و وزن بنه فاقد تفاوت معنی‌دار در

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات کمی زعفران

منابع تغییر	درجه آزادی	تعداد گل (عدد در مترمربع)	وزن گل تازه (گرم در مترمربع)	وزن خشک کلاله (گرم در مترمربع)	وزن خشک خامه (گرم در مترمربع)	شاخص درشتی گل (گرم در مترمربع)
تکرار	۲	۵۱۵/۵	۴۴/۴	۰/۰۰۳۶	۴E-۰۰۶	۰/۰۰۰۱۷
نوع سیستم آبیاری	۱	۰/۰۵ ns	۲/۹۸ ns	۰/۰۵**	۹/۵E-۰۰۵**	۱/۷۴E-۰۰۶ ns
زمان آبیاری	۲	۱ ns	۰/۴۵ ns	۰/۰۰۳۵ ns	۲/۵E-۰۰۵**	۶/۱۶E-۰۰۶ ns
نوع سیستم آبیاری * زمان آبیاری	۲	۱۳۵/۳۴ ns	۸/۶ ns	۰/۰۰۶۵ ns	۱/۴۲E-۰۰۵*	۱/۴E-۰۰۵ ns
خطا	۸	۱۵۴۶۶	۱۳۳۲/۶	۰/۱۱	۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۰۵
ضریب تغییرات (CV)	-	۴/۶	۴/۶	۸	۱۲	۶/۶

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد می‌باشد.

جدول ۵- تجزیه واریانس صفات کیفی زعفران در مقابل تیمارهای زمان آبیاری و نوع سیستم آبیاری

منابع تغییر	درجه آزادی	رطوبت	پیکروکسین	سافرانال	کروسین	میروارگانیزم کل	کپک
تکرار	۲	۰/۰۸	۲/۱۲	۱/۴۷	۶/۵	۱/۱۵E ^{+۱۲}	۰/۰۱۱
نوع سیستم آبیاری	۱	۰/۱۳ ns	۶۱/۳۶*	۵۳/۷**	۵۸/۷**	۱/۳۶E ^{+۱۱} ns	۰/۶۱**
زمان آبیاری	۲	۰/۰۲۹ ns	۱/۱۹ ns	۳/۵۲ ns	۲/۲ ns	۱/۰۷E ^{+۱۱} ns	۰/۰۲۵ ns
نوع سیستم آبیاری * زمان آبیاری	۲	۰/۰۴۷ ns	۳/۰۲ ns	۱/۸۶ ns	۰/۸۶ ns	۸/۹E ^{+۹} ns	۰/۰۰۵ ns
خطا	۸	۲/۶	۶۳/۸	۴۴/۳	۱۹۵/۶	۳/۴E+۱۳	۰/۳۵
ضریب تغییرات	-	۴	۱/۶	۳/۸	۱	۱۰/۸	۳/۷

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد می‌باشد.

(جدول ۶).

صفات کمی

تعداد گل

تعداد گل در عملکرد محصول زعفران نقش موثری دارد، لذا افزایش تعداد گل در هر تیمار می‌تواند به عملکرد کل محصول اثر مثبت داشته باشد. در صفت تعداد گل تمامی تیمارهای پژوهش در یک گروه آماری قرار گرفته و اختلاف معنی‌دار آماری نداشتند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برای صفت تعداد گل به ترتیب برای تیمارهای S₁T₂ و S₂T₂ با مقادیر ۵۳/۱ و ۴۵/۹ عدد گل در یک متر-مربع حاصل شد. برای صفت تعداد گل، آبیاری زیرسطحی (S₂) و زمان عرف آبیاری (نیمه مهر ماه) (T₁)، بهترین عملکرد را نشان دادند

وزن گل تازه

وزن گل تازه برداشت شده در محصول زعفران در عملکرد نهایی محصول نقش موثری دارد. در صفت وزن تازه گل تمامی تیمارهای پژوهش مشابه صفت تعداد گل، اختلاف معنی‌داری نداشتند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برای صفت وزن تازه گل به ترتیب برای تیمارهای S₁T₂ و S₂T₂ با مقادیر ۱۵/۶ و ۱۳/۲ گرم در یک مترمربع حاصل شد. برای صفت وزن تازه گل، آبیاری سطحی (S₁) و زمان عرف آبیاری (نیمه مهرماه) (T₁) بهترین عملکرد را دارا بودند (جدول ۶).

وزن خشک کالاله

در صفت وزن خشک کالاله تیمارهای پژوهش در گروه آماری مختلف قرار گرفتند (جدول ۶). بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برای صفت وزن خشک کالاله به ترتیب برای تیمارهای S1T2 و S2T2 با مقادیر ۰/۷۹ و ۰/۶۶ گرم در یک مترمربع به‌دست آمد. برای صفت وزن خشک کالاله آبیاری سطحی (S1) و زمان عرف آبیاری (نیمه مهرماه) (T1) بهترین عملکرد را نشان دادند.

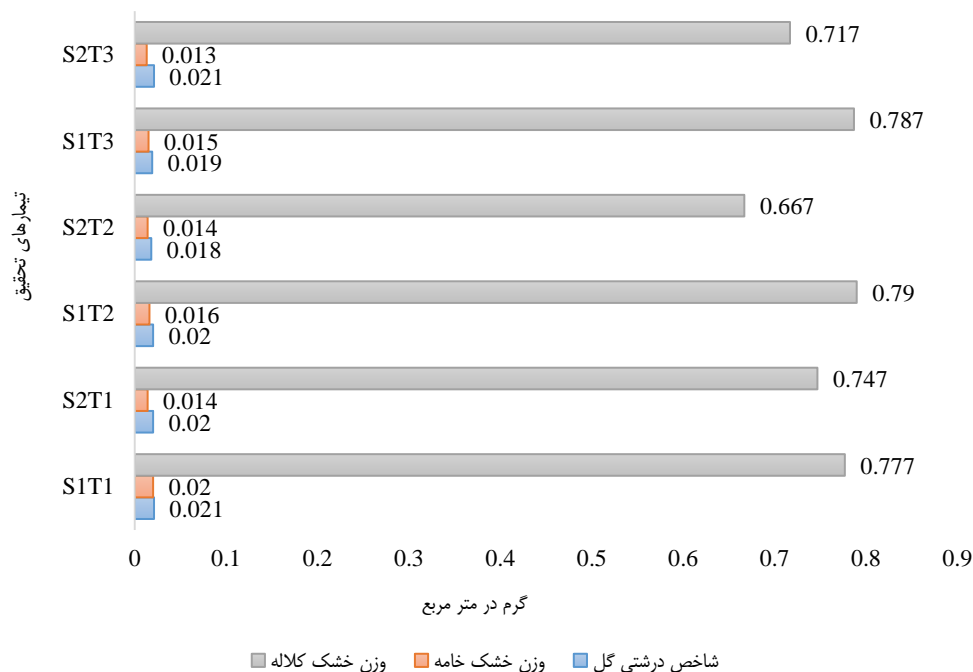
وزن خشک خامه

در صفت وزن خشک خامه تیمارهای پژوهش در گروه آماری مختلف مشابه صفت وزن خشک کالاله قرار گرفته و اختلاف معنی‌دار با یکدیگر نشان دادند (جدول ۶). بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برای صفت وزن خشک خامه به ترتیب برای تیمارهای S1T1 و S2T3 با مقادیر ۰/۰۲ و ۰/۰۱۳ گرم در یک مترمربع حاصل شد. برای صفت وزن خشک خامه آبیاری سطحی (S1) و زمان عرف آبیاری (نیمه مهر ماه) (T1) بهترین عملکرد را داشتند.

شاخص درشتی گل خشک

این صفت از مجموع وزن خشک کالاله و وزن خشک خامه

تقسیم بر تعداد گل به‌دست می‌آید و نشان‌دهنده درشتی و اقتصادی بودن گل می‌باشد. در صفت شاخص درشتی گل خشک تمامی تیمارهای پژوهش در یک گروه آماری قرار گرفته و اختلاف معنی‌دار نداشتند (جدول ۶). بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برای صفت شاخص درشتی گل خشک به ترتیب برای تیمارهای S1T1 و S2T3 با مقادیر ۰/۰۲۱ و ۰/۰۱۸ به‌دست آمد. برای صفت شاخص درشتی گل خشک، آبیاری سطحی (S1) و زمان عرف آبیاری (نیمه مهرماه) (T1) بهترین عملکرد را نشان دادند. وزن خشک کالاله، وزن خشک خامه و شاخص درشتی گل در تیمارهای پژوهش در شکل ۲، نشان داده شده است. پژوهشات در زمینه زمان آبیاری و سیستم آبیاری در عملکرد محصول زعفران می‌توان به محمدپور و همکاران (۱۳۹۲) که با نتایج همخوانی دارد و نتایج پژوهش ایشان نشان داد بالاترین عملکرد با میانگین ۸/۱ کیلوگرم در هکتار مربوط به اثر متقابل ورمی-کمپوست و دور آبیاری ۱۴ روز بود (محمد پور و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین محققین نشان دادند عملکرد زعفران در روش آبیاری نشستی نسبت به کرتی ۳/۵ برابر افزایش می‌یابد (Yarami and Sepaskhah, 2015) که با پژوهش حاضر همخوانی نداشته است.



شکل ۲- وزن خشک کالاله، وزن خشک خامه و شاخص درشتی گل در تیمارهای پژوهش

جدول ۶- مقایسه میانگین مربعات صفات کمی در تیمار های پژوهش

تیمارهای پژوهش	تعداد گل (عدد در متر مربع)	وزن گل تازه (گرم در متر مربع)	وزن خشک کالاله (گرم در متر مربع)	وزن خشک خامه (گرم در متر مربع)	شاخص درشتی گل (گرم در متر مربع)
S1T1	۴۷/۰۰ a	۱۴/۳۳ a	۰/۷۷۷ b	۰/۰۲۰ b	۰/۰۲۱ a
S2T1	۵۳/۰۰ a	۱۵/۲۶ a	۰/۷۴۷ ab	۰/۰۱۴ a	۰/۰۲۰ a
S1T2	۵۳/۱۱ a	۱۵/۶۳ a	۰/۷۹۰ b	۰/۰۱۶ ab	۰/۰۲۰ a
S2T2	۴۵/۸۹ a	۱۳/۱۸ a	۰/۶۶۷ a	۰/۰۱۴ a	۰/۰۱۸ a
S1T3	۴۸/۷۸ a	۱۴/۶۸ a	۰/۷۸۷ b	۰/۰۱۵ a	۰/۰۱۹ a
S2T3	۵۰/۲۲ a	۱۴/۴۶ a	۰/۷۱۷ ab	۰/۰۱۳ a	۰/۰۲۱ a

صفات کیفی

آزمون‌های کیفی زعفران با استفاده از سه آزمایش پیکروکسین، سافرانال و کروسین جهت ارزیابی طعم، رنگ و عطر انجام می‌گیرد. همچنین برای بررسی میزان بار میکروبی از آزمایش‌های کلیفرم کل، اشیریشیا کل و کپک استفاده می‌شود. زعفران به عنوان غنی‌ترین منبع ریو فلاوین ویتامین B2 شناخته شده است (سعیدی‌راد و مختاریان، ۱۳۸۹). استفاده گسترده از زعفران در صنایع آرایشی و به ویژه غذایی (Gresta et al. 2008a; Juana et al. 2009)، به عنوان طعم‌دهنده طبیعی و رنگ خوراکی، سبب توسعه روز افزون کاربرد این گیاه در دنیا شده است. همچنین از زعفران به عنوان محرک در تقویت توانایی جسمی و جنسی نیز یاد شده است (دادخواه و همکاران، ۱۳۸۲؛ Keyhani et al. 2006). کالاله‌ی زعفران دارای رنگ، عطر و طعم خاصی است که هریک از این خصوصیات مختص دسته‌ای از مواد شیمیایی آلی می‌باشد و علاوه بر آن دارای مقادیری آب، مواد معدنی و ویتامین نیز می‌باشد (بهنیا، ۱۳۷۰). سه ترکیب هم خانواده با سه ویژگی زعفران شامل، سترهای کروسین با رنگ، سافرانال با عطر و پیروکروسین با طعم مرتبط است (دانشور و همت‌زاده، ۱۳۹۰).

رطوبت

رطوبت تمامی تیمارهای پژوهش در یک گروه آماری قرار گرفته و اختلاف معنی‌دار آماری نداشتند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برای درصد جرمی رطوبت به ترتیب برای تیمارهای S2T1 و S1T3 با مقادیر ۷/۴۲ و ۷/۱۳ درصد جرمی حاصل شد. برای درصد جرمی رطوبت آبیاری زیر سطحی (S2) و زمان عرف آبیاری (نیمه مهرماه) (T1) بهترین عملکرد را داشتند (جدول ۷).

پیکروکسین

مقدار پیکروکسین تیمارهای پژوهش در گروه مختلف آماری قرار گرفته و اختلاف معنی‌دار آماری نشان دادند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برای صفت پیکروکسین، حداکثر جذب در طول موج ۲۵۷ نانومتر به ترتیب برای تیمارهای S2T3 و S1T3 با مقادیر ۹۲،۱۷ و

۸۸،۵ به‌دست آمد. برای پیکروکسین آبیاری زیر سطحی (S2) و زمان عرف آبیاری (نیمه مهر ماه) (T1) بهترین عملکرد را نشان دادند (جدول ۷). مقدار حداکثر جذب صفات پیکروکسین، سافرانال و کروسین در تیمارهای پژوهش در شکل ۳ ارائه شده است.

سافرانال

مقدار سافرانال تیمارهای پژوهش در گروه مختلف آماری قرار گرفته و اختلاف معنی‌دار آماری نشان دادند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برای سافرانال، حداکثر جذب در طول موج ۳۳۰ نانومتر به‌ترتیب برای تیمارهای S2T3 و S1T2 با مقادیر ۳۳/۱۷ و ۲۹/۳ حاصل شد. برای سافرانال آبیاری زیرسطحی (S2) و زمان ۳۰ روز تأخیر آبیاری (T3)، بهترین عملکرد را دارا بودند (جدول ۷).

کروسین

مقدار کروسین تمامی تیمارهای پژوهش در یک گروه آماری قرار گرفته و اختلاف معنی‌دار آماری نداشتند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برای کروسین، حداکثر جذب در طول موج ۴۴۰ نانومتر به‌ترتیب برای تیمارهای S2T3 و S1T2 با مقادیر ۲۶۲/۱ و ۲۵۸/۷ به‌دست آمد. برای صفت کروسین آبیاری زیرسطحی (S2) و زمان ۳۰ روز تأخیر آبیاری (T3)، بهترین عملکرد را نشان دادند (جدول ۷).

کلیفرم و اشیریشیا کل

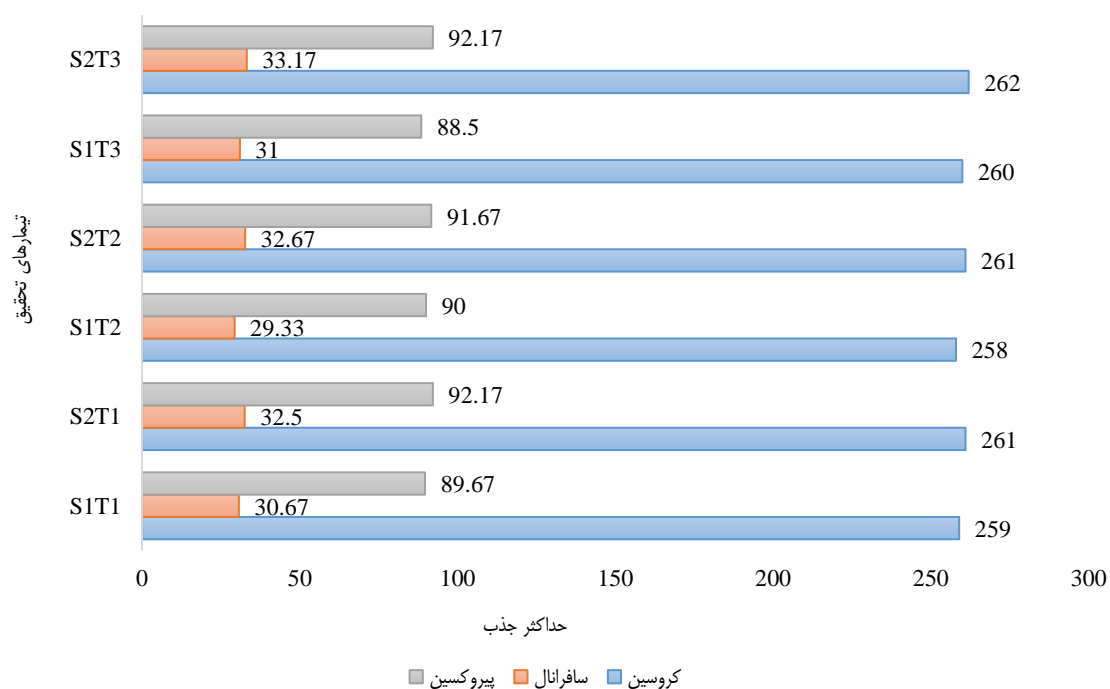
مقدار کلیفرم و اشیریشیا کل تمامی تیمارهای پژوهش در یک گروه آماری قرار گرفته و اختلاف معنی‌دار آماری نداشتند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برای کلیفرم کل به‌ترتیب برای تیمارهای S2T3 و S1T2 با مقادیر ۱۰۷۳۳ و ۸۸۹۰ عدد در هر گرم حاصل شد. برای کلیفرم کل آبیاری زیرسطحی (S2) و زمان ۳۰ روز تأخیر آبیاری (T3)، بهترین عملکرد را داشتند. در بحث اشیریشیا کل در تمام تیمارهای پژوهش نتیجه منفی شد (جدول ۷). دلیل بالا بودن مقدار کلیفرم آبیاری زیرسطحی نسبت به تیمارهای سطحی می‌تواند قرار داشتن زمان بیش‌تر رطوبت و فعالیت کلیفرم ها در محیط خاک و

انتقال به گیاه باشد که موجب افزایش بار میکروبی محصول شده است. کپک تعداد کپک تیمارهای پژوهش در گروه مختلف آماری قرار گرفته

و اختلاف معنی‌دار آماری نشان دادند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برای صفت تعداد کپک در هر گرم به ترتیب برای تیمارهای S2T2 و S1T1 با مقادیر ۲، ۳ و ۷ شد. برای صفت تعداد کپک آبیاری زیرسطحی (S2) و زمان ۱۵ روز تأخیر آبیاری (T2)، بهترین عملکرد را نشان دادند (جدول ۷).

جدول ۷- مقایسه میانگین مربعات صفات کیفی در تیمارهای پژوهش

کپک (تعداد در گرم)	کلیفرم کل (تعداد در گرم)	کروسین (حداکثر جذب در طول موج ۴۴۰ نانومتر)	سافراناال (حداکثر جذب در طول موج ۳۳۰ نانومتر)	پیکروکسین (حداکثر جذب در طول موج ۲۵۷ نانومتر)	رطوبت (درصد جرمی)	تیمارهای پژوهش
۲۷۳ a	۹۲۲۷ a	۲۵۹ a	۳۰/۶۷ ab	۸۹/۶۷ ab	۷/۲۸ a	S1T1
۲۹۵ bc	۱۰۰۶۴ a	۲۶۱ a	۳۲/۵۰ bc	۹۲/۱۷ b	۷/۴۲ a	S2T1
۲۸۰ ab	۸۸۹۱ a	۲۵۸ a	۲۹/۳۳ a	۹۰/۰۰ ab	۷/۳۵ a	S1T2
۳۰۷ c	۱۰۷۳۱ a	۲۶۱ a	۳۲/۶۷ bc	۹۱/۶۷ b	۷/۳۴ a	S2T2
۲۷۵ a	۹۷۲۱ a	۲۶۰ a	۳۱/۰۰ abc	۸۸/۵۰ a	۷/۱۴ a	S1T3
۳۰۵ c	۱۰۷۳۳ a	۲۶۲ a	۳۳/۱۷ c	۹۲/۱۷ b	۷/۳۸ a	S2T3



شکل ۳- پیکروکسین، سافراناال و کروسین در تیمارهای پژوهش

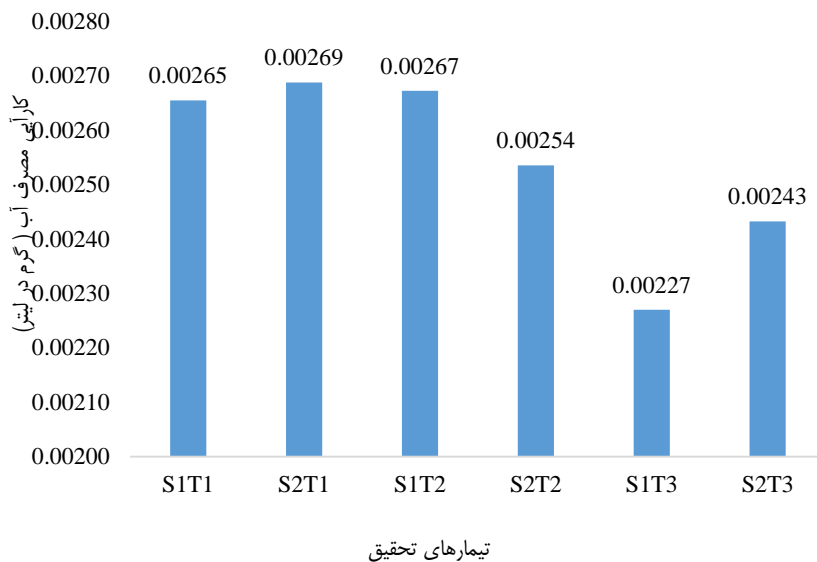
با واحد گرم در لیتر محاسبه شده است. در شکل ۴، کارایی مصرف آب در تیمارهای پژوهش حاضر نشان داده شده است. مقدار آب مصرفی در این پژوهش برای همه تیمارها یکسان می‌باشد، بنابراین حداکثر عملکرد کل (مجموع وزن خشک کلاله و وزن خشک خامه) کارایی مصرف آب بالاتری را نشان می‌دهد (تیمار S2T1 با مقدار ۰/۰۰۲۶۹ گرم بر لیتر). هم‌چنین نتایج نشان داد تیمارهای آبیاری

کارایی مصرف آب

شاخص کارایی مصرف آب آبیاری بیانگر کارایی مصرف آب به مقدار محصول در قطعه مزرعه‌ای می‌باشد که از هر واحد حجم آب آبیاری کاربردی در آن مزرعه به دست می‌آید و معمولاً به صورت کیلوگرم بر مترمکعب ارائه می‌گردد. در پژوهش حاضر به دلیل این که مقیاس اندازه‌گیری زعفران گرم می‌باشد، از این‌رو کارایی مصرف آب

متوالی در منطقه مورد مطالعه باشد.

زیرسطحی در مقایسه با آبیاری سطحی از میزان کارایی مصرف آب بالاتری برخوردار بودند و این امر می‌تواند به دلیل سازگار پذیری زعفران با شرایط کم آبی یا کم آبیاری (آبیاری قطره‌ای) در زمان‌های



شکل ۴- کارایی مصرف آب در تیمارهای پژوهش

نتیجه‌گیری کلی

زعفران به دلیل ارزش غذایی و صادراتی بالا، نیازمند مناسب‌ترین شرایط از لحاظ کیفی و کمی می‌باشد. در این پژوهش به بررسی عملکرد کمی و کیفی زعفران تحت تأثیر دو عامل آبیاری به صورت زیرسطحی و زمان اولین آبیاری پرداخته شد. نتایج صفات کمی محصول زعفران نشان داد بهترین روش آبیاری در منطقه مورد مطالعه آبیاری سطحی که با تفاوت ناچیز با عملکرد آبیاری زیر سطحی مشاهده شد و بهترین زمان آبیاری نیمه همراه ولی در زمان‌های دیگر عملکرد با کاهش جزئی همراه بود، که این تغییر زمان می‌تواند در مواقع فقدان نیروی انسانی کافی و نوسان قیمت زعفران در بازار مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین بهترین روش آبیاری در نتایج صفات کیفی در روش آبیاری زیر سطحی و بهترین زمان نیز ۱۵ روز تأخیر در آبیاری در منطقه مورد مطالعه عنوان گردید. به طوری که اثرات مثبت عطر، طعم و رنگ در زعفران در روش زیرسطحی بیش‌تر از روش سطحی نمایان شد. بطور کل نوع سیستم آبیاری تأثیر نامطلوبی را بر کمیت و کیفیت محصول را ایجاد نکرده ولی براساس هزینه اولیه سیستم زیر سطحی مقرون به صرفه نمی‌باشد. زمان آبیاری با توجه به عملکرد بهتر در تیمارهای نیمه مهر ماه زمان برتر می‌باشد ولی می‌توان از زمان‌های دیگر نیز بهره برد.

منابع

املشی، ا.، امیرشکاری، ح. و فتوکیان، م. ۱۳۹۳. بررسی اثر تراکم دو گونه کدو (حلوایی و تنبل) به عنوان گیاه پوششی و آبیاری تابستانه بر برخی صفات کمی و کیفی زعفران زراعی (*Crocus sativus L.*) سیزدهمین همایش علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران و سومین همایش علوم و تکنولوژی بذر ایران. انجمن علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران.

امیدبیگی، ر. ۱۳۸۰. نشریه بررسی‌های بازرگانی. ۱۶۵: ۲۶-۴۳.

امیرقاسمی، ت. ۱۳۸۷. زعفران طلای سرخ ایران. تهران، نشر آیندگان.

بهنیا، م. ۱۳۷۰. زراعت زعفران. انتشارات دانشگاه تهران.

چگنی، ع. ر. ۱۳۹۵. تأثیر زمان آبیاری و کنترل علف هرز بر عملکرد، رشد و نمو زعفران زراعی. پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی-ارشد، رشته زراعت، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد.

جواد زاده، س. م. ۱۳۸۷. علف‌های هرز مهم زعفران. انتشارات پژوهش طوس. ۱۷۲ صفحه.

تولید گیاهی. ۲۵(۳): ۶۹-۸۲.

- Behdani M. A. Koocheki A. Nassiri M. and Rezvani P. 2008b. Models to predict flowering time in the main saffron production regions of Khorasan province. *Journal of Applied Sciences*. 8(5): 907-909.
- Behdani M.A. Koocheki A. Rezvani P. and Jami Al-Ahmadi M. 2008a. Agro-Ecologica zoning and potential yield of saffron in Khorasan-Iran. *Journal of Biological Sciences*. 8(2): 298-305.
- Feizi, H., Mollafilabi, A., Ahmadian, A. and Sahabi, H. 2015. Effect of summer irrigation and conservation tillage on flower yield and qualitative characteristics of saffron (*Crocus sativus* L.).
- Gresta F. Avola G. Lombardo G.M. and Ruberto G. 2009. Analysis of flowering, stigmas yield and qualitative traits of saffron (*Crocus sativus* L.) as affected by environmental conditions. *Scientia Horticulturae*. 119: 320-324.
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran. Saffron – Test methods. Isiri Number: 259-2. 1st.Revision, <http://www.isiri.org/asp/account/checklog.asp?ID=259-2.doc>
- Juana, J. A. D., Córcolesb, H. L., Munozb, R. M., and Picornella, M. R. (2009). "Yield and yield components of saffron under different cropping systems". *Industrial Crop Production*. 30 (2): 212-219.
- Keyhani, E., Ghamsari, L., Keyhani, J., Hadizadeh, M. (2006). "Antioxidant enzymes during hypoxia-anoxia signaling events in *Crocus sativus* L. corm". In *Annals of the New York Academy of Sciences: Stress Signaling and Transcriptional Control*. 65-75.
- Mollafilabi, A., Davari, K. and Amini Dehaghi, M. 2020. Saffron yield and quality as influenced by different irrigation methods. *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*. 78(1): Piracicaba 2021 Epub.
- Pazoki A. Kariminejad M. and Foladi-Targhi A. 2013. Effect of planting patterns on yield and some agronomical traits in saffron (*Crocus sativus* L.) Under different irrigation intervals in Shahr-e-Rey Region. *International Journal of Farming and Allied Sciences*. 2: 1363-1368.
- Piri, H. and Parsa, M. 2016. Quantitative and qualitative study of forage sorghum at different levels of salinity and irrigation water in subsurface drip irrigation system. *J. Water Res. Agr*. 30: 4. 467-482.
- Yarami, N., Sepaskhah, A. R. 2015. Saffron response to irrigation water salinity, cow manure and planting method. *Agricultural Water Management*. 150: 57-66.
- چوپان، ی.، امامی، س. و هزارجریبی، ا. (۱۳۹۸). نقش دوره‌های مختلف آبیاری بر وزن بنه، مقدار علوفه و تعداد و عملکرد گل زعفران در اقلیم گرم و خشک، نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۲۶(۲)، ۱۱۵-۱۲۲.
- چوپان، ی.، خاشعی سیوکی، ع. و شهیدی، ع. (۱۳۹۷). ارزیابی اثرات فاضلاب تصفیه شده شهری بر خصوصیات شیمیایی خاک تحت کشت پنبه، نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب. ۳(۲)، ۶۱-۶۸.
- خزائی، م.، منفرد، م.، کامکار حقیقی، ع. ا. و سپاسخواه، ع. ل. ۱۳۹۲. بررسی روند تغییرات وزن و تعداد پدازه زعفران در مقادیر و روش‌های متفاوت آبیاری در دوره‌های مختلف کشت. مجله پژوهش‌های زعفران. ۱(۱): ۵۶-۴۸.
- دادخواه، م. ر.، احتشام، م. و فکرت، ح. (۱۳۸۲). زعفران ایران گوهری ناشناخته. انتشارات شهر آشوب. تهران.
- دانشور، م. ح. و همت زاده، ا. ۱۳۹۰. ترکیبات شیمیایی زعفران: رنگ، طعم و عطر. انتشارات دانشگاه شهید چمران.
- سعیدی‌راد، م. ح. و مختاریان، ک. (۱۳۸۹). اصول علمی کاربردی کاشت، داشت و برداشت زعفران. انتشارات آموزش و ترویج کشاورزی.
- ستوده، ا. ۱۳۹۶. مطالعه تأثیر آبیاری تابستانه و زمان آبیاری پاییزه و عمق خاک‌ورزی بر علف‌های هرز و عملکرد زعفران. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- کافی، م.، راشدمحصل، م. ح.، کوچکی، ک. و ملافیلابی، ک. ۱۳۸۱. زعفران، فناوری تولید و فرآوری. انتشارات دانشگاه فردوسی. کدوی تخم کاغذی. مجله علوم باغبانی ایران، جلد ۴۳، شماره ۳، صفحات ۲۹۱ تا ۲۹۹.
- محمدپور، ج.، وزین، ف.، حسن زاده، م. و شجاع، ع. ۱۳۹۲. بررسی اثر کاربرد کودهای بیولوژیک و کودهای شیمیایی نیتروژن بر مورفولوژی و عملکرد زراعی تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری. همایش ملی پژوهش‌های محیط زیست ایران، ۹ آبان، همدان.
- مسافری ضیاء‌الدینی، ح. ۱۳۸۰. اثر رژیم‌های مختلف آبیاری بر عملکرد زعفران. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی. دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.
- مقبلی دامنه، ا.، فتاحی، ر. ا.، قربانی، ب.، ربیعی، غ. ر. و اسفندیاری، ص. ۱۳۹۷. بررسی اثر کم آبیاری در شرایط آبیاری سطحی و زیرسطحی روی رشد سبزینه ای و عملکرد مرکبات. نشریه علمی

Investigation of Subsurface Drip Irrigation and the Time of the First Irrigation on the Quantity and Quality of Saffron

Y. Choopan^{1*}, A. Hezar Jaribi², Kh. Ghorbani², M. Hesam², A. Khashei Siuki³

Recived: Oct.03, 2020

Accepted: Dec.30, 2020

Abstract

In the northeastern regions of the country, due to climatic conditions as well as severe water shortages, it is necessary to cultivate crops that have low water requirements and at the same time have optimal water efficiency. This research randomized complete block design study was performed with two factors of irrigation system type (surface S1 and subsurface S2) and irrigation time (region custom or mehr (October) 15 T1, 15 days delay T2 and 30 days delay T3) and three repetitions. The results of the mean squares showed that the quantitative traits (number of flowers, fresh flower weight, dry stigma weight, dry cream weight and large flower index) of saffron due to the interaction of irrigation method and time of first time irrigation were insignificant and only dry cream weight trait was significant at probability 5% level. The results of the mean squares of qualitative traits (piroxin, crocin, safranal, moisture, mold, and total microorganisms) of saffron in the irrigation time factor and the contrast of irrigation time factor in the irrigation system type of all qualitative traits were no significant. The results showed that the highest value for quantitative traits was the number of flowers and the dry weight of stigmas for S1T2 treatment with 53.1 flowers per square meter and 0.79 grams per square meter, respectively. Also, for qualitative traits of piroxin, crocin, saffron and microorganisms, the total S2T1 treatment was obtained with the values of 1/92, 1/262, 1/33 (maximum absorption) and 10733 numbers per gram, respectively and the best irrigation method and Irrigation time, surface system and 15 days delay were obtained.

Keywords: Irrigation system, Irrigation management, Stigma, Total coliform.

1- PhD student, Department of Irrigation and Drainage, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Birjand University, Birjand, Iran

(*- Corresponding Author Email: Yahyachoopan68@gmail.com)

مقاله علمی-پژوهشی

مدل سازی ضریب دبی دریاچه های قطاعی در شرایط جریان مستغرق با استفاده از روش های پایه کرنلی

کیومرث روشنگر^{۱*}، آرمان علیرضازاده صدقیانی^۲، سامان شهنازی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲

چکیده

تخمین ضریب دبی جریان در دریاچه ها از جمله مسائل اساسی در علوم مربوط به مهندسی آب می باشد. در سال های اخیر روابط نیمه تجربی مختلفی به منظور تخمین ضریب دبی دریاچه های قطاعی توسعه داده شده که کاربرد این روابط در شرایط جریان مستغرق با خطاهای بزرگی همراه بوده است. هدف از تحقیق حاضر استفاده از روش های قدرتمند رگرسیون فرایند گاوسی (GPR) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) به منظور تخمین ضریب دبی دریاچه های قطاعی در شرایط جریان مستغرق و مقایسه نتایج حاصل با روش های نیمه تجربی مرسوم می باشد. بدین منظور مجموعه ی وسیعی شامل ۲۱۳۶ داده آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته و پس از تعریف پارامترهای بدون بعد مختلف، عملکرد روش های مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده کارایی بالای روش های به کار گرفته شده را نسبت به روش های تجربی به خوبی نشان داد. بررسی مدل های مختلف نشان داد رگرسیون فرایند گاوسی به همراه پارامترهای ورودی $Y_0 - Y_1/W$ و Y_1/W با دارا بودن مقادیر $RMSE=0/027$ ، $R=0/983$ و $NSE=0/967$ عملکرد بهتری نسبت به ماشین بردار پشتیبان و سایر روش های نیمه تجربی در تخمین ضریب دبی دریاچه های قطاعی در شرایط جریان مستغرق دارا می باشد.

واژه های کلیدی: دقت برآورد، رگرسیون فرایند گاوسی، شرایط جریان، ماشین بردار پشتیبان

مقدمه

موضوع اشاره نمود که برای مشخصه های دبی عبوری از دریاچه های قطاعی و کشویی در حالتی که جریان مستغرق در پایین دست دریاچه ایجاد می شود با توجه به وجود دو فاز هوا و آب پشت دریاچه، بسیار پیچیده تر از بررسی جریان آزاد می باشد. متزلزل مجموعه ای از نمودارهای تراز را به منظور تعیین ضریب دبی دریاچه های قطاعی در شرایط جریان مستغرق به صورت تابعی از پارامترهای بدون بعد ارائه نمود (Metzler, 1948). تاج مجموعه ای از روابط جهت تخمین دبی دریاچه های قطاعی در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه کرد. تغییرات ضریب دبی در این روش در قالب دسته نمودارهایی به صورت تابعی از پارامترهای بدون بعد ارائه شده است (Toch, 1955). بویالسکی مجموعه گسترده ای از آزمایش ها را در جهت تحلیل آب گذاری دریاچه های قطاعی در آزمایشگاه انجام داد. نتایج برداشت های آزمایشگاهی وی برای توسعه الگوریتمی مبتنی بر معادله انرژی جهت تخمین دبی دریاچه های قطاعی در شرایط جریان آزاد و مستغرق مورد استفاده قرار گرفت (Buyalski, 1983). کلمنس و همکاران بیان کردند که استفاده از معادلات پیشنهادی پیشین در تخمین آب گذاری دریاچه های قطاعی در شرایط جریان مستغرق زمانی منجر به نتایج

دریاچه های قطاعی یا شعاعی از جمله متداول ترین دریاچه ها جهت کنترل دبی و تنظیم سطح آب می باشند. این دریاچه ها به دلیل هزینه های نگهداری و بهره برداری کمتر (امین پور و همکاران، ۱۳۹۲)، کاربرد زیادی در سرریز سدها، شبکه های انتقال آب، کانال های کشاورزی و تونل های انتقال آب دارند. سابقه تحقیق نشان می دهد که در زمینه مطالعه جریان در دریاچه های قطاعی به خصوص با نگرش توسعه مشخصه های دبی برای شرایط جریان مستغرق تحقیقات انگشت شماری انجام شده است. از دلایل این موضوع می توان به این

۱- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۳- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(* نویسنده مسئول: Email: kroshangar@yahoo.com
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.10.0

دریچه‌های قطاعی توسط نوری و سلماسی (۱۳۹۸) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها نشان دهنده تغییرات ضریب دبی به ازای اشکال مختلف آستانه در دریچه‌های قطاعی می‌باشد. گوا و همکاران با تقسیم بندی جریان مستغرق به دو زیر مجموعه جریان مستغرق جزئی (با پرش هیدرولیکی کامل) و جریان مستغرق کامل (با پرش هیدرولیکی غیر عادی یا بدون پرش هیدرولیکی) به برآورد دبی جریان در دریچه‌های قطاعی پرداختند (Guo et al. 2020). نتایج به دست‌آمده توسط آن‌ها نشان داد برآورد دبی در جریان مستغرق کامل از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. در سال‌های اخیر روش‌های هوشمند به صورت گسترده در مباحث هیدرولیکی به کار گرفته شده و توانایی‌های بالای خود را در حل مسائل با عدم قطعیت بالا نشان داده‌اند. در این خصوص، دهقانی و همکاران با تعیین پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر ضریب دبی تخلیه دریچه‌های قطاعی، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به مدل‌سازی هوشمند رابطه ضریب دبی دریچه‌های قطاعی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی محققان قبلی پرداختند. مقایسه نتایج به دست آمده توسط شبکه عصبی مصنوعی و مطالعه‌های قبلی، بیانگر مطابقت قابل قبول این نتایج با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد (Dehghani et al., 2007). دهقانی و شه‌میرزادی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و به‌کارگیری روش هوشمند جستجوی ژنتیکی، رابطه‌ای جهت برآورد ضریب دبی دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان مستغرق تعیین نمودند (Dehghani and Shahmirzadi, 2008). مطالعات انجام شده توسط رادی نیز توانایی بالای شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی ضریب دبی دریچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق را اثبات می‌نماید (Rady, 2016).

در سال‌های گذشته، روابط نیمه تجربی مختلفی به منظور تخمین ضریب دبی از طریق بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی توسعه داده شده که دقت آن‌ها با توجه پیچیدگی‌های حاکم بر مسئله مورد بحث می‌باشد. همچنین هر یک از این روابط در شرایط خاص آزمایشگاهی و تحت فرضیات ساده‌کننده‌ای توسعه داده شده‌اند که استفاده از آن‌ها را در موارد عملی با خطاهای نسبتاً بزرگی همراه می‌سازد. از طرفی بررسی پیشینه مطالعاتی در این زمینه نشان می‌دهد تخمین بده جریان در دریچه‌های قطاعی تحت شرایط جریان مستغرق کار ساده‌ای نبوده و عمدتاً دارای خطاهای قابل‌توجهی می‌باشد (Wahl, 2005). با توجه به عدم قطعیت حاکم بر مسئله انجام مطالعات جامع در زمینه مدل‌سازی هوشمند ضریب دبی دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان مستغرق ضروری به نظر می‌رسد. به همین منظور مطالعه حاضر به ارزیابی عملکرد روش‌های رگرسیون فرآیند گاوسی به‌عنوان یکی از روش‌های نوین مبتنی بر کرنل و همچنین ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی ضریب دبی دریچه قطاعی پرداخته است. بدین منظور مجموعه وسیعی از داده‌های آزمایشگاهی (۲۱۳۶ داده)

مناسب می‌گردند که دریچه‌ها تماماً دارای بازشدگی یکسان باشند (Clemmens et al., 2003). وال و کلمنس با بهره‌گیری از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی بوالسکی، کارایی معادلات پیشنهادی توسط کلمنس و همکاران را مورد بررسی قرار داد (Wahl and Clemmens, 2003; Clemmens, 2005). آن‌ها نشان دادند اگرچه روش پیشنهادی توسط کلمنس و همکاران (۲۰۰۳) در شرایط جریان آزاد و محدوده‌ی معین از استغراق دریچه، عملکرد خوبی دارد؛ لکن در بازشدگی‌های زیاد و افت انرژی کم در بالادست و پایین دست دریچه، خطای تخمین دبی برای دریچه‌های قطاعی لبه تیز تا حدود ۷۰ درصد افزایش می‌یابد. شاهرخ‌نیا و جوان تحقیق‌های متعددی بر روی دریچه‌های قطاعی انجام دادند. آن‌ها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و برازش چند متغیره غیرخطی آن‌ها، روابطی را برای ضریب دبی جریان در دریچه‌های قطاعی نوع لاستیکی سخت در شرایط جریان آزاد و مستغرق تعیین نمودند (Shahrokhnia and Javan, 2005; Shahrokhnia and Javan, 2006). زاهدانی و همکاران با استفاده از مجموعه‌ای گسترده از داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی، معادلات رگرسیون چند متغیره غیرخطی را جهت تعیین ضریب دبی دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان آزاد و مستغرق پیشنهاد نمودند (Zahedani et al., 2012). شایان و همکاران مقدار ضریب فشردگی جریان را در دریچه‌های قطاعی و کشویی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی بررسی نموده و با استفاده از روش‌های تئوری رابطه‌ای را به منظور برآورد ضریب فشردگی در انواع مختلف دریچه‌ها ارائه نمودند (Shayan et al. 2014). نتایج آن‌ها نشان داد بسته به میزان درجه استغراق، ضریب فشردگی در انواع مختلف دریچه‌ها حالت افزایشی و یا کاهش‌ی خواهد داشت. امین‌پور و همکاران (۱۳۹۲) با به‌کارگیری معادلات انرژی و ممتوم روابطی را جهت تخمین ضریب دبی انواع دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد خطای برآورد معادلات پیشنهادی برای شرایط جریان آزاد در محدوده $\pm 5\%$ و برای بیشتر شرایط جریان مستغرق در محدوده $\pm 10\%$ می‌باشد. در تحقیقی دیگر، ژنگ و همکاران با استفاده از روش شناسایی پارامتر به تعیین ضرایب مربوط به روابط دبی در دریچه‌های قطاعی پرداخته و نشان دادند استفاده از روش مذکور منجر به افزایش دقت در تخمین دبی جریان از زیر دریچه‌های قطاعی می‌گردد (Zheng et al., 2017). عبدالحلیم به بررسی آزمایشگاهی تأثیر آستانه بر شرایط جریان مستغرق در دریچه‌های قطاعی پرداخت و با استفاده از روش‌های آماری رابطه‌ای را به منظور برآورد ضریب دبی ارائه نمود (Abdelhaleem, 2017). نتایج به‌دست‌آمده توسط او نشان داد افزایش ارتفاع آستانه موجب افزایش اندک در مقادیر ضریب دبی می‌گردد. همچنین در شرایط جریان آزاد نیز تأثیر آستانه بر ضریب دبی

آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های به‌کاررفته در مطالعه حاضر جامع‌ترین و وسیع‌ترین مجموعه داده در ارتباط با در بچه‌های قطاعی بوده که توسط اداره عمران اراضی ایالات متحده (USBR) گردآوری شده و تغییرات دبی جریان را به ازای اشکال مختلف لبه، ارتفاع از محورهای مختلف و تحت شرایط مختلف هیدرولیکی مورد بررسی قرار داده است. پایگاه داده مذکور تاکنون اساس کار مطالعات مختلفی در رابطه با در بچه‌های قطاعی بوده و روابط مختلفی نیز بر پایه آن توسعه داده شده است (Shahrokhnia and Javan 2005, Bijankhan et al. 2011, 2006; Bijankhan et al. 2013; Shayan et al. 2014). جدول (۱) محدوده پارامترهای بی‌بعد مؤثر در تحلیل در بچه‌های قطاعی را از نتایج مطالعات بویالسکی نشان می‌دهد. در این جدول y_0 بیانگر عمق آب بالادست، y_t عمق آب پایین دست، R شعاع در بچه قطاعی، W ارتفاع بازشدگی در بچه، P_h ارتفاع محور در بچه و C_d نیز ضریب آگذری در بچه قطاعی می‌باشد. لازم به ذکر است ضریب آگذری در بچه قطاعی برای داده‌های مورد بررسی تحت شرایط جریان مستغرق از طریق رابطه ۱ استخراج شده است (Buyalski, 1983).

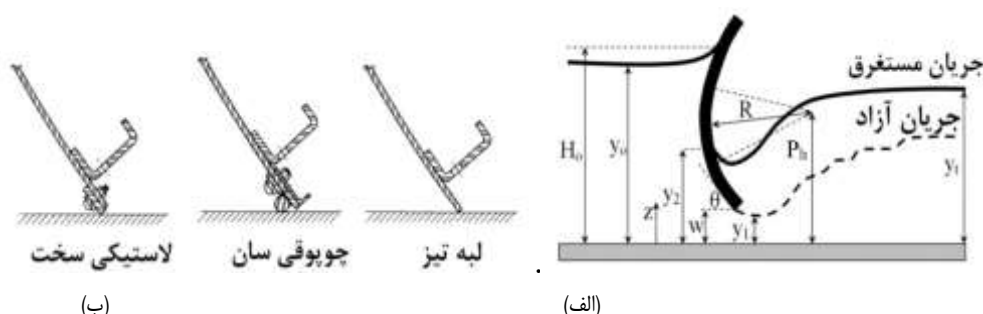
$$q = C_d W \sqrt{2g(y_0 - y_t)} \quad (1)$$

برای سه شکل متفاوت از در بچه قطاعی از نظر فرم لبه، شامل لاستیکی سخت، لبه تیز و چوبوقی سان استفاده گردید. ترکیب مختلفی از پارامترهای بدون بعد به عنوان مدل ورودی تعریف شده و قابلیت مدل‌سازی روش‌های به کار گرفته شده تحت شرایط مختلف هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در تحقیق

به منظور ارزیابی دقت معادلات پیشنهادی در برآورد ضریب دبی برای سه نوع در بچه قطاعی، در شرایط مستغرق، از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی بویالسکی استفاده گردید (Buyalski, 1983). بویالسکی مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای را بر روی در بچه قطاعی با سه نوع لبه (لبه تیز، لاستیکی سخت و چوبوقی سان) با سه ارتفاع از محور (۴۰۹، ۴۶۱ و ۵۱۱ میلی‌متر)، تحت شرایط جریان آزاد و مستغرق انجام داد (شکل ۱). در تمام حالات، عرض در بچه برابر ۷۱۱ میلی‌متر و شعاع در بچه ثابت و برابر ۷۰۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد (Buyalski, 1983). به علت تعبیه دونیم پایه برای در بچه از دو طرف فلوم، عرض کانال پایین دست کمی بیشتر و معادل ۷۶۲ میلی‌متر بوده است. در مجموع تعداد ۲۱۳۶ سری داده‌های



شکل ۱- (الف) پارامترهای مؤثر در جریان از زیر یک در بچه قطاعی؛ (ب) انواع در بچه‌های قطاعی بر اساس شکل لبه

جدول ۱- مشخصات داده‌های بکار رفته در تحقیق

C_d	w/R	y_0/R	P_h/R	تعداد داده	شرایط جریان	نوع در بچه
۰/۰۲۵-۰/۷۰۵	۰/۰۵۷-۰/۸۷۱	۰/۰۸۲-۱/۰۴۹	۰/۵۸۳-۰/۷۲۸	۱۶۵۷	مستغرق	لاستیکی سخت
۰/۱۹۸-۰/۶۳۱	۰/۰۵۷-۰/۷۲۵	۰/۲۹۶-۱/۰۴۷	۰/۵۸۳-۰/۷۲۸	۲۴۲	مستغرق	لبه تیز
۰/۱۹۹-۰/۶۱۶	۰/۰۵۷-۰/۷۲۵	۰/۳۰۱-۱/۰۳۷	۰/۵۸۳-۰/۷۲۸	۲۳۷	مستغرق	چوبوقی سان

به منظور سهولت کار، ورودی‌های مجموعه در ماتریس $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ و خروجی‌ها نیز در ماتریس $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ تجمیع می‌گردند. وظیفه رگرسیون، ایجاد یک ورودی جدید x^* به منظور دستیابی به توزیع پیش‌بینی شده برای مقادیر متناظر داده‌های مشاهداتی y^* و بر مبنای مجموعه داده S

رگرسیون فرآیند گاوسی

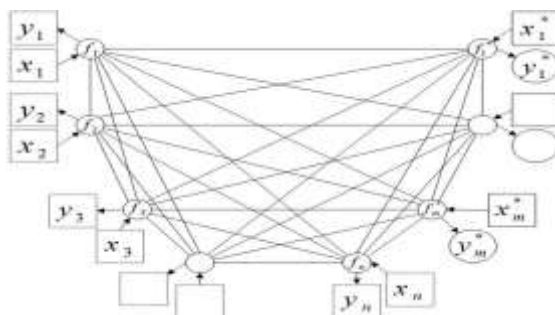
مجموعه داده S با n مشاهده را در نظر بگیرید $S = \{(x_i, y_i) \mid i = 1, \dots, n\}$ که در آن بردار ورودی با D بعد و y_i خروجی اسکالر یا هدف می‌باشد. این مجموعه متشکل از دو جز ورودی و خروجی به عنوان نقاط نمونه یا تجربی معرفی خواهند شد.

با صفر در نظر گرفته می‌شود. در فرآیند گاوسی، رابطه بین بردار ورودی و هدف به صورت رابطه ۵ و ۶ می‌باشد:

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon \quad (5)$$

$$K(X, X) = \begin{pmatrix} k(x_1, x_1) & k(x_1, x_2) & \dots & k(x_1, x_n) \\ k(x_2, x_1) & k(x_2, x_2) & \dots & k(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_n, x_1) & k(x_n, x_2) & \dots & k(x_n, x_n) \end{pmatrix} \quad (6)$$

که در آن‌ها، $k_{i,j}$ کواریانس بین مقادیر توابع نهان $f(x_i)$ و $f(x_j)$ می‌باشد. رگرسیون فرآیند گاوسی به‌منظور محاسبه توزیع پیش‌بینی شده برای مقادیر تابع f^* در نقاط تست $X^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*]$ به کار می‌رود. مدل تصویری فرآیند گاوسی در شکل ۲ ارائه شده است. در این شکل f_i بیانگر $f(x_i)$ می‌باشد. مجموعه توابع نهان f_i که با شاخص x_i نشان داده شده‌اند، به‌طور کامل به یکدیگر مرتبط می‌باشند. هر اتصال نشان‌دهنده یک رابطه بین دو متغیر نهان بوده که توسط تابع کواریانس تعریف می‌شود.



شکل ۲- مدل تصویری رگرسیون فرآیند گاوسی

$$cov(f_*) = K(X_*, X_*) - K(X_*, X)[K(X, X) + \sigma^2 I]^{-1} K(X, X_*)$$

در یادگیری نظارت شده، چنین فرض می‌شود که برای هر داده‌ی مشاهداتی x_i ، مقادیر پاسخ (هدف) y_i وجود داشته باشد. در فرآیند گاوسی، تابع کواریانس بیانگر این مسئله می‌باشد. تابع کواریانس در واقع مشخص‌کننده کواریانس بین دو متغیر تصادفی $f(x_i)$ و $f(x_j)$ بوده که x_i و x_j بردارهایی $d \times 1$ می‌باشند. به عبارت دیگر، تابع کواریانس تعیین‌کننده نحوه تأثیرپذیری پاسخ در یک نقطه x_i ، توسط مقادیر پاسخ در نقطه دیگر x_j می‌باشند به نحوی که $i \neq j, i = 1, 2, \dots, n$. انتخاب تابع کواریانس برای مسائل مختلف، مهمترین بخش از فرآیند گاوسی محسوب می‌شود. تابع کواریانس $k(x, x')$ توسط توابع کرنل مختلفی می‌توانند تعریف گردند. تابع کواریانس می‌تواند به وسیله پارامترهای تابع کرنل در بردار θ تعریف شود. بنابراین می‌توان تابع کواریانس را به صورت $k(x, x' | \theta)$ بیان نمود. برای بسیاری از توابع کرنل استاندارد، پارامترهای کرنل بر اساس انحراف معیار سیگنال (σ_f) و مقیاس طول مشخصه (σ_l) می‌-

می‌باشد. فرآیند گاوسی مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی است که تعداد محدودی از آنها با توزیع‌های گاوسی ادغام شده‌اند. فرآیند گاوسی تعمیمی از توزیع گاوسی می‌باشد. توزیع گاوسی در واقع توزیع بین متغیرهای تصادفی بوده در حالی که فرآیند گاوسی بیانگر توزیع بین توابع می‌باشد. فرآیند گاوسی $f(x)$ توسط توابع میانگین $m(x)$ و کواریانس به شکل زیر تعریف می‌شود (Rasmussen and Williams, 2006):

$$m(x) = E(f(x)) \quad (2)$$

$$k(x, x') = E((f(x) - m(x))(f(x') - m(x')))) \quad (3)$$

که در روابط فوق، $k(x, x')$ تابع کواریانس (یا کرنل) بوده که در نقاط x و x' محاسبه می‌شود. فرآیند گاوسی $f(x)$ می‌تواند به صورت رابطه ۴ بیان گردد:

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x, x')) \quad (4)$$

در این رابطه معمولاً جهت ساده‌سازی، مقدار تابع میانگین برابر

در شکل ۲ مربعات نشان‌دهنده متغیرهای مشاهداتی و دوایر نمایانگر مجهولات می‌باشند. توزیع y مشروط به مقادیر f بوده که با یک گاوسین ایزوتروپیک به شکل رابطه ۷ ارائه می‌شود:

$$p(y|f, X) = N(y, \sigma_n^2 I) \quad (7)$$

که در آن، I ماتریس همانی می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های تابع گاوسی، توزیع حاشیه‌ای y به شکل رابطه ۸ تعیین می‌شود:

$$p(y|X) = \int p(y|f, X)p(f|X)df = N(0, K + \sigma_n^2 I) \quad (8)$$

توزیع ادغام شده مقادیر داده‌های مشاهداتی که خروجی موردنظر می‌باشند و نیز مقادیر تابع در نقاط تست به صورت رابطه ۹ نوشته می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} y \\ f_* \end{bmatrix} \sim N \left(0, \begin{bmatrix} K(X, X) + \sigma^2 I & K(X, X_*) \\ K(X_*, X) & K(X_*, X_*) \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

با توجه به رابطه ۸ و استفاده از قواعد استاندارد برای مقید نمودن گاوسین، می‌توان توزیع شرطی را به صورت روابط ۱۰ و ۱۱ بدست آورد:

$$p(f_* | X, y, X_*) \sim N(\bar{f}_*, cov(f_*)) \quad (10)$$

$$\bar{f}_* = K(X_*, X)[K(X, X) + \sigma^2 I]^{-1} y \quad (11)$$

تابع کرنل است. هر دو الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون فرآیند گاوسی از روش‌های یادگیری ماشین مبتنی بر کرنل با فرمول متفاوت می‌باشند. مفهوم تابع کواریانس در رگرسیون فرآیند گاوسی مشابه تابع کرنل می‌باشد. به منظور استفاده از روش‌های کرنل محور، انتخاب مقادیر بهینه پارامترهای مربوط به تابع کرنل به دلیل تأثیر مستقیم خود در دقت نتایج به دست آمده از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نشان دهنده کارایی بالای تابع کرنل پایه شعاعی در عملکرد ماشین بردار پشتیبان بوده (روشنگر و همکاران ۱۳۹۶، روشنگر و قاسمپور ۱۳۹۷) و به همین منظور از تابع کرنل فوق در این تحقیق استفاده گردید.

روابط نیمه تجربی

به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های کرنل - محور به کار گرفته شده با روابط کلاسیک مرسوم، از ۳ رابطه شاهرخ‌نیا و جوان و زاهدانی و همکاران استفاده گردید (Shahrokhniya and Javan, 2005, 2006; Zahedani, 2012) روابط مذکور در جدول ۲ ارائه شده است.

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی کارایی روش‌های به کار گرفته شده برای تخمین ضریب دبی در بچه‌های قطعی از پارامترهای آماری ضریب همبستگی (R)، معیار ناش - ساتکلیف (NSE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) مطابق با روابط زیر استفاده شده است.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \times \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (18)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (19)$$

که در این روابط X_i بیانگر مقادیر مشاهداتی، Y_i مقادیر محاسباتی، X و Y به ترتیب بیانگر میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی و N تعداد کل داده‌های موجود است. هر چه مقادیر R و NSE نزدیک به یک و $RMSE$ مقادیر نزدیک به صفر داشته باشند نشان دهنده کارکرد ایده‌آل مدل مورد نظر خواهد بود

تعیین پارامترهای ورودی مدل

تعیین و انتخاب پارامترهای ورودی با توجه به تأثیر بالای خود در دقت نتایج به دست آمده از جمله مراحل مهم در فرآیند مدل‌سازی با استفاده از روش‌های هوشمند شناخته می‌شوند. از این رو در این بخش پارامترهای بدون بعد تأثیرگذار در محاسبه ضریب دبی در بچه‌های قطعی در شرایط جریان مستغرق معرفی شده و ترکیب مختلفی از پارامترهای مذکور پس از انجام فرآیند آزمون و خطا جهت مدل‌سازی به کار گرفته می‌شوند. با افزایش عمق پایاب در بچه قطعی، پخش ناشی از آن به محل تنگ‌شدگی جریان در حالت آزاد رسیده و

باشند. مقیاس طول مشخصه به معنی فاصله‌ای است که بین متغیرهای ورودی X_i و مقادیر پاسخ همبستگی وجود دارد. ذکر این نکته ضروریست که هر دو پارامتر σ_l و σ_f بایستی مقادیر بزرگتر از صفر داشته باشند که این را می‌توان با پارامتریک نمودن بردار θ به صورت رابطه‌ی ۱۲ و ۱۳ اعمال نمود:

$$\theta_1 = \log \sigma_l \quad \theta_2 = \log \sigma_f \quad (12)$$

$$p(\sigma^2, K) = \frac{1}{2} Y^T (K + \sigma^2 I)^{-1} Y + \frac{1}{2} \log |K + \sigma^2 + I| - \log p(\sigma^2) - \log(K) \quad (13)$$

برای یافتن هایپر پارامترها، می‌توان مشتق جزئی رابطه نسبت به σ^2 و k را یافت و با کاهش گرادینان به کمینه سازی دست یافت (Pal and Deswal, 2010). در تحقیق حاضر از کرنل Exponential (رابطه‌ی ۱۳) در مدل‌سازی‌های مربوط به رگرسیون فرآیند گاوسی استفاده شده است.

$$k(x_i, x_j | \theta) = \sigma_f^2 \exp \left(- \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^T (x_i - x_j)}}{\sigma_l} \right) \quad (14)$$

ماشین بردار پشتیبان

با توجه به تعدد منابع موجود در رابطه با تئوری روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) در این قسمت تنها به شرح خلاصه‌ای از این روش پرداخته شده است. مدل رگرسیون بردار پشتیبان مشهور به ε -SVR اولین بار توسط وپنیک معرفی شد (Vapnik, 1998). در یک مدل رگرسیونی SVM لازم است وابستگی تابعی متغیر وابسته y به مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل x همانند رابطه ۴ مشخص گردد. بنابراین موضوع اصلی پیدا کردن فرم تابع f است که بتواند به صورت صحیح، موارد جدیدی را که SVM تاکنون تجربه نکرده است پیش بینی کند. این تابع به وسیله آموزش مدل SVM بر روی یک مجموعه داده به عنوان مجموعه آموزش که شامل فرآیندی به منظور بهینه‌سازی دائمی تابع خطا است، قابل دسترسی است. برای این مدل، تابع خطا به صورت رابطه‌ی ۱۵ تعریف می‌شود.

$$\frac{1}{2} W^T W + C \sum_{i=1}^N \xi_i + C \quad (15)$$

تابع خطای مذکور لازم است که با توجه به محدودیت‌های رابطه‌ی ۱۶ کمینه گردد.

$$W^T \phi(X_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \quad (16)$$

$$y_i - W^T \phi(X_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i$$

$$\xi_i, \xi_i \geq 0 \quad . i = 1, \dots, N$$

که در این روابط:

C ثابت گنجایش، W بردار ضرایب، W^T ترانزپوز بردار ضرایب، ξ_i و ξ_i ضرایب کمبود، b ضریبی ثابت، N الگوی آموزش مدل و ϕ

(θ) می‌باشد (Metzler, 1948; Buyalski, 1983):

$$C_d = f(y_0, y_t, w, \theta) \quad (20)$$

با انجام آنالیز ابعادی پارامترهای بدون بعد زیر به منظور تخمین

ضریب دبی جریان در دریچه‌های قطاعی به دست می‌آید:

$$C_d = f\left(\frac{y_0 - y_t}{w}, \frac{y_t}{w}, \theta\right) \quad (21)$$

در این حالت دریچه مستغرق می‌گردد. به عبارت دیگر در شرایط جریان مستغرق، عمق پایاب از حداکثر عمق ثانویه پرش در حالت جریان آزاد بیشتر می‌باشد (شکل ۱). بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط متزلر و بویالسکی، مقدار ضریب دبی دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان مستغرق تابع عمق آب در بالادست (y_0)، عمق آب در پایین دست (y_t)، ارتفاع بازشدگی دریچه (w) و زاویه لبه دریچه با افق

جدول ۲- روابط نیمه تجربی به کاررفته در تحقیق

محدوده کاربرد	رهیافت	رابطه
جریان مستغرق	شاهرخ نیا و جوان (۲۰۰۶)	$C_d = 0.62 \left(\frac{\theta}{90}\right)^{-0.06} \left(\frac{y_0 - y_t}{y_t}\right)^{0.37}$
جریان مستغرق	شاهرخ نیا و جوان (۲۰۰۵)	$C_d = 0.53 \left(\frac{\theta}{90}\right)^{0.87} \left(\frac{y_0 - y_t}{w}\right)^{0.33}$
جریان مستغرق	زاهدانی و همکاران (۲۰۱۲)	$C_d = 0.8814(y_0 - y_t)^{0.0246} w^{-0.0273} P_h^{0.0538} R^{-0.0511}$

در روابط فوق، C_d ضریب دبی دریچه قطاعی در حالت مستغرق، θ زاویه لبه دریچه، y_0 عمق آب در بالادست دریچه، y_t عمق آب در پایاب، w ارتفاع بازشدگی دریچه

برای هر سه نوع دریچه قطاعی شامل ۲۱۳۶ داده آزمایشگاهی انجام شده و مقادیر معیارهای ارزیابی در جدول ۴ ارائه شده است. با در نظرگیری نتایج به دست آمده از روش GPR، مدل (۴) شامل دو پارامتر ورودی $y_0 - y_t/w$ و y_t/w با دارا بودن حداقل مقدار جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE=0/027$) و همچنین حداکثر مقادیر ضریب همبستگی ($R=0/983$) و معیار ناش-ساتکلیف ($NSE=0/967$) بهترین عملکرد را در تخمین ضریب دبی دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان مستغرق دارا می‌باشد. بررسی و مقایسه بین نتایج به دست آمده از مدل‌های مختلف نشان می‌دهد پارامتر $y_0 - y_t/w$ به عنوان پارامتر مشترک در مدل‌های ورودی نقش اساسی در مدل‌سازی مربوطه داشته و تاثیرگذارترین پارامتر در تخمین ضریب دبی دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان مستغرق محسوب می‌شود. این پارامتر معرف شرایط مختلفی از جریان مستغرق بوده و توسط محققین دیگری از جمله انصار و فررو نیز به منظور توسعه روابط بدون بعد برای دریچه‌های کشویی مستغرق معرفی شده است (Ansar and Ferro, 2001). بررسی مقادیر معیار ناش-ساتکلیف در دو مدل (۲) و (۳) نشان می‌دهد جایگزینی پارامتر y_t/R با y_0/R منجر به بهبود ۸ درصدی نتایج به دست آمده از دو روش SVM و GPR می‌گردد. در واقع می‌توان گفت در شرایط جریان مستغرق به دلیل کنترل از پایین دست، عمق جریان در پایین دست تأثیر بیشتری در فرآیند مدل‌سازی ضریب دبی نسبت به عمق بالادست دارا می‌باشد. به همین ترتیب به کارگیری پارامتر بدون بعد نسبت عمق پایین دست به بازشدگی دریچه (y_t/w) دقت مدل‌سازی را به نحو قابل توجهی افزایش داده و در کنار پارامتر $y_0 - y_t/w$ نتایج قابل قبولی را در هر دو روش به کار گرفته شده ارائه می‌نماید. نمودارهای پراکندگی بین

زاویه لبه دریچه با افق را می‌توان به صورت تابعی از شعاع دریچه (R)، ارتفاع بازشدگی دریچه (w) و فاصله محور دریچه تا کف کانال (P_h) بیان نمود. بنابراین:

$$C_d = f\left(\frac{y_0 - y_t}{w}, \frac{y_t}{w}, \frac{P_h - w}{R}\right) \quad (22)$$

همچنین بررسی‌های تجربی صورت گرفته توسط تاج نشان دهنده تأثیر بالای نسبت‌های w/R ، y_0/R ، y_t/R و P_h/R در محاسبه ضریب دبی دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان مستغرق می‌باشد (Toch, ۱۹۵۵). بنابراین می‌توان ضریب دبی را تابعی از پارامترهای بدون بعد زیر در نظر گرفت:

$$C_d = f\left(\frac{y_0 - y_t}{w}, \frac{y_t}{w}, \frac{P_h - w}{R}, \frac{w}{R}, \frac{y_0}{R}, \frac{y_t}{R}, \frac{P_h}{R}\right)$$

به منظور دستیابی به مدلی با قابلیت اعتماد بالا، ترکیب مختلفی از پارامترهای فوق تعریف شده و پس از انجام مجموعه‌ی وسیعی از فرآیند سعی و خطا، مدل‌های برتر انتخاب شدند. مدل‌های تعریف شده برای تخمین ضریب دبی در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

جدول ۳- مدل‌های تعریف شده برای تخمین ضریب دبی

مدل	پارامترهای ورودی
(۱)	$\left(\frac{y_0 - y_t}{w}\right)$
(۲)	$\left(\frac{y_0 - y_t}{w}, \frac{y_0}{R}\right)$
(۳)	$\left(\frac{y_0 - y_t}{w}, \frac{y_t}{R}\right)$
(۴)	$\left(\frac{y_0 - y_t}{w}, \frac{y_t}{w}\right)$

نتایج و بحث

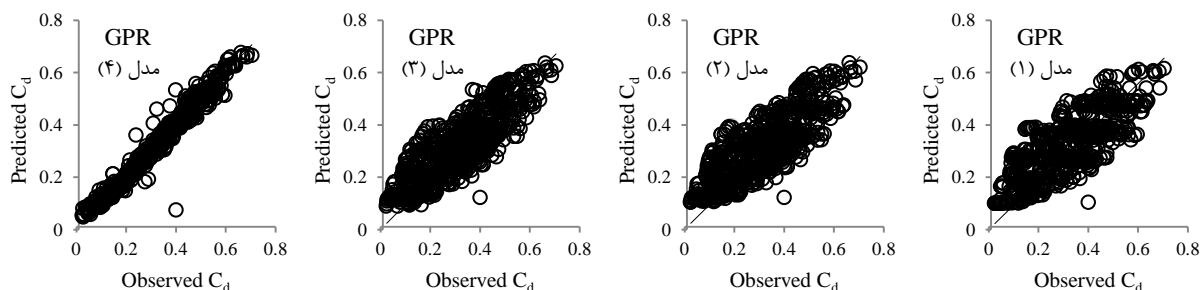
پس از تعیین پارامترهای ورودی، فرآیند مدل‌سازی ضریب دبی

از دقت بسیار پایینی نسبت به روش‌های کرنل محور به کار گرفته شده برخوردار می‌باشند. از دلایل عدم کارایی روش‌های نیمه تجربی می‌توان به توسعه آنها با استفاده از محدوده مشخصی از داده‌های آزمایشگاهی و میدانی اشاره نمود. همین عامل به کارگیری روش‌های نیمه تجربی را در دریاچه‌های قطعی با دامنه وسیعی از عمق جریان در بالادست و پایین دست دریاچه، میزان باز شدگی دریاچه و... دچار خطا می‌نماید.

داده‌های مشاهداتی و تخمین زده شده توسط رگرسیون فرآیند گاوسی برای داده‌های صحت‌سنجی در شکل ۳ ارائه شده است. به منظور مقایسه دقت روش‌های کرنل محور با روش‌های کلاسیک از ۳ رابطه مختلف نیمه تجربی استفاده شده و نتایج حاصل در جدول ۵ ارائه شده است. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد روش‌های مذکور با دارا بودن مقادیر منفی معیار ناش- ساتکلیف قابلیت اعتماد کافی را در برآورد ضریب دبی دریاچه‌های قطعی تحت شرایط بحرانی نداشته و

جدول ۴- نتایج حاصل از مدل‌سازی ضریب دبی دریاچه‌های قطعی در شرایط جریان مستغرق

معیارهای ارزیابی						مدل	روش
صحت‌سنجی			آموزش				
RMSE	NSE	R	RMSE	NSE	R		
۰/۰۹۲	۰/۶۱۳	۰/۷۸۳	۰/۰۸۸	۰/۶۶۳	۰/۸۱۴	(۱)	GPR
۰/۰۸۷	۰/۶۵۶	۰/۸۱۰	۰/۰۷۷	۰/۷۴۴	۰/۸۶۰	(۲)	
۰/۰۸۱	۰/۷۰۲	۰/۸۳۸	۰/۰۷۷	۰/۷۳۸	۰/۸۶۰	(۳)	
۰/۰۲۷	۰/۹۶۶	۰/۹۸۳	۰/۰۱۶	۰/۹۹۴	۰/۹۸۸	(۴)	
۰/۰۹۴	۰/۵۹۵	۰/۷۷۳	۰/۰۹۳	۰/۶۲۰	۰/۷۹۰	(۱)	SVM
۰/۰۹۰	۰/۶۲۷	۰/۷۹۲	۰/۰۹۰	۰/۶۴۸	۰/۸۰۶	(۲)	
۰/۰۸۳	۰/۶۸۳	۰/۸۳۷	۰/۰۸۲	۰/۷۰۵	۰/۸۴۱	(۳)	
۰/۰۳۵	۰/۹۴۴	۰/۹۷۲	۰/۰۳۴	۰/۹۴۹	۰/۹۷۴	(۴)	



شکل ۳- نتایج به دست آمده از رگرسیون فرآیند گاوسی برای مدل‌های مختلف ورودی

جدول ۵- نتایج به دست آمده از روش‌های نیمه تجربی

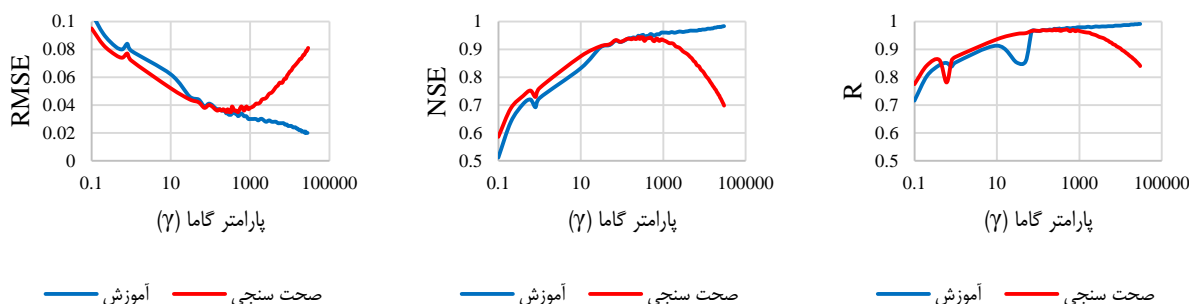
معیارهای ارزیابی			رابطه
صحت‌سنجی			
RMSE	NSE	R	
۰/۳۳۹	-۴/۰۱	۰/۴۵۲	شاهرخ‌نیا و جوان (۲۰۰۵)
۰/۳۷۲	-۵/۰۵	۰/۴۴۵	شاهرخ‌نیا و جوان (۲۰۰۶)
۰/۵۴۱	-۱۱/۷۹	۰/۷۶۶	زاهدانی و همکاران (۲۰۱۲)

جستجوی گرید و اعتبارسنجی متقابل استفاده گردید. بدین منظور با ثابت در نظر گرفتن پارامتر γ ، پارامترهای مربوط به ماشین بردار پشتیبان در بازه ۰/۰۰۱-۱۵ بهینه‌سازی شده‌اند. تغییرات معیار ناش- ساتکلیف به ازای مقادیر مختلف پارامتر گاما (۷) برای مدل (۴) به عنوان مدل برتر در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است. به منظور

پارامترهای σ_f و σ_l برای مدل‌های مختلف به ترتیب بین $12/2743 - 2/3654$ و $0/2721 - 0/1440$ با استفاده از روش بهینه- سازی گرادین کاهشی در روش GPR بهینه شده‌اند. به منظور یافتن مقادیر بهینه پارامترهای مربوط به ماشین بردار پشتیبان (C و E) و همچنین پارامتر مربوط به کرنل پایه شعاعی (۷) از ترکیب دو روش

پشتیبان انجام یافته است. در حالت کلی، افزایش مقادیر مربوط به پارامتر گاما موجب افزایش پیچیدگی مدل می‌گردد (Han et al., 2007). به همین دلیل مقادیر بالای پارامتر گاما در این تحقیق موجب افزایش پیچیدگی مدل و به دنبال آن افزایش محسوس مدت زمان مدل‌سازی نسبت به رگرسیون فرآیند گاوسی می‌گردد. همچنین بررسی تغییرات معیارهای ارزیابی بیانگر حساسیت بالای معیارهای ناش - ساتکلیف و جذر میانگین مربعات خطا به تغییرات مربوط به پارامتر گاما می‌باشد.

بررسی بهتر موضوع، نمودارهای مربوطه در مقیاس لگاریتمی ارائه شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص می‌گردد مدل ماشین بردار پشتیبان به ازای مقادیر کوچکتر از $\gamma = 150$ دچار خطای بیش آموزش شده و مقادیر معیار ناش - ساتکلیف برای داده‌های صحت - سنجی بیش از مقادیر این معیار برای داده‌های آموزش می‌باشد. با افزایش پارامتر گاما تا $\gamma = 250$ دقت مدل‌سازی افزایش یافته و آموزش مدل نیز دچار خطا نمی‌گردد. این فرآیند برای تمامی مدل‌های تعریف شده به منظور یافتن پارامترهای بهینه ماشین بردار



شکل ۴ - تغییرات معیارهای ارزیابی به ازای مقادیر مختلف پارامتر گاما

عملکرد این روش داشته و دقت مدل‌سازی بین $NSE=0/957$ برای کرنل Squared Exponential تا $NSE=0/966$ برای کرنل Exponential متغیر می‌باشد. در نقطه مقابل، نتایج ارائه شده در جدول ۷ نشان‌دهنده تأثیر بالای توابع کرنل بر عملکرد ماشین بردار پشتیبان می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد کرنل RBF عملکرد بسیار بهتری در تخمین ضریب دی‌بی از خود نشان می‌دهد و از طرف دیگر به کارگیری کرنل Sigmoid نتایج ضعیفی را به دنبال دارد.

عملکرد هر دو روش SVM و GPR وابستگی شدیدی به انتخاب تابع کرنل مناسب و بهینه‌سازی پارامترهای مربوطه دارد. به منظور بررسی تأثیر توابع کرنل مختلف در عملکرد رگرسیون فرآیند گاوسی پنج تابع کرنل شامل توابع Squared Exponential, Exponential, Matern 3/2, Matern 5/2, Rational Quadratic و انتخاب و عملکرد هر یک در تخمین ضریب دی‌بی در پیچه‌های قطعی با استفاده از پارامترهای ورودی مدل (۴) به عنوان مدل برتر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارائه شده در جدول ۶ نشان می‌دهد به کارگیری توابع کرنل مذکور در ساختار رگرسیون فرآیند گاوسی تأثیر بسیار اندکی بر

جدول ۶ - نتایج به دست آمده از رگرسیون فرآیند گاوسی با استفاده از توابع کرنل مختلف

معیارهای ارزیابی						تابع کرنل
صحت‌سنجی			آموزش			
RMSE	NSE	R	RMSE	NSE	R	
۰/۰۲۷	۰/۹۶۶	۰/۹۸۳	۰/۰۱۶	۰/۹۹۴	۰/۹۸۸	Exponential
۰/۰۳۰	۰/۹۵۷	۰/۹۷۸	۰/۰۳۰	۰/۹۶۰	۰/۹۷۹	Squared Exponential
۰/۰۲۹	۰/۹۶۰	۰/۹۸۰	۰/۰۲۷	۰/۹۶۶	۰/۹۸۳	Matern 3/2
۰/۰۳۰	۰/۹۵۸	۰/۹۷۹	۰/۰۲۹	۰/۹۶۲	۰/۹۸۱	Matern 5/2
۰/۰۳۰	۰/۹۵۸	۰/۹۷۹	۰/۰۲۹	۰/۹۶۲	۰/۹۸۱	Rational Quadratic

جدول ۷- نتایج به‌دست‌آمده از ماشین بردار پشتیبان با استفاده از توابع کرنل مختلف

معیارهای ارزیابی						تابع کرنل
صحت‌سنجی			آموزش			
RMSE	NSE	R	RMSE	NSE	R	
۰/۰۳۵	۰/۹۴۴	۰/۹۷۲	۰/۰۳۴	۰/۹۴۹	۰/۹۷۴	RBF
۰/۰۹۹	۰/۵۵۸	۰/۷۶۱	۰/۱۱۰	۰/۴۷۳	۰/۶۸۸	Linear
۰/۱۱۵	۰/۳۹۸	۰/۶۴۵	۰/۱۱۸	۰/۳۹۹	۰/۶۵۲	Polynomial
۰/۱۴۹	-۰/۰۰۰۵۶	۰/۱۲۷	۰/۱۵۲	-۰/۰۰۰۰۶۱	۰/۰۱۷	Sigmoid

های قطاعی با ارتفاع محور در پیچه برابر با $P_h=511$ و $P_h=409$ می‌باشد. همچنین در در پیچه‌های قطاعی با ارتفاع محور $P_h=409$ به کارگیری دو پارامتر γ/R و ν/R تأثیری در بهبود نتایج نداشته و حتی موجب کاهش دقت مدل‌سازی به خصوص در ماشین بردار پشتیبان می‌گردد. با افزایش ارتفاع محور در پیچه، میزان تأثیرگذاری عمق جریان در پایین‌دست بر دقت مدل‌سازی نیز افزایش یافته و بهره-گیری از پارامتر γ/R موجب افزایش دقت مدل‌سازی می‌گردد.

میزان کارایی روش‌های هوشمند می‌تواند در شرایط مختلف هیدرولیکی دچار نوسان شده و پارامترهای ورودی می‌توانند در شرایط مختلف هیدرولیکی تأثیرگذاری متفاوتی بر روند مدل‌سازی داشته باشند. به منظور بررسی بیشتر این موضوع، عملکرد مدل‌های تعریف شده برای سه ارتفاع مختلف محور در پیچه شامل ۴۰۹، ۴۶۱ و ۵۱۱ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در جدول ۸ ارائه شده است. بررسی نتایج به دست آمده نشان دهنده بهبود نسبی نتایج در در پیچه-

جدول ۸- نتایج حاصل از مدل‌سازی بر اساس ارتفاع محور در پیچه‌های مختلف

معیارهای ارزیابی						روش	ارتفاع محور در پیچه (P_h)	مدل
صحت‌سنجی			آموزش					
RMSE	NSE	R	RMSE	NSE	R			
۰/۰۷۰	۰/۶۹۳	۰/۸۳۵	۰/۰۷۲	۰/۶۹۹	۰/۸۳۸	(۱)	۴۰۹	GPR
۰/۰۷۶	۰/۶۴۰	۰/۸۰۴	۰/۰۶۰	۰/۷۹۲	۰/۸۹۴	(۲)		
۰/۰۷۶	۰/۶۴۱	۰/۸۰۴	۰/۰۶۳	۰/۷۶۷	۰/۸۷۸	(۳)		
۰/۰۱۸	۰/۹۷۸	۰/۹۸۹	۰/۰۰۵	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	(۴)		
۰/۰۹۵	۰/۶۷۶	۰/۸۳۲	۰/۰۹۰	۰/۶۷۵	۰/۸۳۲	(۱)	۴۶۱	GPR
۰/۰۹۲	۰/۶۹۶	۰/۸۳۵	۰/۰۷۸	۰/۷۵۶	۰/۸۷۰	(۲)		
۰/۰۸۷	۰/۷۳۹	۰/۸۵۴	۰/۰۷۵	۰/۷۷۷	۰/۸۸۲	(۳)		
۰/۰۳۸	۰/۹۴۷	۰/۹۷۳	۰/۰۱۶	۰/۹۸۸	۰/۹۹۴	(۴)		
۰/۰۷۷	۰/۶۹۳	۰/۸۳۳	۰/۰۷۲	۰/۷۴۵	۰/۸۶۴	(۱)	۵۱۱	SVM
۰/۰۷۸	۰/۶۷۷	۰/۸۳۴	۰/۰۶۷	۰/۷۷۸	۰/۸۸۴	(۲)		
۰/۰۷۴	۰/۷۱۱	۰/۸۴۶	۰/۰۵۸	۰/۸۳۶	۰/۹۱۶	(۳)		
۰/۰۲۰	۰/۹۷۸	۰/۹۸۹	۰/۰۰۵	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	(۴)		
۰/۰۷۳	۰/۶۷۳	۰/۸۳۲	۰/۰۷۰	۰/۷۱۵	۰/۸۴۸	(۱)	۴۰۹	SVM
۰/۰۸۷	۰/۵۳۲	۰/۷۴۱	۰/۰۷۵	۰/۶۷۰	۰/۸۱۹	(۲)		
۰/۰۸۵	۰/۵۵۱	۰/۷۵۵	۰/۰۷۵	۰/۶۷۷	۰/۸۳۷	(۳)		
۰/۰۲۶	۰/۹۵۷	۰/۹۷۹	۰/۰۲۵	۰/۹۶۲	۰/۹۸۱	(۴)		
۰/۰۹۹	۰/۶۴۷	۰/۸۰۵	۰/۰۹۳	۰/۶۵۶	۰/۸۱۰	(۱)	۴۶۱	SVM
۰/۰۹۶	۰/۶۶۹	۰/۸۳۳	۰/۰۸۷	۰/۷۰۱	۰/۸۴۱	(۲)		
۰/۰۹۴	۰/۶۸۱	۰/۸۳۰	۰/۰۸۵	۰/۷۱۴	۰/۸۴۷	(۳)		
۰/۰۴۵	۰/۹۲۵	۰/۹۶۲	۰/۰۳۶	۰/۹۴۸	۰/۹۷۴	(۴)		
۰/۰۷۹	۰/۶۷۱	۰/۸۱۹	۰/۰۸۰	۰/۶۸۶	۰/۸۳۸	(۱)	۵۱۱	SVM
۰/۰۸۳	۰/۶۳۷	۰/۸۰۴	۰/۰۷۷	۰/۷۱۴	۰/۸۴۶	(۲)		
۰/۰۷۵	۰/۷۰۹	۰/۸۴۳	۰/۰۷۲	۰/۷۴۴	۰/۸۶۴	(۳)		
۰/۰۲۶	۰/۹۶۳	۰/۹۸۳	۰/۰۲۲	۰/۹۷۵	۰/۹۸۷	(۴)		

نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از ۲۱۳۶ داده‌ی آزمایشگاهی به مدل سازی و تخمین ضریب دبی با استفاده از روش‌های هوشمند پرداخته شد. بدین منظور ترکیب مختلفی از پارامترهای بدون بعد استفاده گردید. خروجی مدل‌های مربوطه نشان‌دهنده دقت بالای رگرسیون فرآیند گوسی در تخمین ضریب دبی بوده است. بررسی حالت‌های مختلف نشان می‌دهد مدل با پارامترهای ورودی $y_0 - y_t/w$ و y_t/w با دارا بودن مقادیر معیارهای ارزیابی $RMSE=0/027$ ، $NSE=0/967$ و $R=0/983$ به عنوان مدل برتر شناخته شده و نسبت به سایر مدل‌ها در تخمین ضریب دبی منجر به نتایج دقیق‌تری می‌گردد. همچنین مشاهده گردید که پارامتر $y_0 - y_t/w$ نقش اساسی در تخمین ضریب دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان مستغرق ایفا می‌نماید. مقایسه روش‌های نیمه تجربی و کلاسیک با نتایج روش‌های به کار رفته در این تحقیق نشان داد روش‌های GPR و SVM از بسیار بالایی نسبت به روش‌های کلاسیک برخوردار می‌باشند. روش‌های نیمه تجربی به کار گرفته شده با دارا بودن مقادیر منفی معیار ناش - ساتکلیف به هیچ عنوان قابلیت اعتماد لازم را به منظور تخمین پدیده مورد نظر دارا نمی‌باشند. با این حال، روش‌های پیشنهادشده وابستگی شدیدی به کیفیت داده‌های به کار رفته داشته و به منظور بررسی بیشتر موضوع استفاده از داده‌های میدانی توصیه می‌گردد.

منابع

- Abdelhaleem, F. S. F. 2017. Hydraulics of submerged radial gates with a sill. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 23(2): 177-186.
- Ansar, M. and Ferro, V. 2001. Simultaneous Flow over and under a Gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 127(5): 325-328.
- Bijankhan, M., Ferro, V. and Kouchakzadeh, S. 2013. New stage-discharge relationships for radial gates. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 139(5): 378-387.
- Bijankhan, M., Kouchakzadeh, S. and Bayat, E. 2011. Distinguishing condition curve for radial gates. *Flow Measurement and Instrumentation*. 22(6): 500-506.
- Buyalski, C. P. 1983. Discharge algorithms for canal radial gates, REC-ERC-83-9, Engineering and Research Center, U.S. Bureau of Reclamation, Denver.
- Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., and Replogle, J. A. 2003. Calibration of submerged radial gates. *Journal of Hydraulic Engineering*. 129(9): 680-687.
- Dehghani A. A. and Meshkati Shahmirzadi M. E. 2008. Assessment of radial gate's discharge coefficient by using genetic algorithm. *Scientific Journal of Gorgan University of Agriculture and Natural Resources, Iran*. (In Persian).
- Dehghani, A.A., Suzuki, K., Hashemi, F. and Salmatian, A.S. 2007. Estimation of the discharge coefficient of canal radial gates using artificial neural network. *IAHR-International Congress on water engineering, Venice, Italy*, Pp: 221-230.
- Guo, Y. X., Guo, X. L., Wang, Y. S., Wang, T., Fu, H., & Li, J. Z. 2020. Flow condition identification and discharge calibration for submerged radial gates. *Journal of Hydraulic Research*. 1-8.
- Han, D., Chan, L. and Zhu, N. 2007. Flood forecasting using support vector machines. *Journal of hydroinformatics*. 9(4): 267-276.
- Metzler, D.E. 1948. A Model Study of Tainter Gate Operation. M.Sc. thesis, Iowa State University, Iowa City, IA, USA.
- Pal, M. and Deswal, S. 2010. Modelling pile capacity using Gaussian process regression. *Computers and Geotechnics*. 37(7-8): 942-947.
- Rady, R. A. E. H. 2016. Modeling of flow characteristics beneath vertical and inclined sluice gates using artificial neural networks. *Ain Shams Engineering Journal*. 7(2): 917-924.
- Rasmussen, C. E. and Williams, C. K. 2006. Gaussian process for machine learning. MIT press.
- Shahrokhnia, M.A. and Javan, M. 2006. Dimensionless Stage-Discharge Relationship in Radial Gates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.
- امین پور، ی.، فرهودی، ج. و خلیلی شایان، ح. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی و صحرایی دریچه‌های قطاعی به عنوان سازه اندازه گیری جریان تحت شرایط آزاد و مستغرق. *مجله آب و خاک*، ۲۸(۴): ۶۹۵-۷۰۷.
- روشنگر، ک.، فرودی خور، ع. و صانعی، م. ۱۳۹۶. تعیین پارامترهای تاثیرگذار بر ضریب دبی سرریزهای اوجی قوس محور با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) و مقایسه با روش شبکه فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۱(۴): ۶۴۷-۶۵۷.
- روشنگر، ک. و قاسم پور، ر. ۱۳۹۷. بررسی عملکرد روش‌های کلاسیک و هوش مصنوعی در تخمین ضریب زبری در پیچانرودها. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۲(۴): ۸۱۱-۸۲۲.
- نوری، م.، سلماسی، ف. ۱۳۹۸. بررسی آزمایشگاهی تاثیر آستانه بر ضریب دبی دریچه قطاعی در شرایط جریان آزاد. *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۵۱(۱): ۱۵۷-۱۶۸.

- Momentum Method to Radial Gate Discharge Calibration. *Impacts of Global Climate Change*: 1-10.
- Wahl, T. L. 2005. Refined energy correction for calibration of submerged radial gates. *Journal of Hydraulic Engineering*. 131(6): 457-466.
- Zahedani, M. R., Keshavarzi, A., Javan, M. and Shahrokhnia, M. A. 2012. New equation for estimation of radial gate discharge. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*. 165(5): 253-263.
- Zheng, H., Lei, X., Shang, Y., Cai, S., Kong, L. and Wang, H. 2017. Parameter identification for discharge formulas of radial gates based on measured data. *Flow Measurement and Instrumentation*. 58: 62-73.
- 132(2): 180-184.
- Shahrokhniya, M.A. and Javan, M. 2005. Obtained of discharge coefficient in radial gates. *Hydraulic Magazine*, 1: 1-11.
- Shayan, H. K., Farhoudi, J. and Roshan, R. 2014. Estimation of flow discharge under the sluice and radial gates based on contraction coefficient. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*. 38(C2): 449.
- Toch, A. 1955. Discharge characteristics of Tainter gates. *ASCE Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 120: 290-300.
- Vapnik, V. 1998. *Statistical learning theory* Wiley, New York. 1: 624.
- Wahl, T. and Clemmens, A. 2005 *Applying the Energy-*

Modeling Discharge Coefficient of Radial Gates under Submerged Flow Conditions using Kernel-Based Approaches

K. Roushangar^{*1}, A. Alirezazadeh Sadaghiyani², S. Shahnazi³

Received: Oct.05, 2020

Accepted: Feb.20, 2020

Abstract

Prediction of flow discharge coefficient of gates is one of the essential issues in water engineering sciences. In recent years, various semi-empirical equations have been developed in order to predict the discharge coefficient of radial gates that the application of these formulas under submerged flow conditions suffered from large errors. The aim of present study is to apply robust Gaussian Process Regression (GPR) and Support Vector Machine (SVM) to predict discharge coefficient of radial gates under submerged flow conditions and compare the obtained results with well-known semi-empirical approaches. For this purpose, an extensive experimental dataset comprises 2136 data points were used to feed the utilized methods. Different combinations of dimensionless parameters were prepared and the performance of aforementioned methods were assessed. The obtained results showed that GPR method with input parameters of y_0-y_r/w and y_r/w yields a correlation coefficient (R) of 0.983, a Nash- Sutcliffe efficiency (NSE) of 0.967 and root mean squared error (RMSE) of 0.027 and indicated superior performance compared with employed SVM and other semi-empirical approaches.

Keywords: Flow conditions, Gaussian process regression, Prediction accuracy, Support vector machine

1- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- M.Sc Student, Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Ph.D Student, Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

(*- Corresponding Author Email: kroshangar@yahoo.com)

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب سطحی با مدل SWAT (مورد مطالعه: رودخانه مزلقان)

شهاب حاجی قاسمی^۱، محمود ذاکری نیری^{۲*}، عطاالله نجفی جیلانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۱

چکیده

هدف پژوهش حاضر بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی حوضه مزلقان بود. به این منظور مدل SWAT برای شبیه‌سازی رژیم هیدرولوژیکی حوضه و الگوریتم SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل استفاده شد. داده‌های آماری مورد استفاده برای شبیه‌سازی رواناب، مربوط به سال‌های (۱۹۹۷-۲۰۱۵) بود. برای ارزیابی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی رواناب از شاخص‌های نش-ساتکلیف، R^2 ، p-factor و r-factor استفاده شد و با استفاده از مدل تغییر اقلیم LARS-WG در منطقه مورد مطالعه با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه رازین که دارای آمار بلندمدت اقلیمی است، ریزمقیاس نموده و با در نظر گرفتن سناریوهای تغییر اقلیم RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره آینده ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تغییر اقلیم منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اطمینان از درستی واسنجی مدل LARS-WG از شاخص‌های خطاسنجی میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب بهره‌وری نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد؛ نتایج مطالعه ضمن تایید کارایی مدل، نشان داد برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰، افزایش در متوسط دمای سالانه براساس سه سناریوی نامبرده رخ خواهد داد. همچنین میانگین ماهانه بارش تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، کاهش را پیش‌بینی می‌کند. در نهایت با توجه به داده‌های پیش‌بینی شده اقلیمی در شبیه‌سازی رواناب، در حوضه مزلقان، افزایش رواناب پیش‌بینی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، رواناب سطحی، رودخانه مزلقان، مدل SWAT، LARS-WG

مقدمه

اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که بشر در عصر حاضر با آن روبرو است، لذا سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌ها باید توان ظرفیت‌سازی و انعطاف‌پذیری برای رویارویی با وقوع پدیده‌هایی نظیر تغییر اقلیم که ابعاد و اثرات زیان‌بار آن‌ها گسترده و همراه با عدم قطعیت‌های فراوان است را داشته باشند (حیدری تاشه کبود و حسینی، ۱۳۹۸).

محدودیت منابع آب و توزیع نامتجانس آن در مناطق مختلف ایران سبب شده است که در مقایسه با بسیاری از کشورها، نسبت به پدیده تغییر اقلیم آسیب‌پذیرتر باشد؛ زیرا ارتباط تنگاتنگی بین چرخه هیدرولوژی و سیستم اقلیمی وجود دارد و هر تغییری در اقلیم، روی پارامترهای هیدرولوژیکی اثر می‌گذارد. تغییر اقلیم عبارت است از تغییرات رفتار آب و هوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلند مدت از اطلاعات مشاهده یا ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است. در سال‌های اخیر با تدوین سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، مدل‌های گردش عمومی با فرضیات مختلف انتشار اجرا شده‌اند تا وضعیت اقلیمی دهه‌های آتی را پیش‌بینی کنند. طبق رویکرد جدید در گزارش پنجم

رواناب، آبدی رودخانه‌ها، آب‌های زیرزمینی، شدت سیلاب و خشکی، همگی متاثر از بارش و دما که از مهم‌ترین عناصر اقلیمی هستند، می‌باشند. آگاهی از میزان حجم و شدت رواناب ناشی از نزولات جوی و تغییرات کمی و کیفی آن در زمان و مناطق مختلف از نیازهای اساسی برنامه‌ریزان و مدیران منابع آب است، به طوری که در مسائل مربوط به مدیریت منابع آب، کنترل آلودگی، طرح‌های مهندسی آب، مصارف کشاورزی، خسارات ناشی از سیل و حفظ و بهره‌وری مناسب از منابع طبیعی ضروری است. نظر به اینکه تغییر

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

(* نویسنده مسئول: Email:Lzakeriiau@gmail.com)

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.11.1

مکانی انجام دهد. از سال ۱۹۹۰ مطالعات متعدد تلاش کرده‌اند عدم قطعیت ناشی از منابع مختلف را در پژوهش‌های هیدرولوژیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار دهند. همچنین مدل LARS-WG^۱ یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های آب و هوایی است که برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط اقلیم حال و آینده به کار می‌رود. در این راستا با توجه به اهمیت موضوع و به منظور کنترل آن، تحقیقاتی با مدل SWAT صورت گرفته که در این پژوهش به بررسی پاره‌ای از مطالعات داخلی و خارجی پرداخته شده است.

پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۶)، در بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوزه آبریز تویسرکان همدان با مدل LARS-WG به این نتیجه رسیدند که در اثر کاهش بارش ناشی از تغییرات اقلیمی حجم رواناب خروجی هر یک از زیرحوزه‌های حوزه آبریز تویسرکان کاهش خواهد یافت. نادری و همکاران (۱۳۹۶)، در پژوهشی با عنوان "بررسی تاثیر تغییر کاربری اراضی و اقلیم بر رواناب حوضه آبخیز با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه گرین)" گزارش کردند که کاهش میزان رواناب در دوره ۲۰۴۲ تا ۲۰۵۰ نسبت به دوره‌ی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ در اثر تغییر اقلیم (بارش و دما) بیشتر از میزان کاهش است که در اثر تغییر کاربری اراضی ایجاد می‌شود. بحری و زاهدی (۱۳۹۵)، در مطالعه‌ای به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی جریان سطحی رودخانه حوضه آبخیز ارازکوسه^۲ پرداختند؛ نرم افزار مورد استفاده، LARS-WG و SWAT بود. نتایج نشان دهنده افزایش متوسط دمای سالانه در دوره‌های نامبرده بود. همچنین بارش در سال‌های ابتدایی و میانی قرن با افزایش و در سال‌های انتهایی قرن با کاهش روبرو خواهد بود. ساراف و رگولوار، در بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی در تولید رواناب در حوضه رودخانه گوداواری، هند گزارش کردند که کاهش رواناب در طی سال‌های ۲۰۲۰ ممکن است. به علت افزایش زیاد حداقل درجه حرارت صورت پذیرد (Saraf and Regulwar, 2018). واگش و همکاران، در مطالعه‌ای به "تاثیر تغییرات اقلیمی در تولید رواناب: حوضه رودخانه ریفت دره اتیوپی" با مدل SWAT پرداختند؛ در نهایت پیش‌بینی بارش رواناب برای حوضه حاکی از این بود که حوضه افزایش شدید بارش و دما را پیش‌رو خواهد داشت (Wagesh et al., 2013). مرور مطالعات نشان می‌دهد بررسی نتایج تغییر اقلیم حاکی از آن است که بر تبخیر و تعرق افزایش یافته است. و بر رواناب اثر خواهد داشت. اکثر مطالعات داخلی و خارجی، مدل LARS-WG برای بررسی تغییر اقلیم انتخاب کرده بودند که نتایج رضایت‌بخش بود.

بررسی تاثیر پدیده‌ی تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و رواناب سطحی حوضه‌ی آبخیز می‌تواند به مدیریت چالش‌های منابع

هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC AR5)^۱ که تحت چهار سناریو ارائه شده است، میانگین دمای مناطق مختلف کره زمین تحت هر چهار سناریو RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 و RCP8.5 بسته به منطقه جغرافیایی با شدت‌های متفاوت افزایش خواهد یافت (چراغلی زاده و همکاران، ۱۳۹۹). از آنجا که میزان درجه حرارت مؤلفه‌های اقلیمی در اندرکنش متقابل قرار دارد، انتظار می‌رود که تغییرات قابل ملاحظه‌ای در آب و هوای جهانی رخ دهد (IPCC, 2007). گرم شدن کره زمین منجر به تغییر بیلان تابش از سطح زمین، گردش اتمسفر، تغییر توزیع مکانی و زمانی و شدت بارش شده و به چرخش بخار آب سرعت می‌بخشد، همچنین ویژگی‌های هیدرولوژیکی از قبیل تبخیر، رواناب، آب و خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Kundzewicz et al., 2007; Merritt et al., 2006). سازگاری با تغییر اقلیم یکی از اجزای برنامه‌ریزی در توسعه‌ی زیربنایی و پذیرفته شده در تمام نهادهای بین‌المللی است. این سازگاری شامل پیش‌بینی دقیق از وضعیت آینده نیز خواهد بود. منابع آب کشور از جمله بخش‌هایی است که به‌طور جدی از تغییرات اقلیمی متأثر خواهد شد و حوزه‌های وسیعی از آن شامل منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، شبکه‌های آب و فاضلاب، شبکه‌های آبرسانی شهری و سازه‌های مرتبط با بخش آب با پیامدهای قابل ملاحظه‌ای روبه‌رو خواهند شد (شهوری و همکاران، ۱۳۹۸). نظر به تأثیر تغییرات فوق بر برنامه‌ریزی‌های منابع آب، شبیه‌سازی جریان رودخانه برای آگاهی از آورد رودخانه در دوره‌های زمانی آینده از مسائل مهم و کاربردی در مدیریت منابع آب است و می‌تواند در زمینه‌های مدیریتی راهگشای مشکل سیلاب، فرسایش خاک و طراحی کلیه پروژه‌های هیدرولیکی باشد که معمولاً با توسل به مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی که با بهره‌مندی از روش‌های مختلف نظری میزان جریان را برآورد می‌کنند صورت می‌گیرد (درواری و سلیمانی، ۱۳۸۶). انتخاب یک مدل از بین مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف که بتواند تأثیرات تغییر اقلیم را با توجه به شرایط مختلف مدیریت کشاورزی و منابع آبی بر روی سیستم منابع آب یک منطقه شبیه‌سازی کند، تأثیر بسزایی در ارزیابی اثرات این پدیده و تصمیم‌گیری بهتر سازمان‌ها و ذینفعان مربوط دارد. بررسی تحقیقات انجام شده نشان داده است که مدل SWAT^۲ به دلایلی مانند بدون هزینه بودن و قابلیت شبیه‌سازی همزمان اثرات متقابل متغیرهای هیدرولوژیکی و مدیریت کشاورزی مانند رواناب، تبخیر و تعرق و آب‌های زیرزمینی و متغیرهای گیاهی مانند عملکرد در حوضه‌های پیچیده با شرایط کاربری اراضی و نوع خاک متنوع گزینه مناسبی می‌باشد (Neitsch et al., 2011). این مدل ضمن دارا بودن این امکانات، می‌تواند تحلیل‌های لازم را در محیط GIS به طور

1- Fifth Assessment Report IPCC (AR5,2014)

2- Soil and Water Assessment Tool

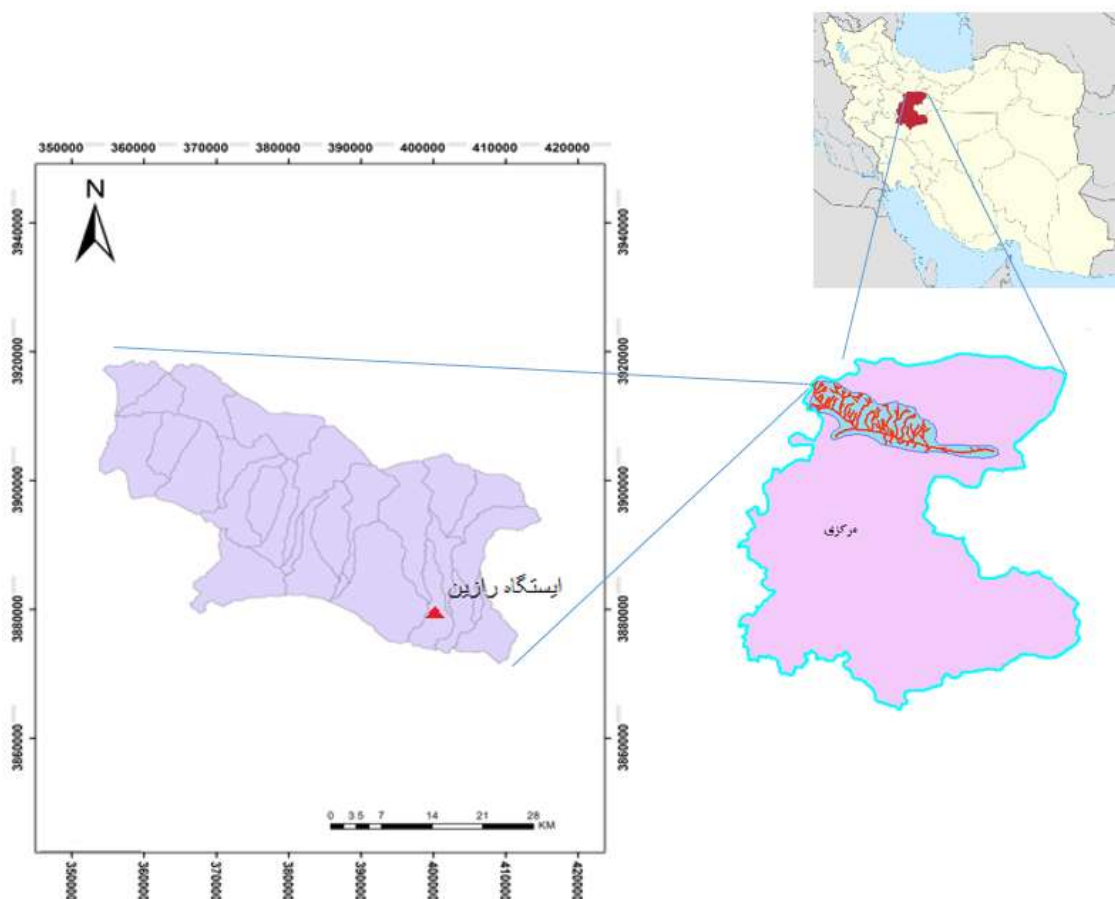
آبخیز مزلقان با اقلیم نیمه خشک در محدوده جغرافیایی ۱۷' تا ۵۰° طول شرقی و ۵۶' تا ۳۳° عرض شمالی و ۱۰' تا ۵۰° طول شرقی و ۲۵' و ۳۵° عرض شمالی با مساحت ۱۴۲۹ کیلومتر مربع در شمال شرق استان مرکزی واقع شده است. متوسط بارندگی سالانه این حوزه ۲۷۱/۱ میلیمتر و متوسط آبردهی سالانه آن ۱/۳۱ مترمکعب بر ثانیه است. رودخانه مزلقان از کوه‌های قاراغان سرچشمه گرفته و در بخش نوبران شهرستان ساوه جریان دارد. این رودخانه یکی از ریزابه‌های رودخانه قره‌چای است و در ۱۷ کیلومتری پایین دست سد ساوه، رودخانه مزلقان به رودخانه قره‌چای می‌پیوندد. این رودخانه از غرب به شرق جریان دارد. بر اساس اطلاعات نقشه کاربری اراضی، بیشترین کاربری حوزه، مسکونی، بیابان، محدوده نظامی و زمین‌های حاصلخیز است، و در مرتبه‌ی بعد به کشاورزی تعلق دارد است. با توجه به نقشه خاک محدوده مورد مطالعه، بیشترین مساحت حوزه به به اینسپتی سول و اریدسول اختصاص دارد.

آب و برنامه‌ریزی صحیح و مدیریت حوزه‌ی آبخیز کمک نماید. مطالعات منطقه‌ای تاثیرات تغییرات اقلیمی با توجه به نوسان پارامترهای اقلیمی از یک منطقه به منطقه دیگر کاملاً ضروری است و از طرفی سامانه‌های اقلیمی مختلف نسبت به تغییرات یکسان، واکنش‌های متفاوتی را نشان می‌دهند (شریفی و همکاران، ۱۳۹۷). مرور مطالعات حاکی رضایت بخش بودن نتایج مدل LARS-WG در بررسی تغییر اقلیم است و برای بررسی این پدیده، مناسب است؛ همچنین بررسی مطالعات تغییر اقلیم نشان دهنده ائدرگذاری آن بر بارش، دما و رواناب است. نظر به اهمیت این مساله، بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب سطحی حوزه رودخانه مزلقان با مدل SWAT، هدف و موضوع پژوهش حاضر است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

حوزه مورد مطالعه این پژوهش، رودخانه مزلقان است؛ حوزه



شکل ۱- نقشه موقعیت مکانی رودخانه مزلقان

سناریو و مدل اقلیمی

از آنجا که پیش‌بینی وضعیت اقلیم آینده تحت پدیده تغییر اقلیم به طور قطعی ممکن نمی‌باشد، راه‌حل جایگزین استفاده از سناریوهای اقلیمی می‌باشد. گام نخست در مطالعات تغییر اقلیم، انتخاب مدل‌های اقلیمی مناسب منطقه از میان مجموعه مدل‌های پیشنهادی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، جهت اخذ داده‌های اقلیمی تحت سناریوهای انتخابی است (قهرمان و همکاران، ۲۰۱۵).

در حال حاضر از روش‌های مختلفی برای تولید سناریوی اقلیمی در دوره‌های آتی استفاده می‌شود. این روش‌ها عبارتند از تولید سناریوی مصنوعی، استفاده از داده‌های گذشته متغیر اقلیمی منطقه و استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو^۱ که در این پژوهش، مدل گردش عمومی جو (AOGCM)، مدنظر است. در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید این سناریوها مدل‌های AOGCM می‌باشد. این مدل‌ها بر پایه قوانین فیزیکی بوده که به وسیله روابط ریاضی در یک شبکه سه بعدی در سطح کره زمین حل می‌شوند. در تمام این مدل‌ها هشت متغیر سطحی اقلیمی شامل میزان بارندگی، میانگین فشار سطح دریا، تابش خورشیدی، دمای میانگین، دمای نقطه شبنم، دمای هوای حداقل، دمای هوای حداکثر و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوهای مختلف انتشار شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین متغیرهای دیگری شامل محدوده تغییرات دمای روزانه، فشار بخار، واریانس دمای روزانه و بارندگی نیز تحت بعضی از مدل‌ها اجرا شده‌اند. و از خروجی مدل CanESM2 که از چهارمین نسل از مدل‌های آب و هوایی است، استفاده شده است. که توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب و هوای کانادا زیر نظر سازمان محیط زیست این کشور توسعه یافته است. در این مدل کل سطح زمین به صورت ۶۴*۱۲۸ سلول، شبکه‌بندی شده است که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

هیات بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود (AR5) از سناریوهای جدید RCP به عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. سناریوی جدید انتشار دارای چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 می‌باشد که بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند.

– **سناریوی انتشار RCP2.6:** این سناریو توسط تیم مدل‌سازی IMAGE از موسسه ارزیابی‌های محیطی هلند طراحی شده است. این سناریو دربرگیرنده کمترین نرخ افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن است. مطابق این سناریو واداشت تابشی

خاک اینسپتی سول جوان است. خاک اریدسول خاک مناطق خشک و بیابانی با تجمع آهک و لایه‌های نمک می‌باشد. این خاک به مقدار کافی باران دریافت نمی‌کند که بتوان به صورت عادی در آن کشاورزی انجام داد. لذا باتوجه به نوع خاک و جذب ضعیف آن و کاربری منطقه که غالب مسکونی و بیابان و کشاورزی است، می‌توان احتمال افزایش در تبخیر و تعرق، دما و رواناب را در محدوده پیش‌بینی کرد.

روش تحقیق

در این پژوهش به منظور ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه آبخیز مزلقان، پس از واسنجی مدل هیدرولوژیکی ارزیابی آب و خاک SWAT و مدل اقلیمی LARS-WG با شرایط منطقه مطالعاتی، کارایی آن‌ها در بازتولید داده‌های گذشته و پیش‌بینی دوره آبی و شبیه‌سازی حوضه آبخیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در پژوهش حاضر برای بررسی تغییرات اقلیمی ایستگاه رازین ورودی‌های مدل لارس شامل: دمای حداقل و حداکثر، بارندگی و تابش یا ساعت آفتابی برای دوره ۲۰۱۵-۱۹۹۷ بودند که به صورت روزانه برای یک ایستگاه هواشناسی منطقه طبق فرمت مدل تهیه شده و به مدل معرفی گردیدند. همچنین فایل دیگری شامل مشخصات جغرافیایی هر ایستگاه تهیه شد که شامل طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه مورد مطالعه بود.

ارزیابی مدل با شاخص‌های خطاسنجی میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب بهره‌وری نوسان-ساتکلیف (NSE) صورت گرفت.

پس از اطمینان از قابلیت مدل LARS-WG در تولید داده‌های اقلیمی ایستگاه مطالعاتی، این مدل جهت ریزمقیاس‌نمایی CanESM2 تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 اجرا شد. پس از اجرای مدل و تولید مقادیر روزانه پارامترهای بارش، دمای کمینه و بیشینه برای ایستگاه رازین، پارامترهای مذکور مورد تجربه و تحلیل قرار گرفته و شرایط اقلیمی دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) پیش‌بینی گردید.

باتوجه به هدف مقاله جهت بررسی اثر تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه آبخیز مزلقان، پس از تولید مقادیر روزانه پارامترهای اقلیمی، این مقادیر به مدل SWAT که در مرحله قبل واسنجی و اعتبارسنجی شده بود، وارد شده و وضعیت آینده منطقه مطالعاتی پیش‌بینی شد. با مقایسه مقادیر دبی در دوره مشاهداتی و آینده، تغییرات هیدرولوژیکی حوضه مزلقان، مورد مطالعه قرار گرفت. که در ذیل به تشریح به آن پرداخته شده است.

1- Atmosphere- Ocean General Circulation Model (AOGCM)

به این سطح واداشت تابشی، بایستی گازهای گلخانه‌ای به میزان قابل توجهی کاهش یابد.

در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ وات بر مربع رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. برای رسیدن

جدول ۱- مشخصات مدل CanESM2 (مختصات ایرادی ندارد)

دقت مکانی داده‌های اتمسفری		دقت مکانی داده‌های اقیانوسی	
مدل	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)
CanESM2	۲/۲۹۰۶	۲/۸۱۲۵	۱/۱۴۰۷ و ۱/۹۳۰۳

دمای حداکثر و حداقل، تابش خورشیدی و ساعات آفتابی توزیع نیمه تجربی جداگانه‌ای در نظر می‌گیرد. در مدل فرض بر این است که دما دارای توزیع نرمال بوده و متوسط و انحراف معیار دمای روزانه مطابق با سای فوریه محدود تغییر می‌کند. برای دماهای حداکثر و حداقل، فرض می‌شود که خودهمبستگی زمانی در طول سال برای یک ایستگاه معین به صورت ثابت باشد. برای تابش خورشیدی نیاز، توزیع‌های نیمه تجربی با بازه‌های زمانی مساوی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شاهین رخسار و همکاران، ۱۳۹۸).

مدل هیدرولوژی

در این پژوهش از نسخه ۲۰۱۲ نرم افزار SWAT استفاده شد. مدل SWAT یک مدل نیمه توزیعی بوده که برای شبیه‌سازی حوضه آبریز به صورت پیوسته عمل می‌کند که توسط آرنولد و همکارانش در سال ۱۹۹۸ توسعه یافته است و برای پیش‌بینی اثر روش‌های مدیریتی متفاوت زمین بر روی جریان، رسوب، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌های زراعی با خاک و کاربری اراضی متغیر برای بازه‌های زمانی طولانی توسعه یافته است (ایمانی امیرآباد و همکاران، ۱۳۹۶). در این راستا با استفاده از نرم‌افزار GIS نسخه ۱۰.۴، DEM و آبراهه‌ها و مشخصات شبکه رودخانه‌ای حوزه استخراج گشت. سپس از روی نقشه رقومی ارتفاع، حوضه آبخیز به تعدادی زیرحوضه تقسیم شد. و بر مبنای نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و شیب، زیرحوضه‌ها نیز به واحدهای کوچکتری تقسیم می‌شوند که به هر کدام از این واحدها یک HRU^۱ (واحد هیدرولوژیک) می‌گویند. این واحدها بایستی تا حد امکان از نظر هیدرولوژیکی مشابه باشند. در واقع باید در هر واحد هیدرولوژیکی، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، پوشش و کاربری اراضی تغییرات چشمگیری نداشته باشند (Neitch et al. 2011).

چرخه هیدرولوژی که به وسیله مدل SWAT شبیه‌سازی می‌شود، بر پایه رابطه بیلان آبی است:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

که در آن SW_t مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0 مقدار

سناریوی RCP4.5: سناریوی RCP4.5 توسط گروه مدلسازی MiniCAM طراحی شده است و در آن واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر متر مربع ثابت می‌ماند.

سناریوی انتشار RCP6: سناریوی انتشار RCP6 توسط گروه مدلسازی AIM در موسسه ملی مطالعات ژاپن طراحی گردید. در این سناریو واداشت تابشی بعد از سال ۲۱۰۰ به دلیل استفاده از فناوری‌های جدید و سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای ثابت می‌ماند.

سناریوی RCP8.5: بدون اتخاذ هیچگونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب و هوای کره زمین در خط سیر سناریوی انتشار RCP8.5 پیش خواهد رفت. به طوری که ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد. در این هنگام غلظت دی اکسید کربن به ۱۰۰۰ ppm رسیده است و همچنان روند افزایشی خواهد داشت. این سناریو توسط تیم مدلسازی MESSAGE و موسسه IIASA به سرپرستی پروفیسور کیوان ریاحی در موسسه بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی IIASA اتریش توسعه و طراحی شد که وجه مشخصه آن روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است.

ریز مقیاس نمایی

در این تحقیق برای کوچک مقیاس کردن داده‌های مدل CanESM2 از مدل ریز مقیاس LARS-WG استفاده شده است که از جمله روش‌های آماری ریزمقیاس نمایی است. LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های آب و هوایی است که برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط اقلیم حال و آینده به کار می‌رود. در این مدل داده‌های بارش روزانه در هرماه با استفاده از زنجیره مارکوف مرتبه اول مورد بررسی و از داده‌های تحلیل شده به منظور تعیین مشخصات آماری نظیر تعداد روزهای خشک و تر، میانگین و توزیع بارش‌های روزانه در هرماه از سال استفاده می‌شوند. مدل LARS-WG برای هر یک از متغیرهای

بار اجرای مدل یک پارامتر تغییر می‌کند و بقیه ثابت می‌مانند و اثر آن تغییر بر تابع هدف، حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند. پارامترهایی که برای آنالیز حساسیت در منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد عبارت بودند از: شماره منحنی SCS (CN2)، ثابت تخلیه آب زیرزمینی (V_ALPHA_BF)، زمان تاخیر آب زیرزمینی (V_GW_DELAY)، حداقل مقدار ذخیره آب لازم برای رویداد جریان پایه (V_GWQMN)، ظرفیت ذخیره آب قابل دسترس (r_SOL_AWC)، ضریب نفوذ آبخوان (V_RCHRGP_DP)، طول متوسط شیب (V_SLSUBBSN)، ضریب تأخیر رواناب سطح (r_SURLAG)، فاکتور جبران تبخیر از سطح خاک (V_EPCO)، فاکتور تاخیر دمای بارش برف (V_TIMP)، دمای ذوب توده برف (V_SMTMP)، متوسط دمای هوا برای بارش برف (V_SFTMP)، حداکثر میزان ذوب برف (V_SMFMN)، ضریب مانینگ کانال (r_CH_N2)، فاکتور جبران تبخیر از سطح خاک (V_ESCO) و هدایت هیدرولیکی کانال (r_CH_K2).

در سال‌های اخیر بسته نرم‌افزاری به نام SWAT-CUP توسعه یافت که به وسیله آن امکان واسنجی مدل با استفاده از روش‌های واسنجی خودکار شامل PSO، MCMC، GLUE، SUFI2 و Parasol فراهم می‌آید. این بسته نرم‌افزاری امروزه توسط بسیاری از کاربران برای واسنجی به کار می‌رود (بیات و همکاران، ۱۳۹۷). لذا در این پژوهش، واسنجی و اعتبارسنجی مدل با نرم‌افزار SWAT-CUP با الگوریتم SUFI-2 انجام گرفت. در این مرحله بایستی به دفعات مختلف اقدام به اجرای مدل نموده و هر بار با توجه به شاخص‌ها و معیارهای آماری، نتایج را مورد ارزیابی قرار داد. در صورت رضایت بخش نبودن نتایج شبیه‌سازی، بایستی پارامترهای موجود در مدل بهینه شده و مجدداً مدل را اجرا نمود تا جریان شبیه‌سازی شده از لحاظ آماری دارای دقت مناسب باشد. در تحقیق حاضر نیز بعد از اجرای مدل در دفعات متعدد، هر بار پارامترهای حساس تغییر داده شد. و در نهایت بعد از بهینه شدن پارامترها، برنامه SUFI2 اجرا و برای منطقه مطالعاتی کالیبره شد.

برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی دبی رواناب از شاخص‌های نش-ساتکلیف، R^2 ، p-factor و r-factor استفاده شد. روش SUFI-2 تمام عدم قطعیت‌ها را در مدلسازی شامل عدم قطعیت ورودی‌ها، مدل مفهومی، پارامترها و داده‌های اندازه‌گیری شده را در نظر می‌گیرد. سنجش میزان عدم قطعیت که دربرگیرنده تمام موارد اشاره شده می‌باشد، توسط معیاری به نام P-Factor که بیانگر درصد داده‌های مشاهداتی که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد (95PPU) قرار می‌گیرند، است. از آنجایی که اثر تمام عوامل عدم

اولیه خاک (میلی‌متر)، R_{day} مقدار بارندگی در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i ام (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آبی که از پروفیل خاک به ناحیه غیراشباع در روز i ام وارد می‌شود (میلی‌متر)، و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز i ام (میلی‌متر)، است.

در مدل SWAT دو روش برای تخمین رواناب سطحی وجود دارد: الف) روش شماره منحنی و ب) رابطه نفوذ گرین و آمپت. روش شماره منحنی، تجربی است و به وسیله سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) برای تخمین رواناب در حوضه با کاربری اراضی و خاک‌های مختلف توسعه پیدا کرده است. در این پژوهش برای محاسبه روش نفوذپذیری شماره منحنی (CN¹) بهره گرفته شده است. رابطه SCS رابطه اصلی روش شماره منحنی می‌باشد و به صورت معادله زیر بیان می‌گردد:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} - 0.8S)} \quad (2)$$

که در این رابطه، Q_{surf} رواناب سطحی (میلی‌متر)، R_{day} عمق بارش روزانه (میلی‌متر)، S پارامتر نگهداشت رطوبت (میلی‌متر)، پارامتر S به صورت مکانی و زمانی تغییر پیدا می‌کند. به صورت مکانی با تغییرات خاک، کاربری اراضی، نحوه مدیریت و شیب منطقه و به صورت زمانی با تغییرات آب موجود در خاک تغییر می‌یابد پارامتر S به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

که در آن: CN ماره منحنی مربوط به حوضه می‌باشد که برای هر بارندگی فرق می‌کند و به ویژگی‌های فیزیکی حوضه بستگی دارد و S پارامتر نگهداشت رطوبت (میلی‌متر) می‌باشد.

بهبود پردازش شبیه‌سازی مدل‌ها لازم است به سمتی سوق داده شود که کلیه منابع تولید خطا و همچنین منشاء آن در روند مدلسازی و یا پیش‌بینی پوشش داده شوند. پارامترهای مدل یکی از منابع تولید خطا است که عدم اطلاع از صحت مقادیر آن‌ها سبب بروز خطا در نتایج شبیه‌سازی می‌شود (مهرپرور و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به زیاد بودن پارامترهای ورودی، برای شناخت بهتر مدل و انجام موفق واسنجی، لازم است برای پارامترهای مدل آنالیز حساسیت انجام شود. هدف اصلی از آنالیز حساسیت تعیین ورودی‌هایی است که مشارکت بیشتری در تغییر خروجی دارند و اینکه کدام پارامتر همبستگی بیشتری با خروجی دارد. با انجام آنالیز حساسیت می‌توان پارامترهای مهم و حساس را شناخته و با تمرکز بر روی آن‌ها واسنجی مدل را سریع‌تر انجام داد. برای انجام آنالیز حساسیت روش "یک پارامتر در هر بار" (OAT) مورد استفاده قرار گرفت که متعارف‌ترین روش برای این کار می‌باشد. در روش OAT در هر

دو مجموعه داده چه میزان خطا وجود دارد. به عبارت دیگر، خطای جذر میانگین مربعات عدد پیش‌بینی شده و عددی که به صورت تجربی به دست آمده را با هم مقایسه می‌کند. هر چه خطای جذر میانگین مربعات کمتر باشد، بهتر است.

نحوه محاسبه خطای ریشه میانگین مربعات، در رابطه ذیل آورده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NQ} (q_o(t) - q_s(t))^2}{NQ}} \quad (8)$$

هر چه مقادیر ضریب تاثیر (NAS) و ضریب تعیین (R^2) به یک نزدیکتر باشند، دبی‌های شبیه‌سازی شده از دقت مطلوب‌تری برخوردار خواهند بود.

میانگین خطای مطلق، متوسط مقدار مطلق خطاها را نشان می‌دهد. این معیار آماری از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i^{sim} - Q_i^{obs}| \quad (9)$$

بر اساس روش ذکر شده، مراحل انجام تحقیق در شکل ۲ آورده شده است.

نتایج و بحث

اجرای اولیه مدل SWAT: با اجرای مدل SWAT نقشه زیر

حوزه‌ها براساس وضعیت آبراهه‌های حوزه، تولید شد. به طور کلی نتایج حاصل از اولین اجرای مدل SWAT و شاخص‌های ارزیابی دقت شبیه‌سازی این مدل را نشان داد که مدل SWAT در اولین اجرا با مقادیر اولیه پارامترها دارای دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی دبی رواناب حوزه آبخیز مزلقان نمی‌باشد و واسنجی مدل می‌تواند به بهبود نتایج و افزایش دقت شبیه‌سازی آن کمک کند.

واسنجی مدل: واسنجی مدل به صورت ماهانه و با استفاده از

برنامه SUFI2 انجام شد. پارامترهای مؤثر در تولید رواناب حوزه آبخیز شناسایی شد و به همراه محدوده مجاز تغییرات آن‌ها به مدل وارد شد. از آمار ۱۳ ساله اندازه‌گیری شده (2010-1998) دبی روزانه برای واسنجی مدل استفاده شد نتایج ارزیابی به صورت جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۳ هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی ماهیانه در دوره واسنجی (2010-1998) نشان داده شده است.

تعیین مقادیر بهینه پارامترهای حساس بعد از

واسنجی: همانطور که قبلاً اشاره شد، در این تحقیق به منظور واسنجی مدل از برنامه SUFI2 استفاده شد. در جدول ۳ مقادیر پارامترهای حساس در بهترین حالت واسنجی آورده شده است.

قطعیت در متغیر اندازه‌گیری شده منعکس می‌شوند، P-Factor معیار مناسبی برای سنجش قدرت آنالیز عدم قطعیت انجام شده می‌باشد (عباسپور و همکاران، ۱۳۸۶).

نظر به اینکه روش SUFI2 روش استوکاستیکی است، از باندهای عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد و همچنین از فاکتوری به نام R-Factor که به نوعی بیانگر متوسط فاصله بین باند بالا و پایین می‌باشد، برای برآورد کیفیت نتایج حاصل از مدلسازی استفاده می‌شود و به عبارت دیگر معیاری برای برآورد نزدیکی فاصله بین باندهای بالا و پایین می‌باشد:

$$\bar{R}_x = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^k (X_U - X_L)_i \quad (4)$$

طبیعتاً شرایط ایده‌آل زمانی است که فاصله بین باند بالا (X_U) و پایین (X_L) تا حد امکان به هم نزدیک و \bar{R}_x به صفر نزدیک شود. اگرچه به علت وجود خطا در اندازه‌گیری و وجود خطا در اندازه‌گیری و وجود عدم قطعیت‌های زیاد در مدل مقادیر ایده‌آل برای \bar{R}_x به دست نخواهد آمد. مقدار معقول برای \bar{R}_x با پارامتری به نام R-factor محاسبه می‌شود که برابر است با:

$$R - factor = \frac{\bar{R}_x}{\sigma_x} \quad (5)$$

که در آن σ_x انحراف معیار مربوط به متغیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. در صورت امکان بهتر است که مقدار R-factor از یک کمتر باشد.

مقدار ضریب ناش-ساتکلیف بین یک تا منفی بینهایت تغییر می‌کند. مقدار بهینه این شاخص یک است. اگر میزان آن از ۰/۵ بیشتر باشد، مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است و در صورت منفی شدن آن بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشود و از متوسط مقادیر مشاهده‌ای استفاده شود. در این پژوهش از رابطه ۶ بهره گرفته شده است.

$$NES = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NQ} (q_o(t) - q_s(t))^2}{\sum_{i=1}^{NQ} (q_o(t) - q_o(mean))^2} \quad (6)$$

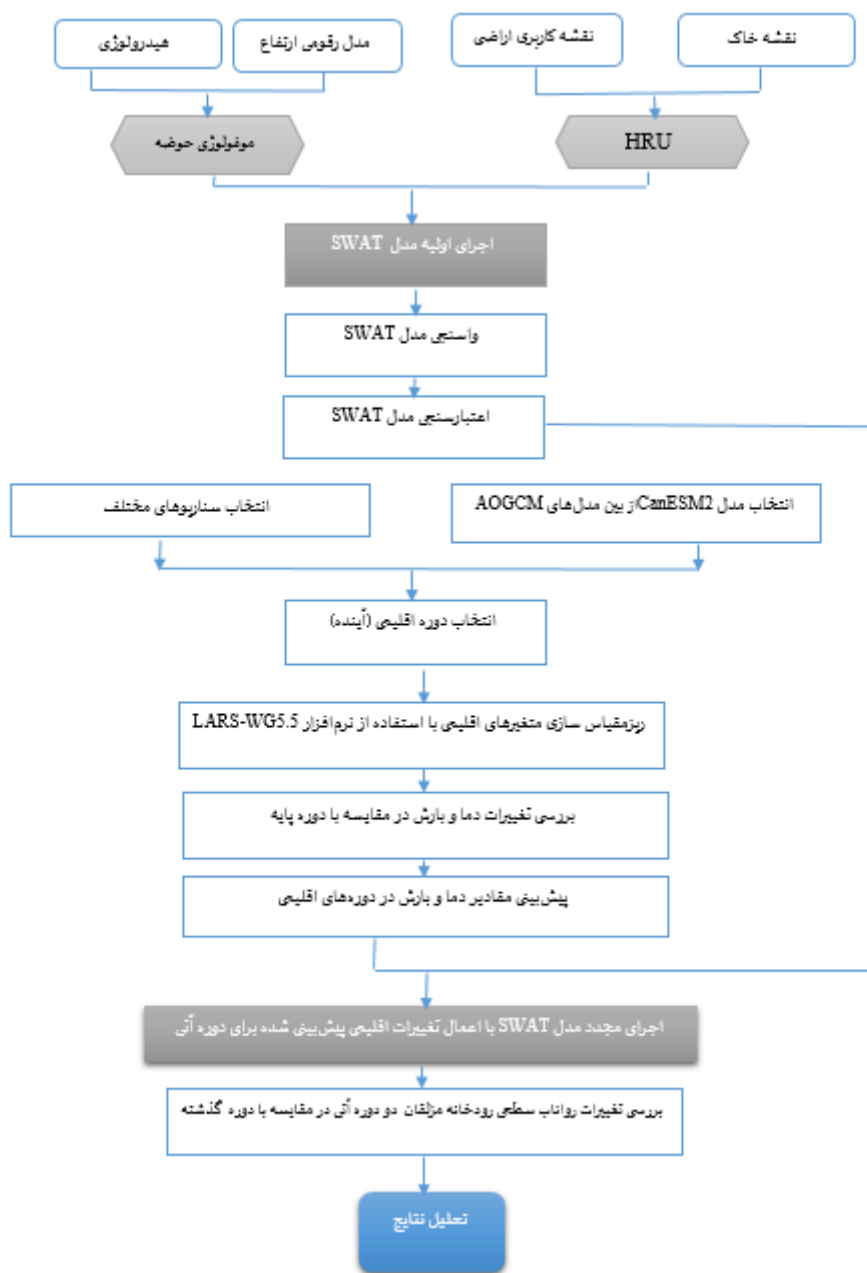
که $q_o(t)$: دبی مشاهده شده $q_s(t)$: دبی شبیه‌سازی شده $q_o(mean)$: میانگین مقدار مشاهده شده، $q_s(mean)$: میانگین مقدار شبیه‌سازی شده NQ : تعداد عرض‌های هیدروگراف.

نحوه محاسبه ضریب تعیین (R^2) در این پژوهش در رابطه ذیل آمده است:

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})}{Q_{obs} \times Q_{sim}} \right] \quad (7)$$

در این رابطه، Q داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و n برابر تعداد داده‌هاست. اندیس sim بیانگر داده‌های شبیه‌سازی شده و اندیس obs بیانگر داده‌های مشاهده‌ای است. مقدار R^2 بیانگر ارتباط خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای بوده که مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است.

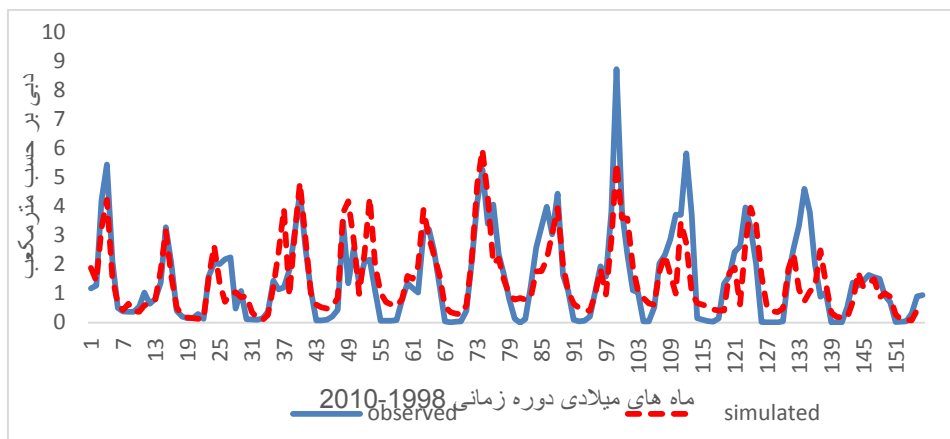
اعداد محاسبه شده برای خطای RMS بیانگر این است که بین



شکل ۲- روندنمای پژوهش

جدول ۲- ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی

شاخص	شبیه سازی دوره واسنجی
NS	۰/۶۰
R^2	۰/۶۱
p-factor	۰/۳۴
r-factor	۰/۰۹



شکل ۳- مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و محاسباتی در دوره واسنجی با پایه زمانی ماهانه ایستگاه رازین

جدول ۳- مقادیر بهینه پارامترهای حساس بعد از واسنجی برای منطقه مطالعاتی

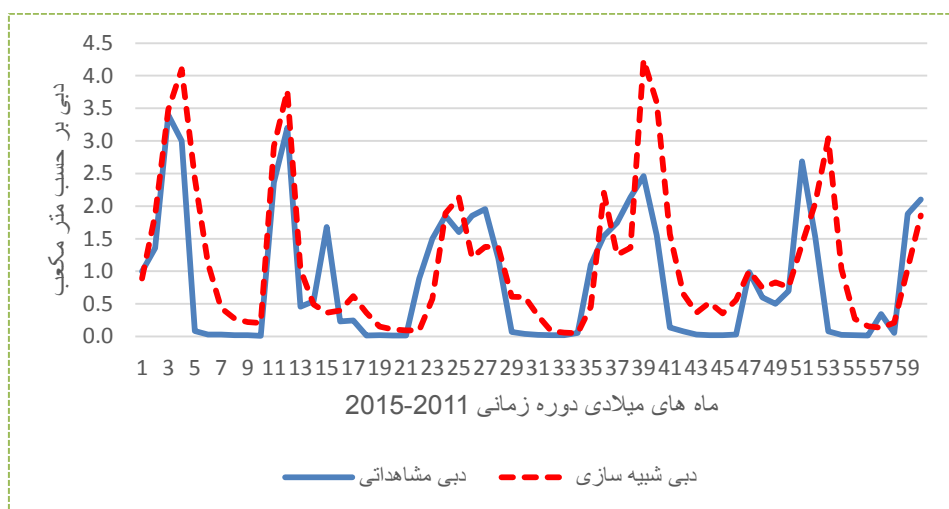
ردیف	نام پارامتر	واحد	حدود بهینه	حداقل	حداکثر
۱	V_GW_REVAP (ضریب تعیین نفوذ به سفره عمیق از سفره کم عمق)	-	۰/۰۱۱۵۹۲	۰/۰۲	۰/۲
۲	V_ALPHA_BF (ثابت تخلیه آب زیرزمینی)	روز	۰/۲۷۷۲۹۷	۰	۱
۳	CN2 (شماره منحنی SCS)	-	۰/۱۰۹۶۶۹	-۰/۲	۰/۲
۴	V_CH_N2 (ضریب مانینگ کانال)	-	۰/۰۰۶۵۴۰	-۰/۰۱	۰/۳
۵	V_CH_K2 (هدایت هیدرولیکی کانال)	میلی متر در ساعت	۶۶۱/۰۱۱۶۵۸	۰/۰۱	۵۰۰
۶	r_SOL_K (هدایت هیدرولیکی کانال)	میلی متر در ساعت	۰/۲۰۰۵۸۷	۲۰۰۰	۰
۷	r_SOL_BD (ضریب آلودگی خاک مرطوب)	-	۰/۷۱۷۲۹۱	۰/۹	۲/۵
۸	V_SMTMP (دمای ذوب توده برف)	درجه سلسیوس	۰۹/۰۴۷۶۶۸	-۲۰	۲۰
۹	V_GWQMN (حداقل مقدار ذخیره آب لازم برای رویداد جریان پایه)	mmH2o	۴۱۲/۷۳۷۲۱۳	۰	۵۰۰۰
۱۰	V_ALPHA_BNK (ضریب α آب پایه برای ذخیره ساحلی کانال)	-	۰/۲۷۷۲۹۷	۰	۱
۱۱	V_GW_DELAY (زمان تاخیر آب زیرزمینی)	روز	۴۹۷ /۵۴۸۵۲۳	۰	۵۰۰

شده و این نتایج به عنوان نتایج نهایی اعتبار سنجی مدل در جدول ۴ ارائه شده است.

در شکل ۴ هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی (2011-2015)، نشان داده شده است. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که مدل زمان وقوع مقادیر دبی اوج و دبی‌های پایه را به خوبی مدل‌سازی نموده است اما مقادیر دبی اوج را بیشتر از مقادیر واقعی برآورد نموده است، که متوسط دبی ماهانه شبیه‌سازی شده در طول دوره‌های واسنجی و اعتبار سنجی نیز موید این مطلب است.

در جدول فوق V نشان‌دهنده روش Replace و r نشان‌دهنده روش Multiple می‌باشد. در روش Multiple، مقدار پارامتر در یک ارزش داده شده ضرب می‌گردد تا مقدار بهینه محاسبه شود اما در روش Replace، پارامتر موردنظر با ارزش داده شده جایگزین می‌گردد.

اعتبارسنجی مدل: بعد از مرحله واسنجی مدل، ارزیابی مدل نیز نتایج قابل قبولی را در پی داشت. در این مرحله با توجه به پارامترهای واسنجی بهینه شده برای منطقه مطالعاتی، با استفاده از باقیمانده آمار (2011-2015) اقدام به شبیه‌سازی جریان رودخانه



شکل ۴- مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در دوره اعتبارسنجی با پایه زمانی ماهانه

جدول ۴- ارزیابی کارایی مدل در مرحله اعتبارسنجی

شاخص	شبیه‌سازی دوره واسنجی
NS	۰/۵۸
R ²	۰/۵۸
p-factor	۰/۲۴
r-factor	۰/۰۹

میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب بهره‌وری نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد، با توجه به بالا بودن مقادیر نش-ساتکلیف و نزدیک بودن این مقادیر به یک و همچنین پایین بودن مقادیر میانگین خطای مطلق میانگین دمای حداکثر ماهیانه و میانگین دمای حداقل ماهیانه دقت بالای مدل‌سازی را برای پارامترهای دمای می‌رساند. مقدار آماره میانگین مجذور مربعات خطا و میانگین خطای مطلق برای دمای کمینه و بیشینه کمتر از مقدار برای بارش است این مسئله بیانگر قدرت بالای مدل WG-LARS در مدل کردن داده‌های دیدبانی شده دما نسبت به بارش است که این امر به علت ماهیت پارامتر دما می‌باشد که عنصری پیوسته است.

بر اساس در هیدروگراف‌ها و جداول بعد از انجام مراحل واسنجی و اعتبارسنجی ضریب نش-ساتکلیف به ترتیب برابر ۰/۶ و ۰/۵۸ به دست آمد که این ضرایب نشان دهنده نتیجه قابل قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی بیلان آبی می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی داده‌های تغییر اقلیم با مدل LARS-WG

نتایج بیان شده در جدول ۵ بیانگر این مطلب می‌باشند که داده‌های ایستگاه رازین میانگین بارش ماهیانه، میانگین دمای حداکثر ماهیانه و میانگین دمای حداقل ماهیانه مشاهده شده و تولید شده دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۱۵) از همبستگی معنی‌داری برخوردار می‌باشد. برای اطمینان از درستی واسنجی مدل از شاخص‌های خطاسنجی

جدول ۵- نتایج آماری‌های خطاشناسی متغیرهای هواشناسی مشاهداتی و مدل‌سازی ایستگاه رازین (۱۹۹۷-۲۰۱۵)

دمای حداقل			دمای حداکثر			بارش		
NASH	MAE	RMSE	NASH	MAE	RMSE	NASH	MAE	RMSE
۰/۸۹	۰/۲	۰/۲۳	۰/۹۹	۰/۲۱	۰/۳	۰/۹۴	۳	۳/۹

سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 نشان می‌دهد، که برای ایستگاه رازین برای ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر افزایش دما را پیش‌بینی می‌-

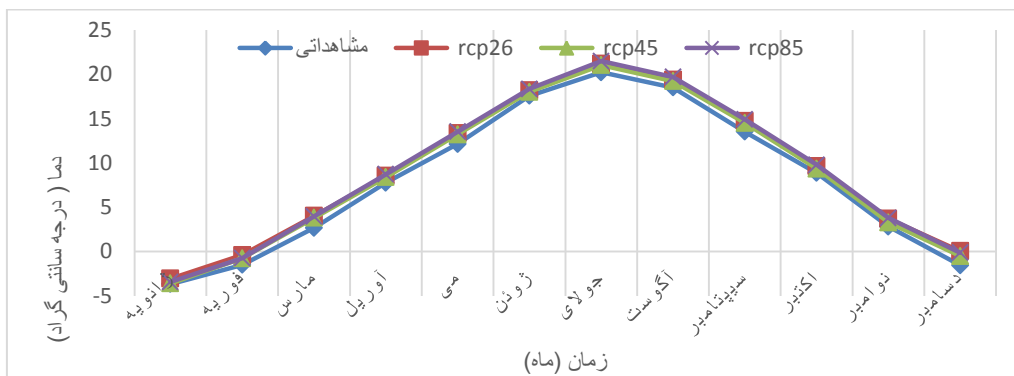
تغییرات اقلیم حوضه رودخانه مزلقان

دمای حداقل: مقایسه میانگین دمای حداقل ماهانه دوره مشاهداتی (۱۹۹۸-۲۰۱۷) و دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) حداقل تحت

کنند. میانگین سالانه دمای حداقل تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۰۹ و ۰/۱۳ درصد نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته است (جدول ۶ و شکل ۵).

جدول ۶- مقایسه میانگین دمای حداقل ماهانه دوره مشاهداتی و دوره آتی (سناریو واحد ندارد)

ماه	سناریوها			
	مشاهداتی	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
ژانویه	-۳/۶۷	-۳/۰۶	-۳/۵۹	-۳/۴۲
فوریه	-۱/۵	-۰/۳۹	-۰/۷۵	-۰/۷۴
مارس	۲/۶۷	۴/۰۲	۳/۸	۳/۹۷
آوریل	۷/۷۶	۸/۵۴	۸/۳۸	۸/۷۲
می	۱۲/۱۳	۱۳/۳۶	۱۳/۲۱	۱۳/۵۳
ژوئن	۱۷/۵۷	۱۸/۱۸	۱۸/۰۳	۱۸/۳۵
جولای	۲۰/۲۲	۲۱/۱۹	۲۱/۰۴	۲۱/۴۹
اگوست	۱۸/۵۱	۱۹/۳۸	۱۹/۲۳	۱۹/۷
سپتامبر	۱۳/۵۲	۱۴/۷۲	۱۴/۵۲	۱۴/۹
اکتبر	۸/۸۶	۹/۶۱	۹/۳۵	۹/۷۹
نوامبر	۲/۸۲	۳/۷۱	۳/۲۸	۳/۳۸
دسامبر	-۱/۵۵	-۰/۰۶	-۰/۵۱	-۰/۱۲



شکل ۵- نمودار دمای حداقل ماهانه مشاهداتی و دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ ایستگاه رازین

رازین را تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 نشان می‌دهد. ماه ژوئن، جولای، اکتبر و دسامبر برای سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و ماه ژانویه، مارس و آوریل برای سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 و RCP8.5 افزایش یافته و می، اگوست و نوامبر برای سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 کاهش یافته است. به طوری که میانگین ماهانه بارش تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 به ترتیب ۶ و ۱/۵ درصد افزایش و RCP8.5 ۴ درصد کاهش را پیش‌بینی می‌کند.

دمای حداکثر: شکل ۶ و جدول ۷ مقایسه میانگین دمای

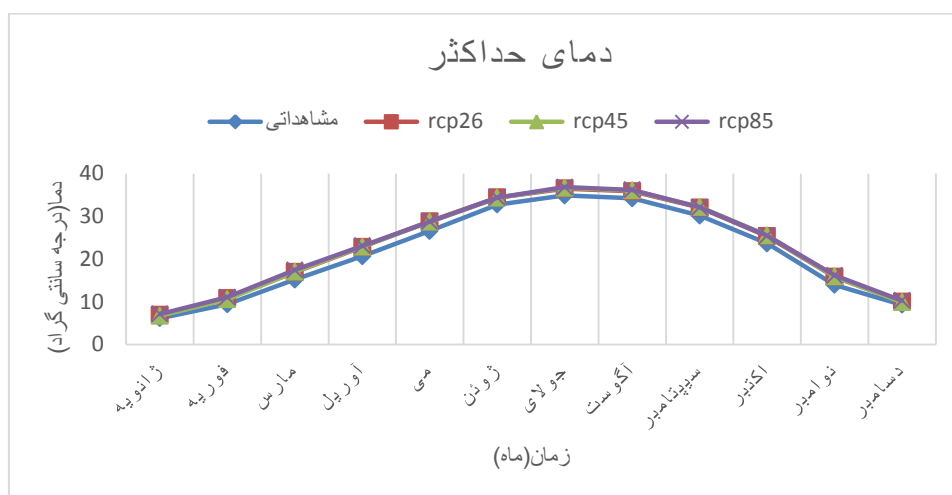
حداکثر ماهانه دوره مشاهداتی (۱۹۹۷-۲۰۱۵) و دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) را تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در ایستگاه رازین نشان می‌دهد. که برای ایستگاه رازین برای ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای، اگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر افزایش دما را پیش‌بینی می‌کنند. میانگین سالانه دمای حداکثر تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۰۷، ۰/۰۸ و ۰/۰۹ درصد نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته است.

تغییرات بارش: جدول ۸ و شکل ۷ مقایسه میانگین بارش

ماهانه دوره مشاهداتی و دوره شبیه‌سازی شده ۲۰۲۱-۲۰۴۰ ایستگاه

جدول ۷- مقایسه میانگین دمای حداکثر ماهانه دوره مشاهداتی و دوره آتی ایستگاه رازین

ماه	سناریوها		
	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6
مشاهداتی	۶/۱	۶/۷	۶/۹
ژانویه	۶/۱	۶/۷	۶/۹
فوریه	۹/۴	۱۰/۵۷	۱۰/۸
مارس	۱۵/۲	۱۷/۰۱	۱۶/۹
آوریل	۲۰/۶۵	۲۲/۸۷	۲۲/۸
می	۲۶/۵۷	۲۸/۶۸	۲۸/۸
ژوئن	۳۲/۷۲	۳۴/۳۱	۳۴/۳۶
جولای	۳۴/۸۶	۳۶/۶۶	۳۶/۴۸
آگوست	۳۴/۱۸	۳۶/۰۲	۳۵/۸۳
سپتامبر	۳۰/۱۳	۳۲/۱۸	۳۲/۰۲
اکتبر	۲۳/۶۳	۲۵/۴۹	۲۵/۳۲
نوامبر	۱۳/۹۴	۱۵/۸۷	۱۵/۸۱
دسامبر	۹/۲	۹/۸۹	۹/۹



شکل ۶- نمودار دمای حداکثر ماهانه مشاهداتی و دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ ایستگاه رازین

مدل سازی سناریوهای مختلف اقلیمی

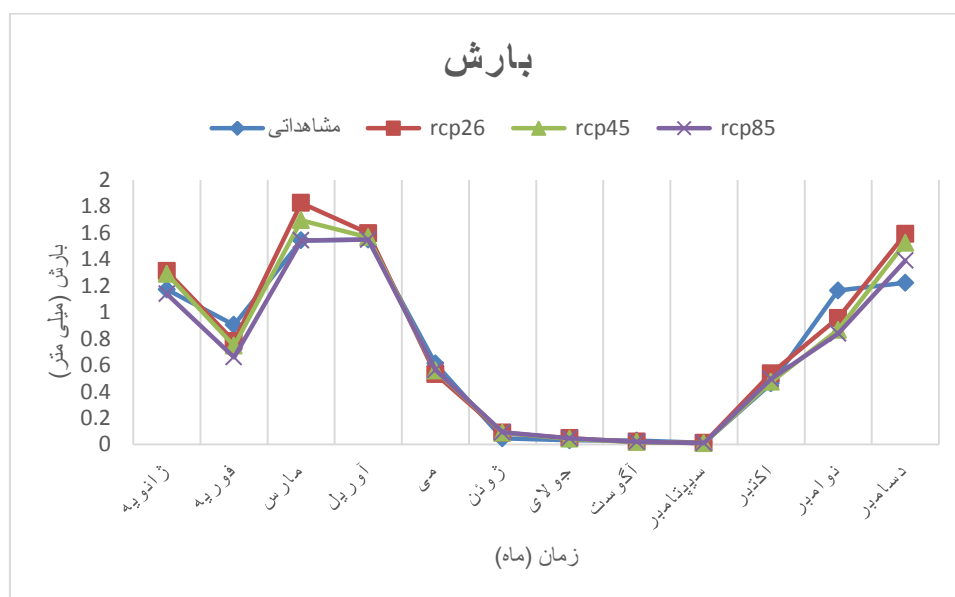
بعد از اجرای اولیه مدل با وارد کردن نقشه کاربری اراضی، بافت خاک، مدل رقمی ارتفاع به علاوه آمار هیدرومتری، هیدروگراف جریان خروجی حوزه شبیه سازی شد. در مرحله بعد برای شبیه سازی اثر سناریوها، با ثابت نگه داشتن اطلاعات ورودی و پارامترهای کلی واسنجی شده مدل به استثنای داده های اقلیمی مربوط به سناریوها، مدل به ازای هر سناریو دوباره اجرا گردید.

در نهایت مدل SWAT هیدروگراف خروجی متناسب با شرایط

اقلیم را شبیه سازی می کند که با مشاهده اختلاف بین هیدروگراف خروجی حوزه در شرایط اقلیم های مختلف، تغییرات ناشی از این تغییرات قابل مشاهده می باشد. در ادامه با اعمال شرایط اقلیمی آینده در فرمولاسیون مدل که فرایند هیدرولوژیکی حضور دارند، در نهایت سبب تغییر مقادیر فرایندهای هیدرولوژیکی و دبی شبیه سازی خواهند شد.

جدول ۸- مقایسه میانگین دمای حداقل ماهانه دوره مشاهداتی و دوره آتی ایستگاه رازین

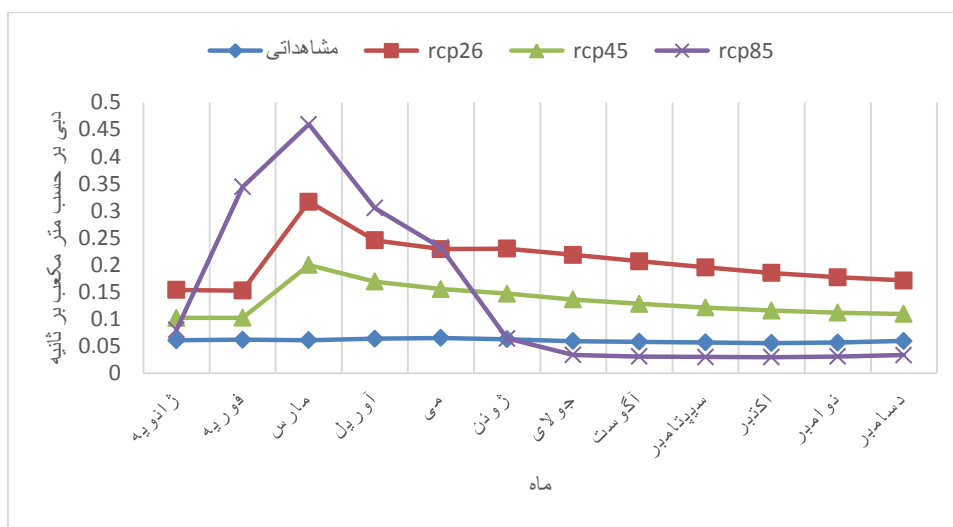
ماه	سناریوها			
	مشاهداتی	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
ژانویه	۱/۱۷	۱/۳۱	۱/۳	۱/۱۴
فوریه	۰/۹	۰/۸	۰/۷۴	۰/۶۶
مارس	۱/۵۴	۱/۸	۱/۷	۱/۵۴
آوریل	۱/۵۵	۱/۶	۱/۵۶	۱/۵۵
می	۰/۶۱	۰/۵۳	۰/۵۶	۰/۵۶
ژوئن	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۹	۰/۱
جولای	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴
اگوست	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
سپتامبر	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
اکتبر	۰/۴۶	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۵
نوامبر	۱/۱۶	۰/۹۵	۰/۸۶	۰/۸۳
دسامبر	۱/۲۲	۱/۶	۱/۵۲	۱/۴



شکل ۷- نمودار بارش ماهانه مشاهداتی و دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ ایستگاه رازین

RCP4.5 و ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل و می افزایش و در ماه‌های ژوئن، جولای، اگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر کاهش رواناب در سناریو RCP8.5 داشته است. بیشترین میزان افزایش رواناب در هر سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 مربوط به ماه مارس می‌باشد.

مدل‌سازی جهت بررسی اثر تغییر اقلیم: برای بررسی و مقایسه اثر تغییر اقلیم روی میزان رواناب، از داده‌های خروج مدل LARS-WG به عنوان ورودی برای مدل SWAT بعد از کالیبره شدن برای منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفت، که نتایج آن به صورت میانگین ماهانه در شکل ۸ آورده شده است. باتوجه به داده‌های پیش‌بینی شده اقلیمی در شبیه‌سازی رواناب، افزایش رواناب در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای، اگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر، دسامبر برای سناریوهای RCP2.6 و



شکل ۸- مقایسه رواناب مشاهداتی و دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریو rcp8.5، rcp2.6، rcp2.6

بحث و نتیجه گیری

عواقب تغییر اقلیم و بالطبع گرم شدن زمین بر جنبه‌های مختلف کشاورزی، جنگل و کاربری زمین، بهداشت، نفوذ آب شور به آب‌های سطحی و زیرزمینی در اثر افزایش سطح آب دریا، کاهش دبی آب رودخانه‌ها، افزایش در شدت و فراوانی بلایای طبیعی از جمله طوفان و سیلاب قابل تامل است و ضرورت پرداختن به این مهم را بیش از پیش نمایان می‌سازد؛ لذا شناخت دگرگونی‌های اقلیمی و رفتار آن‌ها در دوره‌های آتی و اثرات آن‌ها در حوزه‌های مختلف به خصوص در منابع آب در برنامه‌ریزی‌های کلان و استراتژیک از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین در این پژوهش به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی رودخانه مزلقان پرداخته شد.

براساس داده‌های شبیه‌سازی شده ایستگاه هیدرومتری رازین، نتایج نشان داد، میانگین سالانه دمای حداقل ایستگاه رازین، سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۱ و ۰/۱۳ افزایش یافته است.

میانگین سالانه دمای حداکثر ایستگاه رازین تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۰۷، ۰/۰۷ و ۰/۰۸ افزایش یافته است.

میانگین بارش ماهانه ایستگاه رازین تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 به ترتیب ۶ و ۱/۵ درصد افزایش و در سناریو RCP8.5 ۴ درصد کاهش را پیش‌بینی کرده است.

در ادامه به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان رواناب ناشی از سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ توسط نرم‌افزار LARS-WG در حوضه مزلقان پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان دهنده شبیه‌سازی قابل قبولی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیم بر متوسط رواناب می‌باشد. که

برای سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 برای دوازده ماه افزایش یافته است. و برای سناریو RCP8.5 برای ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل و می افزایش یافته است و برای ماه‌های دسامبر، نوامبر، اکتبر، سپتامبر، اگوست و جولای کاهش یافته است.

نتایج این پژوهش نشان داد مدل‌های پیش‌بینی کننده اقلیم می‌توانند ورودی‌های مناسبی را جهت شبیه‌سازی میزان رواناب حوزه با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی (SWAT) فراهم کنند. براساس نتایج به دست آمده از به کارگیری مدل LARS-WG تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 با توجه به دقت خوب مدل در شبیه‌سازی داده‌های مشاهده شده، توانایی خوب این مدل در پیش‌بینی داده اقلیمی آینده مشخص شد. با توجه به توانایی این مدل در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی، می‌توان با اطمینان بالایی از این مدل برای ارزیابی تغییر اقلیم در این ناحیه و نواحی با اقلیم مشابه استفاده کرد.

لذا یافته‌های پژوهش با مطالعات پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۶)، کاویان و همکاران (۱۳۹۶)، نادری و همکاران (۱۳۹۶)، حاجی محمدی و همکاران (۱۳۹۵)، بحری و زاهدی (۱۳۹۵)، همچنین با یافته‌های ساراف و رگولوار (۲۰۱۸)، واگش و همکاران (۲۰۱۳)، لیروننگ (۲۰۱۲) و ژانگ و همکاران (۲۰۰۶)، مبنی بر نتایج رضایت‌بخش مدل LARS-WG برای بررسی تغییر اقلیم را تایید می‌کند. همچنین یافته‌های مطالعه با نتایج تحقیقات ذکر شده که پدیده تغییر اقلیم با افزایش دما و تبخیر و تعرق و کاهش بارش همراه است، هماهنگ و همسو است.

نتایج به دست آمده صرف نظر از جهت تغییرات هر یک از مولفه‌های هیدرولوژیکی، دلالت بر اهمیت الگوی زمانی تغییرات در طول

بر دماهای حدی بیشینه ایران تحت سناریوهای RCP طی قرن بیست و یکم. دوفصلنامه نیوار، ۴۴ (۱۰۹): ۸۵-۹۶.

حیدری تاشه کبود، ش. و حسینی، ا. ۱۳۹۸. ارائه برنامه راهبردی بهره‌وری مصرف آب در کشور به منظور سازگاری با تغییر اقلیم. دوفصلنامه نیوار، ۴۳ (۱۰۷): ۱۳-۲۶.

درواری، ز. و سلیمانی، ک. ۱۳۸۶. شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه معرف کسلیان). نهمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان: دانشگاه شهید باهنر. انجمن مهندسی آبیاری و آب.

شاهین رخسار، پ.، علیزاده، ا.، انصاری، ح. و قربانی، م. ۱۳۹۸. بررسی عدم قطعیت گروهی مدل‌های گردش عمومی جو در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی (مطالعه موردی ایستگاه سینوپتیک رشت). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳ (۶): ۱۸۹۷-۱۹۰۹.

شریفی، پ.، ثروتی، م. و محمدخانی، ن. ۱۳۹۷. تاثیر تغییر اقلیم بر ارزیابی تناسب اراضی برخی از محصولات دیم در منطقه میان‌دوآب. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) // الف، ۳۲ (۲): ۲۵۴-۲۴۳.

شهوری، ن.، خلیلیان، ص.، موسوی، س. و مرتضوی، س. ۱۳۹۸. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع حوضه دشت ورامین با استفاده از مدل SWAT. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۲، ۱۳ (۲): ۳۵۴-۳۶۶.

مهرپرور، م.، اصغری، ک. و گل محمدی، م. ۱۳۹۷. کاهش خطای شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب با بکارگیری تکنیک داده‌گواری در مدل هیدرولوژیکی SWAT. فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴ (۵): ۸۴-۹۶.

نادری، م.، ایلدرمی، عل.، نوری، ح.، آقامین، س. و زینیوند، ح. ۱۳۹۶. بررسی تاثیر تغییر کاربری اراضی و اقلیم بر رواناب حوضه‌ی آبخیز با استفاده از مدل SWAT. (مطالعه موردی: حوضه‌ی گرین). فصلنامه هیدروژئومورفولوژی، ۱۴ (۱): ۶۱-۷۹.

IPCC. 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers.

Kundzewicz Z.W., Mata L.J., Arnell N.W., D'oll P., Kabat P., Jim'enez B., Miller K.A., Oki T., Sen Z. and Shiklomanov, I.A. 2007. Freshwater resources and their management. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Parry, M. L. Canziani O. F. Palutikof J. P. van der Linden P. J. and Hanson C. E.

سال دارد که نقش موثری در مدیریت منابع آب حوزه دارا می‌باشد. پژوهش حاضر ضمن بیان اهمیت اثرات بالقوه تغییر اقلیم در وضعیت هیدرولوژی حوزه لزوم توجه به بحث تغییر اقلیم و پیامدهای آن را در مدیریت منابع آب را متذکر می‌گردد.

در نهایت نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در حوضه مزلقان تغییر اقلیم محسوس‌تری شروع گردیده است. به طوری که اقلیم به سمت گرم شدن پیش می‌رود. همچنین به دلیل کاهش بارندگی‌ها و افزایش بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی سطحی، جریان آب رودخانه نسبت به آمار درازمدت کاهش بسیار شدیدی داشته است. لذا به منظور جلوگیری از آثار تغییر اقلیم بر حوضه مزلقان، موارد ذیل پیشنهاد می‌شود:

کاشت گیاهان مقاوم به خشکی و کم مصرف؛
توسعه جنگل‌ها و پوشش‌های گیاهی برای ترسیب کربن؛
استفاده از روش باروری ابرها به منظور افزایش میزان جریان رودخانه و تغذیه سفره‌های زیرزمینی؛
به توجه به اینکه کاربری پایین دست حوضه، زراعت آبی و باغ است و نیاز به آب دارد، تمهیدات آبیاری تحت کم فشار برای حوضه اندیشیده شود.
اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها براساس نسبت‌های تلفات خاک به منظور انجام اقدامات حفاظتی.

منابع

ایمانی امیرآباد، س.، دلاور، م. و نیک سخن، م. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی و ارزیابی راهکارهای مدیریتی برای کاهش مواد مغذی ورودی به دریاچه زریبار با استفاده از مدل SWAT. فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳ (۱): ۸۷-۶۹.

بحری، م. و زاهدی، ا. ۱۳۹۵. بررسی تغییرات اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی جریان سطحی رودخانه حوضه آبخیز آراز کوسه. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۱۶، ۴۲ (۳): ۱۳۱-۱۰۹.

بیات، م.، علیزاده، ح. و مجردی، ب. ۱۳۹۷. جذب داده برای واسنجی- پیش‌بینی با استفاده از مدل SWAT. فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴ (۱): ۱-۱۲.

پورمحمدی، س.، دستورانی، م.، مساحبوانی، ع.، گودرزی، م.، جعفری، ه. و رحیمیان، م. ۱۳۹۶. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه و ارائه راهکارهای سازگاری با اثرات آن (مطالعه موردی: حوضه آبریز تویسرکان همدان). فصلنامه علوم مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۱، ۳۷ (۲): ۱-۱۲.

چراغعلی‌زاده، م.، همتی، ر. و عسگری، س. ۱۳۹۹. اثرات تغییر اقلیم

institute technical report.

Saraf, V. R. Regulwar, D. G. 2018. Impact of Climate Change on Runoff Generation in the Upper Godavari River Basin, India. *The Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. 22(4): 04018021.

Wagesh, N; Jain, M.K; Goel, N. K. 2013. Effect of Climate Change on Runoff Generation: Application to Rift Valley Lakes Basin of Ethiopia. *Journal of Hydrologic Engineering*. 18:1048- 1063.

Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173–210.

Merritt, W.S., Alila, Y., Barton, M., Taylor, B., Cohen, S. and Neilsen, D. 2006. Hydrologic response to scenarios of climate change in subwatersheds of the Okanagan basin, British Columbia. *Hydrology. J.* 326: 79-108.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R. 2011. Soil and water assessment tool theoretical document (version 2009), Texas water resource

Investigating of Climate Change Effects on the Surface Runoff with SWAT Model (Case study: Mazlaghan River)

Sh. HajiGhasemi¹, M. Zakeri Niri^{2*}, A. Najafi Jilani³

Recived: Oct.25, 2020

Accepted: Dec.01, 2020

Abstract

The purpose of the present study was Investigating of Climate Change Effects on the Surface Runoff of the Mazlaghan area. For this purpose, SWAT model was used to simulate basin hydrological regime and SUFI-2 algorithm in SWAT-CUP software to optimize model parameters. Statistical data used for runoff simulation were years (1997-2015). To evaluate the ability of SWAT model to simulate runoff discharge, Nash Sutcliffe, R2, p-factor and r-factor indices were used. Using the LARS-WG climate change model in the study area, map the observational data of Razin Station with long-term climate data, taking into account RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 climate change scenarios for the coming period 2021- 2040 Climate change in the region was evaluated.. LARS-WG model to ensure the correct calibration errors indices of average root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and the coefficient of productivity Nash Sutcliffe (NSE) was used; The results of the study, while confirming the efficiency of the model, showed for the period 2021-2040, an increase in the mean annual temperature will occur based on the three scenarios mentioned. Also, the average monthly rainfall under the scenarios of RCP2.6, RCP4.5 increases and RCP8.5 predicts a decrease. Finally, according to the predicted climatic data in runoff simulation, an increase in runoff is predicted in the Alluvial Basin.

Keywords: Climate change, LARS-WG, Mazlaghan river, Surface runoff, SWAT model

1- M.Sc. Graduates, Water Resources Management and Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran
(*- Corresponding Author Email: Zakeriiau@gmail.com)

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی مدل‌های هوشمند جهت برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های لومی

شادیه حیدری تاشه‌کبود^{۱*}، مجتبی خوش‌روش^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۲۷

چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع یکی از پارامترهای اصلی در مطالعات کشاورزی و محیط‌زیست است که برای پیش‌بینی و مدیریت آب و انتقال املاح در خاک ضروری است. در این تحقیق از ۱۲۰۰ سری داده مربوط به خاک‌های لومی جهت پیش‌بینی و مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از خصوصیات فیزیکی خاک نظیر وزن مخصوص ظاهری خاک، ظرفیت آب در دسترس، محتوای کربن آلی و مقادیر رس، سیلت و ماسه استفاده شد. از این تعداد سری داده، ۹۰۰ سری برای استفاده در بخش آموزش مدل‌ها و ۳۰۰ سری برای آزمون مدل‌ها در سه سناریو طراحی شده تخصیص یافت. عملکرد مدل‌های SVM، MLP و M5 در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک لومی مورد ارزیابی قرار گرفت. عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، خطای مجذور میانگین مربعات (RMSE) و خطای بایاس میانگین (MBE) مقایسه شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد هر سه مدل مورد استفاده از توانایی خوبی در مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع برخوردارند، اما مدل M5 با ضریب تبیین بالای ۰/۹۵ در هر سه سناریو و RMSE پایین‌تر نسبت به سایر مدل‌ها به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد. نتایج نشان داد که مدل‌های داده‌کاوی هوشمند تخمین مقادیر ناشناخته را بر اساس الگوهای موجود در یک پایگاه داده امکان‌پذیر می‌نمایند. بنابراین مدل‌های بکار گرفته‌شده می‌توانند در پیش‌بینی انتقال املاح در خاک و پارامترهای فیزیکی خاک استفاده شوند.

واژه‌های کلیدی: انتقال املاح، حرکت آب در خاک، درخت تصمیم، خصوصیات فیزیکی خاک، وزن مخصوص ظاهری

مقدمه

توسط رینولدز (Reynolds, 2010) دشوار، زمان‌گیر و هزینه‌بر است (Asadollahzadeh et al., 2014) و برای همین منظور غالباً از طریق روش‌های غیرمستقیم برآورد می‌شود. اکثر مدل‌های هیدرولیکی موجود خاک، نیروهای مویرگی را محاسبه می‌نمایند و روند جریان که در شرایط بسیار خشک رخ می‌دهد را نشان نمی‌دهند که این امر برای حفاظت آب و خاک، رشد گیاهان و فرایندهای بیولوژیکی بالأخص در مناطق خشک و نیمه‌خشک مهم هستند (Ryel et al., 2002; Wang et al., 2017). بر همین اساس در دهه‌های اخیر سعی بر آن بوده منحنی هدایت هیدرولیکی کامل خاک ارائه شود (Tuller and Or, 2001; Tokunaga, 2009; Wang et al., 2017; Wang et al., 2013). در حدود دو دهه است که استفاده از روش‌های هوشمند برای برآورد هدایت هیدرولیکی و پارامترهای مختلف آب و خاک به دلیل آسانی و کم‌هزینه بودن به‌وفور کاربرد داشته است.

سرمیدان و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از روش‌های نروفازی، شبکه عصبی و رگرسیون چندمتغیره، برخی از خصوصیات خاک شامل نقطه پژمردگی، ظرفیت زراعی، ظرفیت تبادل کاتیونی و وزن

آب در خاک می‌تواند به صورت جریان اشباع، غیراشباع و یا جریان بخار حرکت نماید. جریان اشباع زمانی صورت می‌پذیرد که منافذ خاک کاملاً از آب پر شده باشد. هدایت هیدرولیکی اشباع سرعت حرکت آب از طریق خاک اشباع را توصیف می‌نماید. همچنین هدایت هیدرولیکی خاک یکی از پارامترهای اساسی در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، املاح شیمیایی در خاک و حرکت آب در خاک است (Nosrati, 2012; Koorevaar et al., 1983; Reynolds, 2008 and Topp). به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع حل معادلات ارائه شده توسط فیلیپ (Philip, 1993) و اصلاح شده

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

* - نویسنده مسئول: (Email: shadiheidari1990@gmail.com
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.12.2

مصنوعی به‌خوبی و با دقت مناسب می‌تواند هدایت هیدرولیکی خاک را تخمین نماید و پارامترهای سیلت، رس، ماسه، وزن ظاهری و مواد آلی خاک مؤثرترین متغیرهای ورودی مدل هستند (Moosavi and Sepaskhah, 2012).

رضایی و همکاران در مطالعه‌ای از شبکه‌های عصبی MLP و مدل‌های رگرسیونی برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل MLP از دقت بهتری نسبت به مدل‌های رگرسیونی برخوردار است (Rezaie et al., 2012). همچنین امامزاده و همکاران با استفاده از مدل‌های MLP و RBF به تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک پرداختند و آنها نیز برتری مدل MLP را خاطر نشان کردند (Emamzadeh et al., 2014).

تایفور و همکاران با بهره‌گیری از چندین روش هوش مصنوعی، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را تخمین زدند. آنها نتیجه گرفتند که خروجی ناشی از ترکیب نتایج کل مدل‌ها به نسبت خروجی هرکدام از مدل‌های استفاده شده به‌صورت منفرد کارا تر است (Tayfur et al., 2014).

البیسی با استفاده از ماشین بردار پشتیبان هدایت هیدرولیکی اشباع را در خاک‌های شنی بر اساس ویژگی‌های شوری و قلیایی خاک پیش‌بینی کردند. در این تحقیق عملکرد سه تابع خطی، پایه شعاعی و سیگموئید بر عملکرد ماشین بردار پشتیبان با استفاده از داده‌های میدانی مورد بررسی قرار گرفت. مدل پایه شعاعی با ضریب همبستگی ۰/۹۷۶ در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک عملکرد خوبی از خود به‌جای گذاشت (Elbisi, 2015).

یانو و همکاران با کمک شبکه عصبی مصنوعی مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را در زمین‌های کشاورزی ساحلی و شور جیانگسوی شمالی در کشور چین تخمین زدند و شوری خاک را یکی از تأثیرگذارترین فاکتورها در مقدار این پارامتر برشمردند که بایستی همواره به‌عنوان یکی از داده‌های ورودی خاک مورد استفاده قرار گیرد (Yao et al., 2015).

سیهاگ و همکاران هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را با استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی، رگرسیون خطی و شبکه عصبی مصنوعی پیش‌بینی کردند. نتایج حاکی از عملکرد تابع عضویت گاوسی نسبت به تابع عضویت مثلثی و بل در سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی است. همچنین این مدل در حالت کلی عملکرد بهتری در تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک نسبت به شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی داشت (Sihag et al., 2017). همچنین سیهاگ برای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک مدلی بر پایه منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی توسعه داد. پیش‌بینی با رویکرد شبکه عصبی با ضریب همبستگی ۰/۸۶۶ و مجذور مربع خطای ۴/۵۶۱ کارایی خوبی داشت (Sihag, 2018).

الدوساری و همکاران هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک‌های لوم

مخصوصاً ظاهری را تخمین زدند. نتایج کار آنها نشان‌دهنده کارایی بالای مدل نروفازی و شبکه عصبی مصنوعی نسبت به معادلات رگرسیونی بود.

پوررضا بیلندی و خاشعی سیوکی (۱۳۹۴) به تحلیل عدم قطعیت خروجی شبکه عصبی در شبیه‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در ۱۵۱ نمونه از خاک‌های زراعی اطراف شهرستان بجنورد پرداختند. نتایج تحلیل عدم قطعیت به‌دست‌آمده با کمک نمونه‌گیر مونت‌کارلو جهت استفاده در دوره‌های آموزش و آزمون شبکه عصبی پروسپترون بررسی و ارزیابی شد. بر اساس نتایج فقط تابع کاهش گرادیان دارای زمان اجرا بیشتر و مقدار NUE پایین‌تر به نسبت بقیه بوده، لذا بیشترین عدم قطعیت را در بین مقادیر هدایت هیدرولیکی خروجی شبیه‌سازی شده داشت.

مارسل و همکاران از شبکه عصبی برای پیش‌بینی ظرفیت نگهداری رطوبت خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع با بهره‌گیری از ویژگی‌های پایه خاک نظیر مقادیر شن، سیلت و رس، وزن مخصوص ظاهری، تخلخل و مقادیر گراول استفاده نمودند و نتایج حاصل نشان از افزایش دقت پیش‌بینی ظرفیت نگهداری رطوبت و هدایت هیدرولیکی اشباع با افزایش تعداد داده‌ها داشت و روش مذکور به دلیل دقت و میزان بالای انعطاف‌پذیری مورد توجه واقع شد (Marcel et al., 1998).

جرج با ترکیب آزمایش‌های صحرایی و روش مسئله معکوس، به بررسی و تحقیق در مورد تغییرات زمانی و مکانی خصوصیات هیدرولیکی غیراشباع پرداخت. در تحقیق وی، نیمرخ رطوبتی خاک در ابتدا و انتهای دوره مطالعاتی و همچنین مقادیر نفوذ، تبخیر و بار فشاری در پشت جبهه رطوبتی خاک به‌طور پیوسته اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از مطالعات نشان داد که روش معکوس مقادیر معقولی از درصد حجمی رطوبت اشباع را در یک لایه خاک رسی پیش‌بینی نماید (Greg, 2003).

نوایان و همکاران برآورد سریع هدایت آبی اشباع را ارزیابی کردند و نشان دادند شبکه‌های عصبی مصنوعی عملکرد نسبتاً بهتری در مقایسه با روابط رگرسیونی دارند (Navabian et al., 2004).

آمر و همکاران معادله‌ای را برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی خاک بر اساس ویسکوزیته آب، شتاب ثقل، چگالی آب، نسبت حجم کل منافذ و شعاع اندازه منافذ استوانه‌ای پیشنهاد دادند (Amer et al., 2009). نشاط و فرهاد بر اساس محاسبات هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را تخمین زدند، تا بر اساس آن رابطه‌ای بین هدایت هیدرولیکی غیراشباع و خصوصیات فیزیکی آن حاصل شود (Neshat and Farhad, 2012). همچنین موسوی و سپاس‌خواه از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی با پارامترهای ورودی ماسه، سیلت، رس، وزن ظاهری، مواد آلی و محتوای آب اشباع حجمی به پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که شبکه عصبی

فاصله ممکن را از نزدیک‌ترین نمونه‌ها به هر دو طرف ابر صفحه ایجاد می‌کند. در برآورد رگرسیونی به نقطه‌های ایجادکننده مرز ماکزیمم بردار پشتیبان گفته می‌شود. در واقع این بردارها همان تابع تقریب زده شده است که از داده‌های آموزشی حاصل شده است. در این مدل علاوه بر کمینه‌سازی از خطای تجربی از یک عامل هموارساز استفاده می‌شود.

در این مطالعه هدف از آموزش مدل پیدا کردن تابع $f(x)$ به‌عنوان تقریبی از مقدار $y(x)$ با حداقل خطا و بر اساس داده‌های مستقل از یکدیگر می‌باشد.

$$(X_1, y_1), \dots, (X_m, y_m) \subseteq (X \subseteq R^n \times Y \subseteq R) \quad (1)$$

$$R_{reg} = R_{emp}(f) + \lambda \Omega(f) \quad (2)$$

در رابطه بالا $R_{reg}(f)$ و $R_{emp}(f)$ به ترتیب خطای ساختاری و خطای تجربی است و λ پارامتر هموارسازی است؛ که مشخص‌کننده تعادل بین دقت تخمین تابع f و نرمی آن است. همچنین $\Omega(f)$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Omega(f) = \frac{w^T w}{2} \quad (3)$$

وینیک برای توسعه ماشین‌های بردار پشتیبان از تابع خطای جدید استفاده نمود که تابع خطای ϵ -insensitive خوانده می‌شود و جهت توصیف $L(x, f(x, \alpha))$ استفاده می‌شود که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L(y, f(x, \alpha)) = |y - f(x, \alpha)|_{\epsilon} = \begin{cases} 0 & \text{if } |y - f(x, \alpha)| \leq \epsilon \\ |y - f(x, \alpha)| - \epsilon & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

شکل ۱ تخمین شماتیکی از رابطه بین داده‌های موجود (دایره‌های سیاه و سفید) که در یک فضای یک‌بعدی توسط تابع خطی f انجام پذیرفته نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل قابل‌ملاحظه است استفاده از تابع خطای مذکور باعث شده تا اختلاف بین مقادیر تخمینی توسط تابع و مقادیر اندازه‌گیری شده y که کمتر از مقدار ϵ با مقادیر تخمینی دارند، (دایره‌های سیاه‌رنگ) مطابق تابع خطای ذکرشده، $\xi_i = |y_i - f(x_i, \alpha)| - \epsilon$ به‌عنوان خطا در نظر گرفته شود.

برای بررسی الگوریتم رگرسیون در ابتدای تخمین یک تابع خطی بررسی می‌شود. با توجه به این‌که کلیه توابع خطی به شکل زیر است:

ماسه‌ای را با استفاده از مدل‌های پرسپترون چندلایه، رگرسیون خطی چندگانه و رگرسیون فرایند گاوسی مدل‌سازی کردند که مقادیر RMSE برای مدل‌ها به ترتیب $10^{-4} * 1/87$ ، $10^{-4} * 2/22$ و $10^{-4} * 1/16$ به دست آمد. در این مطالعه مقایسه مدل‌ها نشان داد مدل رگرسیون فرایند گاوسی نسبت به مدل‌های پرسپترون چندلایه و رگرسیون خطی چندگانه عملکرد بهتری در مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی غیراشباع داشت (Al-Dosari et al., 2019).

بر اساس موارد گفته‌شده و اهمیت مطالعه در زمینه هدایت هیدرولیکی خاک در علوم و مهندسی آب و خاک، هدف از این تحقیق ارزیابی روش‌های هوشمند SVM^1 ، MLP^2 و $M5$ در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک لومی است. در این راستا از اطلاعات خصوصیات فیزیکی خاک نظیر ظرفیت آب در دسترس، وزن ظاهری خاک و درصد رس، سیلت و ماسه جهت استفاده به‌عنوان ورودی مدل‌ها استفاده خواهد شد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق می‌تواند جهت دسترسی سریع به مقادیر هدایت هیدرولیکی در اختیار محققین قرار گیرد.

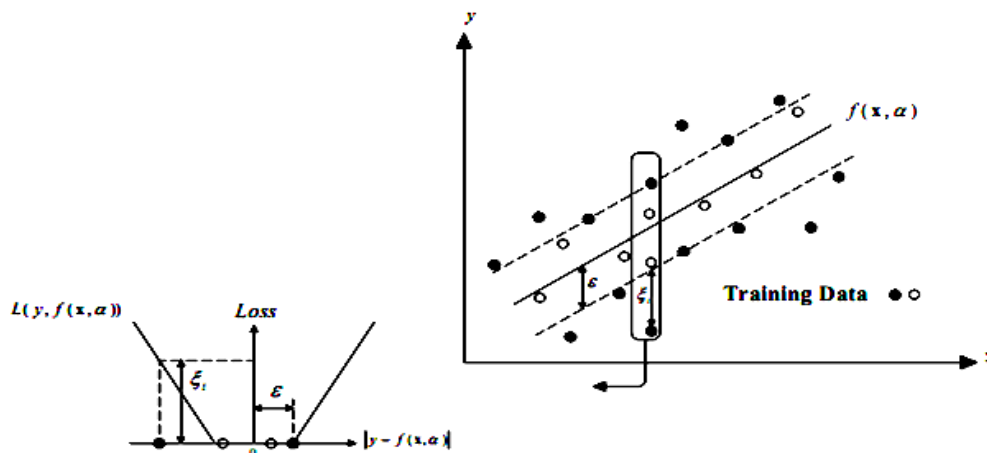
مواد و روش‌ها

در این تحقیق از اطلاعات خاک‌های پایگاه داده نرم‌افزار SWAT³ تحت عنوان usersoil برای استفاده در مدل‌های مورد ارزیابی بهره گرفته شد. بر این اساس ۱۲۰۰ سری داده خاک مربوط به خاک‌های لومی از آن استخراج و جهت پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع مورد استفاده قرار گرفت. از این تعداد داده ۹۰۰ داده برای بخش آموزش و ۳۰۰ داده برای بخش آزمون مدل‌ها اختصاص یافت.

مدل ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان ابزاری برای رگرسیون اولین بار توسط وینیک^۴ و همکاران معرفی شد (Vapnik et al., 1995). این مدل که از روش‌های یادگیری با نظارت^۵ است؛ بر اصل استقرایی کمینه‌سازی خطای ساختاری استوار است. یادگیری تحت نظارت یک روش عمومی در یادگیری ماشین است که در آن به سامانه، مجموعه جفت‌های ورودی و خروجی داده می‌شود و با توجه به داده‌ها مدل تلاش می‌کند تا تابعی از ورودی به خروجی فراگیرد. در این مدل سعی بر آن است که یک سطح چندبعدی در فضای داده‌های اصلی با جداسازی یک مجموعه داده‌های آموزشی صحیح دارد و بیشترین

- 1- Super Vector Machine
- 2- Multilayer perceptron
- 3- Soil and Water Assessment Tool
- 4- Vapnik
- 5- Supervisor



شکل ۱- تابع خطای ϵ غیر حساس

پیش‌بینی هستند که در دهه‌های اخیر در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این شبکه‌ها شامل مجموعه-ای از واحدهای حسی (نرون‌های پایه) می‌باشند که متشکل از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی می‌باشند. سیگنال ورودی در خلال شبکه و در مسیری روبه‌جلو به‌صورت لایه به لایه منتشر می‌شود. این نوع شبکه‌ها معمولاً با عنوان پرسپترون چندلایه (MLP) نامیده می‌شوند (Haykin, 1999).

قاعده فراگیری پرسپترون چندلایه را «قاعده کلی دلتا» یا «قاعده پس انتشار»^۳ می‌گویند. نحوه عمل پرسپترون چندلایه‌ای مشابه پرسپترون تک لایه‌ای است. به این صورت که الگویی به شبکه عرضه می‌شود و خروجی آن محاسبه می‌گردد، مقایسه خروجی واقعی و خروجی مطلوب باعث می‌گردد که ضرایب وزنی شبکه تغییر یابد به طوری که در مراحل بعد خروجی صحیح‌تری حاصل شود. وقتی به شبکه آموزش ندیده‌ای الگویی را عرضه شود، خروجی‌های تصادفی تولید می‌کند. ابتدا باید تابع خطایی تعریف شود که تفاوت خروجی واقعی و خروجی مطلوب را نشان دهد. از آنجایی که خروجی مطلوب دانسته می‌شود، این نوع فراگیری را «فراگیری با سرپرستی»^۴ می‌نامند. برای موفقیت در آموزش شبکه باید خروجی آن را به تدریج به خروجی مطلوب نزدیک کرد. به عبارت دیگر باید میزان خطا را کاهش داد. برای رسیدن به این هدف از قانون دلتا استفاده می‌شود (حسینی، ۱۳۸۸). در پژوهش حاضر، برای مدل‌سازی با استفاده از شبکه‌های MLP از یک شبکه سه لایه‌ای پیشخور استفاده شد. شکل ۲ ساختار یک شبکه عصبی MLP را نشان می‌دهد.

به طوری که: $w, x \in X, b \in R$

$$f(x) = \langle w, x \rangle + b \quad (5)$$

به طوری که در آن $\langle \cdot, \cdot \rangle$ مشخص‌کننده ضرب داخلی دو بردار در فضای هیلبرت^۱ (فضایی که به نام فضای ضرب داخلی یا نقطه‌ای نیز خوانده می‌شود. و در آن ضرب داخلی دو بردار عددی حقیقی شود) می‌باشد و w بردار وزن مربوط به بردار ورودی است.

برای یافتن تابع f باید به کمینه‌سازی تابع خطای هموار شده R_{reg} بر اساس تابع خطای ϵ -insensitive پرداخت. R_{reg} را می‌توان بر اساس شکل باز شده R_{emp}^ϵ بازنویسی شود.

$$R_{reg}[f] = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{C}{m} \sum |y_i - f(x_i)|_\epsilon$$

بنابراین

$$R_{emp}^\epsilon[f] = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y_i - f(x_i)|_\epsilon \quad (6)$$

خطای آموزش را در قالب تابع خطای ϵ -insensitive محاسبه می‌شود. ضریب ثابت C بیانگر سازشی است که میان پیچیدگی تابع f ($\|w\|^2$) و بالاترین مقداری از انحرافات بیشتر از ϵ که قابل تحمل خواهند بود. به طور مختصر کمینه‌سازی رابطه (۴) نشان‌دهنده ایده اصلی تئوری یادگیری آماری است و بیان‌کننده این است که برای دستیابی به کم‌ترین خطای واقعی، کنترل پیچیدگی مدل و همچنین خطای مربوط به داده‌های آموزش ضروری است. به عبارت دیگر طبق گفته وپنیک عمومیت‌پذیری با استفاده از داده‌های محدود امکان‌پذیر است، اگر و تنها اگر پیچیدگی تابع تخمین کنترل شود.

مدل MLP

شبکه‌های چندلایه پیشخور^۲، یکی از متداول‌ترین مدل‌های

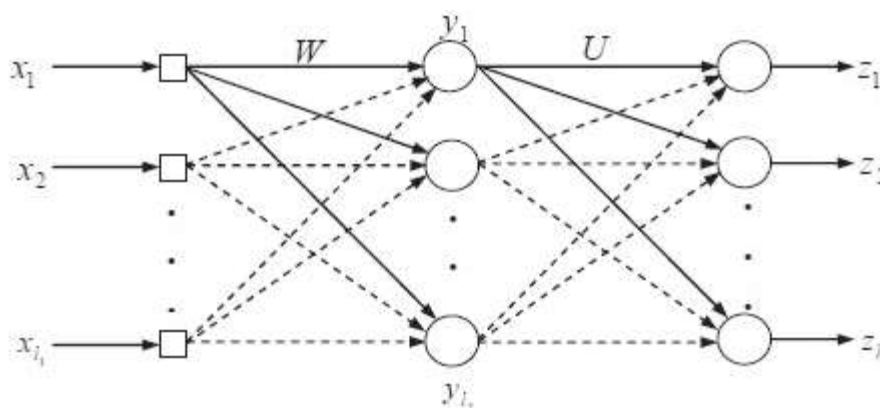
3- Delta rule

4- Backpropagation

5- Supervised learning

1- Hilbert

2- Multi-layer perceptron



شکل ۲- ساختار شبکه MLP (حسینی، ۱۳۸۸)

مدل‌های چندتکه‌ای خطی دانست که هرکدام برای یک محدوده خاصی از داده‌های ورودی مناسب هستند (شکل ۴).

سنجش دقت مدل‌ها

برای بررسی دقت تخمین هر یک از مدل‌ها با استفاده از جذر میانگین مجموع مربع خطاها (RMSE) و متوسط خطای سوءگیری (MBE) و ضریب همبستگی (R^2) واسنجی انجام گرفت. معادلات مربوط به RMSE، MBE و R^2 به صورت زیر می‌باشد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (P_i - O_i)^2} \quad (۸)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^t (P_i - O_i)}{t} \quad (۹)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^t (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^t (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (۱۰)$$

که در روابط فوق P_i و O_i مقادیر مشاهداتی و تخمینی در زمان i و t تعداد داده‌ها هستند. مقدار RMSE بیانگر متوسط مربع خطا بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده است و هر چه مقدار آن کمتر باشد نشان‌دهنده دقت بیشتر تخمین مدل است. مقدار MBE نشان‌دهنده مثبت یا منفی بودن خطای محاسباتی بوده و در صورت مثبت یا منفی بودن نمایانگر این مطلب است که مقادیر پیش‌بینی شده به ترتیب بیشتر یا کمتر از مقادیر مشاهداتی هستند. مقدار R^2 نیز همیشه بین صفر و یک تغییر می‌کند. هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بهتر مقادیر تخمینی و مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

مدل درختی M5

کوبین لان اولین بار این الگوریتم را در سال ۱۹۹۲ مطرح کرد. الگوریتم M5 از معمول‌ترین درختان تصمیم‌گیری برای دسته‌بندی است. مزیت مدل درختی M5 نسبت به رگرسیون درختی، مؤثر بودن در داده‌های بزرگ و دارا بودن دقت بیشتر است (Pal and Deswal, 2009). این دقت معادل دقت شبکه عصبی و دقتی بیش از درختان تصمیمی همانند کارت^۱ می‌باشد. اساس این مدل بر پایه تصمیم و غلبه کردن استوار است و هدف در آن، کار با رگرسیون خطی و تشکیل مقادیر پیش‌بینی شده نهایی در برگ‌هاست. گره‌های این درخت بر اساس حداقل خطای انحراف معیار تعیین می‌شوند (شکل ۳).

مدل رگرسیون‌گیری درختی دو مرحله را شامل می‌شود:

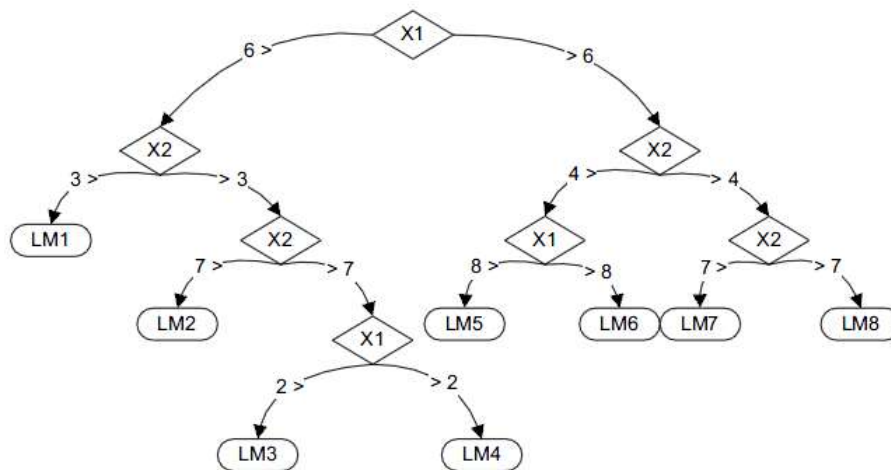
الف) استفاده از یک معیار دسته‌بندی برای ایجاد درخت تصمیم. این معیار بر اساس عملکرد انحراف استاندارد به ازای هر کلاس که در هر گره به دست آمده است، تعیین می‌شود.

رابطه زیر جهت محاسبه کاهش انحراف استاندارد ارائه شده است:

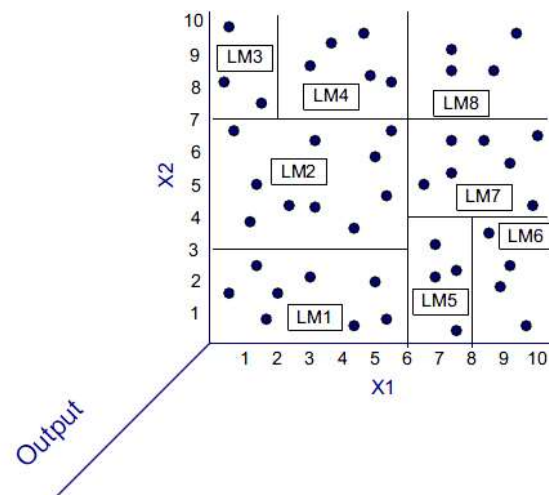
$$SDR = sd(T) - \sum \frac{T_1}{T_2} sd(T_1) \quad (۷)$$

که در رابطه فوق T نشان‌دهنده مجموعه‌ای از نمونه‌ها که به هر گره وارد شده‌اند و sd انحراف استاندارد داده‌های ورودی است. گره‌های فرزند به علت انحراف معیار کمتر دارای دقت بیشتری نسبت به گره‌های والد هستند.

ب) هرس درخت کاملاً رشد یافته: پس از انجام دسته‌بندی‌ها، مدل حداقل خطای مورد انتظار به‌عنوان گزینه برتر ارائه می‌شود. بدین منظور ساختار بزرگ درختی ایجاد شده باید هرس شود، تا مدل با پیچیدگی تحلیل مواجه نشود. از جمله راه‌حل‌های هرس، جایگزینی زیرشاخه‌ها با برگ‌هاست. پس یک مدل درختی را می‌توان ترکیبی از



شکل ۳- ساختار سلسله مراتبی مدل درختی M5



شکل ۴- تقسیم‌بندی فضای نمونه‌ها توسط الگوریتم مدل درختی M5

هیدرولیکی اشباع^۴ خاک (میلی‌متر بر ساعت) استفاده شد. ورودی‌های سناریوهای طراحی شده برای مدل‌سازی در جدول ۲ ارائه شده است.

نتایج مدل SVM

بر اساس نتایج به دست آمده از مدل SVM برای سه سناریوی طراحی شده، این مدل در بخش آموزش و آزمون به لحاظ خطای MBE و RMSE مقادیر قابل قبولی داشت، مقادیر ضریب تبیین در بخش آموزش و آزمون باهم اختلاف قابل توجهی ندارند (جدول ۳). شاخص‌های آماری نشان‌دهنده برتری سناریوی سوم مدل SVM در بخش آموزش و آزمون هستند. شکل ۵ پراکنش داده‌های مشاهداتی در مقابل داده‌های برآوردی را برای بخش آزمون سناریوی برتر

نتایج و بحث

برای شبیه‌سازی مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از مدل‌های هوشمند SVM، MLP و M5 استفاده شد. مشخصات آماری داده‌های بکار رفته در مراحل آموزش و آزمون مدل‌ها در جدول ۱ آمده است. از سه سناریو با استفاده از داده‌های وزن مخصوص ظاهری^۱ خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، ظرفیت آب در دسترس^۲ (میلی‌متر آب بر میلی‌متر خاک)، محتوای کربن آلی^۳ (درصد وزنی خاک) و مقادیر رس، سیلت و ماسه (درصد) برای مدل‌سازی هدایت

1- Bulk density

2- Available water capacity

3- Organic carbon content

4- Saturated hydraulic conductivity

و سوم نتایج به هم نزدیک بود. مقادیر ضریب تبیین در بخش آموزش و آزمون باهم نزدیک بود و در سناریوی دوم و سوم هم نزدیک به هم به دست آمد (جدول ۴). گرچه شاخص‌های آماری نشان‌دهنده برتری سناریوی سوم مدل MLP در بخش آموزش و آزمون هست، اما سناریوی دوم نیز اختلاف چندانی با آن ندارد. شکل ۶ پراکنش داده‌های مشاهداتی در مقابل داده‌های برآوردی را برای بخش آزمون سناریوی دوم و شکل ۷ نیز برای سناریوی برتر (سناریوی سوم) نشان می‌دهد. امامزاده و همکاران و کروک و همکاران در تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع با مدل MLP به نتایج مشابهی دست‌یافته‌اند (Emamzadeh et al., 2017; Kruk et al., 2017).

(سناریوی سوم) نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده از مدل SVM در این تحقیق با نتایج کار تیواراکاوی و همکاران، الیسی، مادی و شین همخوانی داشت. همچنین در تحقیق مادی و شین ترکیب ورودی‌ها با این تحقیق مشابه بوده است (Twarakavi et al., 2009; Elbisy, 2015; Mady and Shein, 2018).

نتایج مدل MLP

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل MLP هر سه سناریوی طراحی‌شده، عملکرد خوبی در بخش آموزش و آزمون داشتند. مقادیر خطای MBE و RMSE مقادیر قابل‌قبول بوده و در سناریوهای دوم

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های بکار رفته در مدل‌ها

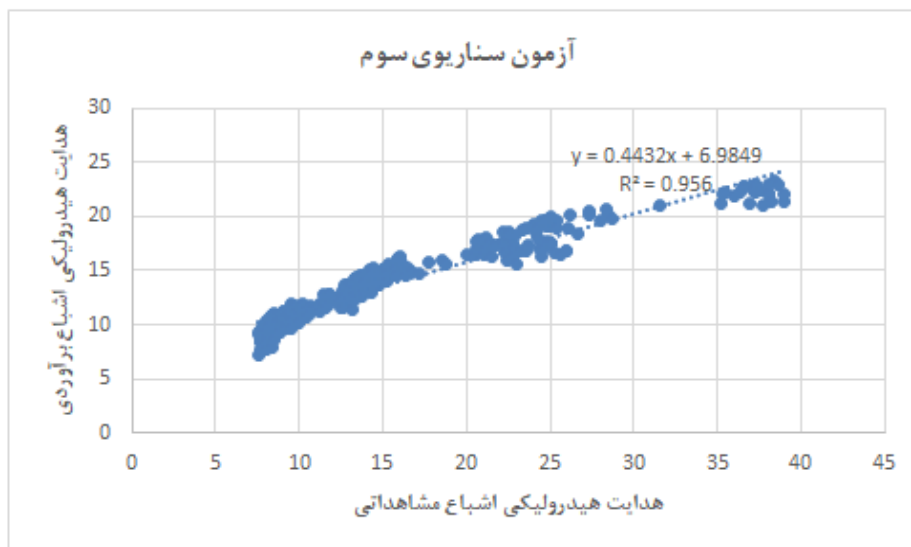
شاخص‌های آماری				متغیرها	مجموعه داده‌ها
انحراف معیار	کمینه	بیشینه	میانگین		
۰/۱۸	۰/۱	۱/۹	۱/۳۳	وزن مخصوص ظاهری	آموزش
۰/۰۴۵	۰	۰/۱۷۵	۰/۱۲۵	ظرفیت آب در دسترس	
۳/۷۱	۰/۲	۴۷/۳	۱/۹۳	محتوای کربن آلی	
۲/۶۷	۱۰	۲۸	۳۲/۴۱	مقدار رس (%)	
۴/۸۵	۲۸	۴۹	۳۶/۲۳	مقدار سیلت (%)	
۵/۳۱	۲۶	۵۱	۴۱/۴۳	مقدار ماسه (%)	
۸/۴۵	۰/۹۵	۳۹/۴۱	۱۰/۲۶	هدایت هیدرولیکی اشباع	
۰/۱	۱	۱/۵	۱/۲۱	وزن مخصوص ظاهری	آزمون
۰/۰۰۳	۰/۱۷۵	۰/۲	۰/۱۷۶	ظرفیت آب در دسترس	
۲/۵۳	۰/۴	۱۵/۸	۲/۵۴	محتوای کربن آلی	
۳	۱۲	۲۷	۲۱/۷۲	مقدار رس (%)	
۵/۴۸	۲۸	۴۹	۳۶/۵۳	مقدار سیلت (%)	
۵/۷۴	۲۶	۵۱	۴۱/۷۸	مقدار ماسه (%)	
۸/۴۷	۷/۵۵	۳۹/۰۱	۱۶/۷۵	هدایت هیدرولیکی اشباع	

جدول ۲- سناریوهای در نظر گرفته‌شده جهت مدل‌سازی

سناریو	متغیرهای ورودی	پارامتر شبیه‌سازی
سناریوی اول	وزن مخصوص ظاهری، محتوای کربن آلی	هدایت هیدرولیکی اشباع
سناریوی دوم	وزن مخصوص ظاهری، محتوای کربن آلی، مقدار ماسه	هدایت هیدرولیکی اشباع
سناریوی سوم	وزن مخصوص ظاهری، ظرفیت آب در دسترس، محتوای کربن آلی، مقدار رس و سیلت و ماسه	هدایت هیدرولیکی اشباع

جدول ۳- ارزیابی شاخص‌های آماری سناریوهای مدل SVM

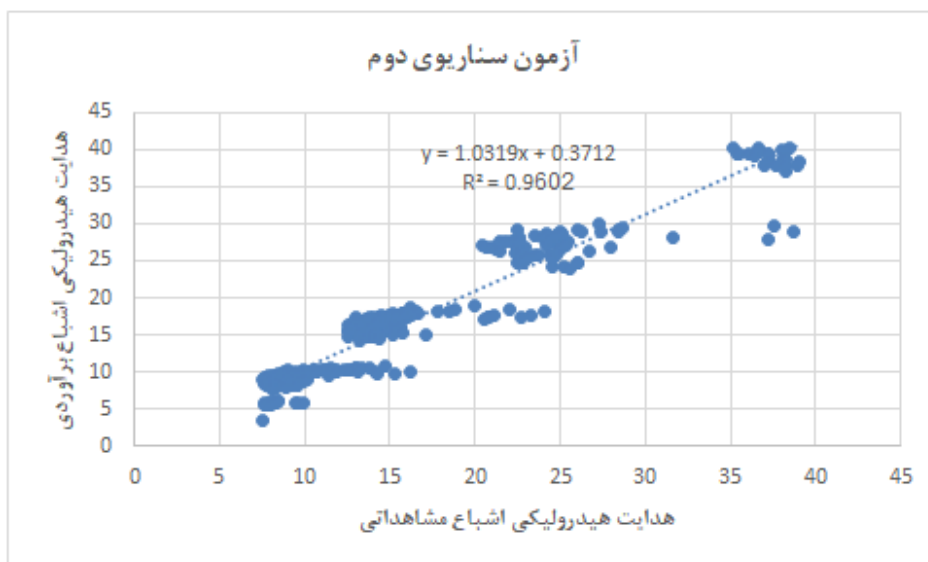
شاخص‌های آماری			سناریو	مجموعه داده‌ها
RMSE	MBE	R ²		
۵/۴۶۵	-۰/۹۱۶	۰/۷۷۲	سناریوی اول	آموزش
۵/۳۵۳	-۱/۰۶۹	۰/۷۸۴	سناریوی دوم	
۵/۱۸۵	-۱/۰۴۵	۰/۷۹۹	سناریوی سوم	
۵/۶۹۷	-۲/۵۶۶	۰/۹۱۳	سناریوی اول	آزمون
۶/۰۳۵	-۳/۰۵	۰/۹۳	سناریوی دوم	
۵/۳۸۱	-۲/۳۴۲	۰/۹۵۶	سناریوی سوم	



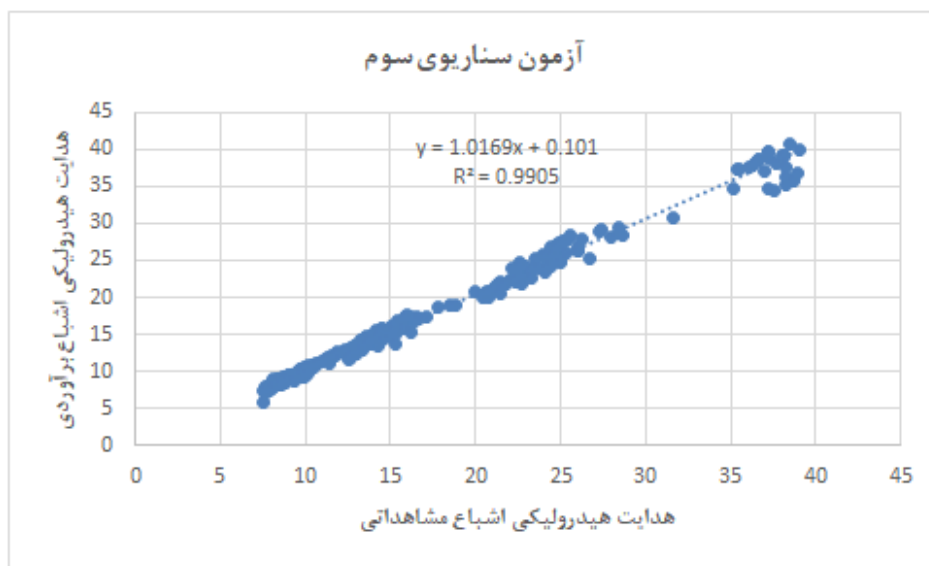
شکل ۵- پراکنش داده‌های مشاهداتی و برآوردی برای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در سناریوی برتر SVM

جدول ۴- ارزیابی شاخص‌های آماری سناریوهای مدل MLP

شاخص‌های آماری			سناریو	مجموعه داده‌ها
RMSE	MBE	R ²		
۳/۰۷۴	-۰/۴۴۹	۰/۹۳۷	سناریوی اول	آموزش
۱/۸۸۹	-۰/۴۳۸	۰/۹۸۴	سناریوی دوم	
۰/۶۸۳	۰/۳۱۹	۰/۹۹۸	سناریوی سوم	
۳/۴۷۳	-۰/۳۸۴	۰/۹۱۴	سناریوی اول	آزمون
۲/۷۱	-۰/۹۰۶	۰/۹۶	سناریوی دوم	
۱/۱۸۸	۰/۲۴۸	۰/۹۹۱	سناریوی سوم	



شکل ۶- پراکنش داده‌های مشاهداتی و برآوردی برای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در سناریوی دوم MLP



شکل ۷- پراکنش داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی برای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در سناریوی برتر MLP

نتایج مدل M5

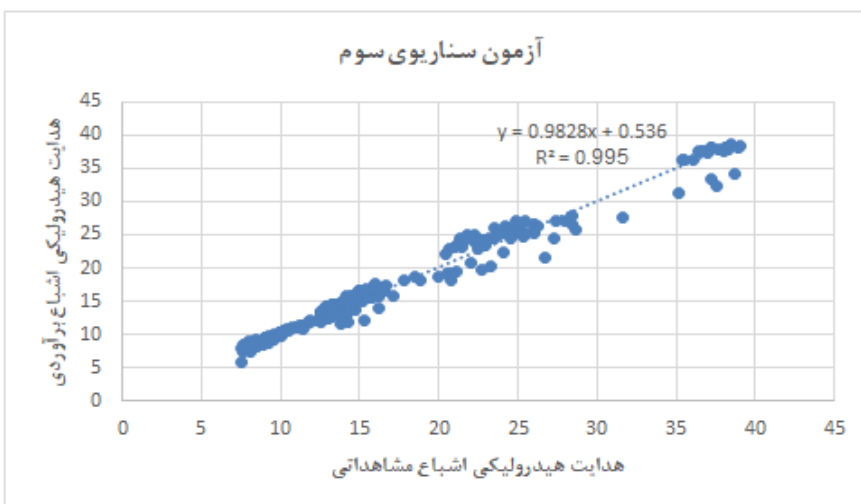
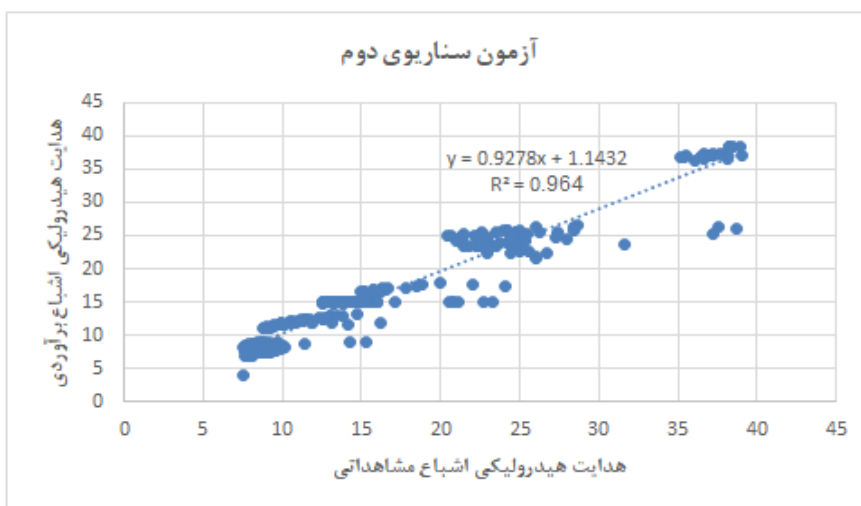
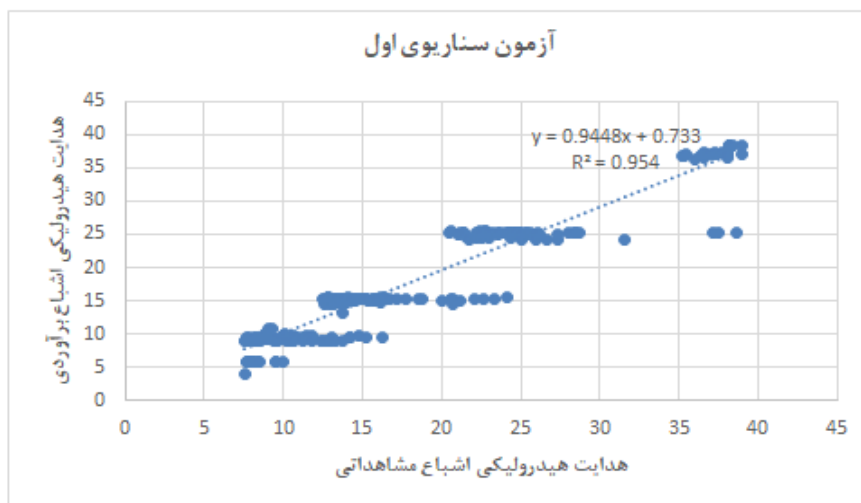
بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل MLP هر سه سناریوی طراحی‌شده، عملکرد خوبی در بخش آموزش و آزمون داشتند. مقادیر خطای MBE و RMSE مقادیر قابل قبول بوده و نتایج به‌دست‌آمده در سناریوها به هم نزدیک است. مقادیر ضریب تبیین هم در بخش آموزش و آزمون باهم نزدیک هستند (جدول ۵). گرچه شاخص‌های آماری نشان‌دهنده برتری سناریوی سوم مدل MLP در بخش آموزش و آزمون هست، اما سناریوی اول و دوم نیز اختلاف چندانی با آن ندارند. شکل ۸ پراکنش داده‌های مشاهده‌ای در مقابل داده‌های برآوردی را برای بخش آزمون سناریوهای مدل M5 نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۸ پراکنش داده‌ها نشان‌دهنده برتری نسبی سناریوی سوم بر سناریوی اول و دوم است. تحقیقات سپهاگ و همکاران نیز مؤید نتایج به‌دست‌آمده از مدل M5 در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی خاک می‌باشد (Sihag et al., 2019).

نتیجه‌گیری

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک یک پارامتر ورودی کلیدی موردنیاز در اکثر مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی است. با توجه به محدودیت روش‌های مستقیم در اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی خاک، از جمله تغییرپذیری زیاد مکانی و زمانی، آزمایش وقت‌گیر، خطاهای بهره‌برداری و هزینه‌های بالای اندازه‌گیری، روش‌های تخمین غیرمستقیم از خصوصیات هیدرولیکی در سال‌های اخیر موردتوجه بسیاری قرار گرفته است. این تحقیق به‌صورت مشخص برای ارزیابی مدل‌های هوشمند در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های لومی بر اساس خصوصیات فیزیکی خاک انجام شده است. به‌طور خاص الگوریتم‌های داده‌کاوی SVM، MLP و M5 به‌صورت جداگانه مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفتند.

جدول ۵- ارزیابی شاخص‌های آماری سناریوهای مدل M5

شاخص‌های آماری			سناریو	مجموعه داده‌ها
RMSE	MBE	R ²		
۱/۶۵۱	۰/۱۲۵	۰/۹۸۱	سناریوی اول	آموزش
۱/۳۰۷	۰/۱۷	۰/۹۸۸	سناریوی دوم	
۰/۷۶۳	۰/۲۴۴	۰/۹۹۷	سناریوی سوم	
۲/۵۶۲	-۰/۱۹۲	۰/۹۵۴	سناریوی اول	آزمون
۲/۲۴۸	-۰/۰۶۶	۰/۹۶۴	سناریوی دوم	
۰/۹۳۵	۰/۳۸۴	۰/۹۹۵	سناریوی سوم	



شکل ۸- پراکنش داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی برای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در سناریوی برتر M5

- در پیش‌بینی برخی خصوصیات خاک (مطالعه موردی: استان گلستان)، مجله تحقیقات آب و خاک، (۴۱): ۲۱۱-۲۲۰.
- عزیزپور، س.، فتحی، پ. و نوبخت و کیلی، ک. ۱۳۹۱. برآورد توأم هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و تخلخل مؤثر با استفاده از رویکرد مسأله معکوس هوشمند، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۶ (۶-): ۱۳-۲۲.
- Al-Dosary, N.M., Al-Sulaiman, M.A. and Aboukarima, A.M. 2019. Modelling the unsaturated hydraulic conductivity of a sandy loam soil using Gaussian process regression, *Water SA*. 45 (1): 121-130.
- Amer, A.M., Logsdon, S.D., and Davis, D. 2009. Prediction of hydraulic conductivity in unsaturated soils. *Soil Science*. 174 (9): 508-515.
- Asadollahzadeh, T., Mashal, M. and Karimzadgan, S. 2014. Investigating the Precision of Hydraulic Conductivity and Sorptive Number Estimation in Cased Boreholes by Reynolds Analysis: The Cased of Pakdasht Region, *Journal of Water and Soil*. 28(4):708-716.
- Elbisy, M.S. 2015. Support Vector Machine and regression analysis to predict the field hydraulic conductivity of sandy soil. *KSCE Journal Civil Engineering*. 19 (7): 2307-2316.
- Emamzadeh, S., Soltani, A. S. J., Mashal, M., and Kalanaki, M. 2014. Comparison of RBF and MLP neural network performance to estimate the saturated hydraulic conductivity. *Second National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources*.
- Emamzadeh, E.S., Soltani, J., Mashal, M., Kalanaki, M. and Asadolahzadeh, T. 2017. Performance evaluation of MLP and RBF neural networks to estimate the soil saturated hydraulic conductivity, *Modern Applied Science*. 11(3):1-12.
- Greg, A. 2003. Temporal and spatial (down profile) variability of unsaturated soil hydraulic properties determined from a combination of repeated field experiments and inverse modeling. *Journal of Hydrology*. 281: 23-35.
- Haykin, S. 1999. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice-Hall Inc., NJ.
- Koorevaar, P., Menelik, G. and Dirksen, C. 1983. *Elements of soil physics*. Elsevier, New York, 228 p.
- Kruk, E., Malec, M., Klatka, S., Brodzińska-Cygan, A. and Kołodziej, J. 2017. Pedotransfer function for determining saturated hydraulic conductivity using Artificial Neural Network, *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*. 16(4): 115-126.
- Mady, A.Y. and Shein, E.V. 2018. Support Vector Machine and Nonlinear Regression Methods for

در ارزیابی مدل‌ها، در مدل SVM سناریو سوم دارای ضریب تبیین ۰/۹۵۶ و RMSE برابر با ۵/۳۸۱ بهترین سناریوی مدل مذکور شد. در مدل MLP نیز سناریوی سوم با ضریب تبیین ۰/۹۹۱ و RMSE برابر با ۱/۱۸۸ بهترین سناریوی مدل شناخته شد. هرچند نتایج تحلیلی نشان از عملکرد خوب همه مدل‌های مورد آزمایش دارند و می‌تواند دقت پیش‌بینی خوبی داشته باشند اما ارزیابی سناریوی سوم مدل M5 نشان داد این مدل با ضریب تبیین ۰/۹۹۵ و RMSE برابر با ۰/۹۳۵ به‌عنوان بهترین مدل به لحاظ پیش‌بینی هدایت هیدرولیک اشباع است. بر اساس تحقیق موسوی و سپاسخواه پارامترهای سیلت، رس، ماسه، وزن ظاهری و مواد آلی خاک مؤثرترین متغیرهای ورودی مدل بوده‌اند (Moosavi and Sepaskhah, 2012)، اما بر اساس تحقیق حاضر مؤثرترین پارامترهای ورودی وزن ظاهری و مواد آلی خاک بوده است که سناریوها بر اساس مؤثرترین ورودی‌ها طراحی شده‌اند. هرچند دو پارامتر ورودی در هر دو تحقیق مشترک هستند اما ترتیب آنها یکسان نیست. نتایج حاصل از این تحقیق در تمامی مدل‌ها نشان داد که سناریوی سوم که ورودی آن تمامی پارامترهاست نتیجه بهتری در آن مدل به دست می‌آورد که این موضوع مؤید تحقیقات تایفور و همکاران است (Tayfur et al., 2014). الدوساری و همکاران در استفاده از شبکه MLP برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی خاک نتایج مشابهی برای آن مدل گرفتند (Al-Dosary et al., 2019). پس از مقایسه مطالعه حاضر با نتایج تحقیقات انجام شده در این رابطه، با وجود ظرفیت نشان داده‌شده از استفاده از مدل‌های داده‌کاوی هوشمند برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک لومی، تحقیقات آینده می‌تواند این رویکرد را برای مطالعه سایر متغیرها در زمینه مدیریت آب و انتقال املاح در خاک‌هایی که امکان اندازه‌گیری آسان وجود ندارد، اتخاذ نماید.

منابع

- پوررضا بیلندی، م. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۳۹۴. تحلیل عدم قطعیت خروجی شبکه عصبی در شبیه‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۹ (۴): ۶۵۵-۶۶۴.
- حسینی، س.ا. ۱۳۸۸. برآورد و تحلیل دماهای حداکثر شهرستان اردبیل با استفاده از مدل تئوری شبکه‌های عصبی مصنوعی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی (اقلیم‌شناسی)، دانشگاه محقق اردبیلی.
- سرمدیان، ف.، تقی‌زاده، ر.ا.، عسگری، ح.م.، و اکبرزاده، ا. ۱۳۸۹. مقایسه روش‌های نروفازی، شبکه عصبی و رگرسیون چندمتغیره

- Sihag, P. 2018. Prediction of unsaturated hydraulic conductivity using fuzzy logic and artificial neural network. *Model. Earth Syst. Environ.* 4 (1): 189–198.
- Sihag, P., Tiwari, N.K. and Ranjan, S. 2017. Prediction of unsaturated hydraulic conductivity using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *ISH J. Hydraul. Eng.* 1–11.
- Sihag, P., Mohsenzadeh Karimi, S. and Angelaki, A. 2019. Random forest, M5P and regression analysis to estimate the field unsaturated hydraulic conductivity, *Applied Water Science.* 9(129). <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1007-8>.
- Tayfur, G., Nadiri, A.A., Moghaddam, A.A. 2014. Supervised intelligent committee machine method for hydraulic conductivity estimation. *Water Resources Management.* 28(4): 1173–1184.
- Tokunaga, T.K. 2009. Hydraulic properties of adsorbed water films in unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 45:W06415.
- Tuller, M., and D. Or. 2001. Hydraulic conductivity of variably saturated porous media: Film and corner flow in angular pore space. *Water Resour. Res.* 37:1257–1276.
- Twarakavi, N.K.C., Simunek, J. and Schaap, M.G. 2009. Development of Pedotransfer Functions for Estimation of Soil Hydraulic Parameters using Support Vector Machines, *Soil Physics.* 73(5): 1443–1452.
- Vapnik, V.N. 1998. *Statistical Learning Theory*, John Wiley, New York.
- Wang, Y., J. Ma, H. Guan, and G. Zhu. 2017. Determination of the saturated film conductivity to improve the EMFX model in describing the soil hydraulic properties over the entire moisture range. *J. Hydrol.* 549:38–49.
- Wang, Y., J. Ma, Y. Zhang, M. Zhao, and W.M. Edmunds. 2013. A new theoretical model accounting for film flow in unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 49:5021–5028.
- Yao, R.J., Yang, J.S., Wu, D.H., Li, F.R., Gao, P., Wang, X.P. 2015. Evaluation of pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity in coastal salt-affected mud farmland. *Journal of Soils and Sediments.* 1–15.
- Estimating Saturated Hydraulic Conductivity, *Moscow University Soil Science Bulletin.* 73(3): 129–133.
- Marcel, G.S., J.L. Feike., T. Martinus., and H. van Genuchten., 1998. *Neural Network Analysis for Hierarchical Prediction of Soil Hydraulic Properties*, Soil Science Society. 62: 847–855.
- Moosavi, A.A. and Sepaskhah, A.R. 2012. Artificial neural networks for predicting unsaturated soil hydraulic characteristics at different applied tensions. *Arch. Agron. Soil Sci.* 58 (2): 125–153.
- Navabian, M., A.M. Liaghat., and M. Homayni., 2004. Prediction of electrical conductivity with neural networks. *International water and soil conference*, Shiraz University. 203–211.
- Neshat, A. and Farhad, M. 2012. A presentation of an experimental model for unsaturated hydraulic conductivity under affection of physical properties of Soil: A case-by-case study of Baghin Plain in Kerman, Iran. *Acad. J. Plant Sci.* 5 (3): 70–75.
- Nosrati, K.F., Movahedi, S.A., Naini, A. Hezar, J., Rishani, Gh. and Deghani, A. 2012. Using artificial neural networks to estimate saturated hydraulic conductivity from easily available soil properties. *Electronic Journal of Soil Management and Sustainable Production.* 2(1): 95–110.
- Pal, M., Deswal, S. 2009. M5 model tree based modelling of reference evapotranspiration: *HYDROLOGICAL PROCESSES.* 23, P. 1437–1443.
- Reynolds, W. D. and Topp, G. C. 2008. Soil water analyses: Principles and parameters. In M.R. Carter, & E.G. Gregorich (Eds.), *Soil sampling and methods of analysis.* 2nd Ed. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 913–939.
- Rezaei, A. R., Sayad, G. A. Mazloom, M., Jafari N., & M. Shorafa, 2012, Comparison of artificial neural networks and regression pedotransfer functions for predicting saturated hydraulic conductivity in soils of Khuzestan province. *JWSS - Isfahan University of Technology.* 16(60): 107–118.
- Ryel, R.J., M.M. Caldwell, C.K. Yoder, D. Or, and A.J. Leffler. 2002. Hydraulic redistribution in a stand of *Artemisia tridentata*: Evaluation of benefits to transpiration assessed with a simulation model. *Oecologia.* 130:173–184.

Evaluation of Intelligent Models Due to Estimating Saturated Hydraulic Conductivity in Loamy Soils

S Heidari TashehKaboud*¹, M Khoshravesh²

Received: Oct.26, 2020

Accepted: Dec.17, 2020

Abstract

Saturated hydraulic conductivity is one of the main parameters in agricultural and environmental studies that is essential for the estimation and management of water and solute transport in soil. In this research, 1200 series of data related to loamy soils were used to prediction and modeling saturated hydraulic conductivity using soil physical properties such as bulk density, available water capacity, organic carbon content and percent of clay, silt and sand content. From studied data series, 900 series were allocated for use in training models and 300 series for testing models in three designed scenarios. The performance of SVM, MLP and M5 models was evaluated in estimating saturated hydraulic conductivity of loamy soils. The performance of the models was compared using the statistical indices such as coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE) and mean bias error (MBE). The results showed that all three models used have good ability in saturated hydraulic conductivity modeling, but the M5 model with a high coefficient of determination over 0.95 in all three scenarios and a lower RMSE than other models was selected as the superior model. The results showed that intelligent data mining models make it possible to estimate unknown values based on ready patterns in a database. Therefore, the applied models can be used to predict solute transport in soil and soil physical parameters.

Keywords: Bulk density, Decision tree, Soil physical properties, Solute transport, Water flow in soil,

1- PhD Student in Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

(* - Corresponding Author Email: shadiheidari1990@gmail.com)

مقاله علمی-پژوهشی

روندیابی سیل به روش موج سینماتیک در بستر GIS (مطالعه موردی: رودخانه قره‌چای)

مینا رضایی انور^۱، محمود ذاکری نیری^{۲*}، معصومه سهرابی ملایوسنی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۸

چکیده

هدف پژوهش حاضر، روندیابی سیل رودخانه قره‌چای به روش موج سینماتیک بود که در محیط برنامه‌نویسی MATLAB انجام شد. با فراهم آوردن داده‌های موردنیاز، مدل‌سازی روندیابی سیل هر ایستگاه به روش موج سینماتیک در حوضه رودخانه قره‌چای صورت گرفت. نتایج حاصل از مشخصات فیزیکی رودخانه حاکی از آن بود که محدوده مورد مطالعه دارای شیب و ضریب زبری کم و شماره منحنی خاک بالایی است. به منظور بهبود روندیابی به روش موج سینماتیک، با داشتن هیدروگراف ورودی به عنوان شرط اولیه و در نظر گرفتن مقدار صفر برای تمامی دبی‌های با زمان صفرثانیه به عنوان شرط مرزی، مدل‌سازی انجام شد. گراف‌های به دست آمده، نشان‌دهنده تطابق مدل‌سازی انجام شده با داده‌های مشاهداتی بود. برای ارزیابی توانایی مدل، از شاخص‌های نش-ساتکلیف (NS)، ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطای استاندارد شده (NRMSE)، استفاده شد، در نتایج ارزیابی کارایی مدل برای ایستگاه هیدرومتری ازنا، بازنه، توره و پل دوآب با مقدار بالای ضریب نش و ضریب تعیین و مقدار خطای پایین NRMS، حاکی از آن است که مدل موج سینماتیک در شبیه‌سازی روندیابی سیل موفق عمل کرده و از دقت مطلوبی برخوردار است و می‌توان نتایج مدل حاضر را به حوضه‌های با این نوع شکل تعمیم داد.

واژه‌های کلیدی: رودخانه قره‌چای، روندیابی، ضریب زبری مانینگ، موج سینماتیک

مقدمه

چگونگی طغیان و فروکش سیل یا صعود و نزول هیدروگراف رودخانه در نقطه مشخصی از آن است. این مساله را می‌توان با روش روندیابی سیل مورد تحلیل قرار داد. مفهوم اصلی روندیابی سیل آن است که اگر مشخصات هیدروگراف در نقطه دیگر در پایین دست تخمین زده شود، مسلماً هیدروگراف‌های این دو نقطه مشابه نخواهد بود، زیرا خصوصیات مسیری که آب از آن گذشته یا در آن جریان دارد، شکل هیدروگراف را تغییر می‌دهد (مهدوی، ۱۳۹۲). برای حل عددی و عملی معادله‌های روندیابی، روش‌های گوناگونی به کار گرفته می‌شود. روش‌های روندیابی تلاش می‌کند تا با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی به عنوان داده‌های ورودی، با استفاده از مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها، تبدیل داده‌های ورودی به خروجی‌های مناسب و فرضیات ساده‌سازی مورد نظر، فرآیندهای واقعی هیدرولوژیکی را شبیه‌سازی نماید. موج سینماتیک از روش‌های هیدرولوژیکی روندیابی جریان می‌باشد که در این روش هم معادله پیوستگی جریان و هم معادله مومنتم در نظر گرفته می‌شوند. موج سینماتیک شکلی از معادله مومنتم است که عمق ارتباط ساده با دبی دارد. باید توجه داشت که موج سینماتیک زمانی رخ می‌دهد که دوره‌های دینامیکی در معادله مومنتم قابل

پدیده سیلاب به عنوان یکی از بلاای طبیعی است که سالانه در نقاط مختلف جهان رخ داده و موجب ایجاد خسارات سنگین جانی و مالی می‌گردد. بررسی و مطالعه بر روی پارامترهای موثر بر رفتار رودخانه جهت مهار و استحصال آب، بسیار حائز اهمیت است. همچنین تعیین مشخصات سیل در مکان و زمان، به منظور شناخت رفتار غیرماندگار آن در هر مقطع مورد نظر و پهنه‌بندی سیلاب از دیدگاه مدیریت سیلاب، اهمیت فراوانی دارد؛ لذا یکی از مسائل عمده در مهندسی هیدرولوژی که اغلب سر و کار با آن زیاد است، پیش بینی

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران
۳- دانشیار گروه زمین شناسی، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران
* نویسنده مسئول: (Email: Zakeriiu@gmail.com)

است که مدل موج سینماتیک در روندیابی سیل موفق عمل کرده است؛ همچنین بالا بودن دقت نتایج این روش و وسعت دامنه کاربرد آن در مسائل مختلف، استفاده از این روش را منطقی جلوه می‌دهد. حوضه قره‌چای در مسیر ایستگاه‌های ازنا، بازنه، توره به علت سرشاخه بودن ۳ ایستگاه و ریزش آن به ایستگاه پل دوآب و پرآب بودن این مسیر از رودخانه، براساس آمار اداره آب شهر اراک، سیل خیز است. نظر به موقعیت این قسمت از رودخانه قره‌چای و اهمیت روندیابی سیل در این قسمت حوضه، به‌عنوان حوضه مطالعاتی انتخاب شد. لذا روندیابی سیل به روش موج سینماتیک در حوضه رودخانه قره‌چای موضوع این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

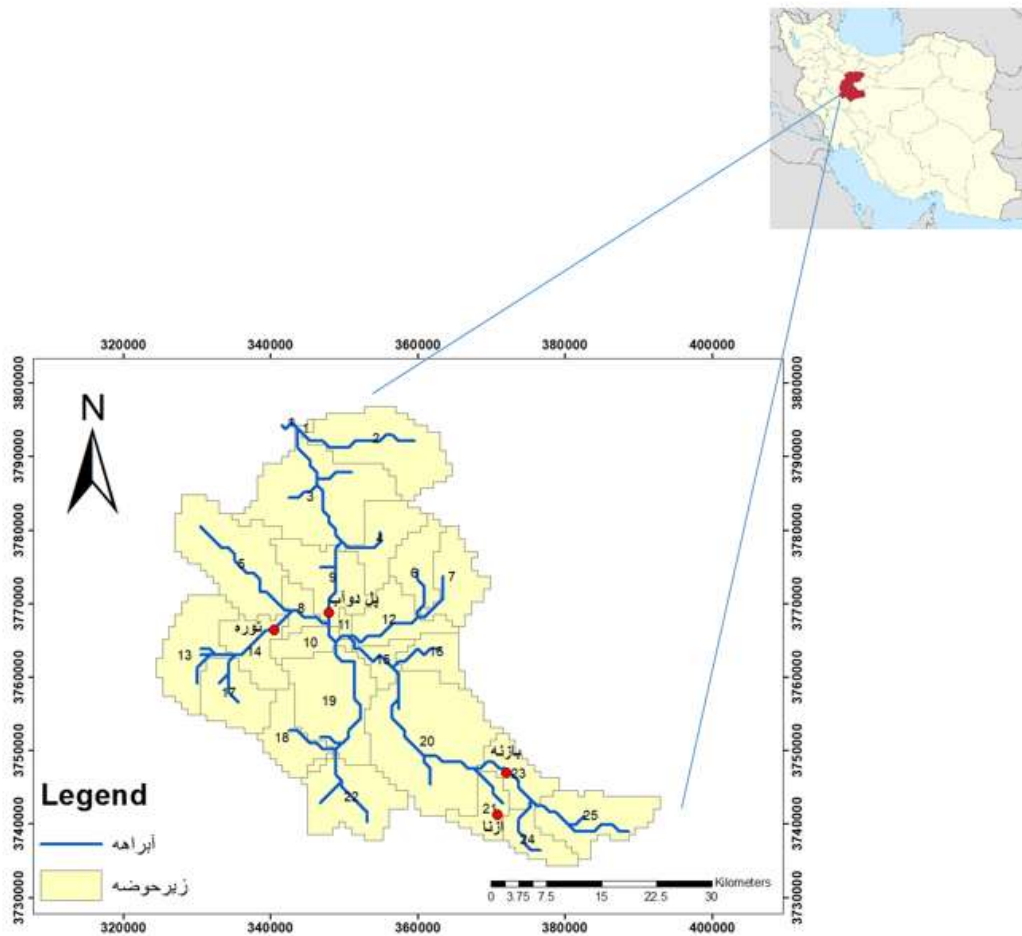
محدوده مورد مطالعه

حوضه مورد مطالعه این پژوهش، رودخانه قره‌چای است؛ حوضه آبخیز قره‌چای یکی از زیرحوضه‌های دریاچه نمک می‌باشد که بین عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی و طول ۴۸ درجه و ۷ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی قرار دارد (شکل ۱). وسعت این حوضه در محدوده استان مرکزی برابر ۲۰۱۱۷ کیلومتر مربع است. رودخانه قره‌چای اصلی‌ترین رودخانه این حوضه آبخیز می‌باشد و طول آبراهه اصلی در این حوضه برابر ۷۱ کیلومتر بوده و تغییرات ارتفاع در محدوده این حوضه از ۹۳۹ تا ۳۵۴۴ متر است. رودخانه قره‌چای با نام رودخانه شراپ پس از خروج از محدوده استان مرکزی «در پایین‌دست ایستگاه هیدرومتری جوشیروان» و به نام رودخانه قره‌چای در راستای جنوب به شمال طی مسیر نموده و در استان همدان پس از اتصال شاخه دیگر به این رودخانه در مسیر غرب به شرق حرکت می‌نماید و پس از عبور از ایستگاه هیدرومتری خماجین، در بخش شمالی استان مرکزی وارد استان می‌گردد. از حوضه مورد مطالعه، ایستگاه پل دوآب به عنوان ایستگاه پایین دست هیدرومتری انتخاب شد. بالادست این ایستگاه سرشاخه است و سه ایستگاه ازنا، بارنه و توره را شامل می‌شود. که داده‌های مورد نیاز پژوهش، از این ایستگاه‌ها دریافت شد. از داده‌های روزانه این ایستگاه‌ها استفاده شد.

روش تحقیق

نظر به اینکه اندازه‌گیری سیل در تمام نقاط مسیر، به‌علت طولانی بودن مسیر و دیگر مشکلات از قبیل هزینه‌های مورد نیاز برای این کار میسر نمی‌باشد، لذا با استفاده از روندیابی می‌توان وضعیت سیل را در هر نقطه‌ای از مسیر و یا کانال مشخص نمود. موج سینماتیک یک مدل هیدرولیکی جهت انجام روندیابی جریان سطحی و داخل کانال می‌باشد که در این تحقیق با هدف شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در نرم افزار MATLAB اجرا شده است.

اغماض باشد. تئوری روندیابی سیلاب با استفاده از روش موج سینماتیک توسط به توصیف رفتار موج سینماتیک پرداخت. از جمله کارهایی که در پیش‌برد مدل موج سینماتیکی صورت پذیرفته است، می‌توان به تلاش‌های چو اشاره نمود (Maidment, 1996; Chow, 1559). در ذیل نمونه‌هایی از مطالعات داخلی و خارجی اخیر مرتبط با موضوع پژوهش آورده شده است: آقایی دانشور و خانجانی (۱۳۹۵)، در مطالعه‌ای به کاربرد مدل‌های یک و دوبعدی جریان سطحی و نفوذ برای حوضه آبریز دره مارون استان فارس پرداختند؛ نتایج تحقیق حاکی از آن بود که موج سینماتیک در پیش‌بینی مقدار و زمان دبی اوج سیلاب‌های انتخابی تقریب‌سازی مناسبی را داراست؛ نتایج حاصل از مطالعه امیدوار (۱۳۹۳) در شبیه‌سازی توزیعی رواناب با استفاده از حل عددی تقریب موج سینماتیک نشان داد که مدل کدنویسی شده دارای عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی فرایندهای رواناب-فرسایش و رسوب می‌باشد؛ مطالعه‌ی قنبرآبادی (۱۳۹۱) در بررسی کارایی روندیابی حوضه آبخیز به روش موج سینماتیک مشخص کرد که مدل موج سینماتیک جهت شبیه‌سازی هیدروگراف سیل رگبارها نسبتاً مناسب دانسته‌اند؛ کریمیان کاکلکی و همکاران (۱۳۹۱)، در مطالعه‌ای به روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها با استفاده از مدل موج سینماتیک و ماسکینگام - کانژ پرداختند؛ نتایج تحقیق نشان‌دهنده توانایی بیشتر مدل موج سینماتیک و صحت بیشتر نتایج حاصل از آن بود. ورگارا و همکاران در پژوهشی به برآورد پارامترهای مدل موج سینماتیک برای پیش‌بینی سیل در ایالات متحده در ۱۶۷۲ حوضه و ۴۷۵۶۳ حوادث استخراج شده از یک شبیه‌سازی ۱۰ ساله پرداختند؛ نتایج حاکی از آن بود که مهارت شبیه‌سازی مسیریابی جریان برای اوج جریان و زمان برآورد اوج جریان به‌طور قابل‌توجهی زیاد است و سازگاری آن را با تأیید نمونه بزرگ نشان می‌دهد (Vergara et al., 2016)؛ رای و همکاران به بررسی تأثیر زیری متغیر بر رواناب پرداختند. و با بیان اینکه زبری زمینی یکی از پارامترهای کلیدی در مدل سازی هیدرولیکی رواناب حوضه است و در طول تکامل یک هیدروگراف رواناب، زبری جریان ثابت نیست، باتوجه به رابطه غیرخطی بین زبری سطح و عمق جریان، به مطالعه زبری متغیر در مدل موج سینماتیک و بررسی تأثیر آن بر رواناب از چهار حوضه آبخیز با اندازه‌های متفاوت و شرایط آب‌وهوایی پرداختند. نتایج نشان داد که شکل هیدروگراف به‌طور کلی، در حالت زبری متغیر، بهتر حفظ می‌شود تا زبری ثابت (Rai, Upadhyay and Sing, 2010)؛ چووا و انگ در پژوهشی شبیه‌سازی بارش رواناب را با موج سینماتیک را مورد مطالعه قرار دادند؛ نتایج حاصل شده در بخش مدل‌سازی سینماتیک با فرض صفر در نظر گرفتن تلفات و در نظر گرفتن حوضه به عنوان یک کل برای محاسبات، شبیه‌سازی حاصل شده با هیدروگراف واقعی برابر است (Chua and Wong, 2010). مرور مطالعات حاکی از این



شکل ۱- نقشه موقعیت مکانی رودخانه قره‌چای

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i_n \quad q = \alpha y^\beta \quad (1)$$

در جایی که y نشان‌دهنده عمق جریان، q دبی واحد عرض، i_n خالص بارندگی، $\beta = 5/3$ ، $\alpha_p = \sqrt{S_p/n_p}$ شیب سطح صاف، n_p ضریب مانینگ زبری انحنای سطح زمین و x و t به ترتیب نشان‌دهنده فاصله و زمان هستند. معادله (۱) می‌تواند به صورت عددی با استفاده از گسسته‌سازی زیر حل شود (Alley et al. 1980):

$$y_j^t = y_j^{t-1} + \Delta t \left[i_n - \frac{(q_j^{t-1} - q_{j-1}^{t-1})}{\Delta x} \right] \quad (2)$$

$$q_j^t = \alpha (y_j^t)^\beta \quad (3)$$

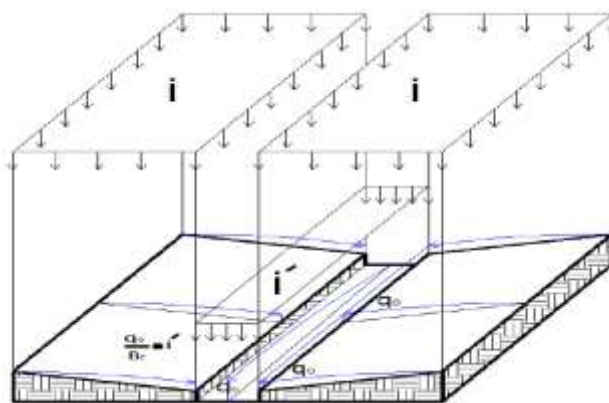
زیر شاخص یک گره شاخص است، Δx فاصله شبکه، Δt گام زمان است. با جایگزین کردن معادله (۲) در معادله (۳) حاصل می‌شود:

$$\left[\left(\frac{q_j^{t-1}}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} + \Delta t \left[i_n - \frac{(q_j^{t-1} - q_{j-1}^{t-1})}{\Delta x} \right] \right]^\beta \quad (4)$$

همچنین به منظور محاسبه پارامترهای مهم فیزیوگرافی حوضه آبریز قره‌چای، از نرم‌افزار ArcGIS ورژن ۱۰٫۴ استفاده شد. سپس براساس داده‌های ورودی که شامل نقشه‌های کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک، شیب، طول و عرض حوضه، ضریب زبری مانینگ و شدت بارش است، روندیابی انجام گرفته و در آخر هیدروگراف روندیابی شده با هیدروگراف شبیه‌سازی مقایسه شد. ارزیابی مدل با شاخص‌های خطاسنجی جذر میانگین مربعات خطای استاندارد شده (NRMSE)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) صورت گرفت که در ذیل به تشریح به آن پرداخته شده است.

موج سینماتیک شکلی از رابطه مومنتم است که در آن عمق ارتباط ساده‌ای با دبی دارد. باتوجه به بازدید میدانی که از حوضه رودخانه قره‌چای به عمل آمد، حوضه مورد مطالعه V شکل و در اکثر مناطق پروفیل برداری مقطع کانال از نوع مستطیلی عریض بود؛ معادلات موج جنبشی برای این مقطع عبارتند از:

مقطع حوضه مورد مطالعه مستطیلی است که براساس آن، پارامترهای α و m معادله موج سینماتیک محاسبه شد. در نهایت به منظور محاسبه زمان پیمایش سیل به خروجی حوضه، با توجه به نوع حوضه که کتاب باز بود، محاسبه صورت گرفت. در حالت کتاب باز، دو صفحه جانبی و یک کانال در نظر گرفته می شود که خود بر دو نوع است: عریض دیدن کانال و لحاظ کردن اثر بارش روی کانال میانی (که این نوع حوضه های شهری را شامل می شود) و نوع دوم، عریض دیدن کانال و نادیده گرفتن اثر بارش روی کانال میانی که این وضعیت اغلب در حوضه های طبیعی رخ می دهد و فرضی نزدیک به واقعیت است (شکل ۲). زیرا معمولاً کانال ها همان آبراهه ها در یک حوضه طبیعی هستند که نسبت به مساحت کل حوضه، مساحت قابل توجهی را تشکیل نمی دهند.



شکل ۲ - حوضه V شکل

که Q_0 جریان در انتهای بالادست کانال قرار دارد. برای حوضه مصنوعی، در هر گام زمانی، رواناب از دو سطح زمینی در مجاورت کانال برای اولین بار محاسبه شد تا q_L^t قبل از اعمال در معادله ی تعیین شود تا Q_{out}^t مشخص شود. روش فوق را چووا و انگ، در مطالعه ی خود استفاده کرده بود (Chua and Wong, 2010) و مدل آزمایشگاهی آن نیز به شرح ذیل بود: داده های مورد نیاز برای محاسبه این دو حوضه از یک ایستگاه آزمایشی در دانشگاه فن آوری Nanyang به دست آمدند. ایستگاه آزمایشی شامل چهار بخش آزمایشی که ۲۵ متر طول و عرض ۱ متر است، می شود. به این ترتیب مساحت حوضه برای هر بخش آزمایشی ۲۵ متر مربع است. هر بخش آزمایش توسط یک دیوار بتنی با ارتفاع ۱ متر در امتداد دو ضلع دیگر و در انتهای بالادست احاطه شده است. سطوح زمینی دارای شیب ۲٪ است. حوضه کتاب باز شامل دو سطح زمینی است (شیب = ۱۱٪) که به سمت کانالی

راه حل تحلیلی برای جریان در خروجی با قرار دادن $\Delta x = L_p$ که L_p طول صفحه زمینی است به دست می آید. دبی مجرای خروجی Q_{out}^t توسط رابطه زیر داده می شود:

$$= \frac{\sqrt{S_p}}{n_p} \left[\left(\frac{n_p \cdot q_{out}^{t-1}}{\sqrt{S_p}} \right)^{\frac{3}{5}} + t_r \left[i_n - \frac{(q_{out}^{t-1} - q_0^{t-1})}{L_p} \right] \right]^{\frac{5}{3}} \quad (5)$$

که q_0 جریان در انتهای بالادست زمین برابر با صفر است. مدل فیزیوگرافی کتاب باز توسط محققین گوناگون برای کاربرد مدل موج سینماتیک برای سیستم هیدرولوژیکی توسعه یافته است. در داخل یک حوضه آبخیز طبیعی، نوع خاک، کاربری، پیکربندی کانال، شیب، پوشش گیاهی و غیره ممکن است تغییر کند، از این رو مدل کتاب باز مشابه با تغییر شکل طبیعی و واقعی فیزیوگرافی حوضه بر روی فرآیند رواناب تاثیر می گذارد. بنابراین برای یک پوشش جامع از جنبه های توزیعی، یک مدل فیزیوگرافی توسعه یافته است.

با فرض کتاب باز بودن حوضه مورد مطالعه، معادلات موج جنبشی توسط رابطه زیر داده میشود:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad Q = \alpha_c A^{\beta_c} \quad (6)$$

که A و Q مساحت و دبی جریان در کانال هستند و q_L جریان جانبی درون کانال است. برای یک کانال مستطیلی عریض، $\alpha = \frac{S_c}{W^{\frac{2}{3}} n_c}$ و $\beta_c = 5/3$ که n_c ضریب زبری مانینگ، S_c شیب کانال و W عرض کانال است (Wong, 1992 and 2009). با استفاده از روش گسسته سازی و جایگزینی $\Delta x = L_c$ جایی که L_c طول کانال است، دبی در مجرای خروجی Q_{out} توسط معادله ی (۷) داده می شود:

$$Q_{out}^t = \sqrt{S_c} / n_c W_c^{\frac{2}{3}} \left[\left(\frac{n_c W_c^{\frac{2}{3}} Q_{out}^{t-1}}{\sqrt{S_c}} \right)^{\frac{3}{5}} + t_r \left[q_L^t - \frac{(Q_{out}^{t-1} - Q_0^{t-1})}{L_c} \right] \right]^{\frac{5}{3}} \quad (7)$$

تعداد داده‌هاست. اندیس sim بیانگر داده‌های شبیه‌سازی شده و اندیس obs بیانگر داده‌های مشاهده‌ای است. مقدار R^2 بیانگر ارتباط خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای بوده که مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است.

هرچه مقدار ضریب تعیین (R^2) به یک نزدیکتر باشند، دبی‌های شبیه‌سازی شده از دقت مطلوب‌تری برخوردار خواهند بود.

مقدار ضریب ناش- ساتکلیف بین یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. مقدار بهینه این شاخص یک است. اگر میزان آن از ۰/۵ بیشتر باشد، مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است و در صورت منفی شدن آن بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشود و از متوسط مقادیر مشاهده‌ای استفاده شود. نحوه محاسبه ضریب نش- ساتکلیف در این پژوهش در رابطه ۹ آمده است:

$$NS = 1 - \frac{\sum(Y_m - Y_s)^2}{\sum(Y_m - \bar{Y})^2} \quad (9)$$

که در آن Y_m دبی مشاهده شده، Y_s دبی شبیه‌سازی شده و \bar{Y} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است. جذر میانگین مربعات خطا، تفاوت میان پیش‌بینی‌های انجام شده با مدل و مشاهداتی که تبدیل به مدل شده می‌باشد. به تفاوت مقدار باقی مانده نیز گفته می‌شود. RMSE به دنبال یکپارچه کردن آن‌ها در یک عدد واحد است. اعداد محاسبه شده برای خطای RMS بیانگر این است که بین دو مجموعه داده چه میزان خطا وجود دارد. به عبارت دیگر، جذر میانگین مربعات خطا عدد پیش‌بینی شده و عددی که به صورت تجربی به دست آمده را با هم مقایسه می‌کند. هر چه جذر میانگین خطای مربعات کمتر باشد، بهتر است.

نحوه محاسبه جذر میانگین مربعات خطا، در رابطه ۱۰ آورده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2} \quad (10)$$

که Q_{obs} و Q_{sim} به ترتیب مقادیر دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای و n تعداد دبی‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای است. باتوجه به این که مقدار RMSE متناسب با واحد اندازه‌گیری متغیر است، مقایسه مقدار آن بین مدل‌های ساخته شده برای دو متغیر با واحدهای متفاوت درست نخواهد بود. لذا مقدار RMSE را به دامنه داده‌های متغیر وابسته تقسیم کرده و آن را RMSE نرمال شده (NRMSE) می‌نامند. این معیار برای مقایسه مدل‌های مختلف مناسب خواهد بود. لازم به ذکر است که NRMSE زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقیق بودن مدل است.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{x_{max} - x_{min}} \quad (11)$$

بر اساس روش ذکر شده، نمودار گردشی پژوهش حاضر در شکل ۳ آورده شده است.

مستطیلی متمایل شده است (شیب = ۲٪) و جریان را به خروجی منتقل می‌کند. رواناب از بخش‌های آزمایشی به سوی مخازن وزنی کالیبره شده برای ثبت جریان خروجی بخش‌های آزمایشی خارج می‌شود. مخزن‌های وزنی قبل از استفاده از یک دستگاه جریان الکترومغناطیسی کالیبره شدند. دو ایستگاه باران‌سنجی که هر کدام ۲۵۶ متر از هر دو طرف کانال بودند برای ثبت بارش مورد استفاده قرار گرفتند که پس از ارزیابی با ضریب خطای ۰/۰۲۹ همبستگی ۰/۹۸ صحت روش فوق در محاسبه روندبایی سیل تایید شد.

یکی از مسائل مهم در مهندسی رودخانه داشتن اطلاعات کافی در مورد مقاومت هیدرولیکی در کانال‌های آبرفتی است. برای محاسبه دبی، سرعت و عمق جریان در کانال‌های طبیعی و نیز برآورد سیل و رسوب، ارزیابی مقاومت جریان ضروری می‌باشد. برای تعیین مقاومت جریان در مجاری روباز از روابط مانینگ، شازی و دارسی-ویسیاخ استفاده می‌شود. تخمین درست این ضرایب می‌تواند به برآورد دقیق‌تر شرایط جریان کمک کند. در این پژوهش ضریب زبری مانینگ مدنظر است (روشنگر، تقی‌اعلمی، ثاقبیان، ۱۳۹۷). عموماً از فرمول‌ها، آزمایش‌ها، برداشت‌های صحرائی، جداول، تصاویر و ویژگی‌های پوشش گیاهی و کاربری اراضی برای تخمین ضریب زبری مانینگ استفاده می‌شود. در این پژوهش برای به دست آوردن ضریب زبری مانینگ با تخمین براساس جدول ارائه شده توسط چو (۱۹۵۹) با پوشش گیاهی و کاربری اراضی حوضه قره‌چای و بهینه‌سازی آن، به دست آمد. در جدول ۱، مقادیر پارامتر ضریب مانینگ دامنه بر اساس کاربری اراضی آورده شده است (Liu and De Smedt, 2005)

جدول ۱- مقادیر پارامتر مانینگ (Chow, 1959)

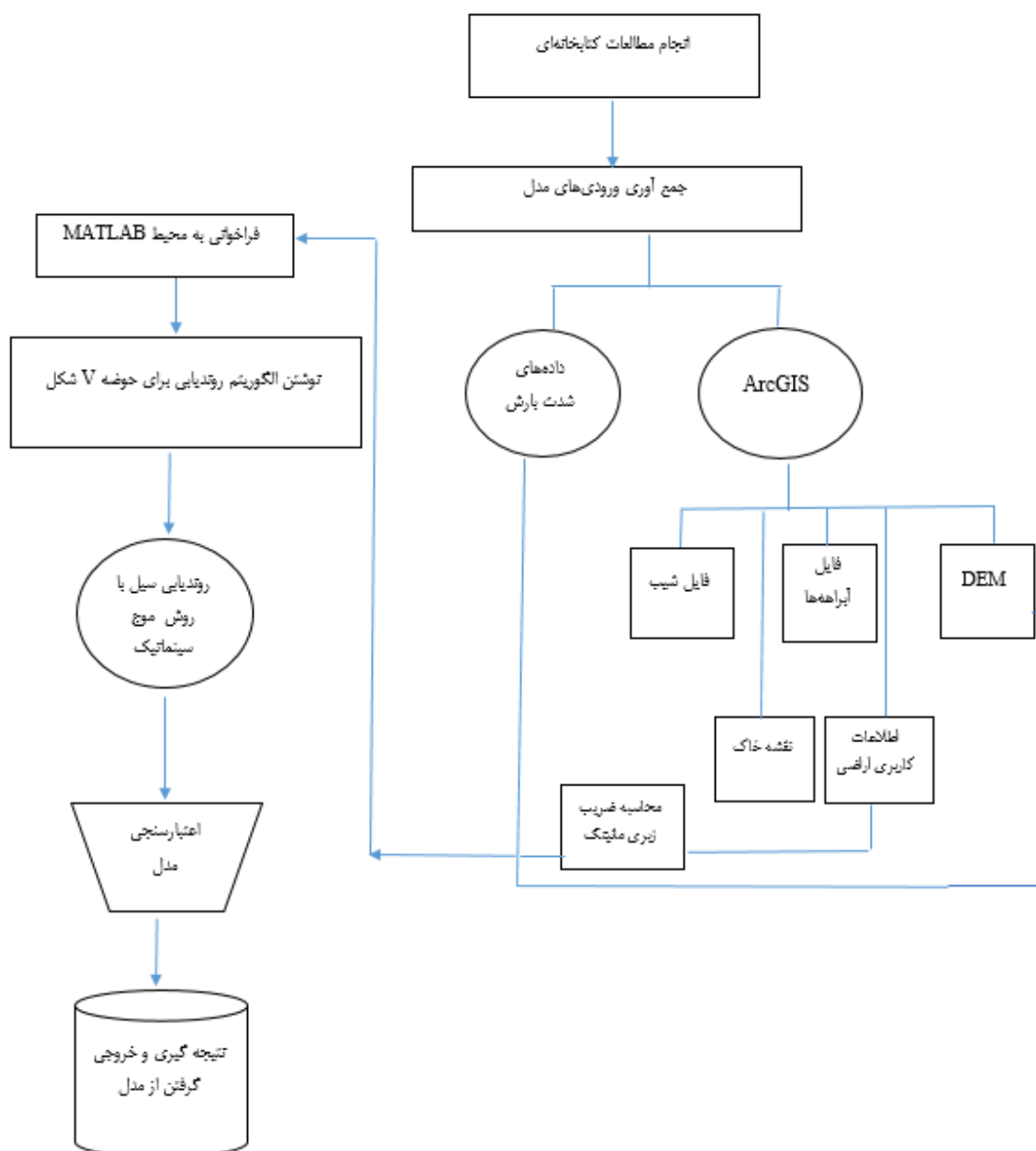
کاربری اراضی	ضریب مانینگ ($n^{-1/3}$ s)
ارضای مرتعی خزان کننده	۰/۴
ارضای جنگلی خزان کننده	۰/۸
زراعت دیم	۰/۱۵
زراعت آبی	۰/۲

شدت بارش، مقدار بارندگی در واحد زمان است که معمولاً برحسب میلیمتر بر ساعت یا اینچ بر ساعت توصیف می‌شود؛ که به صورت $i=p/t$ محاسبه می‌شود. که p مقدار بارندگی و t مدت بارندگی می‌باشد. برای اجرای مدل آمار بارش‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴، انتخاب شد. به راهنمایی آب منطقه‌ای اراک، دلیل انتخاب این سال آبی، این بود در این سال داده‌های ثبت شده‌ی هر ۴ ایستگاه مورد مطالعه، حداکثر دبی اوج سالانه بالایی داشتند.

در ادامه روابط شاخص‌های ارزیابی مدل آورده شده است: نحوه محاسبه ضریب تعیین در رابطه ۸ آورده شده است:

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})}{Q_{obs} \times Q_{sim}} \right] \quad (8)$$

در این رابطه، Q داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و n برابر



شکل ۳- نمودار گردش پژوهش

نتایج و بحث

نتایج حاصل از مشخصات فیزیکی حوضه در GIS: با

اجرای GIS پارامترهای فیزیوگرافی حوضه قره‌چای و نقشه زیر حوضه‌ها براساس وضعیت آبراهه‌های حوضه، تولید شد.

براساس اطلاعات نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز قره‌چای، بیشترین مساحت آن، کشاورزی و زمین‌های حاصل‌خیز و بیابان است. همچنین باتوجه به نقشه خاک محدوده مورد مطالعه، بیشترین

مساحت حوضه به اینسپتی سول و انتی سول اختصاص دارد. این خاک‌ها جوانند و یا در ابتدای مراحل به‌وجودآمدن قرار دارند و جذب آب پایینی دارند. اقلیم منطقه نیز نیمه خشک است.

در پژوهش حاضر پس از بهینه‌سازی مقدار پارامترضریب زبری مانینگ براساس روش شرح داده شده، محاسبه شد که مقدار $0/133$ برای حوضه مورد مطالعه به‌دست‌آمد. اطلاعات مساحت، شیب و طول آبراهه حوضه، به تفکیک زیرحوضه‌ها، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- خصوصیات فیزیوگرافی زیرحوضه‌های رودخانه قره‌چای

زیرحوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	شیب (متر/متر)	ارتفاع متوسط حوضه (متر)	طول آبراهه اصلی
زیرحوضه ۱	۳/۶	۰/۳	۱۷۷۱/۵	۳/۰۲
زیرحوضه ۲	۱۳۹/۱	۱	۲۱۷۶	۱۷/۹۶
زیرحوضه ۳	۱۹۴/۱	۰/۴	۲۲۱۲	۱۷/۸۸
زیرحوضه ۴	۶۸/۸	۳/۵	۲۲۵۲/۵	۷/۱۲
زیرحوضه ۵	۱۵۸/۲	۱/۳	۲۴۴۰/۵	۱۸/۶۹
زیرحوضه ۶	۵۶/۳	۱	۲۲۴۳/۵	۷/۱۲
زیرحوضه ۷	۶۶/۶	۱	۲۱۰۳/۵	۷/۴۸
زیرحوضه ۸	۲۷/۸	۰/۵	۲۱۸۴/۵	۵/۸۴
زیرحوضه ۹	۹۲/۲	۰/۳۵	۲۱۷۸	۱۱/۸۲
زیرحوضه ۱۰	۳۳/۶۹	۰/۱	۲۱۷۷/۵	۲/۹۲
زیرحوضه ۱۱	۶/۵۹	۰/۳۲	۴۰۰۵	۲/۰۶
زیرحوضه ۱۲	۶۷/۳	۰/۵	۴۰۹۴	۱۱/۱۸
زیرحوضه ۱۳	۹۹/۶	۱	۲۴۱۵/۵	۷/۹۷
زیرحوضه ۱۴	۶۳/۷	۱/۲	۲۴۲۱	۱۰/۱۸
زیرحوضه ۱۵	۲۸/۵	۰/۰۶	۱۸۶۷/۵	۸/۹۷
زیرحوضه ۱۶	۴۳/۲	۰/۲۵	۲۲۵۱	۸/۱۹
زیرحوضه ۱۷	۷۳/۹	۱/۲۵	۲۱۷۲	۷/۳
زیرحوضه ۱۸	۵۸/۵	۲	۲۴۶۵/۵	۷/۴۸
زیرحوضه ۱۹	۱۴۱/۳	۱	۲۳۹۲	۲۱/۷۲
زیرحوضه ۲۰	۲۵۱/۹	۰/۷	۲۴۸۰	۲۲
زیرحوضه ۲۱	۴۱/۷۵	۱/۵	۲۳۵۱/۵	۶/۳
زیرحوضه ۲۲	۱۱۰/۶	۱/۶	۲۵۶۷/۵	۱۱/۵۹
زیرحوضه ۲۳	۵۳/۴	۰/۵	۲۲۳۵	۱۰/۶۸
زیرحوضه ۲۴	۴۳/۹	۴	۲۲۷۰	۹/۵۴
زیرحوضه ۲۵	۹۹/۶	۱	۲۴۷۹/۵	۱۵/۷۴

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مدل‌سازی روندبایی حاصل از داده‌های بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه، موفق عمل کرده است. گاهی مدل در تخمین دبی اوج، خطا داشته است.

نتایج ارزیابی کارایی مدل برای ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه، در جدول ۴ آورده شده است؛ مقدار بالای نش ساتکلیف (NS)، ضریب تعیین (R2)، و مقدار خطای پایین NRMS در روندبایی حاصل شده حاکی از آن است که مدل موج سینماتیک در شبیه‌سازی روندبایی سیل موفق عمل کرده و از دقت مطلوبی برخوردار است.

نتایج روندبایی سیل به روش موج سینماتیک: پس از

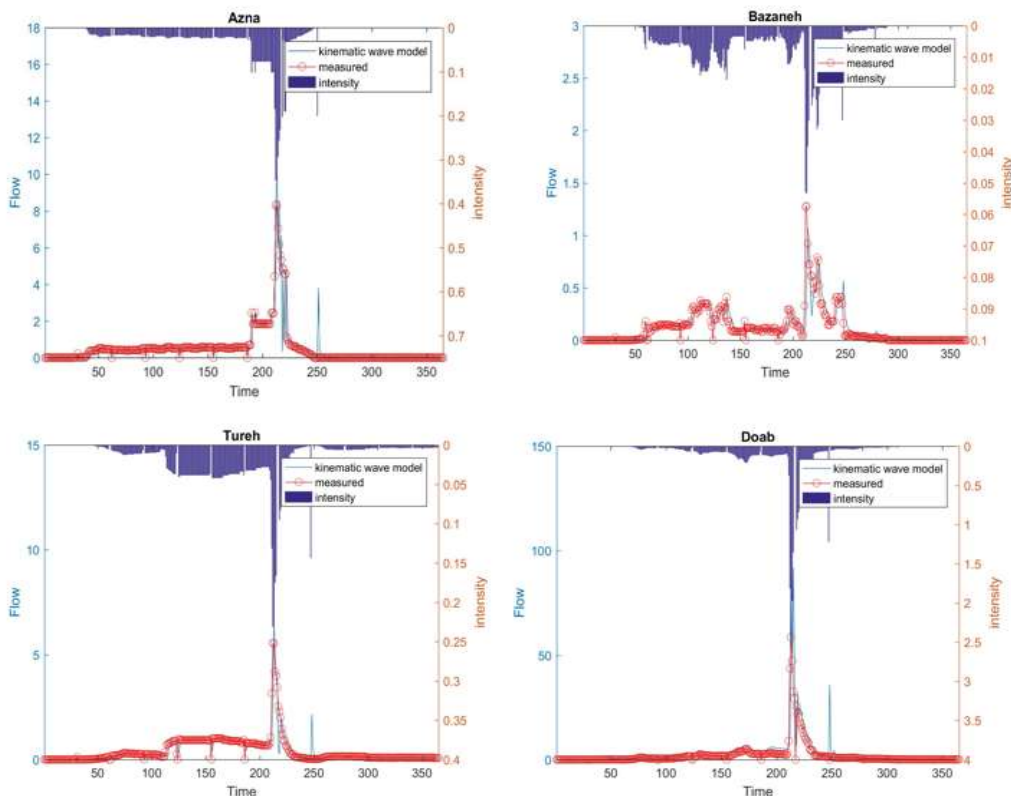
فراهم آوردن داده‌ها، مدل‌سازی روندبایی سیل برای ایستگاه‌های ازنا، بازنه، توره و پل دوآب حوضه رودخانه قره‌چای به روش موج سینماتیک (با در نظر گرفتن نرخ تلفات صفر) انجام شد؛

برای تهیه آمار سیلاب بارش متناظر، برگه‌های ثبت سیلاب و ثبت بارش‌های چهار ایستگاه ازنا، بازنه، توره و پل دوآب در دوره آماری (۱۳۹۵-۱۳۹۴) از اداره آب منطقه‌ای استان اراک تهیه شد. مشخصات وقایع انتخاب شده برای روندبایی سیل در جدول ۳ آورده شده است.

و در ادامه روندبایی در حوضه قره‌چای انجام شد که در شکل ۴ هیدروگراف خروجی حاصل شده آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات وقایع انتخاب شده برای روندیابی سیل

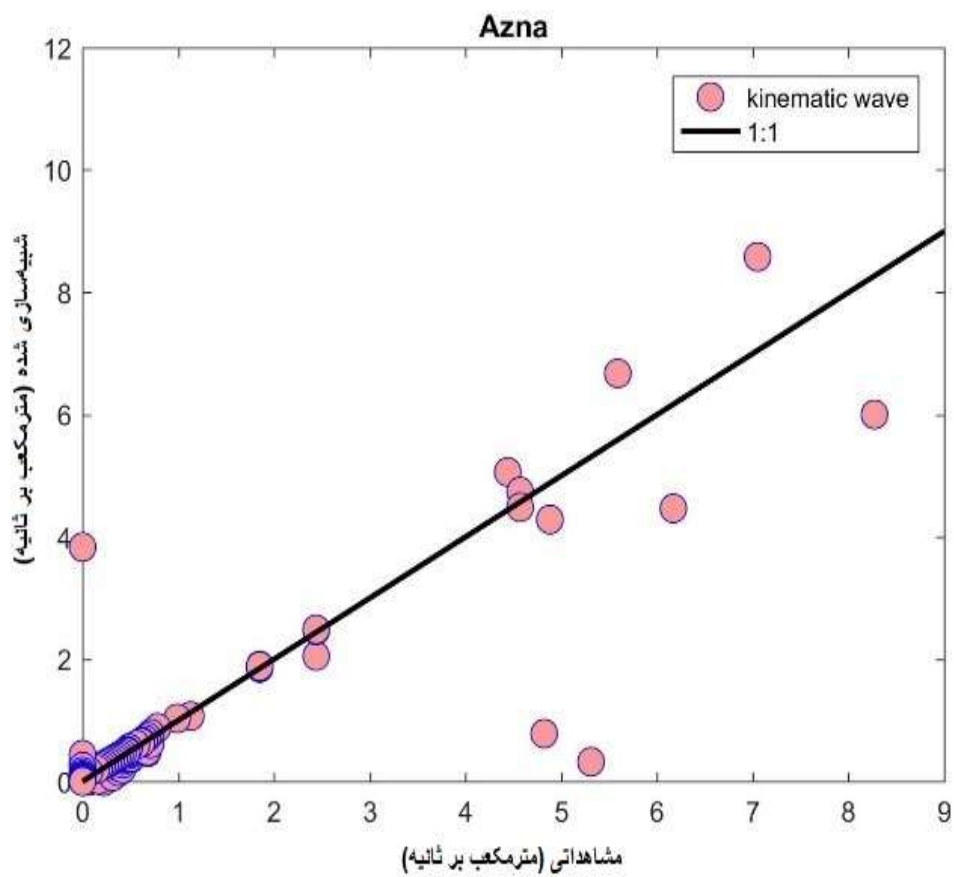
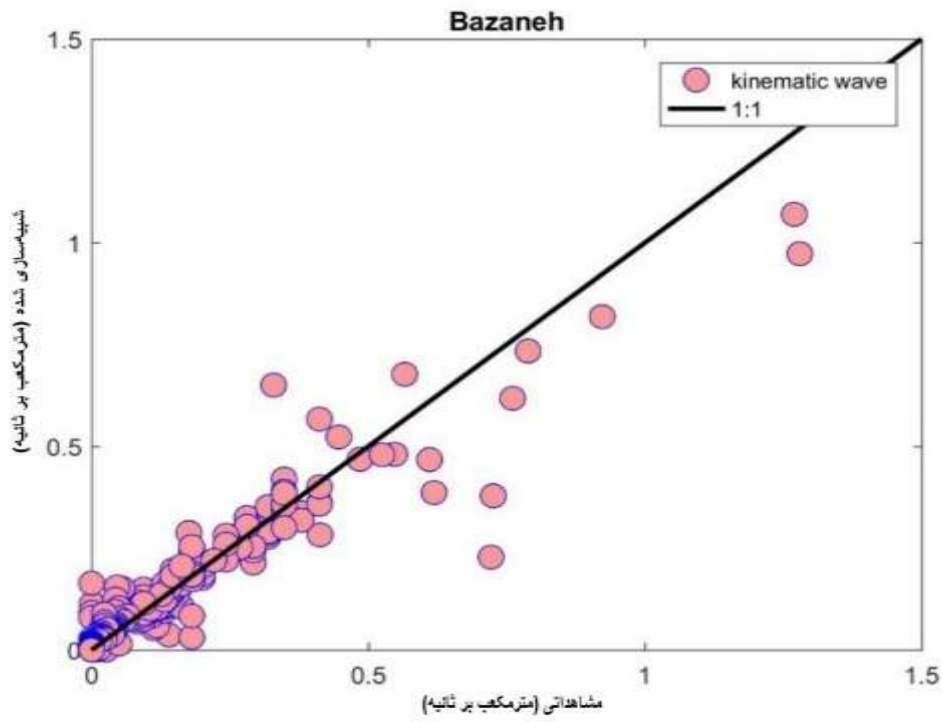
سال آبی	متوسط آورد سالیانه	حجم آورد سالیانه	دبی حداکثر سیلاب
۱۳۹۴-۱۳۹۵	۰/۵۰۹	۱۶/۰۵۲	۸/۵۴
۱۳۹۴-۱۳۹۵	۰/۱۱۶	۳/۶۵۸	۱/۴۷
۱۳۹۴-۱۳۹۵	۲/۰۰	۶۳/۱۴۲	۵۹/۶۱
۱۳۹۴-۱۳۹۵	۲/۱۶۰	۶۸/۱۱۸	۶۱/۰۰

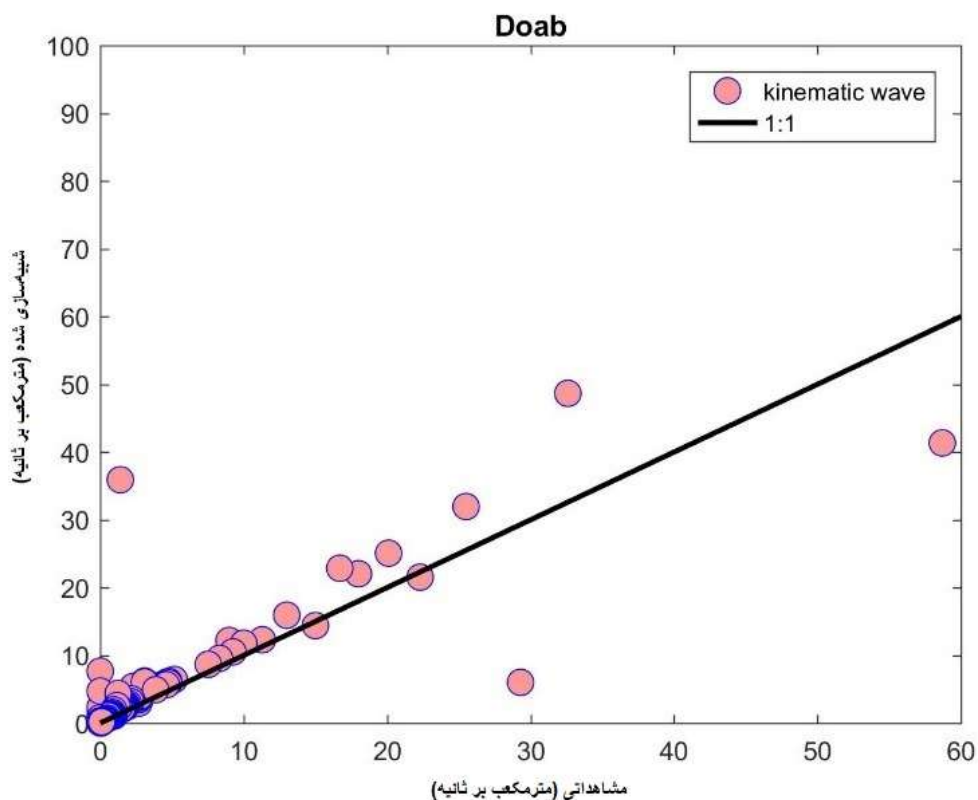
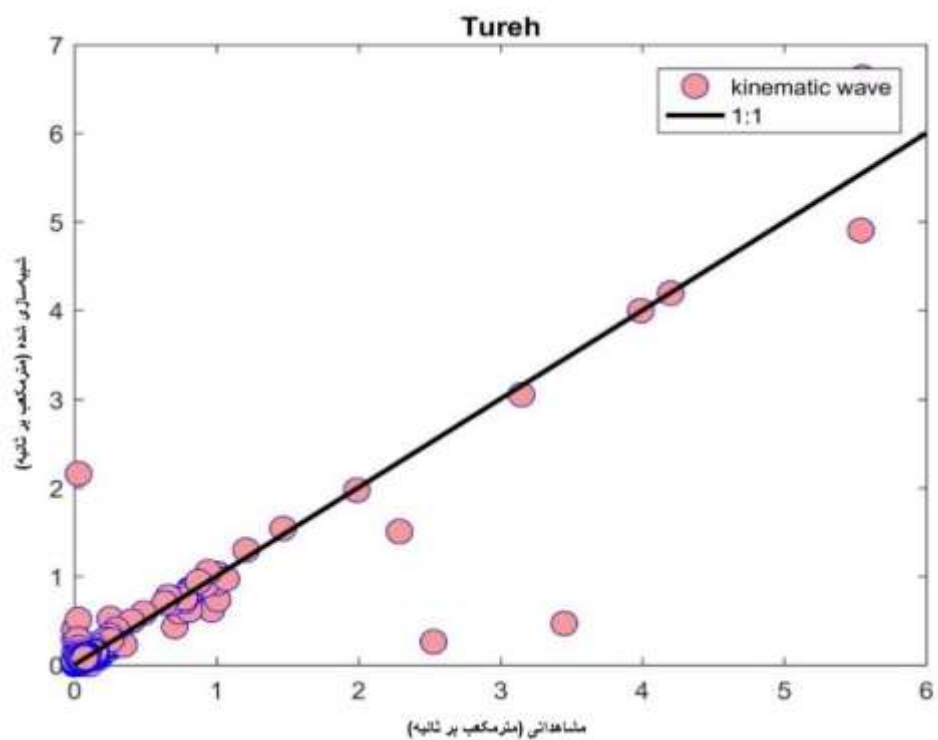


شکل ۴- هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به روش موج سینماتیک ایستگاه هیدرومتری ازنا، بازنه، توره و پل دوآب

جدول ۴- ارزیابی کارایی مدل ایستگاه‌های هیدرومتری ازنا، بازنه، توره و پل دوآب

شاخص	ایستگاه‌های مورد مطالعه	مقدار
NS	ازنا	۰/۸۲
	بازنه	۰/۹۰
	توره	۰/۸۵
	پل دوآب	۰/۳۷
R ²	ازنا	۰/۹۰
	بازنه	۰/۹۴
	توره	۰/۹۲
NRMSE	پل دوآب	۰/۶۱
	ازنا	۰/۰۵
	بازنه	۰/۰۴
	توره	۰/۰۴
	پل دوآب	۰/۰۷





شکل ۵- نمودار پراکنش داده‌ها در روندیابی دبی حداکثر سیلاب به روش موج سینماتیک با مقدار مشاهده شده در ایستگاه هیدرومتری ازنا، بازنه، توره و پل دوآب

شاخص NS (۰/۸۲، ۰/۹۰، ۰/۸۵، ۰/۳۷) و مقدار خطای پایین NRMS (۰/۰۵، ۰/۰۴، ۰/۰۴، ۰/۰۷)، حاکی از آن است که مدل موج سینماتیک در شبیه‌سازی روندیابی سیل موفق عمل کرده است و از دقت مطلوبی برخوردار است.

بررسی شاخص‌ها و نمودارهای به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مدل گاهی در تخمین اوج دچار خطا شده است؛ همچنین بررسی هیدروگراف جداگانه هر ایستگاه و خطاسنجی و همبستگی مدل نشان داد که مدل در شبیه‌سازی برای ایستگاه بازنه موفق‌تر عمل کرده است. برای ایستگاه پل دوآب به‌عنوان خروجی حوضه، نسبت به ۳ ایستگاه دیگر خطای بیشتری در شبیه‌سازی داشته است که شاید بتوان این موضوع را به کیفیت داده‌ها در این ایستگاه‌ها مرتبط دانست.

به‌طورکلی نتایج نشان‌دهنده توانایی و دقت بالای مدل موج سینماتیک، در شبیه‌سازی روندیابی سیل در حوضه آبخیز قره‌چای می‌باشد. با توجه به توپوگرافی منطقه و نقشه‌های GIS، مقطع مستطیلی و شکل حوضه کتاب باز مشخص شد که می‌توان نتایج مدل حاضر را به حوضه‌های با این نوع شکل تعمیم داد.

لذا یافته‌های پژوهش، مطالعات آقایی دانشور و خانجانی (۱۳۹۵)، امیدوار (۱۳۹۳)، قنبرآبادی (۱۳۹۱)، کریمیان کاکلکی و همکاران (۱۳۹۱)، همچنین یافته‌های ورگارا و همکاران (Vergara et al., 2016)، رای و همکاران (Rai et al., 2000) و چووا و انگ (Chua and Wong, 2010) که توانایی مدل موج سینماتیک را در شبیه‌سازی روندیابی سیل با معادلات سنت و نانت و ضریب زبری مانینگ رضایت‌بخش اعلام کردند، تایید می‌کند.

منابع

امیدوار، ا. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی توزیعی رواناب، فرسایش و انتقال رسوب در حوضه داراب کلا با استفاده از حل عددی تقریب موج سینماتیک جریان. رساله دکتری، دانشگاه مازندران.

آقایی دانشور، ف. و خانجانی، م. ۱۳۹۵. کاربرد مدل‌های یک و دوبعدی جریان سطحی و نفوذ برای حوضه آبریز دره مارون استان فارس. نشریه دانش آب و خاک، ۲۶ (۱/۳): ۲۴۸-۲۳۵.

روشنگر، ک، اعلمی، م. و ثاقبیان، م. ۱۳۹۷. پیش‌بینی ضریب زبری مانینگ در کانال‌های روباز با فرم بستر تلماسه با استفاده از روش الگوریتم تکاملی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۲ (۲): ۴۵۷-۴۴۶.

قنبرآبادی، ح. ۱۳۹۱. بررسی کارایی روندیابی حوضه آبخیز به روش موج سینماتیک به وسیله GIS در حوضه آبخیز جعفرآباد، استان

همچنین در شکل ۵، نمودار پراکنش داده‌ها در روندیابی دبی حداکثر سیلاب به روش موج سینماتیک با مقدار مشاهده شده در ایستگاه هیدرومتری ازنا، بازنه، توره و پل دوآب آورده شده است. با توجه به نمودارهای فوق و در مقایسه با خط یک‌به‌یک، انحراف حاصل از موج سینماتیک در شکل‌ها دیده نمی‌شود و همبستگی بین مقادیر مشاهده‌شده حاصل از روندیابی سیل با مقادیر مشاهده‌شده، تایید می‌گردد.

نتیجه‌گیری

نظر به اینکه سیلاب یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی است و خسارات مالی و جانی بسیاری را ایجاد می‌کند، لذا پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی رودخانه در مقابل سیلاب‌های احتمالی به‌منظور کاهش خسارات وارده به مزارع و شهرها و یا تاسیسات در حال ساخت در اطراف رودخانه، حائز اهمیت است. به‌منظور کنترل سیلاب در رودخانه و یا دریاچه پشت سدها و بندها و همچنین جهت حفاظت کناره‌های رودخانه‌ها لازم است تا تغییرات ارتفاع و حجم آب و نیز مقدار شدت جریان ورودی و خروجی به منطقه مورد مطالعه را در طول زمان سیل معین نمود که این عمل را روندیابی سیل می‌نامند. روش‌های متفاوتی به این منظور وجود دارد؛ در این پژوهش به روش موج سینماتیک به روندیابی سیل در حوضه رودخانه قره‌چای پرداخته شده است.

نتایج حاصل از مشخصات فیزیکی رودخانه حاکی از آن بود که محدوده مورد مطالعه دارای شیب و ضریب زبری کم و شماره منحنی خاک بالایی است که با حاکم بودن این شرایط، احتمال وقوع سیل و رواناب در حوضه پیش‌بینی می‌شود.

خروجی حوضه ایستگاه هیدرومتری پل دوآب بود که ورودی این ایستگاه سرشاخه بود و داده‌های سه رود ازنا، بازنه و توره به این خروجی هدایت می‌شد؛ در این شرایط سطح آب در محل تلاقی رودخانه‌ها می‌تواند رابطه بین سطح آب و دبی را تحت تاثیر قرار دهد. با توجه به نتایج مطالعات تایید شده (Chua and Wong, 2010) که به منظور بهبود روندیابی به روش موج سینماتیک، پیشنهاد شده بود، نرخ تلفات صفر و کلیت حوضه برای محاسبه در نظر گرفته شود، لذا در این پژوهش نیز بر این مبنا عمل شد و با داشتن هیدروگراف ورودی به‌عنوان شرط اولیه و در نظر گرفتن مقدار صفر برای تمامی دبی‌های با زمان صفر ثانیه به عنوان شرط مرزی، مدل‌سازی روندیابی سیل رودخانه قره‌چای به روش موج سینماتیک انجام شد.

گراف‌های به‌دست‌آمده، نشان‌دهنده تطابق مدل‌سازی انجام گرفته با داده‌های مشاهداتی بود. در نتایج ارزیابی کارایی مدل برای ایستگاه هیدرومتری ازنا، بازنه، توره و پل دوآب مقدار بالای ضریب

- complex terrain using GIS and remote sensed information. *Journal of Water Resources Management*, 19(5): 605-624.
- Maidment, D.R. 1996. GIS and Hydrologic Modeling - an Assessment of Progress. The Third International Conference on GIS and Environmental Modeling .January 22-26, Santa Fe, New Mexico.
- Rai, R.K., Upadhyay, A. and Sing, V.P. 2010. Effect of variable roughness on runoff. *Journal of Hydrology*. 382: 115-127 .
- Vergara, H., Kirstetter, P.E., J. Gourley, J., L. Flamig, Z., Hong, Y., Arthur, A. and Kolar, R. 2016. Estimating a-priori kinematic wave model parameters based on regionalization for flash flood forecasting in the Conterminous United States. *Journal of Hydrology*. 541: 421-433.
- Wong, T.S.W. 1992. *An Introduction to Kinematic Wave Method for Storm Drainage Design*. Hillview Publishers, Singapore.
- Wong, T.S.W. 2009. *Kinematic-Wave Rainfall-Runoff Formulas*. Nova Science, New York, USA.
- گلستان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- کریمیان کاکلی، ر.، هنربخش، ا.، ساداتی نژاد، ج. و عبداللهی، خ. ۱۳۹۱. روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها با استفاده از مدل موج سینماتیک و ماسکینگام-کانژ (مطالعه موردی: رودخانه دوآب صمصامی). *مجله پژوهش آب ایران*، ۶(۱۰): ۹-۱.
- مهدوی، م. ۱۳۹۲. *هیدرولوژی کاربردی*. جلد دوم. تهران: انتشارات دانشگاه تهران. ۴۴۲ ص.
- Alley, W.M., Dawdy, D.R. and Schaake, J.C. 1980. Parametric-deterministic urban watershed model. *Journal of Hydraulic Engineering*. 106, (HY5): 679-690.
- Chow, V.T. 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Pub. Co., USA, 680pp.
- Chua, L and Wong, T. 2010. Improving event-based rainfall-runoff modeling using a combined artificial neural network-kinematic wave approach. *Journal of Hydrology*. 390: 92-107.
- Liu, Y.B., and De Smedt, F. 2005. Flood modeling for

Flood Routing via Kinematic Wave Theory based on GIS (Case Study: Ghareh-Chay River)

M. Rezaei Anvar¹, M. Zakeri Niri^{2*}, M. Sohrabi MollaYousefi³

Received: Oct.28, 2020

Accepted: Dec.28, 2020

Abstract

The purpose of the present study was to determine the flood Routing kinematics of the Ghareh-chay River that is done in the MATLAB programming environment. By providing the required data, the flood flow routing modeling of each station was performed by the kinematic wave method in the Ghareh-chay River basin. The results of physical characteristics of the river indicated that the study area had low slope and roughness coefficient and high soil curve number. In order to improve the kinematic wave routing, modeling was performed with input hydrograph as the initial condition and considering zero value for all zero-second discharges as the boundary condition. The obtained graphs show the conformity of the modeling performed with the observed data. Nash-Sutcliffe (NS), Coefficient of Determination (R^2) and Normal Root Mean Square Error (NRMSE) indices were used to evaluate the model capability. In the results of the model performance evaluation for the Hydrometric Azna, Bazaneh, Toure and Pole Doab with the high value of Nash coefficient and Coefficient of Determination and the low error value of NRMS indicate that the model The kinematic wave has been successful in simulating flood flow and has good accuracy; and it was determined that the results of the present model can be generalized to basins with this type of shape.

Keywords: Ghareh-Chay river, Routingm, Manning roughness coefficient, Kinematic wave

1- M.Sc. Graduate, Water Resources Management and Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

2- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

3- Associate Professor, Department of Geology, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

(*-Corresponding Author Email: Zakeriau@gmail.com)

مقاله علمی-پژوهشی

توزیع زمانی و مکانی ردپای آب و کارایی مصرف آب جو در مناطق مختلف ایران

حلیمه پیری^{۱*}، مجتبی مبارکی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۶

چکیده

تحقیق حاضر به منظور ارائه راهکارهای پایدار در مدیریت منابع آب با استفاده از مفهوم ردپای آب و کارایی مصرف آب جو در سطح ملی انجام شد. در ابتدا استان‌های مختلف کشور مطابق اقلیم‌نمای دومارتن طبقه‌بندی شدند. سپس ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید در تولید جو و کارایی مصرف آب در اقلیم‌های مختلف و مراکز استان‌ها طی دوره آماری ۱۳۹۶-۱۳۸۷ محاسبه شد. همچنین پهنه‌بندی مکانی و زمانی ردپای آب و کارایی مصرف آب انجام شد. نتایج نشان داد بیشترین ردپای آب سبز در اقلیم مرطوب و مدیترانه‌ای شمال کشور ایستگاه‌های رشت (۵۹۲/۵۳ مترمکعب بر تن)، گرگان (۵۷۰/۸۶ مترمکعب بر تن) و ساری (۵۴۳/۳۶ مترمکعب بر تن) و کمترین آن در اقلیم فراهشک، ایستگاه یزد با ۱۲۴/۲۱ مترمکعب بر تن به دست آمد. ایستگاه زاهدان با اقلیم فراهشک بیشترین ردپای آب آبی (۷۸۷/۰۱ مترمکعب بر تن) و رشت با اقلیم مرطوب کمترین آن (۸۶/۷۳ مترمکعب بر تن) را دارا بود. بیشترین مقدار ردپای آب خاکستری مربوط به ایستگاه‌های زاهدان (۳۹۰/۴ مترمکعب بر تن) و بوشهر (۳۹۰/۱۱ مترمکعب بر تن) و کمترین مقدار آن در ایستگاه همدان (۲۳۹/۶۷ مترمکعب بر تن) بود. از نظر ردپای آب سفید بیشترین آن در ایستگاه زاهدان (۱۹۵۶/۲ مترمکعب بر تن) و کمترین آن مربوط به ایستگاه رشت (۵۱۵/۹۹ مترمکعب بر تن) بود. توزیع مکانی کل ردپای آب نشان داد بیشترین ردپای کل آب در جنوب شرقی کشور و اقلیم فراهشک بود و کمترین آن در نواحی شمالی و غربی کشور مشاهده شد. نتایج پهنه‌بندی کارایی مصرف آب نشان داد بیشترین کارایی مصرف آب در مناطق غربی کشور مشاهده شد و هرچه به سمت مرکز و شرق کشور برویم، مقدار آن کاهش یافت. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت مناطق شمال و غرب کشور برای کاشت جو مناسب‌تر می‌باشد. همچنین با توجه به کمبود آب در مناطق با اقلیم فراهشک و بالابودن ردپای آب در این مناطق از کشت جو در این مناطق خودداری شود. کشت جو در این مناطق به علت تحمل بالای جو به شوری و حاصل‌خیزی کم اراضی می‌باشد. بنابراین لازم است مسئولان در این مناطق کشت محصولات با نیاز آبی کمتر و عملکرد بالاتر و متحمل به شوری را برای جایگزینی جو مورد برنامه‌ریزی قرار دهند.

واژه‌های کلیدی: اقلیم، آب سبز، آب سفید، آب آبی، شاخص تأمین نسبی آب

مقدمه

نمی‌باشد (Arabi Yazdi et al., 2014). توزیع زمانی نزولات جوی در کشور نیز به دلیل ناهماهنگی با فصول آبیاری وضعیت مناسبی ندارد و میزان آن در سال‌های مختلف و حتی فصول مختلف متغیر بوده و این مسئله مشکلات گوناگونی را در چند سال اخیر برای بخش‌های مختلف، به‌ویژه بخش کشاورزی به همراه داشته و زیان‌های زیادی را به این بخش تحمیل کرده است (Razavi and Davari, 2013). از این رو با توجه به عدم توزیع زمانی و مکانی مناسب بارش، مدیریت کشاورزی جهت افزایش کارایی مصرف آب، بسیار دشوارتر از کشورهایی با شرایط آبی مطلوب است. الگوی کشت یکی از عوامل مهم در مدیریت کشاورزی جهت افزایش کارایی مصرف آب است. با توجه به گستردگی پهنه‌ی جغرافیایی کشور و تنوع اقلیمی مناطق گوناگون آن، رسیدن به الگوی کشت مناسبی که

ایران کمتر از یک درصد از منابع تجدید شونده آب در دنیا را در اختیار دارد و طبق پیش‌بینی‌های انجام شده جمعیت ایران تا سال ۱۴۰۰ به بیش از ۱۰۰ میلیون نفر خواهد رسید که تولید غذا برای تأمین نیاز غذایی این جمعیت در سال به بیش از ۱۵۰ میلیارد مترمکعب آب نیاز دارد که این حجم از منابع آب در ایران موجود

۱- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، ایران

(Email: H_piri2880@uoz.ac.ir)

* نویسنده مسئول:

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.14.4

محصول در محیط استفاده شده اند، مورد نیاز است (Hoekstra et al., 2011). رضانی اعتدالی و آبابایی مفهوم آب سفید را ارائه دادند که در واقع حجم تلفات آب آبیاری را بیان می‌نماید (Ababai and Ramezani Etedali, 2014). تاکنون مطالعات زیادی برای ارزیابی این شاخص در حوزه‌های مختلف انجام شده است. محمدی و همکاران (۱۳۹۵) برای تعیین مناطق مناسب کشت سیب‌زمینی در کشور از شاخص ردپای آب استفاده کردند. با توجه به ردپای آب محاسبه شده استان همدان با داشتن کمترین ردپای آب مناسب‌ترین منطقه و استان سمنان با داشتن بیش‌ترین ردپای آب نامناسب‌ترین منطقه برای کشت سیب‌زمینی بودند. فرزی و همکاران (۱۳۹۸) الگوی کشت بهینه برای کرمانشاه را بر اساس ردپای آب تعیین کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد در بین محصولات مورد مطالعه در بخش زراعی هندوانه، ذرت علوفه‌ای و چغندر قند به‌عنوان محصولات برتر از نظر شاخص ردپای آب و در مقابل کنجد، لوبیا و آفتابگردان به‌عنوان نامناسب‌ترین محصولات از این نظر شناخته شدند. چاچاگین و هوکسترا به بررسی جهانی ردپای آب برنج با استفاده از داده‌های محلی و آبیاری واقعی پرداختند و بیان کردند در اندونزی، هند، ویتنام، تایلند، میانمار و فیلیپین بخش آب سبز به نسبت قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از آب آبی است. در حالی‌که در ایالات متحده آمریکا و پاکستان بخش آب آبی بیشتر از چهار برابر آب سبز می‌باشد (Chapagain and Hoekstra, 2011). هر سو و همکاران ردپای آب پنج محصول ذرت، سیب‌زمینی، نیشکر، ذرت خوشه‌ای و برنج منطقه نیمه گرمسیر تایوان را بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که کمترین ردپای آب مربوط به سیب‌زمینی بوده است. برای مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری نیشکر به‌علت استفاده بیشتر از آب باران و برای مناطق معتدل ذرت بهتر می‌باشد (HuiSu et al., 2015). علیقلی‌نیا و همکاران ردپای آب را برای محصول گندم در اقلیم‌های مختلف ایران مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد، بیشترین مقادیر ردپای آب آبی در قسمت‌های مرکزی و جنوبی، بیشترین مقدار ردپای آب سبز در قسمت‌های شمالی و غربی و بیشترین مقدار ردپای آب خاکستری در قسمت‌های جنوبی دیده می‌شود. میانگین ردپای آب سبز، آبی و خاکستری به‌ترتیب ۵۰۳/۳، ۱۳۹۲/۸ و ۲۸۶/۲ مترمکعب بر تن برای گندم به‌دست آمد. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که کشت محصول گندم در همه اقلیم‌ها مناسب نبوده است (Aligholiana et al., 2019).

با توجه به بررسی تحقیقات انجام شده، در بیشتر مطالعات، بخش کشاورزی و تولید محصولات زراعی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب می‌باشد. بنابراین بررسی ردپای آب در این بخش اهمیت ویژه‌ای دارد. زیرا نیاز است تا اطلاعاتی در زمینه‌ی مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب و مقدار آلودگی ایجاد شده توسط محصولات کشت شده جمع‌آوری شود تا مدیریت منابع آب موجود به بهترین شکل

از آن بتوان حداکثر بهره‌برداری را از عوامل و نهاده‌های تولید به‌ویژه عامل محدودکننده‌ی آب به‌دست آورد، ضرورتی انکارناپذیر است. در بسیاری از مناطق کشور، کشت محصولات زراعی، بیلان منفی آب دشت‌ها و نیاز به پایداری تولید محصولات، ما را ملزم می‌کند که در جهت بهبود سفره‌های زیرزمینی آب و افزایش راندمان مصرف آب حرکت کنیم. همچنین باید نسبت تخصیص زمین‌های کشاورزی و برنامه‌ی کشت یک منطقه به انواع محصولات زراعی همان منطقه توسط محققان بخش کشاورزی تعیین و در اختیار سازمان‌های مربوطه قرار گیرد تا با برنامه‌ریزی مناسب اقدامات لازم انجام گیرد. از سوی دیگر میزان کشت محصولات کشاورزی در یک منطقه باید با توجه به منابع آب موجود، عملکرد محصول، نیاز کشور و سیاست‌های درست انجام شود و تصمیم‌گیری در انتخاب گیاهان زراعی مناطق مختلف بر اساس مشخصات اقلیم منطقه باشد (Rouhani et al., 2008).

بررسی وضعیت موجود کشاورزی بیانگر آن است که با وجود پتانسیل افزایش تولید محصولات کشاورزی، به‌دلیل فقدان سیستم مدیریتی صحیح، امکان استفاده بهینه از منابع موجود آب و خاک میسر نشده است. در این راستا بررسی راهکارهای استفاده بهینه آب از طریق بازنگری در تخصیص منابع آب و مدیریت آن امری لازم و ضروری است. اما از آنجایی‌که میزان آب مصرفی واقعی هر محصول تحت تأثیر اقلیم منطقه، میزان تولیدات، الگوی مصرفی، عملیات کشاورزی و راندمان کاربرد آب متغیر است، لذا نیاز به شاخصی است که بتوان با آن نیاز واقعی هر محصول را مورد ارزیابی قرار داد. در این راستا توسعه روش‌های مدیریتی کارآمد و جدید که بتوان با آن مقدار آب واقعی مصرفی را بر اساس الگوی مصرفی مردم، شرایط اقلیمی، راندمان کاربرد آب و عملکرد محصول، محاسبه کرد، امری لازم و ضروری است (Rasooli Majd et al., 2015). در سال‌های اخیر با ظهور شاخص ردپای آب که نشان‌دهنده‌ی مقدار واقعی آب مصرفی بر اساس شرایط و اقلیم هر منطقه می‌باشد، دریچه‌ای برای انجام پژوهش در راستای مدیریت نوین منابع آب با رویکرد یکپارچه باز شده است (علیقلی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۵). ردپای آب شامل سه مؤلفه می‌باشد. ردپای آب آبی و ردپای آب سبز که دربرگیرنده مصارف آب از منابع آب آبی و سبز می‌باشد و ردپای آب خاکستری (Van Oel et al., 2008). ردپای آب آبی، به حجم آب آبیاری مصرفی (آب‌های سطحی و زیرزمینی) که جهت تولید محصول به گیاه داده می‌شود، اشاره دارد. ردپای آب سبز، به سهم آب حاصل از بارندگی مؤثر مرتبط است و به حجم آبی اطلاق می‌شود که در مناطق غیراشباع خاک به‌صورت رطوبت خاک ذخیره می‌شود و گیاه از آن استفاده می‌کند. ردپای آب خاکستری، به حجمی از آب شیرین اطلاق می‌شود که برای برای از بین بردن آلودگی‌های ایجاد شده ناشی از کشت گیاه و تولید



شکل ۱- اقلیم و مناطق مورد مطالعه

محاسبات ردپای آب

اجزای ردپای آب در این تحقیق شامل ردپای آب سبز^۱، ردپای آب آبی^۲، ردپای آب خاکستری^۳ و رد پای آب سفید^۴ می باشد. ردپای آب آبی، به حجم آب آبیاری مصرفی (آبهای سطحی و زیرزمینی) که جهت تولید محصول به گیاه داده می شود، اشاره دارد. ردپای آب سبز، به سهم آب حاصل از بارندگی مؤثر مرتبط است و به حجم آبی اطلاق می شود که در مناطق غیراشباع خاک به صورت رطوبت خاک ذخیره می شود و گیاه از آن استفاده می کند. ردپای آب خاکستری، به حجمی از آب شیرین اطلاق می شود که برای برای از بین بردن آلودگی های ایجاد شده ناشی از کشت گیاه و تولید محصول در محیط استفاده شده اند، مورد نیاز است. آبایی و اعتدال رضائی مفهوم آب سفید را ارائه دادند که در واقع حجم تلفات آب آبیاری را بیان می نماید (Ababai and Etedali Ramazani, 2014). بنابراین ردپای آب کل^۵ به صورت رابطه ۱ بیان می گردد.

$$WF_t = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{gray} + WF_{white} \quad (1)$$

که در آن: WF_t : ردپای آب کل، WF_{green} : ردپای آب سبز، WF_{blue} : ردپای آب آبی، WF_{gray} : ردپای آب خاکستری و WF_{white} : ردپای آب سفید می باشد.

هر کدام از اجزای ردپای آب به شرح زیر محاسبه گردید:

ردپای آب سبز

مصرف آب در این دوره با توجه به محاسبه تبخیر و تعرق گیاه در طول دوره رشد، مورد بررسی قرار می گیرد که در نهایت به صورت

عملی شود. در ایران، محصول جو جزء محصولات استراتژیک قلمداد شده و از سطح زیرکشت قابل توجهی نیز برخوردار است. جو یکی از چهار غله مهم در دنیا بوده و در کنار گندم، برنج و ذرت قرار می گیرد (Tuttolomondo and Labell, 2008). جو با تولید سالیانه ۱۵۷ میلیون تن در سال و با سطح زیرکشت ۵۶ میلیون هکتار جزء یکی از مهمترین غلات دنیا است. طبق آمار فائو ایران با تولید سالیانه ۳ میلیون تن و سطح زیرکشت ۱/۷ میلیون هکتار در رده چهاردهم طبقه بندی کشورهای تولید کننده این محصول قرار می گیرد. جو گیاهی است که دامنه انتشار و سازش اقلیمی وسیعی داشته و اغلب برای کشت در مناطق خشک و نیمه خشک سازگار است. کاه جو در تغذیه دام از ارزش علوفه بالاتری نسبت به کاه گندم برخوردار است به طوری که قابل مقایسه با گندم مقاومت بیشتری نسبت به خشکی و بیماری نشان می دهد و در شرایط نامساعد عملکرد آن بیش از گندم است (نورمحمدی و همکاران، ۱۳۸۳). با توجه به اهمیت آگاهی از سهم اجزاء مختلف ردپای آب در مدیریت منابع آبی و تولید محصولات غذایی در سطح کشور، در این تحقیق به برآورد اجزاء ردپای آب آبی، سبز، خاکستری و سفید در تولید جو در اقلیم های مختلف ایران پرداخته شده است.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه مراکز استان های کشور ایران می باشد. کشور ایران به عنوان دومین کشور بزرگ خاورمیانه است که از یک سو به دلیل قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه خشک جهان و از سوی دیگر به دلایل ضعف های مدیریتی در تخصیص و مصرف آب به ویژه در بخش کشاورزی، در سال های اخیر با مشکل حاد کمبود آب مواجه شده است. ایران از دیدگاه طبقه بندی اقلیمی دومازن دارای پنج اقلیم فراخشک، خشک، نیمه خشک، مرطوب و مدیترانه ای بوده و نواحی خشک و نیمه خشک بیشترین سهم را در خشکی ایران دارند (Karandish and Hoekstra, 2017). برای انجام تحقیق ابتدا اطلاعات مربوط به عملکرد محصول جو در مراکز استان های کشور از آمار جهاد کشاورزی طی سال های ۱۳۹۷-۱۳۸۷ به دست آمد. با استفاده از داده های هواشناسی مراکز استان ها، اقلیم هر کدام از شهرهای مورد مطالعه بر اساس طبقه بندی اقلیمی دومازن تعیین شد. شکل ۱ مناطق مورد مطالعه را نشان می دهد.

برای برآورد حجم ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید در تولید جو از روش هوکسترا و چاپاگین در دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ استفاده شد (Hoekstra and Chapagain, 2008). برای انجام کار ابتدا تبخیر و تعرق گیاه در هر شهر با استفاده از نرم افزار Cropwat و به روش فائوپنمن ماتیت به صورت روزانه برای هر ده سال محاسبه شد.

- 1- Green Water Footprint
- 2- Blue Water Footprint
- 3- Gray Water Footprint
- 4- White Water Footprint
- 5- Total Water Footprint

چاپاگین و همکاران و هوکسترا و همکاران می‌باشد (Chapagain and Hoekstra, 2006; Hoekstra et al., 2011). آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا با توجه به پژوهش چاپاگین و همکاران حداکثر غلظت مجاز نیتروژن در منابع آب سطحی و زیرزمینی را ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر توصیه کرده است (Chapagain et al., 2006). این استاندارد از زمانی اتخاذ شد که آب‌های ناشی از فعالیت کشاورزی دوباره جمع-آوری می‌شدند و بعد از انتقال به منابع اولیه خود، در مصارف شهری مورد استفاده قرار می‌گرفتند. لذا لازم بود تا غلظت این عامل کم‌تر از یک آستانه قرار گیرد. از آنجایی که هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد غلظت طبیعی نیتروژن در آب و محیط در دسترس نبود، مقدار آن در این مطالعه صفر در نظر گرفته شد (Mekonnen and Hoekstra, 2010).

$$WF_{gray} = \frac{\alpha \times NAR}{C_{Max} - C_{Nat}} \times \frac{1}{Y} \quad (8)$$

که در آن: α درصد تلفات کودهای نیتروژن، NAR مقدار مصرف کود نیتروژن برای گیاه (کیلوگرم بر هکتار)، C_{Max} غلظت بحرانی نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار) و C_{Nat} غلظت نیتروژن در آب دریافت-کننده است.

ردپای آب سفید

آبایی و رضانی‌اعتدالی جزء دیگری از مجموع ردپای آب را تشریح نمودند که تحت عنوان آب سفید نام‌گذاری شده است. این جزء، حجم تلفات آب آبیاری (مترمکعب بر هکتار) را مورد توجه قرار می‌دهد و به شرح زیر محاسبه می‌شود (Ababai and Etedali, 2014):

$$WF_{white} = \frac{10 \times (GI - CWU_{blue})}{Y} \quad (9)$$

که در آن: GI نیاز ناخالص آب آبیاری (مترمکعب بر هکتار) است.

شاخص تأمین نسبی آب آبیاری

شاخص تأمین نسبی آب آبیاری^۱ مفهومی است که به منظور ارزیابی مدیریت آبیاری استفاده می‌گردد و نشان‌دهنده وضعیت تأمین آب در مقابل نیاز آبی گیاه می‌باشد. این شاخص توسط مؤسسه بین-المللی فناوری و پژوهش در آبیاری و زهکشی^۲ (IPTRID) معرفی گردید و در سال‌های اخیر به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در ارزیابی مدیریت آبیاری در نقاط مختلف دنیا و در مناطق فاریاب و اراضی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است (Rodríguez-Díaz et al., 2008). مقدار این شاخص از رابطه ۱۰ محاسبه گردید:

$$RIS = \frac{WA_g}{10 \times (ET_c - P_e)} \quad (10)$$

عددی با واحد مترمکعب بر تن بیان می‌شود. ردپای آب سبز محصول از رابطه ۲ محاسبه شد:

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (2)$$

که در آن: WF_{green} ردپای آب سبز (مترمکعب بر تن)، Y عملکرد گیاه (تن در هکتار) و CWU_{green} مقدار مصرف آب سبز گیاه (مترمکعب در هکتار) می‌باشد.

مقدار مصرف آب سبز گیاه از مجموع تبخیر و تعرق روزانه در طی فصل رشد گیاه به‌دست می‌آید:

$$CWU_{green} = 10 \times \sum_{d=1}^T ET_{green} \quad (3)$$

در رابطه ۳، T طول دوره رشد گیاه (روز)، ET_{green} تبخیر و تعرق آب سبز (میلی‌متر در سال)، عدد ۱۰ تبخیر و تعرق را از میلی-متر (ارتفاع) به حجم آب در سطح زمین (مترمکعب در هکتار) تبدیل می‌کند.

در این رابطه فرض شده است تنها وقتی آب سبز موجود در خاک برای استفاده گیاه کافی نباشد، گیاه از آب آبی موجود استفاده می‌کند (Yousefi et al., 2016). از این رو، تبخیر و تعرق سبز گیاه از روش ارائه شده توسط هوکسترا و همکاران به‌دست می‌آید (Hoekstra et al., 2011):

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_e) \quad (4)$$

که در آن: ET_c مقدار تبخیر و تعرق گیاه و P_e مقدار باران مؤثر می‌باشد.

ردپای آب آبی

ردپای آب آبی نیز به طور مشابه ردپای آب سبز محاسبه می‌شود و به صورت رابطه ۵ ارائه می‌گردد:

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (5)$$

$$CWU_{blue} = 10 \times \sum_{d=1}^T ET_{blue} \quad (6)$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_e) \quad (7)$$

که در آن: CWU_{blue} مقدار مصرف ردپای آب آبی گیاه (مترمکعب در هکتار) و ET_{blue} تبخیر و تعرق آب آبی (میلی‌متر در سال) می‌باشد.

ردپای آب خاکستری

یکی دیگر از اجزای ردپای آب در تولید محصول، حجم آب مورد نیاز برای رقیق سازی کودهای کشاورزی با استفاده از رواناب یا نفوذ عمقی است که به آن آب خاکستری گفته می‌شود (Hoekstra et al., 2011). در این پژوهش، ردپای آب خاکستری تنها برای کودهای نیتروژن به‌عنوان منبع آلودگی آب محاسبه شده است. بدین منظور تنها استفاده از کود از ته به عنوان منبع ایجاد آلودگی مورد مطالعه قرار گرفت. اطلاعات مربوط به میانگین میزان کود از ته ۲۵ از جهاد کشاورزی کشور گرفته شد. محاسبه بر اساس روش ارائه شده توسط

1- Relative irrigation supply

2- International Programmer for Technology and Research in Irrigation and Drainage

کارایی مصرف آب

کارایی مصرف آب یکی از شاخص‌های مطرح در خصوص سنجش بهره‌وری آب کشاورزی است. این شاخص در واقع نسبت مقدار محصول تولید شده به ازای مقدار آب مصرفی (تبخیر و تعرق گیاه است). مقدار این شاخص از رابطه ۱۱ به دست آمد (Lu et al., 2016):

$$WUE = \frac{Y}{V_w} \quad (11)$$

که در آن WAg: حجم آب آبیاری است که برای تولید محصول در مزرعه مورد استفاده قرار گرفته است (متر مکعب در هکتار)، ETC: تبخیر و تعرق (میلی‌متر در سال)، Pe باران موثر (میلی‌متر در سال)، عدد ۱۰ برای تبدیل عمق آب از میلی‌متر (ارتفاع) به حجم آب در سطح زمین (مترمکعب در هکتار) به کار رفته است. در صورت تأمین آب مورد نیاز گیاه مقدار این شاخص برابر ۱ می‌باشد. مقادیر بیشتر از یک این شاخص نشان‌دهنده بیش‌آبیاری و مقادیر کمتر از یک آن نشان می‌دهد کم‌آبیاری اتفاق افتاده است.

جدول ۱- مقادیر عملکرد، اجزای ردپای آب و کارایی مصرف آب جو در مراکز استان‌ها

شهر	ردپای آب سبز	ردپای آب آبی	ردپای آب خاکستری	ردپای آب سفید	مجموع ردپای آب	حجم آب مصرف شده	عملکرد	کارایی مصرف آب
	متر مکعب بر تن					مترمکعب در هکتار	تن در هکتار	کیلوگرم بر مترمکعب
اراک	۲۴۶/۲۳	۲۲۵/۸۱	۲۴۵/۲۶	۹۰۲/۵۷	۱۶۱۹/۸۷	۶۵۰۰	۳/۴۳	۲/۳۴
ایلام	۳۱۸/۲۷	۳۱۰/۳۱	۲۶۱/۶	۱۵۵۶/۱۷	۲۴۴۶/۳۵	۷۸۶۷	۲/۶۲	۱/۹۴
خرم‌آباد	۳۳۶/۶۳	۲۷۶/۷۸	۲۵۹/۱۱	۱۵۰۵/۱۸	۲۳۷۷/۷	۷۱۵۳	۲/۷	۲/۴۵
شیراز	۲۲۷/۳۱	۳۴۱/۳۱	۲۵۲/۶۸	۱۲۴۸/۸۷	۲۰۷۰/۱۷	۶۸۲۵	۳/۷۶	۱/۹۶
کرمانشاه	۳۵۳/۲۸	۳۴۲/۷۹	۲۷۹/۶۱	۹۹۳/۱۷	۱۹۶۸/۹۵	۶۴۸۳	۳/۲	۲/۹۵
گرگان	۵۷۰/۸۶	۱۷۲/۰۹	۳۴۴/۶۸	۷۶۰/۴۳	۱۸۴۸/۰۶	۴۷۶۰	۲/۹۸	۱/۸
مشهد	۲۹۸/۱۹	۳۰۴/۸	۲۵۸/۹۸	۱۱۸۹/۱۹	۲۰۵۱/۱۶	۶۸۹۷	۳/۲۶	۱/۸
یاسوج	۳۰۲/۴۶	۳۳۷/۲۴	۲۶۷/۶۵	۱۰۱۳/۳۵	۱۹۲۰/۷	۵۲۳۵	۲/۸۷	۲/۱۱
اردبیل	۴۰۷/۸۲	۱۹۳/۷۶	۲۶۰/۳۸	۱۴۳۶/۷۵	۲۲۹۸/۷۱	۶۴۶۰	۲/۲۶	۱/۸۹
ارومیه	۳۴۷/۹۳	۲۳۳/۴	۲۶۷/۵۱	۱۴۷۴/۳۳	۲۳۳۳/۱۷	۶۱۰۰	۲/۷۶	۲/۲۴
تبریز	۳۹۷/۴۵	۲۲۲/۰۱	۲۵۸/۷۴	۱۳۵۸/۲۲	۲۲۳۶/۴۲	۵۸۶۰	۲/۴۳	۱/۶۲
بجنورد	۴۳۸/۷۷	۲۳۶/۷۶	۲۶۲/۱۲	۱۶۴۶/۹۸	۱۶۴۶/۶۳	۵۷۸۰	۳/۱۲	۱/۸۴
سنندج	۲۶۶/۵۶	۲۴۱/۷۱	۲۵۲/۶۷	۱۲۷۵/۲۶	۲۰۳۶/۲	۶۱۵۴	۳/۵۱	۲/۲۴
شهرکرد	۲۵۴/۷۲	۳۰۸/۹۴	۲۵۷/۶۹	۱۴۳۹/۵۴	۲۲۶۰/۸۹	۶۴۳۰	۳/۵	۱/۹۶
قزوین	۲۷۰/۷۶	۲۰۵/۳۱	۲۴۴/۹۳	۵۸۷/۵۲	۱۳۰۸/۵۲	۵۱۲۰	۳/۲۵	۲/۳۴
همدان	۲۱۷/۳۱	۱۷۷/۷۸	۲۳۹/۶۷	۱۰۲۴/۲۱	۱۶۵۸/۹۷	۵۷۸۱	۳/۸۵	۳/۰۴
اصفهان	۱۴۴/۷۲	۳۳۳/۷۴	۲۴۱/۶۲	۹۳۵/۶۷	۱۶۴۵/۷۵	۶۲۰۰	۳/۲۵	۲/۲
بیرجند	۲۷۲/۵۷	۴۶۱/۷۲	۲۶۷/۲	۱۶۷۵/۵۶	۲۶۷۷/۰۵	۷۲۴۰	۲/۹۵	۱/۵۸
تهران	۲۱۵/۸۱	۲۵۶/۷۶	۲۴۱/۵۷	۱۰۰۴/۹۴	۱۷۱۹/۰۸	۶۳۴۷	۳/۱۳	۲/۲۷
زاهدان	۲۵۳/۱۹	۷۸۷/۰۱	۳۹۰/۴	۱۹۵۶/۲	۳۳۸۶/۸	۸۷۶۰	۱/۷۶	۱/۰۱
زنجان	۳۳۵/۳۷	۱۹۸/۷	۲۵۱/۵۲	۱۳۶۲/۲۵	۲۱۴۷/۸۴	۶۹۵۴	۳/۶۴	۲/۳۶
سمنان	۲۵۸/۵۳	۳۷۱/۴۱	۲۵۴/۲۲	۱۲۷۲/۱۱	۲۱۵۶/۲۷	۷۵۲۳	۳/۷۵	۲/۰۴
کرج	۲۵۵/۵	۲۰۱/۸۶	۲۴۲/۰۹	۱۰۷۴/۹	۱۷۷۴/۳۵	۶۷۱۳	۳/۵۶	۱/۹۷
کرمان	۲۰۶/۲۵	۴۳۳/۴۴	۲۵۷/۶۹	۱۳۰۵/۱۳	۲۲۰۳/۵۱	۷۴۳۰	۳/۱۲	۱/۷۲
اهواز	۳۳۶/۰۱	۷۳۰/۵۵	۳۸۴/۷۳	۱۳۵۳/۹۷	۲۸۰۵/۲۶	۷۵۸۴	۲/۸۵	۱/۲۴
بندرعباس	۱۹۷/۸۷	۷۸۴/۱۹	۳۷۳/۸۲	۱۴۵۷/۶۶	۲۸۱۳/۵۴	۷۸۶۴	۳/۰۱	۱/۴۷
بوشهر	۴۷۰/۲۴	۶۷۵/۸۵	۳۹۰/۱۱	۱۰۵۴/۸۱	۲۵۹۱/۰۱	۷۲۳۰	۲/۲۷	۱/۱۵
ساری	۵۴۳/۳۶	۱۲۷/۱۲	۲۲۳/۶	۶۶۸/۵۵	۱۵۶۲/۶۳	۴۲۱۰	۳/۱۲	۲/۰۸
رشت	۵۹۲/۵۳	۸۶/۷۳	۲۷۵/۳۷	۵۱۵/۹۹	۱۴۷۰/۶۲	۳۸۵۰	۳/۸۱	۲/۸۷
یزد	۱۲۴/۲۱	۵۱۶/۹۸	۲۵۳/۳۷	۱۱۰۰/۲۱	۱۹۹۴/۷۷	۷۴۶۸	۲/۸۷	۱/۶۸
قم	۲۹۸/۴۱	۳۶۷/۰۶	۲۶۰/۰۲	۱۲۴۲/۵۲	۲۱۶۸/۰۱	۶۲۳۵	۲/۷۶	۲/۱۳

بیشترین مقدار ردپای آب خاکستری مربوط به ایستگاه‌های زاهدان (۳۹۰/۴ متر مکعب بر تن) و بوشهر (۳۹۰/۱۱ متر مکعب بر تن) و کمترین مقدار آن در ایستگاه همدان (۲۳۹/۶۷ متر مکعب بر تن) بود. علت بالا بودن ردپای آب خاکستری در این مناطق، استفاده بیشتر از کود شیمیایی می‌باشد. در این مناطق به‌علت بالا بودن مقدار آب آبی، آبشویی در اراضی بالا می‌باشد و این امر باعث شسته شدن مواد غذایی خاک شده و نیاز به استفاده از کود بیشتر می‌شود. لذا آلودگی ناشی از مصرف کود شیمیایی در این مناطق بالاتر است. در مجموع با توجه به این که در برخی ایستگاه‌ها، ردپای آب خاکستری نسبت به ردپای آب سبز و آبی بیشتر است، می‌توان گفت برای تولید محصول جو مقداری آب از طریق مصرف کودهای شیمیایی آلوده می‌شود. برای کاهش این جزء نیز می‌توان کودهای زیستی و آلی را جایگزین کودهای شیمیایی نمود. همچنین با مصرف بهینه کودهای شیمیایی، امکان کاهش سهم آب خاکستری وجود دارد. از نظر ردپای آب سفید، بیشترین ردپای آب سفید در ایستگاه زاهدان (۱۹۵۶/۲ مترمکعب بر تن) مشاهده شد. بنابراین لازم است در کنترل تلفات آبیاری و مدیریت مؤثرتر آب آبیاری در این منطقه اهتمام بیشتری صورت گیرد. کمترین مقدار ردپای آب سفید مربوط به ایستگاه رشت (۵۱۵/۹۹ مترمکعب بر تن) بود. توزیع آب سبز در سه استان شمالی کشور نشان می‌دهد به دلیل بارش‌های فراوان در این مناطق، بخش زیادی از نیاز آبی گیاه توسط رطوبت موجود در پروفیل خاک تأمین می‌شود. بنابراین در این استان‌ها با افزایش راندمان آبیاری می‌توان ردپای آب سفید را کاهش داد.

نکته قابل توجه در سطح کشور، سهم بالای ردپای آب سفید در تولید جو آبی است، هرچند که این حجم آب به چرخه آبی کشور باز می‌گردد و امکان استفاده از آن در سال‌های بعد وجود دارد، اما با اعمال مدیریت مؤثر و کاهش این سهم، می‌توان از آن در سایر فرآیندهای تولیدی استفاده کرد. رضانی اعتدالی و آبابایی (۱۳۹۴) ردپای آب مجازی برای جو را در ۱۵ استان کشور مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان در دوره آماری ۱۳۹۰-۱۳۸۵ نشان داد ۴۴ درصد از مجموع ردپای آب در تولید جو در این ۱۵ استان سهم ردپای آب سفید و خاکستری می‌باشد.

ردپای کل آب شامل فرایند مصرف آب از زمان کاشت تا برداشت است و از مجموع ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید به‌دست می‌آید. مصرف آب سبز در تولید محصولات کشاورزی از آب باران است که بر روی محیط زیست اثرات سویی ندارد. در مقابل آب آبی از آب‌های سطحی یا زیرزمینی است که اثرات آن بر محیط زیست مشهود است (Ridutt and Pfister, 2010). بنابراین ردپای کل آب به مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب در تولید محصولات کشاورزی و اثرات زیست‌محیطی ناشی از آن دلالت دارد که کاربرد آن می‌تواند

در این رابطه Y: مقدار محصول تولید شده (کیلوگرم در هکتار)، Vw: آب مصرف شده توسط گیاه (تبخیر و تعرق واقعی گیاه) متر مکعب در هکتار.

در پایان محاسبات، توزیع مکانی اجزای ردپای آب و کارایی مصرف آب با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS مشخص شد. همچنین تغییرات زمانی اجزای ردپای آب طی دوره آماری ۱۳۹۶-۱۳۸۷ مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

جدول ۱ نتایج میانگین حاصل از عملکرد، آب مصرفی و محاسبه ردپای آب سبز، آبی، خاکستری، سفید کارایی مصرف آب مناطق مورد مطالعه را در دوره آماری ۱۳۹۷-۱۳۸۷ نشان می‌دهد.

تفاوت در شرایط آب و هوایی، میزان بارش و شرایط متفاوت خاک منجر به تنوع در مقدار ردپای آب سبز شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد بیشترین ردپای آب سبز مربوط به ایستگاه‌های رشت (۵۹۲/۵۳ مترمکعب بر تن)، گرگان (۵۷۰/۸۶ مترمکعب بر تن) و ساری (۵۴۳/۳۶ مترمکعب بر تن) یعنی نوار شمالی کشور می‌باشد که علت آن بارندگی‌های زیاد در این مناطق است. کمترین ردپای آب سبز مربوط به ایستگاه یزد با ۱۲۴/۲۱ مترمکعب بر تن بود که نشان‌دهنده کمبود بارندگی در این منطقه می‌باشد. بیشترین مقدار آب آبی در ایستگاه زاهدان با ۷۸۷/۰۱ مترمکعب بر تن به‌دست آمد که نشان‌دهنده کاهش بارندگی و بالا بودن نیاز آبی گیاه جو در این منطقه می‌باشد. همچنین نشان می‌دهد سهم زیادی از آب در این استان از طریق آبیاری مصرف می‌شود. برای کاهش سهم این جزء ردپای آب می‌توان به راهکارهایی مثل تنظیم دور آبیاری و استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری اشاره کرد. کمترین مقدار ردپای آب آبی مربوط به ایستگاه رشت با ۸۶/۷۳ متر مکعب بر تن بود که علت آن بالا بودن مقدار رطوبت و بارندگی و همچنین بالا بودن عملکرد محصول در این ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه‌ها می‌باشد. همچنین از جدول مشاهده می‌گردد در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه ردپای آب آبی از ردپای آب سبز بیشتر بود که نشان‌دهنده کمبود بارندگی در کشور و حاکم بودن اقلیم خشک و نیمه‌خشک در تمامی استان‌ها کشور از نظر کشاورزی می‌باشد. علیقلی‌نیا و همکاران در تحقیق خود راجع به ردپای گندم در اقلیم‌های مختلف ایران به نتایج مشابه دست یافتند (Aligholina et al., 2019).

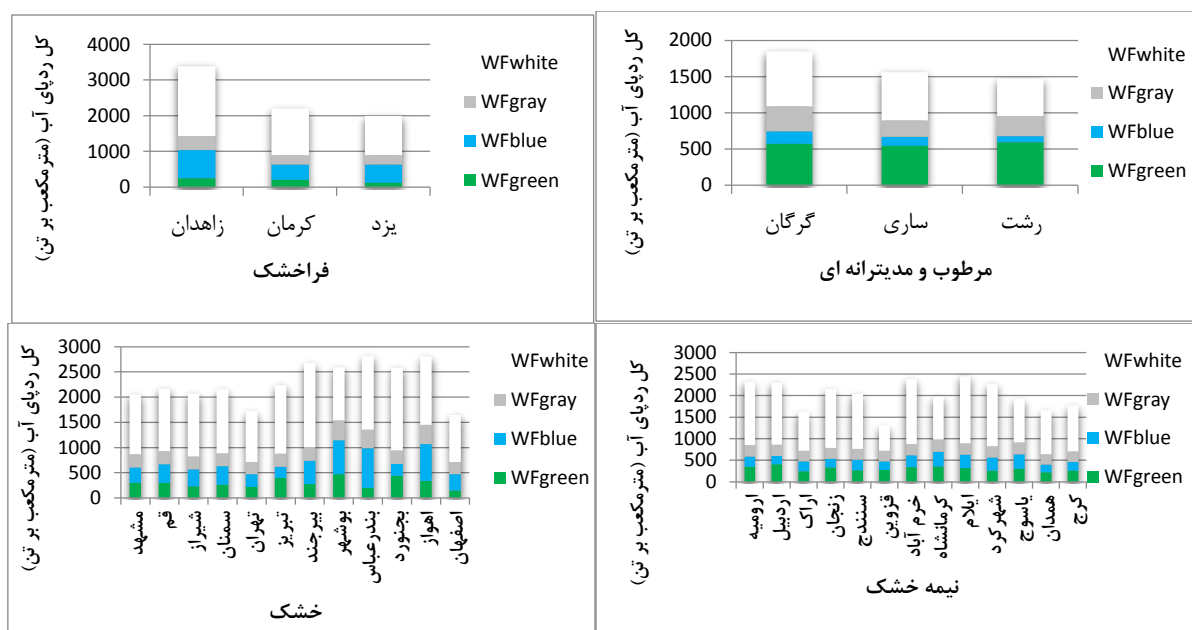
وجود اقلیم خشک و نیمه‌خشک در کشور باعث شده است، کشاورزان برای افزایش بهره‌وری محصول و کاهش اثرات اقلیمی بر عملکرد، از کودهای شیمیایی رایج استفاده نمایند. این امر باعث بالا رفتن ردپای آب خاکستری می‌شود (علیقلی‌نیا و همکاران ۱۳۹۸).

می‌گردد. در اقلیم خشک، بوشهر دارای بیشترین ردپای آب سبز بود اما به دلیل بالا بودن ردپای آب آبی و خاکستری مناسب کشت جو نمی‌باشد. در این اقلیم ایستگاه تبریز و بجنورد مناسب‌تر برای کشت می‌باشند. در اقلیم نیمه‌خشک، اردبیل، خرم‌آباد و کرمانشاه به دلیل بالاتر بودن ردپای آب سبز و کمتر بودن آب آبی مناسب‌تر برای کاشت جو می‌باشند. فرزی و همکاران (۱۳۹۸) به تعیین الگوی کشت بهینه استان کرمانشاه بر اساس ردپای آب پرداختند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد از بین غلات، گیاه جو کمترین ردپای آب را دارا بود و این منطقه مناسب برای کشت این محصول می‌باشد.

همچنین از شکل ۲ مشاهده می‌گردد بیشترین جزء ردپای آب در همه ایستگاه‌ها مربوط به جزء آب سفید می‌باشد. همان‌طور که قبلاً گفته شد این جزء آب، حجم تلفات آبیاری در مزرعه را نشان می‌دهد. بالا بودن این جزء در تمامی اقلیم‌ها نشان می‌دهد، مدیریت خوب و مناسبی برای آبیاری مزارع جو در کل کشور انجام نمی‌گیرد. عدم مدیریت صحیح و نامناسب در نحوه آبیاری، تعداد دفعات آبیاری بیش از حد نیاز آبی گیاه، تاریخ و زمان نامناسب آبیاری باعث پایین آمدن عملکرد و بالا رفتن ردپای آب سفید می‌شود. بنابراین ضروری است، کنترل تلفات آبیاری و پایین آوردن ردپای آب سفید از طریق افزایش راندمان، استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری و تاریخ مناسب کاشت صورت گیرد.

ارزیابی جامع‌تری از بهره‌وری آب زراعی، تحلیل توزیع زمانی و مکانی کشت داد (Lue et al., 2016). مجموع کل ردپای آب در شهرهای زاهدان، اهواز و بندرعباس نسبت با سایر شهرهای مورد مطالعه بیشتر بود. که علت آن‌را می‌توان بالا بودن ردپای آب آبی و سفید در این مناطق بیان نمود. چگونگی مدیریت کشاورزی در زمان کاشت، داشت و برداشت، تفاوت در حاصل‌خیزی اراضی و مصرف کود، شرایط آب و هوایی و تفاوت در نیاز آبی از مهم‌ترین دلایل در تفاوت ردپای آب در نواحی مختلف است (Bazrafshan et al., 2020).

برای مقایسه ردپای آب در هر یک از اقلیم‌های مورد مطالعه و تعیین مناطق مناسب کشت جو در هر اقلیم، شکل ۲ ترسیم شد. با توجه به این که ردپای آب سفید حجم تلفات آب آبیاری را نشان می‌دهد که ناشی از مدیریت آبیاری در مزرعه می‌باشد، لذا برای تعیین مناطق مناسب برای کشت از جزء ردپای آب سبز، آبی و خاکستری استفاده شد. بر این اساس مناطقی که دارای ردپای آب سبز بالاتر و ردپای آب آبی کمتری می‌باشند، برای کشت مناسب‌تر می‌باشند. در اقلیم مدیترانه‌ای و مرطوب شمال کشور، سه ایستگاه رشت، ساری و گرگان به دلیل داشتن ردپای آب سبز بالا و ردپای آب آبی پایین مناسب برای کشت جو می‌باشند. در اقلیم فراهخشک، ایستگاه کرمان نسبت به زاهدان ردپای آب سبز کمتری داشت اما به دلیل داشتن ردپای آب آبی و خاکستری کمتر، مناسب‌تر برای کشت جو معرفی



شکل ۲- مقایسه ردپای آب در اقلیم‌های مختلف

های ۱۳۸۸، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ مشاهده شد. علت این افزایش می‌تواند به دلیل وجود خشکسالی‌های شدید در این سال‌ها باشد که باعث بالا رفتن ردپای آب آبی شده است. محققان از جمله آبایی و رضانی-

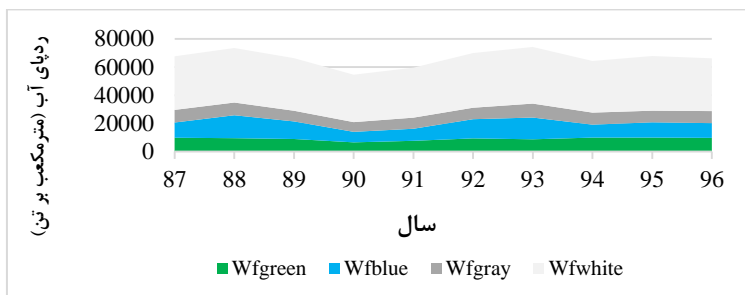
توزیع زمانی و مکانی ردپای آب

متوسط تغییرات زمانی ردپای آب (شکل ۳) نشان داد ردپای آب در سال‌های مختلف متفاوت بوده است. بیشترین مقدار آن در سال-

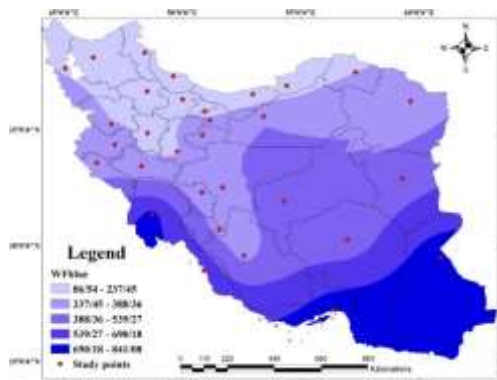
برای جو مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل‌های ۴ تا ۸ تغییرات مکانی ردپای آب سبز، آبی، خاکستری، سفید و مجموع کل ردپای آب را نشان می‌دهند.

اعتدالی و بذرافشان و گرکانی نژادمشیزی در تحقیقات خود وقوع خشکسالی در این سال‌ها را گزارش نموده‌اند (Ababai and Ramazani Etedali, 2019 & Bazrafshan and Gerkani Nezhad Moshizi, 2018).

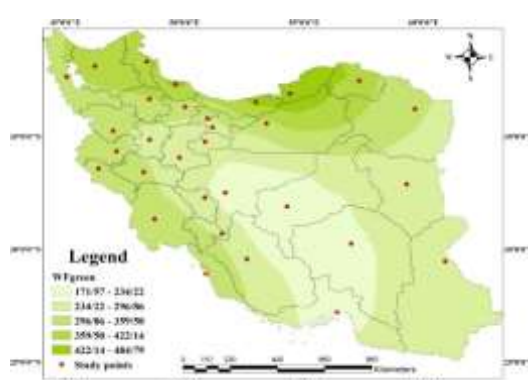
به‌منظور بررسی تغییرات مکانی ردپای آب، نقشه‌های پهنه‌بندی شده در هر چهار جزء ردپای آب ترسیم شد و روند تغییرات ردپای آب



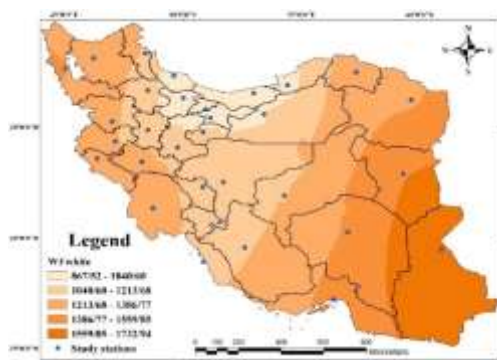
شکل ۳- توزیع زمانی اجزای ردپای آب در دوره مورد مطالعه (۱۳۸۷-۱۳۹۶)



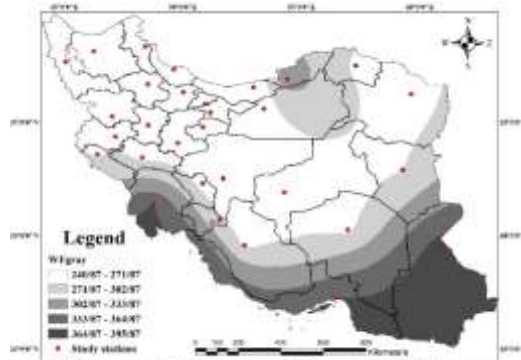
شکل ۵- تغییرات مکانی ردپای آب آبی



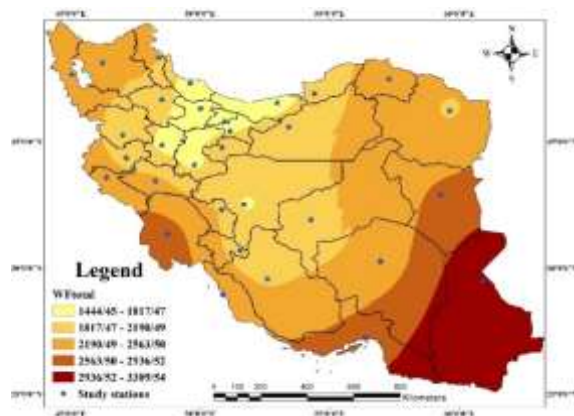
شکل ۴- تغییرات مکانی ردپای آب سبز



شکل ۷- تغییرات مکانی ردپای آب سفید



شکل ۶- تغییرات مکانی ردپای آب خاکستری



شکل ۸- تغییرات مکانی کل ردپای آب

غرب کشور برویم، مقدار ردپای کل آب کاهش می‌یابد. در نقاط مرکزی کشور به دلیل عدم کشت ردپای آب از همه‌جا کمتر می‌باشد. مطابق شکل ۸ از بین تمامی اقلیم‌ها، نوار شمالی کشور (اقلیم مدیترانه‌ای و مرطوب) کمترین ردپای کل آب را داشت.

ارزیابی شاخص تأمین نسبی آب آبیاری

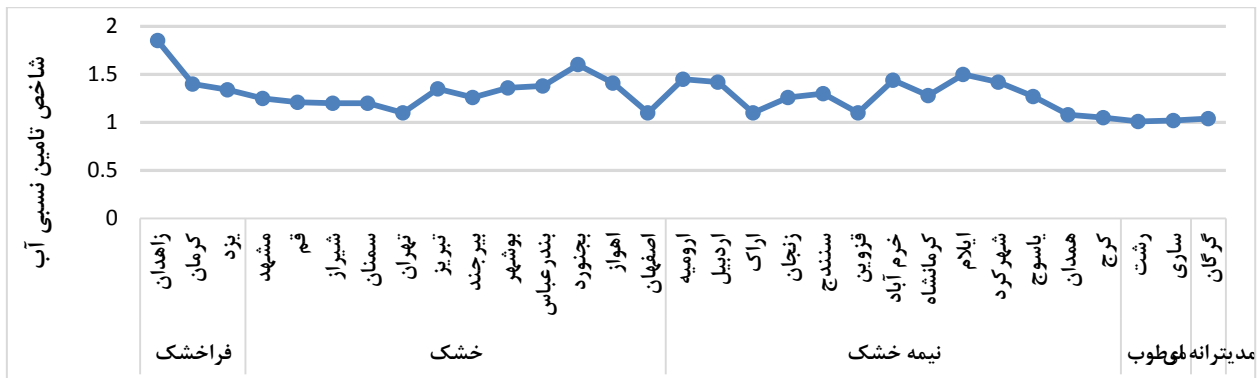
شاخص ردپای آب، روش مناسبی برای ارزیابی ارتباط بین آب مورد استفاده و عملکرد محصول می‌باشد. اما این شاخص نمی‌تواند اطلاعاتی در مورد مدیریت آبیاری، کمبود آبیاری، بیش آبیاری و یا آب مورد نیاز محصول در حین فرآیند رشد را در اختیار بگذارد (علیقلی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۵). بنابراین به منظور ارزیابی هرچه بهتر وضعیت آبیاری و آب مصرفی در بخش کشاورزی، از شاخص تأمین نسبی آب آبیاری استفاده شد. مقادیر این شاخص برای استان‌های مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، مقادیر شاخص نسبی آبیاری بیشتر از یک بود که نشان می‌دهد، آبیاری بیش از اندازه در این مزارع انجام شده است. در اقلیم‌های مختلف شاخص تأمین نسبی آب متفاوت بود. بیشترین مقدار آن در ایستگاه زاهدان مشاهده شد. پیش‌تر توضیح داده شد که در این ایستگاه ردپای آب سفید از دیگر ایستگاه‌ها بیشتر بود که این امر باعث بالا رفتن شاخص تأمین نسبی آب آبیاری شد. در ایستگاه‌های رشت، ساری و گرگان مقدار این شاخص تقریباً یک بود که نشان می‌دهد که آبیاری در این مناطق به اندازه نیاز آبی گیاه انجام شده است. علت آن هم ریزش باران‌های زیاد در این مناطق می‌باشد که باعث شده است کشاورزان از دادن آب اضافی به مزارع خودداری کنند. موریلو و همکاران زمان کشت محصول، راندمان آبیاری و سیستم تکنولوژی آبیاری را به عنوان عوامل اصلی در تفاوت شاخص نسبی آبیاری بیان نمودند (Morillo et al., 2015). بالا بردن راندمان استفاده از آب در سیستم‌های آبیاری باعث کم شدن مقدار شاخص تأمین نسبی آب آبیاری، افزایش عملکرد محصول و کاهش ردپای آب می‌گردد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات ردپای آب آبی و آب سبز کاملاً برعکس است. به طوری که در جاهایی که ردپای آب آبی بیشتر است، ردپای آب سبز کمتر می‌باشد و برعکس مناطقی که دارای ردپای آب آبی کمتری هستند، ردپای آب سبز بیشتری دارند. علت این امر تبعیت الگوهای ردپای آب آبی و آب سبز از نزولات جوی می‌باشد. مطابق شکل‌های فوق، بیشترین مقادیر ردپای آب آبی در قسمت‌های مرکزی و جنوبی ایران دیده می‌شود. قسمت‌های فوق مناطق بیابانی و اقلیم‌های گرم و خشک ایران را تشکیل می‌دهند که از نظر بارندگی حجم بارش کمتری را نسبت به سایر نقاط کشور دارند. این در حالی است که در بررسی ردپای آب سبز، وضعیت کاملاً برعکس بوده و بیشترین مقدار ردپای آب سبز در قسمت‌های شمالی و غربی کشور دیده می‌شود که علت آن بارش‌های فراوان در این مناطق می‌باشد.

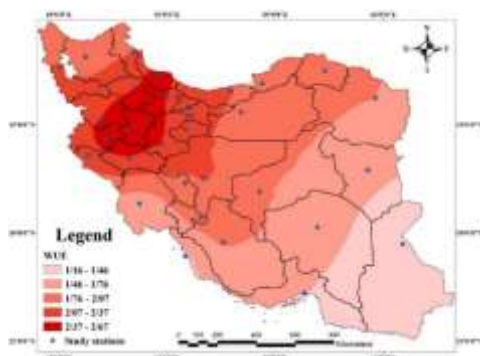
پهنه‌بندی ردپای آب خاکستری (شکل ۶) نشان داد، ردپای آب خاکستری در مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی و غربی بیشتر از سایر نقاط دیگر کشور بود. مشابه ردپای آب سبز، ردپای آب خاکستری نیز در مناطق مرکزی ایران کمتر بود که به دلیل کمبود بارندگی، کشت کمتر و در نتیجه، مصرف کمتر از سموم و کود می‌باشد.

پهنه‌بندی ردپای آب سفید (شکل ۷) نشان داد بیشترین مقدار آب سفید در مناطق شرق و جنوب‌شرقی کشور مشاهده شد. که نشان‌دهنده مصرف بیش از اندازه آب در این مناطق و مدیریت ضعیف آبیاری می‌باشد. کمترین مقدار رد پای آب سفید نیز در نوار شمالی کشور مشاهده شد. در این مناطق به دلیل بالا بودن ریزش‌های جوی، کشاورزان کمتر آبیاری انجام می‌دهند که باعث پایین آمدن ردپای آب سفید در این مناطق می‌شود.

همان‌طور که گفته شد کل ردپای آب شامل ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید می‌باشد. شکل ۸ پهنه‌بندی کل ردپای آب را نشان می‌دهد. مقدار کل ردپای آب در جنوب‌شرقی ایران (اقلیم فرا خشک) بیشتر از سایر نقاط می‌باشد. هرچه از جنوب‌شرق به سمت مرکز و



شکل ۹- شاخص تأمین نسبی آب برای مناطق مورد مطالعه



شکل ۱۰- پهنه‌بندی کارایی مصرف آب

ارزیابی کارایی مصرف آب

مطابق جدول ۱ کارایی مصرف آب از ۱/۰۱ کیلوگرم بر مترمکعب در ایستگاه زاهدان تا ۳/۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب در همدان متغیر بود. پایین بودن کارایی مصرف آب در زاهدان به دلیل بالا بودن ردپای آب در این منطقه می‌باشد که آن هم ناشی از بالا بودن ردپای آب سفید و آبی می‌باشد. بنابراین در این منطقه باید مدیریت بیشتری از نظر توزیع و تحویل آب در مزارع انجام گیرد. مسائل اقلیمی و شرایط خاک حاکم بر مناطق غربی کشور به خصوص همدان بر پایین بودن ردپای آب در این منطقه موثر است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۶). دلایل متفاوت بودن کارایی مصرف آب جو در اقلیم‌ها و مناطق مختلف، قطعاً به عوامل و پارامترهای زیادی از جمله شرایط اقلیمی، کیفیت آب و خاک، نوع منبع آب و سیستم آبیاری، مسائل مدیریتی به‌زراعی و به‌نژادی، ارقام گیاهی، نوع عملیات و نهاده‌ها کشاورزی دارد (Morell et al., 2011). همچنین کارایی مصرف آب به عواملی همچون عملکرد در واحد سطح، راندمان آبیاری، میزان تبخیر و تعرق، استفاده از روش‌های کاهش تبخیر مانند مالچ‌پاشی و استفاده از گیاهان مقاوم به تبخیر، تغییر زمان کاشت و ژنوتیپ گیاهی دارد (et al., 2016). لذا توجه به این مسئله می‌تواند باعث افزایش کارایی مصرف آب به‌خصوص در مناطق فراخشک و خشک شود. شکل ۱۰ توزیع مکانی کارایی مصرف آب را نشان می‌دهد. بالاترین کارایی مصرف آب در ایستگاه‌های همدان، زنجان، رشت و کرمانشاه مشاهده شد. هرچه از سمت غرب به مرکز و شرق کشور برویم، مقدار کارایی مصرف آب کاهش می‌یابد. یکی از دلایل کاهش کارایی مصرف آب در مناطقی مرکزی و شرقی کشور، بالا بودن تبخیر و تعرق در این مناطق و بالا بودن ردپای آب سفید می‌باشد. همچنین عملکرد جو در این مناطق نسبت به سایر نقاط کشور پایین‌تر بود. این مناطق کویری و خشک و بعضاً زمین‌ها شور می‌باشند که باعث پایین آمدن عملکرد گیاه می‌شود.

نتیجه‌گیری

مفهوم ردپای آب در تولید محصولات کشاورزی به مدیریت و مکان‌یابی مناسب مصرف آب کشاورزی کمک فراوانی می‌کند. همچنین آگاهی از مقدار دقیق کل آب مصرفی و کارایی آب مصرفی در جهت مدیریت منابع آب با توجه به بحران‌های آبی اخیر می‌تواند در جهت دستیابی به معیشت پایدار برای کشاورز و سیاستگذاران مفید باشد. در این راستا بررسی ردپای آب محصول جو در مراکز استان‌های مختلف ایران نشان داد که مقدار آب مصرفی واقعی این محصول در چهار جزء آب سبز، آب آبی، آب خاکستری و سفید در مناطق و اقلیم‌های مختلف ایران یکسان نبوده و بسته به نوع اقلیم، وضعیت آب و هوایی و نحوه کشت و زرع این محصول متفاوت است. بنابراین لزوم مدیریت کشت این محصول در اقلیم‌های مختلف ایران امری لازم و ضروری بوده که همواره باید مدنظر مسئولین و مدیران امر قرار گیرد. چراکه مطابق با نتایج این تحقیق کشت محصول جو در همه نقاط و در همه اقلیم‌ها مناسب نبوده است و کاشت آن برای همه مناطق توصیه نمی‌شود. از نظر شاخص ردپای آب بیشترین مقدار کل ردپای آب در ایستگاه زاهدان و کمترین آن در ایستگاه رشت مشاهده شد. سهم ردپای آب خاکستری و سفید در کل ردپای آب بیشتر از ردپای

فرزی، س.، گلابی، م. و رادمنش ف. ۱۳۹۸. تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر شاخص ردپای آب (مطالعه موردی: استان کرمانشاه). آبیاری و زهکشی ایران، ۳(۱۳): ۶۰۲-۵۸۸.

محمدی، ع.، یوسفی، ح.، نوراللهی، ی. و ساداتی نژاد، س.ج. ۱۳۹۶. انتخاب بهترین استان در تولید سیب زمینی از طریق شاخص ارزیابی ردپای آب. اکوهیدرولوژی، ۴(۲): ۵۳۲-۵۲۳.

نورمحمدی، ق.، سیادت، آ. و کاشانی، ع. ۱۳۸۴. کاشت گیاهان. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۴۴۶ صفحه.

Ababaei, B. and Ramezani Etedali, H. 2019. Investigating climate change over 1957-2016 in an arid environment with three drought indexes. Theoretical and Applied Climatology. 137: 2977-2992.

Ababai, B. and Ramazani Etedali, H. 2014. Estimation of Water Footprint Components in Wheat Production in Iran. Water and Soil. 2 (6): 1458-1468.

Aligholina, T., Rezaei, H., Bahmanesh, J. and Montasseri, J. 2017. Study of water footprint index for dominant crops in Lake Urmia catchment and its relationship with irrigation management. Soil Science. 27 (4): 37-48.

Arabi Yazdi, A., Nik nia, N., Majidi, N. and Emami, H. 2014. Water Security Assessment in Arid Climates Based on Water Footprint Concept (case study; south khorasan province). Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 8(4):735-746.

Bazrafshan, O. and Gerkan Nezhad Moshizi, Z. 2018. The impacts of climate variability on spatiotemporal water footprint of Tomato production in The Hormozgan. Journal of Water and Soil. 32(1):29-43.

Chapagain, A. K. and Hoekstra, A.Y. 2011. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. Ecological Economics. 70(4): 749-758.

Chapagain A. k, Hoekstra A. Y, Savenije H. H. G, and Gautam R. 2006. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. Ecological Economics. 60: 186- 203.

Farzi, S., Golabi, M., Radmanesh F. 2019. Determining the optimal cultivation pattern based on water footprint index (Case study: Kermanshah province). Irrigation and Drainage of Iran. 3 (13), 602-588.

Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. 2008. Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources, Blackwell, Oxford, UK.

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M. 2011. The Water Footprint

آب سبز و آبی بود. اگرچه این میزان آب به چرخه آبی کشور برمی-گردد اما کاهش کیفیت آن و گاه از دسترس خارج شدن آن موضوعی است که بایستی مورد توجه مسئولین قرار گیرد. از نظر ردپای آب سبز مراکز استان‌های شمالی کشور (رشت، ساری و گرگان) بیشترین ردپای آب سبز را داشتند. از نظر ردپای آب آبی رشت کمترین و زاهدان بیشترین ردپای آب آبی را دارا بودند. ردپای آب خاکستری در استان‌های جنوبی و جنوب شرقی از سایر مناطق بیشتر بود. شاخص تأمین نسبی آب آبیاری در تمام ایستگاه‌ها بیشتر از یک بود که نشان می‌دهد در کل کشور آب بیش از اندازه به گیاه جو داده می‌شود. کارایی مصرف آب در غرب و مناطقی از شمال کشور (رشت) بیشتر از سایر مناطق بود. کمترین کارایی مصرف آب در مرکز و جنوب شرق کشور دیده شد. جو از دیرباز جایگاه ویژه‌ای در سبد تغذیه دام به-صورت دانه و علوفه سبز داشته است. مردم مراکز جنوب شرق و خصوصاً زاهدان دامپرور هستند و برای مصرف دام‌های خود جو کشت می‌کنند. با توجه به بالابودن ردپای آب جو در این مناطق لازم است جهاد کشاورزی با آگاه‌سازی کشاورزان سطح زیرکشت این محصول را کاهش دهند و کشاورزان را به کشت محصولات جایگزین با عملکرد بالاتر و مصرف آب کمتر مانند سورگوم و ذرت علوفه‌ای تشویق نمایند. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده لازم است مسئولین در جهت حفظ خودکفایی این محصول در کشور، الگوی کشت بهینه این محصول را متناسب با اقلیم مناطق و با در نظر گرفتن آب واقعی مصرفی و مقادیر ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید برنامه‌ریزی نمایند.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل انجام شده است. کد پژوهانه UOZ-GR-9719-30

منابع

بذرافشان، ز.، رضانی‌اعتدالی، ه. و بذرافشان، ا. ۱۳۹۹. توزع زمانی و مکانی اجزای ردپای آب و تجارت آب مجازی محصول گردو در ایران. اکوهیدرولوژی، ۷(۳): ۵۹۳-۵۸۳.

رضانی‌اعتدالی، ه. و آبایی، ب. ۱۳۹۵. برآورد اجزاء ردپای آب مجازی در تولید جو در مقیاس ملی و استانی. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۰(۳): ۴۴۳-۴۳۲.

علیقلی‌نیا، ت.، شبانی، ح.، محمدی، ا.، وحسام، م. ۱۳۹۸. مقایسه و ارزیابی ردپای آب آبی، سبز و خاکستری گندم در اقلیم‌های مختلف ایران. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۵(۳): ۲۴۵-۲۳۴.

- Research in Agriculture. 30 (3), 443-432.
- Rasooli Majd, N., Montaseri, M., Bahmanesh, J. and Rezaei, H. 2015. Identification and evaluation of the water footprint index, broken down by water, green water and gray water, by applying climate change. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University.
- Razavi, SS. and Davari K 2013. The role of virtual water in managing water resources. *Journal of Water and Sustainable Development*. 1: 9-18.
- Rodríguez-Díaz, J.A., Camacho-Poyato, E., Lopez-Luque, R. and Perez-Urrestarazu, L. 2008. Benchmarking and multivariate data analysis techniques for improving the efficiency of irrigation districts (an application in Spain). *Agricultural Systems*. 96: 250-259
- Rouhani, N., Yang, H., Amin Sichani, S., Afyouni, M., Mousavi, F. and Kamgar Haghighi, A. 2008. Evaluating the exchange of food and water based on available water resources in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 12(46):417-432.
- Seyedan, S. and Ghadami Firouzabadi, A. 2018. Estimation of virtual water in major crop products (Case Study Hamedan province). *Irrigation and Water Engineering*. 9(1): 102-111.
- Tuttolomondo, T. and Labell. S., 2008. Simulation of the effects of climate change on barely yield in rural Italy. F.A.O. website. www.FAO.Org.
- Yousefi, H., Mohammadi, A., Nourollahi, Y. and Sadatinejad, J. 2016. Evaluation of water footprint index of Tehran province crops. *Soil Conservation*. 24 (6):85-67.
- Zare Abyaneh, H., Bayat varkeshi, M., Sabzi Parvar, A.K., Maroufi, S. and Ghasemi, A. 2010. Estimation of estimation methods of evapotranspiration of the reference plant and its zoning in Iran. *Natural Geographic Research*. 74:110-95.
- Assessment Manual: Setting the Global Standard. Earthscan, London, UK, 203p.
- Hoekstra, A.Y and Chapagain A.K. 2006. Water footprint of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resource Management*. 21(1): 35-48.
- HuiSu, M., HuiHuang, C. YangLi, W., ToTso, C. and ShengLur, H. 2015. Water footprint analysis of bioethanol energy crops in Taiwan. *Journal of Cleaner Production*. 88: 132-138.
- Karandish, F. and Hoekstra, A.Y. 2017. Informing national food and water security policy through water footprint assessment: the case of Iran. *Water*. 9(11): 1-25.
- Lu, Y., Zhang, X., Chen, S., Shao, L. and Sun, H. 2016. Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: a case study in the North China Plain. *Journal of Cleaner Production*. 116:71-79.
- Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. 2010. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences*. 14:1259-1276.
- Mohammadi, A., Yousefi, H., Noorollahi, Y. and Sadatinejad, S.J. 2017. Selecting the best province in potato production through water footprint evaluation index. *Echo Hydrology*. 4 (2): 532-523.
- Morell, F.J., Lampurlan, J., Alvaro-Fuentes, J. and Cantero-Martínez, C. 2011. Yield and water use efficiency of barley in a semiarid Mediterranean agroecosystem: long-term effects of tillage and N fertilization. *Soil and Tillage Research*. 117: 76-84.
- Morillo, J.G., Díaz, J.A.R., Camacho, E. and Montesinos, P. 2015. Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Cleaner Production*, 87: 594-602.
- Ramezani Etadali, H. and Ababai, B. 2016. Estimation of virtual water footprint components in barley production on national and provincial scale. *Water*

Temporal and Spatial Distribution of Water Footprint and Water Use Efficiency of Barely in Different Regions of Iran

H. Piri^{*1}, M. Mobaraki²

Received: Nov.01, 2020

Accepted: Dec.06, 2020

Abstract

The present study was conducted to provide sustainable solutions in water resources management using the concept of water footprint and water use efficiency of barley at the national level. At the beginning of the study, the provinces of the country were classified according to the Dumartin climate. Then, green, blue, gray and white water footprints in barley production and water use efficiency in different climates and provincial centers were calculated during the statistical period of 2008-2017. Also, spatial and temporal zoning of water footprint and water use efficiency were performed. The results showed that the highest water footprint of green water in the humid and Mediterranean climate of the north of the country were Rasht stations (592.553 m³/ton), Gorgan (570.86 m³/ton) and Sari (543.53 m³/ton) and the lowest In ultra-dry climate, Yazd station was obtained with 124.21 m³/ton. Zahedan station with ultra-dry climate had the highest water footprint of blue (787.01 m³/ton) and Rasht with humid climate had the lowest (86.73 m³/ton). The highest amount of gray water footprint was related to Zahedan stations (390.4 m³/ton) and Bushehr (390.11 m³/ton) and the lowest amount was in Hamedan station (239.67 m³/ton). In terms of white water footprint, the highest was in Zahedan station (1956.2 m³/ton) and the lowest was in Rasht station (515.599 m³/ton). Spatial distribution of total water footprint showed that the highest total water footprint was in the southeast of the country and the arid climate and the lowest was observed in the northern and western parts of the country. The results of water use efficiency zoning showed that the highest water use efficiency was observed in the western regions of the country and the lowest was observed in the northern and western parts of the country. Therefore, according to the obtained results, it can be said that the northern and western regions of the country are more suitable for planting barley. Also, due to the lack of water in areas with dry climate and high water footprint in these areas, barley cultivation in these areas should be avoided. In these areas, cultivation of crops with less water requirements and higher yields should be planned. Barley cultivation in these areas is due to the high tolerance of barley to salinity and low soil fertility. Therefore, it is necessary for the authorities in these areas to plan the cultivation of crops with lower water requirements and higher yields and tolerance to salinity to replace barley.

Keywords: Climate, Green water, Relative water supply index, White water

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran

2 - M.Sc. Graduate, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran

(* - Corresponding Author Email: H_piri2880@uoz.ac.ir)

مقاله علمی-پژوهشی

تعیین مقادیر مناسب پارامترهای طراحی سیستم آبیاری با دو رژیم جریان پیوسته و کاهش جریان

هادی رضانی اعتدالی^۱، کیوان زرکانی^۲، محدثه السادات فخار^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۲۸

چکیده

امروزه با توجه به مصرف بالای آب در بخش کشاورزی و بحران آب در کشور اهتمام به اصلاح روش‌های آبیاری مضاعف گشته است. با توجه به اینکه بخش زیادی از اراضی آبی هنوز به صورت سطحی می‌باشد، یافتن راه‌حلی به منظور اصلاح روش‌های مذکور با هزینه‌هایی به مراتب کمتر از آبیاری تحت فشار ضروری است. هدف از این تحقیق استفاده از نرم افزار SIRMOD برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای طراحی مانند طول، دبی و زمان قطع جریان در دو رژیم جریان پیوسته و کاهش جریان در سیستم‌های آبیاری نواری و جویچه‌ای است که بدین منظور با استفاده از مدل SIRMOD اقدام به سناریوسازی به میزان ۲۵ و ۵۰ درصد مقادیر واقعی طول مزرعه، دبی ورودی و زمان قطع جریان اقدام شد. نتایج نشان داد که با کاهش ۲۵ الی ۵۰ درصدی طول و دبی ورودی به مزرعه، شاخص‌های ارزیابی از قبیل راندمان کاربرد، راندمان ذخیره، یکنواختی توزیع، به صورت چشمگیری افزایش پیدا می‌کند و نسبت رواناب و نسبت نفوذ عمقی کاهش قابل توجهی داشت. نتایج اثر تغییرات طول نوار بر شاخص‌های ارزیابی نشان می‌دهد میزان راندمان ذخیره از بازه (+۰/۲۵ تا -۰/۵) مقدار تقریباً ثابتی برابر با ۱۰۰ می‌باشد ولی در بازه (+۰/۵ تا +۰/۲۵) میزان راندمان تغییر کرده حتی در بعضی نقاط به مقدار ۸۰ نیز رسیده، و مقدار راندمان کاربرد نیز در اکثر جویچه‌ها مقداری بین (۹۰ تا ۴۰ درصد) می‌باشد. نتایج بیانگر این بود که روش کاهش جریان در عین موثر بودن بر افزایش شاخص‌های ارزیابی با توجه به قطع جریان آب توسط زارع پس از اتمام فاز پیشروی به خصوص در آبیاری نواری تاثیر چشمگیری در افزایش شاخص‌ها نداشت.

واژه‌های کلیدی: دبی ورودی، راندمان کاربرد، طول مزرعه

مقدمه

نیاز روزافزون بخش‌های مختلف به آب مشکل خشکسالی در سال‌های آبی حادث‌تر خواهد شد (Strelkoff et al., 1999). بر اساس گزارش موسسه بین‌المللی مدیریت آب (IWMI)، کشور ایران برای حفظ وضع فعلی خود تا سال ۲۰۲۵ باید بتواند ۱۱۲ درصد به منابع آب قابل استحصال خود بیفزاید و با توجه به نیازهای روزافزون در بخش کشاورزی، شرب، صنعت و حفاظت از سایر منابع زیستی بسیار دشوار و شاید ناممکن باشد. لذا، با توجه به وضع فعلی یکی از راهکارهای موثر و عملی استفاده بهینه و صرفه‌جویی در مصرف آب است. با توجه به گزارشات اخیر که در رسانه‌ها پخش شده عمده مصارف آب کشور ایران در بخش کشاورزی می‌باشد که با مدیریت مصرف آب در این بخش می‌تواند بسیار راهگشا و موثر واقع گردد (ناصری و همکاران، ۱۳۹۶). بسیار واضح است که برای دستیابی به این امر مهم، شناسایی شاخص‌های اصلی مدیریت مصرف آب و تعیین این شاخص‌ها به روش‌های مناسب است (Mailapalli et al., 2008). راندمان آبیاری

با پیشرفت علم و فناوری، شیوه‌های نوین در آبیاری ایجاد شده است اما هنوز اکثر کشورهای جهان اراضی خود را به روش سطحی آبیاری می‌کنند. کشور ایران از این جنبه با حدود ۸/۳ میلیون هکتار اراضی فاریاب رتبه ششم در جهان است (عباسی، ۱۳۹۱). با توجه به اینکه کشور ایران در اقلیم خشک و کم‌آب قرار گرفته و با توجه به

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری زهکشی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری زهکشی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

* نویسنده مسئول: (Email: fakhar.mohadese95@gmail.com)

زیرا جریان در انتهای پایین دست آنقدر حفظ شود تا عمق آب مورد نظر نفوذ کند. با افزایش جریان ورودی، آب زودتر به انتهای مزرعه می‌رسد ولی هم مدت و هم اندازه رواناب را افزایش می‌دهد (Elliott and Walker., 1982). برای حل این مشکل راه‌حلهایی چون مسدود کردن انتهای مزرعه، کنترل، کاهش و یا استفاده مجدد رواناب، کاهش دبی ورودی، انتخاب دبی ورودی که مجموع نفوذ عمقی و رواناب را به حداقل برساند، به عبارتی بهینه‌سازی رژیم دبی ورودی به مزرعه پیشنهاد شده است (مجدزاده و همکاران، ۱۳۹۰). به همین منظور در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های تحت فشار به منظور افزایش بهره‌وری مصرف آب در دستور کار قرار گرفته است. اما با این حال هنوز روش سطحی متداول‌ترین نوع آبیاری می‌باشد. از مهمترین دلایل این امر می‌توان به هزینه‌های بالا و مشکلات اجرای روش‌های تحت فشار اشاره کرد. دسترسی به راندمان بالا در مصرف آب در مزرعه نیازمند طراحی دقیق و اجرای صحیح سیستم آبیاری است و هر چه پارامترهای مؤثر در آبیاری هنگام طراحی بیشتر و دقیق‌تر لحاظ شده و مدل آبیاری نیز دقیق‌تر شبیه‌سازی شود، طبیعتاً راندمان آبیاری نیز بالاتر خواهد رفت (گلستانی و همکاران، ۱۳۸۹) در پژوهشی جهت ارزیابی مزرعه‌ای و تحلیل سیستم آبیاری سطحی با استفاده از نرم‌افزار WinSRFR (مطالعه موردی آبیاری جویچه‌ای) سه روش آبیاری جویچه‌ای شامل آبیاری معمولی، یک در میان ثابت و یک در میان متغیر در نظر گرفتند که نهایتاً نتایج نشان داد با مدیریت زمان قطع جریان و دبی ورودی، بازده کاربرد را می‌توان به شرط تامین عمق مورد نیاز، از ۵/۵۴ درصد در شرایط جاری به ۷۴ درصد افزایش داد (تقی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱). در تحقیقی دیگر موهان ردی و همکاران در اراضی تحت آبیاری سطحی در کشور ازبکستان به این نتیجه رسیدند که حدود ۳۹ درصد از آب تحویلی به مزارع به علت عدم به کارگیری دبی مناسب آبیاری به صورت رواناب تلف می‌گردد، همچنین عواملی چون عدم تحویل آب در زمان مناسب و نوسانات زیاد آب تحویلی به کشاورزان از عوامل مهم در عدم مدیریت صحیح آبیاری در مزارع عنوان گردیده است (Mohan reddy et al., 2010). در پژوهشی که در استان اهواز جهت بررسی کارایی و تحلیل حساسیت شبیه‌های مختلف نرم‌افزار SIRMOD در طراحی آبیاری جویچه‌ای انجام شد، نتایج نشان داد مرحله پیشروی و پسروی را با نتایج قابل قبولی و حساسیت بالا شبیه‌سازی می‌کند (مردزاده و همکاران، ۱۳۹۲). کلارک و همکاران از مدل SIRMOD برای ارزیابی بهبود عملکرد آبیاری جویچه‌ای و نواری در ایالت کالیفرنیا جنوبی استفاده کردند در این مطالعه ۳۴ نوار و جویچه مورد بررسی قرار گرفت و هیدروگراف ورودی و رواناب خروجی اندازه‌گیری گردید نتایج حاصل نشان داد مدل SIRMOD ابزاری مفید جهت ارزیابی آبیاری سطحی می‌باشد (Clark et al., 2010). ابراهیمیان و همکاران از سه معادله کامل،

از شاخص‌های مهم در تعیین مصرف، استفاده از آب و صرفه‌جویی در آن و در نهایت افزایش تولید و بهبود بهره‌وری آب مزرعه است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۵). گسترش استفاده از روش‌های آبیاری تحت فشار در اراضی فاریاب کشور یکی از برنامه‌های اصلی کشور در صرفه‌جویی در منابع آب کشاورزی است اما با توجه به مشکلات موجود در کشور هنوز حدود ۸۰ درصد اراضی فاریاب کشور به صورت سطحی آبیاری می‌شوند که باید برنامه‌های بهبود آبیاری سطحی در آن لحاظ شود (عباسی، ۱۳۹۱). راندمان‌های آبیاری، بهره‌وری مصرف آب کشاورزی، مقدار آب مصرفی در بخش کشاورزی و توسعه پایدار روش‌های نوین آبیاری از مهم‌ترین شاخص‌های کلیدی و رویکردهای اساسی در برنامه‌ریزی‌های کلان مربوط به تامین، تخصیص و مصرف اصولی از آب در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی است. اولین و مهم‌ترین گام، تعیین راندمان سامانه‌های آبیاری موجود و ارزیابی نحوه کار آنها برای تصمیم‌گیری و تصمیم‌سازی‌های مرتبط با مصرف بهینه آب، الگوی کشت و کاهش تلفات آب آبیاری است (امینی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۵). راندمان آبیاری به نسبت تولید محصول به تبخیر و تعرق اطلاق می‌شود. بنظر می‌رسد که این واژه اولین بار در سال ۱۹۶۲ استفاده شد. از این واژه بطور گسترده برای تعریف تولید در ازای مصرف یک واحد آب بکار برده شده برای مصرف گیاه استفاده شده است. آب عامل و نیاز اصلی کشاورزی در جهان به شمار می‌رود (Mc Clymont and Smith., 1996). از این رو، طرح‌های آبیاری نقش کلیدی در افزایش تولیدات محصولات کشاورزی در سطح جهان دارد. بر اساس گزارش براون، مساحت اراضی آبی جهان از ۴۸ میلیون هکتار در سال ۱۹۰۰، به ۹۴ میلیون هکتار در سال ۱۹۵۰ و ۲۴۰ میلیون هکتار در سال ۱۹۹۰ و به ۲۸۷ میلیون هکتار در سال ۲۰۰۷ افزایش یافته است (Brown, 2001). آبیاری سطحی یکی از مهمترین روش‌های آبیاری اراضی آبی است که محققین زیادی برای بهبود و توسعه آن قدم برداشته و برمی‌دارند (Trout, 1992). اهمیت این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که افزایش بهره‌وری در آبیاری سطحی بسیار کم‌هزینه و از سویی پربازده است و در صورت شناخت مشکلات موجود و پیدا کردن راه حل مناسب برای آن می‌توان بخش قابل توجهی از تلفات آب در بخش کشاورزی کاهش داد. بنابراین اصلاح روش‌های آبیاری سطحی، اعمال مدیریت صحیح در زمان و مقدار آب آبیاری، تسطیح، تجهیز، نوسازی و یکپارچه‌سازی، انتخاب دبی ورودی مناسب و ابعاد مناسب سیستم آبیاری از جمله عواملی هستند که در کاهش تلفات آبیاری نقش بسزایی دارند. در سیستم‌های آبیاری سطحی دو عامل نفوذ عمقی و رواناب باعث کاهش راندمان می‌شود. راه‌حلهای موجود در این رابطه، حالت رقابتی باهم دارند و در یک راستا نیستند. برای کاهش تلفات نفوذ عمقی بایستی فاز پیشروی تا حد امکان سریعتر کامل شود و این به معنای افزایش تلفات رواناب است.

بود. فاصله جویچه‌ها ۷۵ سانتیمتر و طول آن‌ها ۶۰ متر بود. تغییرات زمانی نفوذ تجمعی در تمامی تیمارها مشاهده نشد.

جدول ۱- نتایج آزمون خاک اراضی

مشخصات	عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متر
Sand	٪۳۳
Silt	٪۳۲
Clay	٪۳۵
EC	۱/٪۸۳
pH	٪۸
درصد اشباع SP	٪۵۱
بافت خاک	لوم رسی

مقادیر نفوذ تجمعی در طول فصل روند نزولی و به صورت لگاریتمی گزارش شد. نفوذ نهایی و راندمان کاربرد آب در انتهای فصل کشت نسبت به ابتدای دوره، به ترتیب ۳۴ و ۱۰ درصد کاهش یافت. بخش قابل توجهی از تغییرات نفوذ در آبیاری اول تا سوم مشاهده گردید برای معرفی یک مدل تجربی به منظور بررسی تغییرات زمانی نفوذ، ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف لوئیس را تعیین نمودند. نتایج نشان‌دهنده رفتار متفاوت تیمارهای خاک، روی توان معادله نفوذ بود. تغییرات زمانی ضرایب معادله نفوذ مستقل از بافت خاک و مدیریت مزرعه گزارش گردید. در مجموع، تغییرات زمانی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از تغییرات مکانی آن‌ها بیشتر و مهم‌تر است. بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که تغییرات زمانی و مکانی نفوذ آب در خاک در آبیاری سطحی، در آبیاری‌های اول بیشتر است. تغییرات زمانی نسبت به تغییرات مکانی در ابتدای دوره رشد بیشتر است (Mc Clymont and Smith, 1996). در آبیاری‌های بعدی به تدریج از تغییرات زمانی نفوذ کاسته و نقش تغییرات مکانی افزایش می‌یابد. بنابراین، در طراحی سامانه‌های آبیاری سطحی باید از اطلاعات مربوط به آبیاری‌های دوم و به بعد، برای مدیریت و طراحی آبیاری استفاده نمود. زرع‌کنانی و همکاران (۱۳۹۸) از نرم‌افزار SIRMOLD به منظور شبیه‌سازی و ارزیابی رخدادهای آبیاری با ضرایب نفوذ و ضریب زبری مانینگ برآورد شده از مدل‌های SIPAR_ID، INFILT و EVALUE استفاده کرد. دبی ورودی از پارامترهای مهم در طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری سطحی می‌باشد. تعیین مقدار بهینه این عامل می‌تواند در ارتقای کارایی سامانه‌های آبیاری سطحی نقش قابل توجهی داشته باشد. دبی جریان بر سطح مقطع، سرعت جریان، زمان پیشروی، مدت زمان و راندمان آبیاری، فرسایش خاک و غیره اثرگذار است. در آبیاری سطحی، افزایش دبی به کاهش زمان پیشروی و افزایش یکنواختی آبیاری در مزرعه منجر می‌گردد. به منظور ارزیابی، طراحی و شبیه‌سازی جریان آب در جویچه‌های آبیاری تعیین معادله

مدل اینرسی صفر و مدل موج سینماتیک در مدل SIRMOLD برای شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای و نواری استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل SIRMOLD در شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای بهتر از آبیاری نواری عمل کرده است (Ebrahimi et al., 2011). هدف از این تحقیق، استفاده از نرم‌افزار SIRMOLD برای ارزیابی روش‌های آبیاری سطحی و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف با مقادیر مختلف پارامترهای طراحی چون طول، دبی ورودی، زمان قطع جریان در دو رژیم جریان پیوسته و کاهش جریان در سیستم‌های آبیاری نواری و جوی‌پشته‌ای می‌باشد.

مواد و روش‌ها

محل انجام این تحقیق مزرعه جهان آباد واقع در شهرستان البرز استان قزوین می‌باشد که دارای مختصات ۳۶/۱۸ شمالی و ۵۹/۰۵ شرقی می‌باشد. شهرستان البرز دارای وسعتی معادل ۴۱۶ کیلومتر مربع بوده آب و هوای شهرستان خشک و نیمه‌خشک و میانگین بارندگی سالانه آن ۳۰۹ میلی‌متر می‌باشد کمترین بارندگی در ماه تیر، مرداد و شهریور و بیشترین بارندگی در ماه‌های بهمن، اسفند و فروردین اتفاق می‌افتد. سردترین و گرم‌ترین ماه‌های سال به ترتیب دی و تیر می‌باشد. در مزرعه انتخابی از دو نوع روش آبیاری جوی‌پشته‌ای و نواری به ترتیب برای آبیاری ذرت و درختان هلو و شلیل استفاده گردید. آبیاری مزرعه از یک حلقه چاه عمومی با دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه انجام شده همچنین در قسمت زراعی تاریخ کشت ذرت ۱۰ خرداد ماه و اولین رخدادهای آبیاری که در زبان عرف بین کشاورزان به خاکاب معروف است در ۱۳ خرداد ماه انجام گردید. آبیاری‌های بعدی با فاصله ده روزه به وقوع پیوست. فواصل بین پشته‌ها نیز ۷۵ سانتیمتر و طول جویچه‌های مورد بررسی ۱۸۰ سانتی‌متر بوده است. همچنین در قسمت باغ که شامل درختان هلو و شلیل بود فواصل بین درختان ۳*۳ و نوارهایی به طول ۱۰۰ متر و به عرض ۲/۵ متر برای آبیاری درختان ایجاد گردید. تاریخ اولین آبیاری باغ ۲۰ اردیبهشت ماه و آبیاری‌های بعدی با فاصله ده روزه به وقوع پیوست. با توجه به اهمیت کیفیت آب و خاک ورودی به مزرعه مورد مطالعه در نتایج خروجی در نخستین مرحله این تحقیق از خاک و آب ورودی به مزرعه نمونه تهیه گردید که نتایج آن به شرح جدول (۱) می‌باشد. اندازه‌گیری‌های لازم برای ارزیابی و آنالیز شامل: رطوبت خاک قبل از آبیاری، اندازه جریان ورودی، سرعت پیشروی آب، شرایط خاک، خصوصیات مقطع جریان، زمان قطع جریان و سرعت پیشروی می‌باشند. در این تحقیق داده‌های مربوط به سه آبیاری اول در بخش زراعت و باغ برداشت گردید. علت این امر اهمیت آبیاری‌های اول با توجه به ضریب زبری بالا و تحلیل مسایل مرتبط با آن می‌باشد. دو تیمار مدیریتی شامل خاک بدون کاه و کلس و خاک با کاه و کلس

مشخصات سطح مقطع آنها اندازه گیری گردید. این ردیف‌ها بسته به مورد، یک در میان و یا همجوار بودند. برای دقت در اندازه‌گیری‌ها کنار یکی از ردیف‌ها به فواصل ۲۰ متر میخ‌کوبی (نشانه‌گذاری) گردید. کد ارتفاعی در طول مسیر جویچه‌ها برای تعیین شیب مزرعه، برداشت گردید. زمان پیشروی آب به هر یک از ایستگاه‌ها یادداشت شد. زمان قطع جریان یادداشت گردید و رژیم کاهش جریان به نصف در جویچه‌های مورد بررسی اعمال گردید و برای دنبال نمودن جبهه خیس در خاک، اطمینان از کفایت و میزان یکنواختی آبیاری در سه نقطه ابتدایی، میانی و انتهایی جویچه با برداشت نمونه خاک پس از ۴۸ ساعت از زمان آبیاری میزان رطوبت خاک تعیین گردید. در طرح مورد مطالعه یک مزرعه تحت پوشش آبیاری نواری قرار دارد. موارد زیر برای گردآوری داده‌ها برای ارزیابی و بررسی آبیاری نواری صورت گرفته است. مکانی در مزرعه انتخاب گردید که خاک، شیب و گیاه در آن نقطه در برگزیده مشخصات کامل مزرعه بود. کد ارتفاعی در طول مسیر نوارها برای تعیین شیب برداشت گردید.

نفوذ آب در خاک که تا حد امکان به شرایط واقعی مزرعه نزدیک باشد، ضروری است. مشخصات جویچه و نوارهای مورد مطالعه به شرح جدول (۲) است که جویچه‌ها را با حرف لاتین F و نوارها با حرف لاتین B مشخص شده‌اند و جویچه‌ها و نوارهایی که روش کاهش جریان پس از فاز پیشروی در آنها اعمال گردیده است با حرف لاتین C در جدول مشخص گردیده‌اند طول جویچه‌های مورد بررسی ۱۸۰ متر و طول نوارهای مورد مطالعه بنا به پیشنهاد کارشناسان آب و خاک اداره جهاد کشاورزی شهرستان الوند ۱۰۰ متر اجرا شده بود. شایان ذکر است که رژیم کاهش جریان پس از اتمام فاز پیشروی و به میزان نصف دبی ورودی اعمال گردید. روش اجرای عملیات در هر یک از رخدادهای سه‌گانه آبیاری در مزارعی که تحت پوشش آبیاری جویچه‌ای قرار دارند به شرح ذیل بوده است: یک نمونه خاک برای اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک قبل از آبیاری برداشت گردید. شش جویچه برای آزمایش انتخاب ۳ جویچه برای بررسی شرایط جریان با دبی ثابت و ۳ جویچه برای اعمال شرایط جریان کاهش و طول

جدول ۲- مشخصات هندسی هیدرولیکی جویچه و نوار

BC3	B3	BC2	B2	BC1	B1	FC3	F3	FC2	F2	FC1	F1	جویچه
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	طول جویچه (متر)
۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	عرض جویچه یا نوار (متر)
۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	شیب (درصد)
۲۴	۲۴	۲۲	۲۲	۲۵	۲۵	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۱۲۰	۱۲۰	زمان کاهش جریان (دقیقه)
۴۰	۴۰	۴۵	۴۵	۴۰	۴۰	۱۱۵	۱۱۵	۱۱۵	۱۱۵	۱۲۵	۱۲۵	زمان قطع جریان (دقیقه)
۱۲	۱۲	۱۱/۵	۱۱/۵	۱۲/۵	۱۲/۵	۱/۶	۱/۶	۱/۵	۱/۵	۱/۶	۱/۶	متوسط جریان ورودی
۳	۳	۲	۲	۱	۱	۳	۳	۲	۲	۱	۱	رخداد آبیاری
۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	p1
۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	p2
۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۲۴	σ1
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱/۵۶	۱/۵۶	۱/۵۶	۱/۵۶	۱/۵۶	۱/۵۶	σ2

پارامترهای ارزیابی

چنانچه آبیاری ناقص صورت گرفته باشد، راندمان آبیاری (Ea)، درصد تلفات به صورت نفوذ عمقی (DRP) و درصد تلفات به صورت روان آب (TWR) به صورت زیر محاسبه می‌شود (Walker, 2003):

$$Ea = 100 \left(\frac{Zreqd Xd + Vz d}{Qin(tco)} \right) \quad (1)$$

Ea: راندمان آبیاری

Zreqd: مقدار آبی که لازم است برای تامین نیاز آبی گیاه در خاک نفوذ کند.

Xd: فاصله از ابتدای مزرعه تا جایی که نفوذ بیشتر می‌باشد.

Vzd: حجم آب نفوذ شده در خاک در قسمتی که کم‌آبیاری شده

یکی دیگر از موارد پر اهمیت راندمان آبیاری می‌باشد بهره‌گیری از راندمان زیاد در یک سیستم آبیاری الزاما اقتصادی نیست. لیکن یک مدیر خوب باید همواره بازدهی سیستم آبیاری را ارزیابی نماید تا بتواند تصمیم صحیح‌تری در مورد تغییر و یا اصلاح سیستم آبیاری اتخاذ نماید (قبادی‌نیا و همکاران، ۱۳۸۶). معمولا آن دسته از محاسبات در رابطه با بازدهی که بر مبنای اطلاعات و داده‌های مزرعه استوار است تا حدود پنج درصد مقدار واقعی صحت دارند. لذا ایجاد تغییراتی در سیستم که موجب افزایش کمتر از پنج درصد در بازدهی گردد، چندان درخور توجه نمی‌باشد، مگر این که داده‌های مشابه برای مقایسه با روش‌هایی که احتمال جایگزینی با سیستم فوق را دارند مورد استفاده قرار بگیرد.

است.

Dr: عمق متوسط آبیاری (میلی متر)

مقصود از عبارت فوق این است که لحاظ عمق آبیاری مازاد بر کمبود رطوبتی خاک در رابطه، باعث بروز خطا در برآورد راندمان واقعی کاربرد آب در ربع پایین خواهد شد. به همین دلیل ماکزیمم آب ارائه شده به گیاه در حد کمبود رطوبتی خاک در نظر گرفته می شود. مقدار پایین AELQ اشاره به مشکل مدیریت و طرز کاربرد سیستم دارد. برای قطعی شدن علت، پارامتر دیگری تحت عنوان راندمان پتانسیل کاربرد آب در ربع پایین تعریف و مورد بررسی قرار می گیرد. این شاخص بیانگر آن است که سامانه موجود با فرض بهره برداری مناسب چگونه عمل می کند. راندمان پتانسیل در واقع حالت خاصی از راندمان آبیاری در زمانی است که حداقل عمق آب نفوذ یافته معادل عمق مطلوب آبیاری باشد. پایین بودن PELQ معمولاً به طراحی یا کارایی ضعیف سامانه و یا لحاظ مسائل اقتصادی مربوط می شود و چنانچه مدیریت بهره برداری در روش آبیاری مناسب باشد، راندمان واقعی کاربرد ربع پایین PELQ حداکثر راندمان قابل تصور برای یک سیستم خواهد بود. در صورتی که طراحی صحیح انجام شده باشد و PELQ همچنان پایین باشد، تغییر نوع سامانه اجتناب ناپذیر است. در مقایسه راندمان دو سامانه آبیاری لازم است پارامترهای متغیر حذف شوند.

$$PELQ = Dq / Dr \times 100 \quad (10)$$

PELQ: راندمان پتانسیل کاربرد آن در ربع پایین (درصد)

Dq: کمبود رطوبت خاک در منطقه ریشه ها (میلی متر)

Dr: متوسط عمق آبیاری (میلی متر)

PELQ: مقدار دقیق AELQ در کل زمین زراعی است، زمانی که کمترین ربع عمق نفوذ آب، کافی برای جبران SMD باشد. (زمانی که $SMD = MAD$ است).

PELQ: بهترین معیار مقایسه بین دو سامانه است و می توان با این پارامتر در یک منطقه، دو روش آبیاری را از نظر کارایی و عملکرد در مزرعه مقایسه کرد. در صورتی که نفوذپذیری خاک و خصوصیات ردیف و یا نوار در سرتاسر زمین یکنواخت باشد عمق نفوذ آب در انتهای ردیف یا نوار همان حداقل عمق مطلق می باشد و به جای میانگین پایین ترین ربع نفوذ از عمق نفوذ آب در انتهای ردیف یا نوار استفاده می شود. استفاده از AELA و PELA به ترتیب به جای AELQ و PELQ دلالت بر استفاده از حداقل عمق مطلق به جای پایین ترین ربع عمق نفوذ دارد.

معرفی مدل SIRMOD

در این تحقیق از نرم افزار SIRMOD به منظور ارزیابی رخدادهای آبیاری استفاده شد این نرم افزار در سال ۱۹۸۹ به وسیله والکر در دانشگاه ایالتی یوتا ارائه شد. نرم افزار فوق در تمامی روش-

Qin: دبی ورودی به جویچه

tco: زمان قطع آبیاری

$$DPR = 100 \left(\frac{Vz - Vz_d - Zreqd \times D}{QIN(Tco)} \right) \quad (2)$$

درصد نفوذ عمقی

Vz: حجم آب نفوذ شده در خاک از ابتدا تا انتهای جویچه

$$TWR = 100 - Ea - DRP \quad (3)$$

TWR: درصد تلفات ناشی از روان آب

در صورتی که آبیاری کامل انجام شده و یا بیش آبیاری صورت گرفته باشد، مقادیر راندمان آبیاری، درصد تلفات عمقی و روان آب به صورت زیر خواهد بود (Walker, 2003):

$$Ea = 100 \left(\frac{Zreqdl}{Qin(tco)} \right) \quad (4)$$

$$DRP = 100 \left(\frac{Vz - zreqdL}{Qin(tco)} \right) \quad (5)$$

$$TWR = 100 - Ea - DPR \quad (6)$$

به طور معمول یکی از ارکان اصلی ارزیابی سامانه های آبیاری، بررسی یکنواختی توزیع آب (DU) می باشد. این ضریب معیاری برای بیان میزان یکنواختی پخش و مشکلات توزیع آب است. به عبارت دیگر ضریب (DU) شاخص خوبی برای ارزیابی میزان مشکل یکنواختی (در صورت وجود) می باشد. لازم به ذکر است اگرچه مقدار توزیع یکنواختی آب (DU) نسبی است، ولی مقدار کمتر از ۶۷٪ عموماً قابل قبول خواهد بود.

$$DU = Dq / D \times 100 \quad (7)$$

DU: توزیع یکنواختی (درصد)

Dq: میانگین عمق نفوذ کرده در پایین ترین $\frac{1}{4}$ اراضی (میلی متر)

D: متوسط عمق آب نفوذ کرده (میلی متر)

راندمان واقعی کاربرد آب معرف راندمان آبیاری در مزرعه است و در حقیقت راندمان واقعی موجود در مزرعه خواهد بود. تعیین راندمان واقعی سامانه برای بهبود و اصلاح و اقدامات مدیریتی لازم است.

$$AELQ = Dq / Dr \times 100 \quad (8)$$

AELQ: راندمان کاربرد آب در ربع پایین مزرعه (درصد).

Dq: متوسط عمق آب ذخیره شده در ناحیه ریشه نمونه ها در ربع مقادیر اندازه گیری شده که کمترین آب را دریافت کرده اند (میلی متر).

Dr: متوسط عمق آبیاری (میلی متر)

چنانچه میانگین یک چهارم عمق آب ذخیره شده در ناحیه ریشه بیشتر از کمبود رطوبت خاک (SMD) باشد، در رابطه راندمان واقعی کاربرد آب به جای Dq از SMD استفاده می شود.

$$AELQ = SMD / Dr \times 100 \quad (9)$$

AELQ: راندمان اصلاح شده کاربرد آب در ربع پایین مزرعه

(درصد)

توصیه شده در آبیاری نواری را به عنوان معیار حداقل دبی ورودی در آبیاری کرتی توصیه کرده‌اند (مصطفی‌زاده و فرزام‌نیا، ۱۳۷۹).

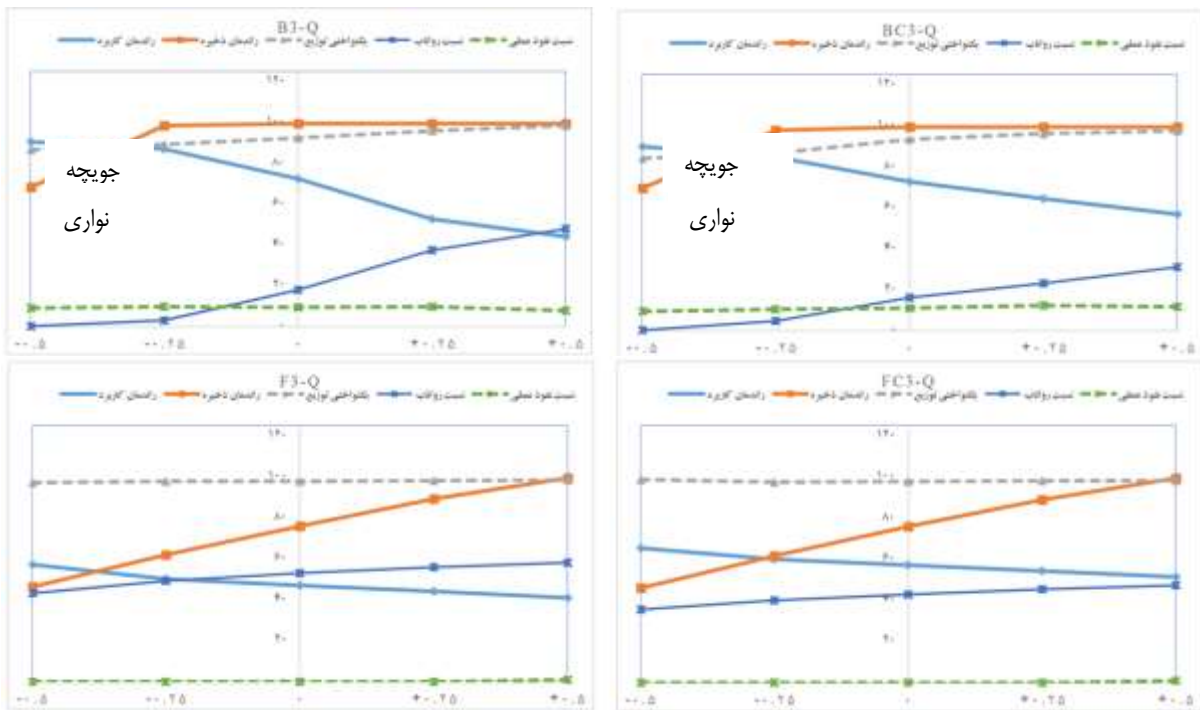
به منظور مطالعه اثر تغییرات دبی ورودی به جویچه و نوار بر شاخص‌های ارزیابی آبیاری نواری و جویچه‌ای سناریوهای مختلفی برای تغییرات دبی به میزان ± 25 و ± 50 درصد میزان دبی واقعی بررسی گردید نتایج نشان داد که در آبیاری اول جویچه‌ای مقادیر راندمان کاربرد به دلیل کم بودن عمق موثر ریشه و بالا بودن مقادیر نفوذ عمقی بسیار پایین و حتی به زیر ۵۰ نیز می‌رسد می‌باشد و در سناریو با کاهش ۵۰ درصدی دبی در هر دو روش پیوسته و کاهش مقادیر بالاتری را دارا بود. همچنین میزان راندمان ذخیره که در ابتدا در بعضی موارد بین ۴۰ تا ۵۰ درصد بوده در نهایت به ۱۰۰ نیز رسیده است در سومین رخداد آبیاری جویچه‌ای نیز با اعمال روش کاهش جریان شاهد افزایش چشمگیر مقادیر راندمان کاربرد و کاهش نفوذ عمقی و رواناب خروجی بودیم همچنین نتایج نشان داد که با افزایش میزان دبی ورودی به جویچه مقادیر راندمان ذخیره افزایش یافته ولی کاهش در راندمان کاربرد گردید. مقادیر راندمان کاربرد مشاهده شد نهایتاً می‌توان گفت که در سناریو با کاهش ۲۵ درصدی دبی ورودی به جویچه بهترین مقادیر در شاخص‌های ارزیابی مشاهده شد که میزان راندمان ذخیره به ۱۰۰ رسید و میزان راندمان کاربرد بین ۴۰- تا ۵۰ نیز می‌باشد که نتایج حاصل از تغییرات در شکل (۱) نمایش داده شده است.

به منظور مطالعه اثر تغییرات طول جویچه و نوار بر شاخص‌های اصلی ارزیابی آبیاری نواری و جویچه‌ای سناریوهای مختلفی برای تغییرات طول به میزان ± 25 و ± 50 درصد میزان طول جویچه و نوار در مزرعه بررسی گردید نتایج شکل (۲) نشان داد که بهترین مقادیر شاخص‌ها در جویچه در افزایش ۲۵ درصدی طول جویچه اتفاق می‌افتد به نحوی که علاوه بر افزایش راندمان کاربرد، میزان رواناب نیز به طرز چشمگیری کاهش یافته است علاوه بر این با این میزان افزایش طول میزان کفایت آبیاری نیز در مزرعه در سطح معقولی قرار گرفت. علاوه بر جویچه با بررسی و تحلیل اثر تغییرات طول نوار بر شاخص‌های ارزیابی نتایج و نمودارهای خروجی شکل (۳) نشان از برتری سناریو افزایش طول نوار به میزان ۵۰ درصد مقادیر واقعی مزرعه داشت.

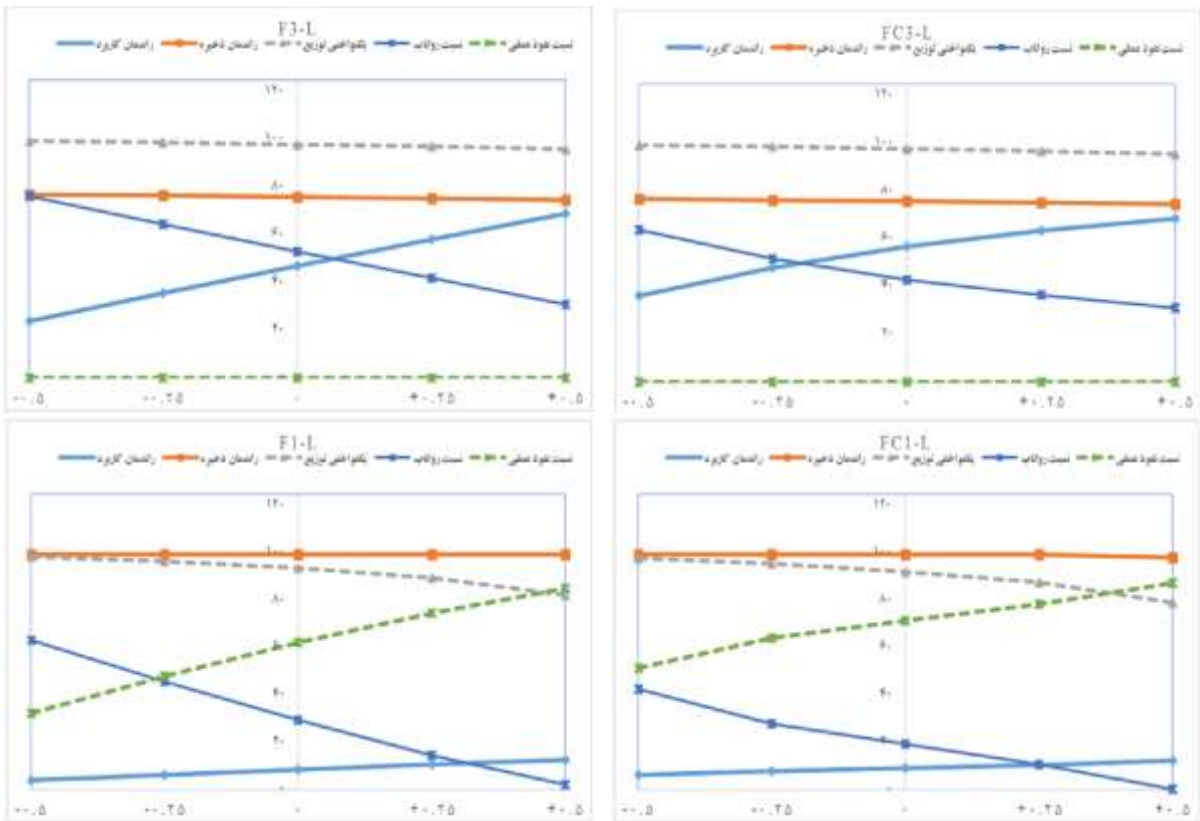
های آبیاری سطحی اعم از جویچه‌ای نواری و کرتی قابل استفاده بود و دارای قابلیت سهولت مدیریت در جریان‌های موجی و کاهش جریان نیز می‌باشد (Walker, 2003). در این نرم‌افزار برای توصیف خصوصیات نفوذ از معادله کوستیاکف لوییس استفاده شده است. ورودی‌های اصلی نرم‌افزار SIRMOD شامل شدت جریان ورودی، مشخصات هندسی سطح مقطع شیار، طول و شیب شیار، پارامترهای نفوذپذیری و ضریب زبری مانینگ می‌باشند. خروجی‌های نرم‌افزار نیز شامل زمان پیشروی و پسروی، رواناب از انتهای شیار و عمق آب نفوذ یافته به شمار می‌روند اجزای تشکیل‌دهنده مدل SIRMOD شامل یک موتور شبیه سازی که برای پیش‌بینی جریان سطحی و زیر سطحی یک سیستم از نظر هندسی نفوذپذیری و نیز شرایط مرزی مورد استفاده قرار می‌گیرد و ابزاری برای ارزیابی عملکرد سیستم آبیاری سطحی و نفوذپذیری و شرایط زبری برای پارامترهای اندازه-گیری شده میدانی و ابزاری برای طراحی سیستم‌های آبیاری و بهینه-سازی سیستم آبیاری موجود است.

نتایج و بحث

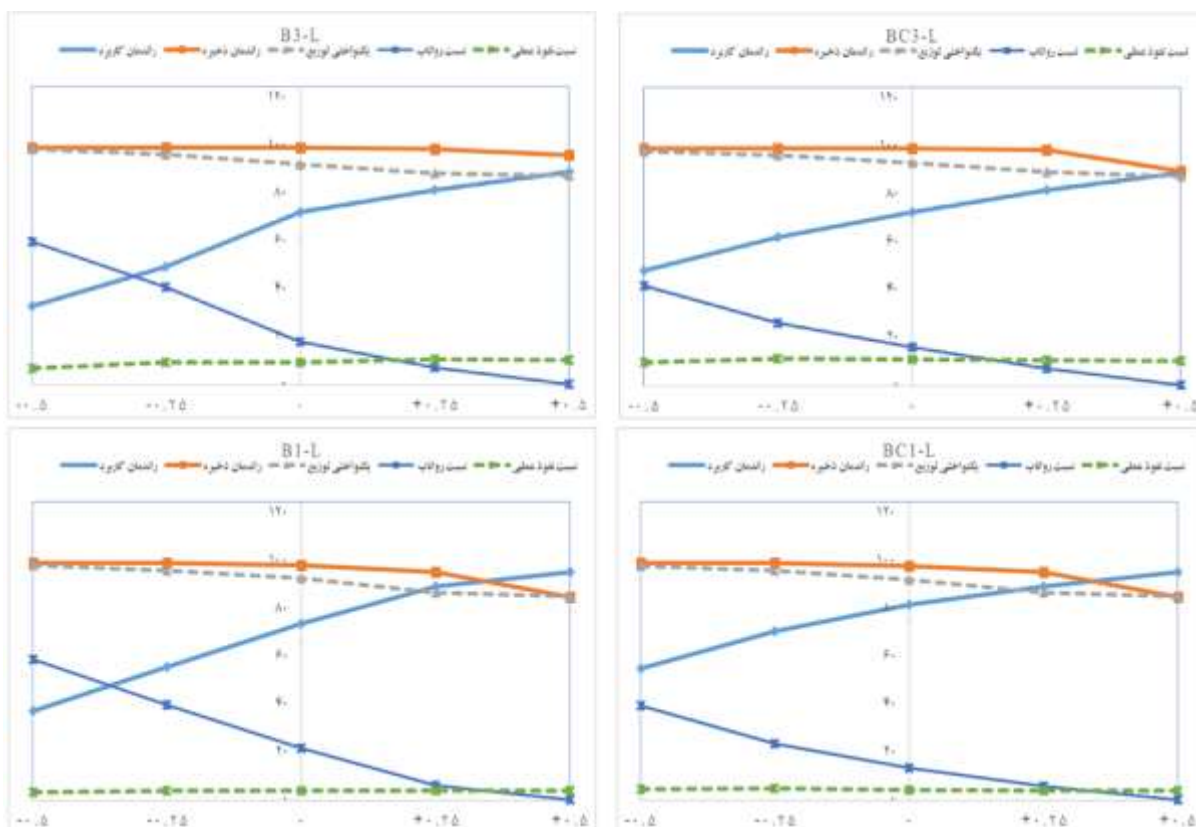
در مزرعه ارزیابی شرایط موجود و نهایتاً سناریوسازی و تعیین مقادیر بهینه دبی ورودی، طول بهینه جویچه یا نوار و زمان مناسب قطع جریان می‌باشد که در این زمینه با ایجاد تغییرات افزایشی و کاهش به میزان ۲۵ و ۵۰ درصد از مقادیر مشاهداتی روند تغییرات در راندمان کاربرد، کفایت آبیاری، یکنواختی، میزان نفوذ عمقی و رواناب بررسی و سناریوی بهینه انتخاب گردید. افزایش دبی موجب افزایش احتمال فرسایش خاک و رواناب خروجی (در صورت باز بودن انتهای مزرعه) می‌گردد. خاک‌هایی که دارای سیلت بیشتری باشند، استعداد بیشتری برای فرسایش دارند (Strelkoff et al., 1999). از طرفی، دبی ورودی نمی‌تواند از یک مقدار مشخص هم کمتر باشد. زیرا مرحله پیشروی بسیار طولانی شده و اختلاف فرصت نفوذ در ابتدا و انتهای مزرعه زیاد می‌شود. کاهش بیش از اندازه دبی جریان عدم یکنواختی توزیع آب را نیز به دنبال دارد. روش دیگر برای تخمین حداقل دبی جریان در نوار، کنترل زمان پیشروی است. به این ترتیب که حداکثر زمان پیشروی ۲۴ تا ۳۶ ساعت در نظر گرفته می‌شود و حداقل دبی موردنظر در نوار باید بتواند در این مدت، مرحله پیشروی را تکمیل کند. از این رو، در این روش ابتدا یک دبی اولیه برای نوار فرض می‌شود با محاسبه زمان پیشروی، در صورتی که زمان پیشروی کمتر از ۲۴ تا ۳۶ ساعت باشد، دبی فرضی به عنوان حداقل دبی مجاز در نظر گرفته می‌شود در صورتی که زمان پیشروی بیشتر باشد، باید دبی فرضی را افزایش و مرحله قبل را تکرار کرد. این روند تا زمانی که مرحله پیشروی در دامنه ۲۴ تا ۳۶ ساعت باشد، ادامه می‌یابد (Hart et al., 1980). از سویی دیگر در برخی منابع، حداقل دبی



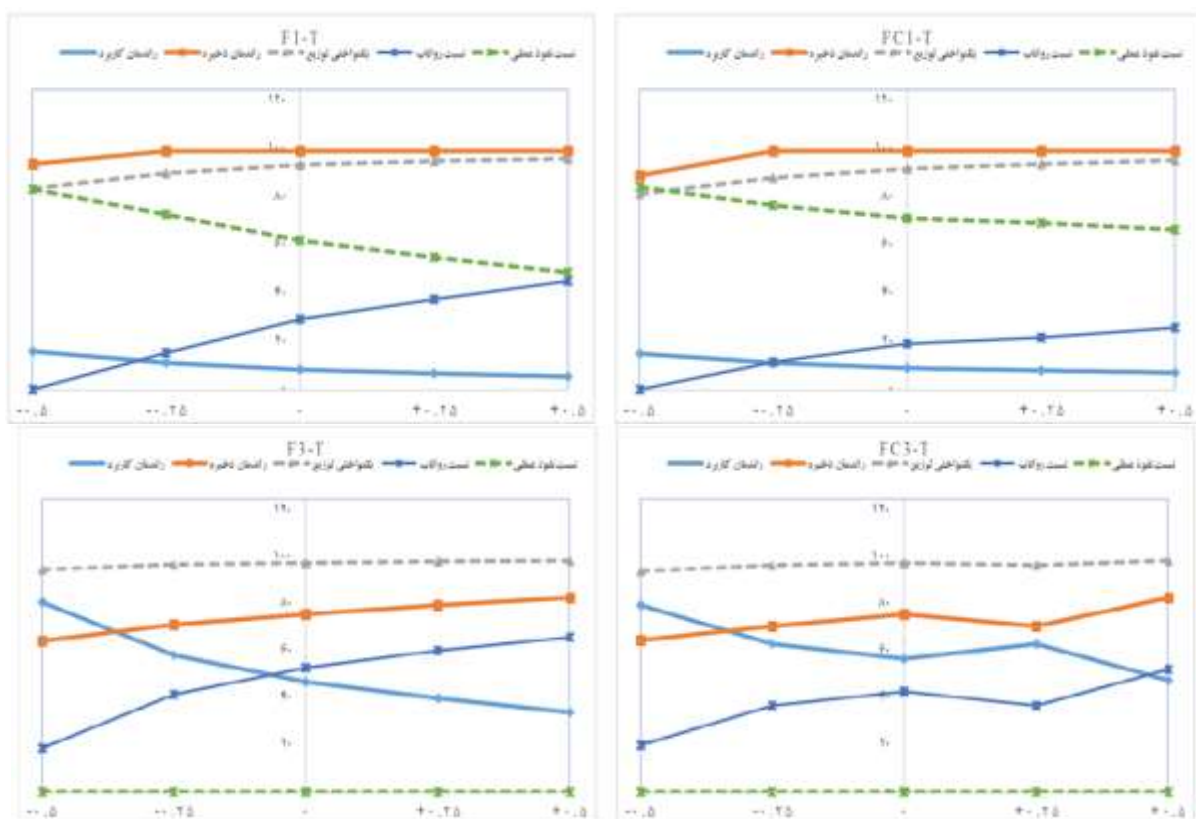
شکل ۱- اثر تغییرات دبی بر شاخص‌های ارزیابی در نوار و جویچه با روش‌های کاهش جریان و پیوسته



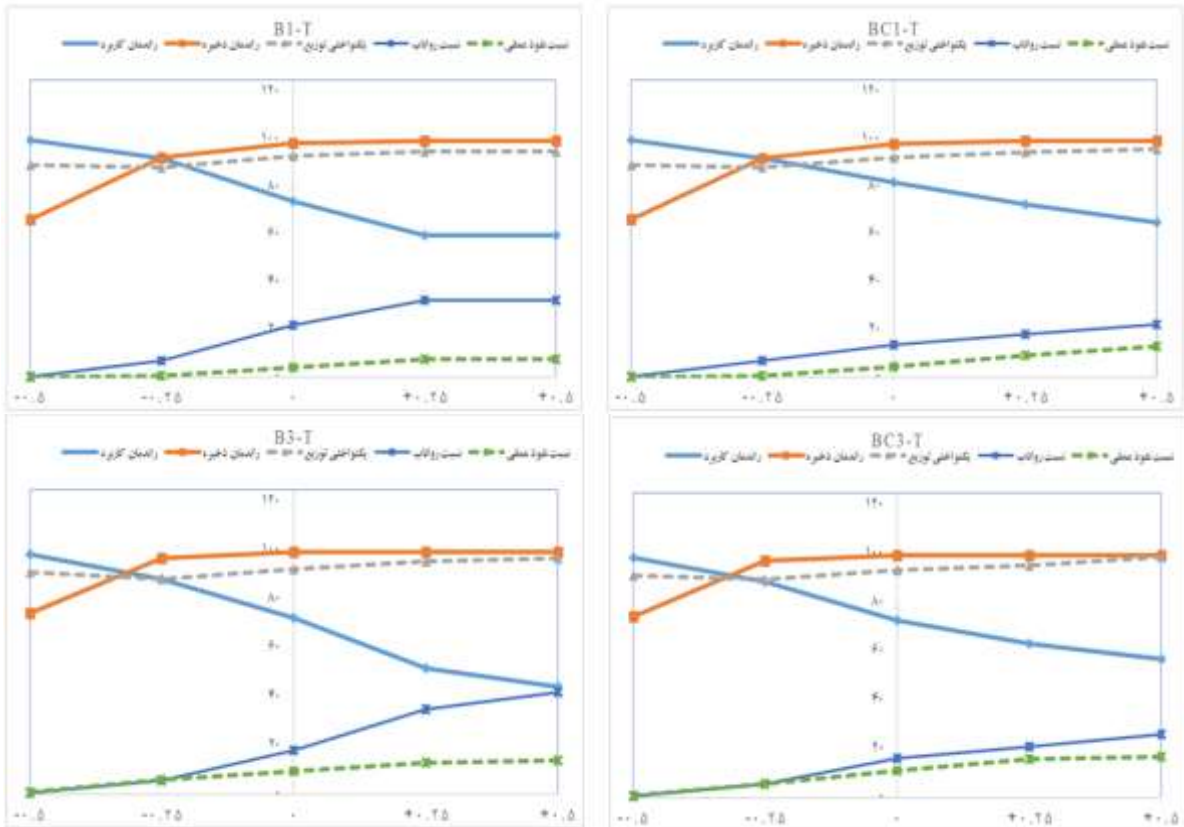
شکل ۲- اثر تغییرات طول جویچه بر شاخص‌های ارزیابی در روش‌های کاهش جریان و پیوسته



شکل ۳- اثر تغییرات طول نوار بر شاخص‌های ارزیابی در روش‌های کاهش جریان و پیوسته



شکل ۴- اثر تغییرات زمان قطع جریان جویچه بر شاخص‌های ارزیابی در روش‌های کاهش جریان و پیوسته



شکل ۵- اثر تغییرات زمان قطع جریان نوار بر شاخص های ارزیابی در روش های کاهش جریان و پیوسته

شاخص‌ها افت می‌کند و این نشان از اثر معکوس سناریوهای بهینه بر یکدیگر دارد، لذا پیشنهاد می‌گردد که زارع با توجه به وضعیت حقابه از لحاظ میزان و زمان در دسترس بودن حقابه، طول قطعات زراعی نسبت به انتخاب بهترین گزینه موجود اقدام و با به‌کارگیری روش بهینه گام اساسی در بهبود راندمان آبیاری اراضی خود اقدام نماید همچنین نتایج نشان از تاثیرات طول، دبی ورودی به قطعات و زمان قطع جریان بر میزان رواناب خروجی داشت که این در حال حاضر به عنوان یکی از مهمترین مشکلات در اراضی با آبیاری سطحی مطرح است که نتایج این تحقیق نشان داد که با به‌کارگیری سناریوهای موجود می‌توان بسیاری از شاخص‌های آبیاری را به میزان قابل توجهی افزایش و حتی به مقادیر بالاتر از راندمان سامانه‌های آبیاری تحت فشار در حال بهره‌برداری ارتقا داد.

منابع

زرعکانی، ک. ه. رضانی اعتدالی. و پ. دانشکار آراسته، ۱۳۹۸. برآورد ضرایب نفوذ و ضریب زبری مانینگ در دو رژیم جریان پیوسته و کاهشی نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۹ (۲): ۱۰۱-۸۹.
امینی زاده س. لیاقت ع. محمودیان شوشتری م. کوچک زاده ص.

به‌منظور مطالعه اثر تغییرات زمان قطع جریان جویچه و نوار بر شاخص‌های اصلی ارزیابی آبیاری نوار و جویچه‌ای سناریوهای مختلفی برای بررسی میزان تغییرات زمان قطع جریان به میزان ± 25 و ± 50 درصد در مزرعه بررسی گردید نتایج نشان داد که بهترین مقادیر شاخص‌ها در جویچه و نوار در کاهش ۲۵ الی ۵۰ درصدی میزان دبی ورودی به جویچه اتفاق می‌افتد به نحوی که علاوه بر افزایش راندمان کاربرد، میزان رواناب نیز به طرز چشمگیری کاهش یافته است همچنین نتایج در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داد که رخداد آبیاری تاثیر چشمگیری بر نتایج خروجی نداشت.

نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق نشان از اثر بهینه افزایش طول به میزان ۲۵ تا ۵۰ درصد طول واقعی مزرعه در صورت ثابت بودن سایر عوامل دارد، چنین تاثیری در مورد دبی جریان ورودی به مزرعه و زمان قطع جریان نیز کاملاً صدق می‌کند. با بررسی سناریوهای ترکیبی نتایج نشان از تاثیر منفی به‌کارگیری سناریوهای مختلف بهینه در کنار یکدیگر داشت به عنوان مثال با افزایش طول مزرعه و کاهش زمان آبیاری به طور چشمگیری میزان یکنواختی و ضریب ذخیره در میان

- Brown, Jr., G. E. 2001. How minerals react with water. Science. 294: 67-70.
- Elliott, R.L. and Walker, W.R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration advance functions. Trans. ASAE. 25: 396-400.
- Clark, B. Hall, L. Davids, G. Walker, W. and Eckhardt, J. 2009. Application of Sirmod to evaluate potential tailwater reduction from improved irrigation management. World Environmental and Water Resources Congress, ASCE.
- Ebrahimian, H. and Liaghat, A. 2011. Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. Soil and Water Research. 2:91-101.
- Hart, W.E., Collins, H.G., Woodward, G. and Humpherys, A. S. 1980. Design and operation of gravity or surface irrigation systems, Chap. 13 in M. E. Jensen (ed.), Design and Opreation of Farm Irrigation Systems. ASAE Monograph No. 3, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI.
- McClymont, D.J. and Smith, R.J. 1996. Infiltration parameters from optimization on furrow irrigation advance data. Irrigation Science. 17(1): 15-22.
- Mailapalli, D.R. W.W. Wallender, N.S. Raghuwanshi, and Singh, R. 2008. Quick method for estimating furrow infiltration. J. Irrigation. Drain. Eng. 134(6): 788-795.
- J Mohan Reddy. K. Jumaboev, B. Matyakubov, Eshmuratov, D. 2013."Evaluation of furrow imigation practices in Fergana Valley of Uzbekistan" Agricultural Water Management. 117 (31): 133-144.
- Strelkoff, T.S., A.J. Clemmens, M. EI-Ansary, and Awad, M. 1999. Surface-irrigation evaluation models: Application to level basins in Egypt. Trans. ASAE. 42(4):1027-1036
- Trout, T.J., 1992. Furrow flow velocity effects on hydraulic roughness. Irrigation and Drainage Engineering. 118(6): 981-987.
- Walker, W.R., 2003. SIRM0D- Surface Irrigation simulation, evaluation and design. Guide and technical documentation. Dept. of Biological and Irrigation Engineering. Utah State University. Logan. Utah
۱۳۸۵. ارایه یک حل صریح معادلات مدل اینرسی صفر با تاثیر محیط خیس شده جهت شبیه سازی آبیاری جویچه ای، نشریه پژوهش کشاورزی. ۶ (۳): ۱-۱۶.
- تقی زاده ز. وردی نژاد و. ابراهیمیان ح. و خانمحمدی ن. ۱۳۹۱. ارزیابی مزرعه‌ای و تحلیل سیستم آبیاری سطحی با (WinSRFR مطالعه موردی آبیاری جویچه ای)، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۶ (۶): ۱۴۵۹-۱۴۵۰.
- عباسی، ف.، ف. سهراب. و ن. عباسی. ۱۳۹۵. ارزیابی وضعیت راندمان آب آبیاری در ایران. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۷ (۶۷): ۱۲۸-۱۱۳.
- عباسی، ف. ۱۳۹۱. اصول جریان در آبیاری سطحی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۲۳۲ صفحه.
- مجدزاده، ب.، ت. سهرابی. و ف. عباسی. ۱۳۹۰. بهبود عملکرد آبیاری جویچه ای با تغییر سطح مقطع در طول جویچه. مجله پژوهش آب ایران. ۵ (۱): ۲۲-۱۳.
- مرادزاده م. برومندنسب س. لاله‌زاری ر. و بهرامی م. ۱۳۹۲. بررسی کارایی و تحلیل حساسیت شبیه‌های مختلف نرم افزار SIRM0D در طراحی آبیاری جویچه ای، نشریه مهندسی منابع آب. ۶ (۱۸): ۷۴-۶۳.
- قبادی‌نیا م. سهرابی ت. میراب زاده م. ۱۳۸۶. اثر افزایش پله‌ای دبی جریان بر پیشروی آب در جویچه با آبیاری موجی، نشریه پژوهش کشاورزی. ۷ (۲): ۷۹-۸۹.
- مصطفی‌زاده ب. و فرزاد نیا م. ۱۳۷۹. بررسی عملکرد هیدرولیکی آبیاری جویچه‌ای در روش‌های مختلف مدیریت دبی جریان، علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۴ (۳): ۱۰-۱.
- گلستانی س. ۱۳۸۹. شایان نژاد م. طباطبایی س، بررسی کاربرد روش‌های اصلاح شده در مدل ترکیبی بیلان حجمی - اینرسی صفر برای آبیاری جویچه ای: مجله پژوهش آب. ۴ (۶): ۱۸-۱۱.
- ناصری، ا.، ف. عباسی. و م. اکبری. ۱۳۹۶. برآورد آب مصرفی در بخش کشاورزی به روش بیلان آب. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۸ (۶): ۳۲-۱۷.

Determining the Appropriate Values of Irrigation System Design Parameters Tape and Strip System with Two Continuous Flow Regimes and Decrease Flow

H. Ramezani Etedali¹, K. zarakani², M. Fakhar^{3*}

Received: Nov.08, 2020

Accepted: Dec.18, 2020

Abstract

Today, due to high water consumption in the agricultural sector and the water crisis in the country, efforts have been made to improve irrigation methods. Given that agricultural irrigation is still superficial, it is necessary to find a solution to improve these methods at a much lower cost than pressurized irrigation. The purpose of this study is to use SIRMOD software to determine the optimal values of design parameters such as length, flow and cut-off time in two continuous flow regimes and flow reduction in strip and stream irrigation systems. Using the SIRMOD model, 25 and 50% of the actual values of field length, inlet flow and cut-off time were generated. The results showed that with a reduction of 25 to 50% in the length and flow rate to the farm, evaluation indicators such as application efficiency, storage efficiency, distribution uniformity, increase significantly And runoff ratio and deep penetration ratio were significantly reduced. The results of the effect of changes in tape length on evaluation indicators show that the amount of storage efficiency in the range (-0.5 to +0.25) is almost a constant value equal to 100, but in the range (+0.25 to +0.5) The efficiency has changed even in some places to 80, and the application efficiency in most furrows is a value between (90 to 40). The results showed that the flow reduction method, while being effective in increasing the evaluation indicators due to the interruption of water flow by the farmer after the end of the progress phase, especially in strip irrigation, did not have a significant effect on increasing the indicators.

Keywords: Application efficiency, Farm length, Input flow

1- Associate professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- M.Sc. Graduate, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3- M.Sc. Student, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

(*- Corresponding Author Email: www.fakhar.mohadese95@gmail.com)

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی چندهدفه الگوی کشت مبتنی بر ردپای آب در استان‌های شرق کشور

علی عارفی‌نیا^۱، خالد احمدالی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰

چکیده

افزایش بهره‌وری منابع به کمک بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی، یک راهکار مناسب برای توسعه بخش کشاورزی است. در این تحقیق الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه (NSGAI) برای بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی عمده شهرستان‌های استان‌های شرقی کشور شامل خراسان‌های شمالی، رضوی و جنوبی و استان سیستان و بلوچستان با اهداف حداکثر کردن ارزش اقتصادی ردپای آب و حداقل کردن ردپای آب آبی با استفاده از شاخص کمیسیون توسعه پایدار سازمان ملل (UN) در قالب چهار سناریو به کار گرفته شده است. نتایج نشان داد در برخی سناریوها امکان تحقق کامل اهداف در الگوی چندهدفه وجود ندارد، همچنین نتایج نشان داد در صورت اجرای الگوی کشت بهینه چنانچه منطقه مورد مطالعه از منظر قید امنیت آبی به ترتیب در شرایط بحران متعادل، متوسط و شدید قرار داشته باشد، میزان تولید به ترتیب ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد میزان فعلی و به‌طور میانگین باعث صرفه‌جویی به ترتیب ۵۵، ۴۰ و ۳۰ درصدی منابع آبی منطقه می‌شود. اجرای این الگو در مناطق مورد مطالعه افزایش میزان درآمد، کاهش مصرف آب و به تبع آن پایداری بیشتر محیط‌زیست را نیز در بردارد.

واژه‌های کلیدی: آب آبی، آب سبز، امنیت آبی، الگوی کشت بهینه، بهینه‌سازی چندهدفه، NSGA II

مقدمه

مدیریت نامناسب منابع آب در برخی مناطق، وضعیت را به سمت کم‌آبی سوق می‌دهد طوری که تا سال ۲۰۲۵ تقریباً دوسوم مردم جهان در شرایط تنش آبی قرار می‌گیرند (FAO, 2018). کمبود آب و تنش آبی در منطقه خاورمیانه تا سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت (FAO, 2017). لذا در کشورهای موجود در این منطقه باید راهکارهای مناسب بکار گرفته شود تا بتوان ضمن برقراری امنیت غذایی، از به خطر افتادن امنیت منابع آبی نیز جلوگیری نمود و با بهره‌برداری مناسب از منابع آب، اهداف چندجانبه کاربران و دولت‌مردان تأمین شود و درعین حال پایداری محیط‌زیست تضمین شود (FAO, 2015). بخش کشاورزی، به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده از میان مصارف جهانی آب (Pongkijvorasin, 2007) نقش مهمی در تعادل

مقدار آب بین مصرف‌کننده‌های مختلف دارد (Gollehon and Quinby, 2004) از طرفی یکی از نخستین بخش‌هایی که خسارت ناشی از مدیریت نادرست منابع آب را نمایان می‌سازد، بخش کشاورزی است. می‌توان گفت که عدم مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح در این بخش، نقش مستقیم و پررنگی در مسائل اجتماعی و اقتصادی داشته و خسارت‌های جبران‌ناپذیر را به بار می‌آورد که برای حل این معضل می‌توان از انواع روش‌های حل بهینه‌سازی نظیر برنامه‌ریزی غیرخطی در غالب ساختارهای مختلف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی بهره جست (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۱). از طرفی استفاده از شاخص‌های مختلف به‌عنوان یک ابزار سیاسی، از دهه ۱۹۲۰ میلادی آغاز شده است و تا به امروز بیش از ۵۰ شاخص در زمینه‌ی توسعه پایدار ارائه و مورد استفاده قرار گرفته است. با افزایش سطح کمی و کیفی اطلاعات و ارتباطات جهانی، روش‌ها و شاخص‌های جامع‌تر و دقیق‌تری ارائه می‌گردد که ارزیابی وضعیت منابع آب در جهان نیز از این قاعده مستثنای نیست (Sullivan, 2002). شاخص ردپای آب به میزان مستقیم یا غیرمستقیم مصرف آب در تولید محصول یا خدمات اشاره دارد (Hoekstra, 2008). برآورد ردپای آب محصولات مختلف کشاورزی به‌عنوان شاخصی از حجم آب موردنیاز، می‌تواند در اخذ تصمیم در راستای جبران کمبود منابع آبی، تعیین سهم آب

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد منابع آب، گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(Email: khahmadauli@ut.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

میلی‌متر در عرض‌های شمالی تا کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در عرض‌های جنوبی و حاشیه دریا متغیر است. بر اساس آمارنامه‌های وزارت جهاد کشاورزی، میانگین بلندمدت (از سال ۱۳۶۱ تا سال ۱۳۹۷) کل سطح زیر کشت محصولات آبی استان‌های مورد مطالعه حدود ۹۶۹ هزار هکتار است و عمده‌ترین محصولات آبی چهار محصول گندم، جو، یونجه و ذرت با سطح زیر کشت ۶۴۶ هزار هکتار است که این مقدار بیش از ۶۶ درصد کل سطح زیر کشت محصولات آبی منطقه را شامل می‌شود. از طرفی کاهش چشمگیر بارش‌ها، افزایش مصرف آب، خشک‌سالی‌های پیاپی، حفر چاه‌های غیرمجاز و پدیده تغییر اقلیم موجب ایجاد شرایط بحران آبی در دشت‌ها این منطقه از کشور شده است، لذا لزوم یک مدیریت صحیح و آینده‌نگر در الگوی کشت غالب این منطقه ضروری است. میانگین بلندمدت (۱۰ ساله) سطح-تولید-عملکرد محصولات زراعی غالب استان‌های شرقی کشور و همچنین برای کل کشور در جدول (۱) آورده شده است.

داده‌های ورودی این تحقیق در منطقه مورد مطالعه شامل داده‌های هواشناسی (میانگین بلندمدت) و زراعی مورد نیاز در مدل ریاضی مسئله بهینه‌سازی الگوی کشت به ترتیب از سایت هواشناسی کل کشور

مواد و روش‌ها

روش ارائه‌شده در این مقاله شامل سه بخش است: برآورد ردپای آب و ارزش اقتصادی آن، بهینه‌سازی الگوی کشت و سناریوهای امنیت آبی. روندنمای روش‌های به‌کاررفته در این مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

برآورد ردپای آب و ارزش اقتصادی آن

میزان WF تولید هر محصول به مصرف آب (از جمله آب آبی و سبز) در طول دوره رشد و عملکرد محصول بستگی دارد (Hoekstra et al., 2017). ردپای آب سبز و آبی تولید محصولات در این تحقیق در چارچوب روش هوکسترا و همکاران و رضانی و همکاران مطابق روابط ۱ و ۲ محاسبه شده است (Hoekstra et al., 2011; Ramezani et al., 2019).

$$WF_{Green} = \frac{CWU_{Green}}{Y} = 10 \times \frac{ET_{Green}}{Y} \quad (1)$$

$$WF_{Blue} = \frac{CWU_{Blue}}{Y} = 10 \times \frac{ET_{Blue}}{Y} \quad (2)$$

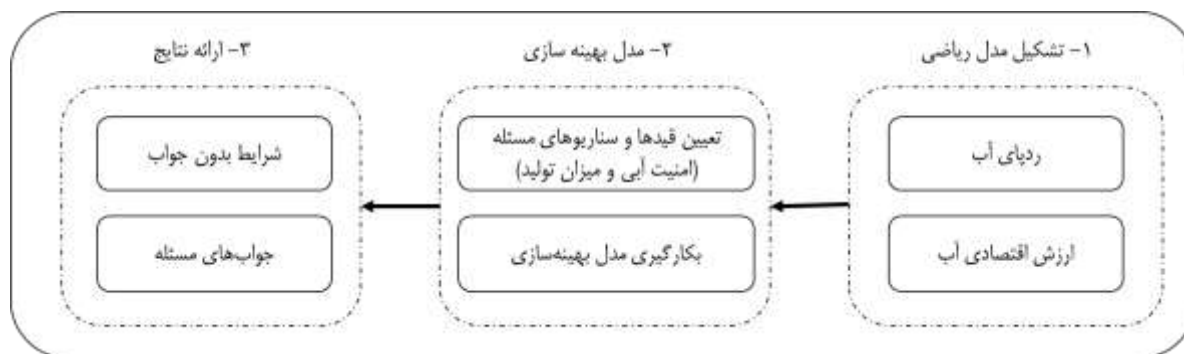
آبی و آب سبز در تولید محصولات کشاورزی، تغییر در الگوی کشت، تغییر حجم صادرات و واردات محصولات با توجه به موضوع خودکفایی کشور مؤثر واقع گردد (عربی و نیکنیا، ۱۳۸۹). ردپای آب^۱ (WF) به‌عنوان یک ابزار استراتژیک برای ارزیابی مصرف آب به سه بخش آب آبی، آب سبز و آب خاکستری تقسیم می‌شود (Van Oel et al., 2009). ردپای آب سبز به حجم آب حاصل از بارش و ردپای آب آبی به حجم آب آبیاری (شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی) اشاره دارد. ردپای آب خاکستری حجمی از آب شیرین است که برای رقیق‌سازی کودهای شیمیایی که در تولید محصول استفاده می‌شوند به‌کاربرده می‌شود (Ababaei and Ramezani, 2017). تاکنون مطالعات زیادی در سراسر جهان در رابطه با شاخص ردپای آب در بررسی وضعیت منابع صورت گرفته است (Forin et al., 2020; Mekonnen and Hoekstra, 2020; Kondash et al., 2018; Ewaid et al., 2019). با توجه به اینکه مفهوم ردپای آب در حال حاضر به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های سنجش بهره‌وری آب در مباحث مختلف مورد توجه پژوهشگران در صنعت آب قرار گرفته است، استفاده از این مفهوم با توجه به شرایط خاص سیاسی و اقلیمی کشور، به‌منظور انتخاب بهترین ترکیب کشت، ضمن خودکفایی نسبی در تولید محصولات کشاورزی، می‌تواند ابزاری بسیار سودمند در ذخیره آب کشور و رسیدن به امنیت آبی باشد. در مطالعه حاضر با توجه به مفهوم ردپای آب و همچنین با استفاده از شاخص امنیت آبی سازمان ملل (UN) به‌عنوان یکی از پرکاربردترین شاخص‌های امنیت آبی (Lawrence et al., 2002) به ارائه یک الگوی مدیریتی جهت کشت محصولات عمده زراعی شهرستان‌های استان‌های شرقی ایران با دو تابع هدف حداقل‌سازی مصرف آب آبی و حداکثر سازی ارزش اقتصادی ردپای آب پرداخته شده است.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در این تحقیق، چهار استان شرقی ایران (خراسان شمالی، خراسان رضوی، خراسان جنوبی و سیستان-بلوچستان)، شامل ۵۶ شهرستان است. مساحت این منطقه حدوداً ۴۲۴۴۵۵ کیلومتر مربع است که در طول‌های ۵۵ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و عرض‌های ۲۵ درجه و ۶ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۳ دقیقه شمالی واقع شده است. میانگین دمای سالانه از شمال به جنوب منطقه مطالعاتی افزایش می‌یابد. متوسط درجه حرارت سالانه از ۱۲ درجه سانتی‌گراد در نواحی کوهستانی استان خراسان شمالی تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد در نواحی ساحلی استان سیستان و بلوچستان متغیر است. میانگین بلندمدت بارش سالانه از بیش از ۴۰۰

جدول ۱- میانگین بلندمدت (۱۰ ساله) سطح-تولید-عملکرد محصولات زراعی عمده چهار استان شرقی کشور

استان	محصول	سطح (هکتار)	تولید (تن)	عملکرد (کیلوگرم در هکتار)
خراسان جنوبی	گندم	۲۹۸۳۶	۴۶۷۲۰	۱۵۶۶
	جو	۱۷۰۶۳	۳۰۸۵۴	۱۸۰۸
	یونجه	۳۴۰۹	۱۶۵۶۹	۴۸۶۰
	ذرت	۷۳۷	۲۰۲۶۰	۲۷۴۸۵
خراسان رضوی	گندم	۲۴۴۵۷۵	۴۲۸۶۲۷	۱۷۵۲
	جو	۱۲۳۰۱۹	۲۳۳۰۷۰	۱۸۹۵
	یونجه	۳۱۵۵۹	۲۴۹۸۶۷	۷۹۱۷
	ذرت	۱۸۰۱۷	۷۷۹۵۱۰	۴۳۲۶۵
خراسان شمالی	گندم	۴۵۹۲۷	۷۶۵۵۸	۱۶۶۷
	جو	۱۶۰۷۹	۳۱۹۹۸	۱۹۹۰
	یونجه	۱۰۵۰	۳۵۸۵	۳۴۱۳
	ذرت	۱۸۹۱	۸۱۲۰۶	۴۲۹۴۳
سیستان و بلوچستان	گندم	۷۹۸۳۶	۱۲۰۸۶۷	۱۵۱۴
	جو	۱۰۹۷۲	۱۹۲۶۱	۱۷۵۵
	یونجه	۱۷۰۹۳	۳۷۰۹۹۷	۲۱۷۰۵
	ذرت	۵۱۸۱	۴۴۰۷۳۱	۸۵۰۶۵
کل کشور	گندم	۲۴۶۷۰۰	۵۹۸۱۷۹۸۴	۲۴۲۷
	جو	۶۵۳۰۰۱	۱۶۷۴۹۹۲	۲۵۶۵
	یونجه	۵۳۱۳۰۲	۴۷۲۸۵۹۸	۸۹۰۰
	ذرت	۱۴۴۵۳۴	۷۴۰۸۹۹۰	۵۱۲۶۱



شکل ۱- روند نمای روش‌های به کاررفته در تحقیق

است. برای به دست آوردن ارزش ردپای آب از مفهوم ردپای اقتصادی آب مطابق روابط ۳ و ۴ استفاده شده است (Ababaei and Ramezani, 2014).

$$WF_{E(Green)} = \frac{WF_{Green}}{NB} \quad (3)$$

که در آن، WF_{Green} ردپای آب سبز (مترمکعب بر کیلوگرم)، WF_{Blue} ردپای آب آبی (مترمکعب بر کیلوگرم)، CWU_{Green} و CWU_{Blue} مصرف آب سبز و آبی هستند (مترمکعب بر هکتار)، ET_{Green} و ET_{Blue} تبخیر-تعرق آب سبز و آب آبی (میلی‌متر)، Y عملکرد محصول است (کیلوگرم بر هکتار) و ضریب ۱۰ برای تبدیل عمق آب (میلی‌متر) به حجم آب در واحد سطح (مترمکعب بر هکتار)

ساله) داده‌های میانگین حداکثر دمای ماهانه، میانگین حداقل دمای ماهانه، میانگین رطوبت نسبی ماهانه، میانگین ماهانه سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین، مجموع ساعات آفتابی ماهانه و مجموع بارش ماهانه است.

در قسمت دوم به منظور محاسبه عملکرد محصولات مورد مطالعه (مخرج کسر ردپای آب)، داده‌های مربوط به سطح زیر کشت و تولید محصولات از بانک اطلاعاتی وزارت جهاد کشاورزی با مراجعه حضوری دریافت گردید. سپس با استفاده از آزمون‌های آماری (توزیع نرمال) در سطح اطمینان ۹۵ درصد داده‌های پرت (شامل سال‌هایی که با دخالت بیش از حد عوامل انسانی عملکرد نرمال منطقه بشدت تحت تأثیر قرار گرفته است) حذف گردید. در ادامه نیز میانگین بلندمدت (۲۰ ساله) عملکرد هر محصول، در شهرستان‌های مربوط به دشت‌هایی که ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه به‌عنوان ایستگاه معرف آن‌ها بودند، به‌عنوان عملکرد شاخص آن ایستگاه در محاسبات مربوط به ردپای آب در نظر گرفته شده است.

بهبودسازی الگوی کشت

در این تحقیق با تابع هدف حداکثر نمودن ارزش اقتصادی ردپای آب کل محصولات و حداقل نمودن میزان مصرف آب آبی، اقدام به آمایش سطح زیر کشت گیاهان زراعی عمده در شرق کشور در مقیاس شهرستان شده است. به منظور پیاده کردن مدل آمایش الگوی کشت، از مدل‌های بهبودسازی تکاملی استفاده شده است. مدل‌های بهبودسازی از جمله سیستم‌هایی هستند که به لحاظ بهبودی هم‌زمان چند پارامتر با اثرات متقابل آن‌ها ابزار مناسبی برای مدیریت فراهم می‌آورند. بهبودسازی در واقع تعیین مناسب‌ترین مقدار متغیرهای تصمیم و تأثیرگذار بر مسئله است که منجر به بهبود نمودن هدف مورد نظر می‌شود. متغیر تصمیم در این تحقیق، سطح زیر کشت محصولات در هر شهرستان است. توابع هدف و قیودهای مورد نظر در این تحقیق در روابط ۹ و ۱۴ آورده شده است.

$$f_1 = \max \left(\sum_{i=1}^{56} \sum_{j=1}^9 (WF_{E(Green)(ij)} + WF_{E(Blue)(ij)}) \times Y_{ij} \times A_{ij} \right) \quad (9)$$

$$f_2 = \min \sum_{i=1}^{56} \sum_{j=1}^9 (WF_{Blue(ij)} \times Y_{ij} \times A_{ij}) \quad (10)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{56} \sum_{j=1}^9 WF_{Blue(ij)} \times Y_{ij} \times A_{ij} \leq WS_i \quad (11)$$

$$WF_{E(Blue)} = \frac{WF_{Blue}}{NB} \quad (4)$$

که در آن $WF_{E(Green)}$ ردپای اقتصادی آب سبز برحسب مترمکعب بر میلیون ریال، $WF_{E(Blue)}$ ردپای اقتصادی آب آبی برحسب مترمکعب بر میلیون ریال و NB سود خالص برحسب میلیون ریال بر کیلوگرم است.

به منظور محاسبه تبخیر-تعرق آب سبز و آب آبی از روش هوکسترا و همکاران با استفاده از روابط ۵ و ۶ استفاده شد (Hoekstra et al., 2011):

$$ET_{Green} = \min(ET_c, P_e) \quad (5)$$

$$ET_{Blue} = \max(0, ET_c - P_e) \quad (6)$$

که در آن، ET_c مقدار تبخیر-تعرق گیاه در طول فصل رشد (میلی‌متر) و P_e بارش مؤثر در طول دوره رشد محصول (میلی‌متر) است.

مقدار ET_c با استفاده از رابطه ۷ محاسبه گردید (Allan et al., 1998):

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (7)$$

که در آن، K_c ضریب گیاهی محصول بر اساس ضرایب گیاهی موجود در سند ملی آب کشور و ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر) است که مطابق با معادله FAO Penman-Monteith مطابق رابطه ۸ محاسبه شده است (Allan et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (8)$$

که در آن ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر)، R_n تشعشع خالص در سطح گیاه (مگا ژول بر مترمربع در روز)، G فلاکس حرارتی خاک (مگا ژول بر مترمربع در روز)، T میانگین دمای روزانه در ارتفاع دو متری (درجه سلسیوس)، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع و دما (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) و γ ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) است.

در این تحقیق در بخش اول به منظور محاسبه نیاز آبی محصولات مورد مطالعه (صورت کسر ردپای آب)، ابتدا تبخیر و تعرق گیاه مرجع و همچنین بارش مؤثر در مختصات هر یک ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT 8.0 که توسط سازمان فائو به منظور محاسبه نیاز آبی گیاهان بر اساس روش فائو-پنمن-مونیتیت ارائه شده است، استفاده گردید. علاوه بر یکسری اطلاعات شامل موقعیت جغرافیایی، ارتفاع ایستگاه مورد نظر و دوره رشد محصولات (با استفاده از آمار موجود در سند ملی آب کشور) داده‌های مورد استفاده در این قسمت شامل میانگین بلندمدت (۲۰

شهرستان i برحسب هکتار، Y_{ij} عملکرد محصول z در شهرستان i برحسب کیلوگرم بر هکتار، i شماره شهرستان، z شماره محصول، at_i سطح زیر کشت کل محصولات مورد بررسی در شهرستان i ام برحسب هکتار، Y_{ij} عملکرد محصول z ام از شهرستان i ام برحسب کیلوگرم بر هکتار، k ضریب حد بالای مساحت، WS_i میزان آب قابل استفاده بر اساس شاخص امنیت آبی برحسب مترمکعب و $Y_j^* \times A_j^*$ میزان تولید محصول z در شرایط موجود است.

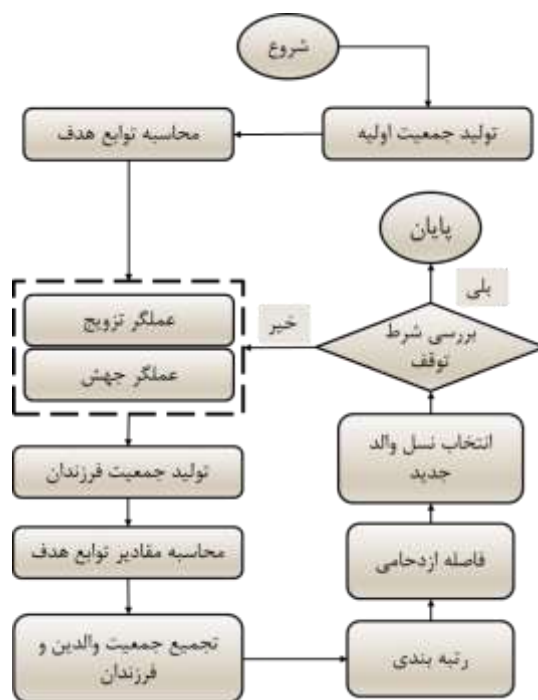
NSGAI که اولین بار توسط دب معرفی شد، یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های تکاملی در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است که مورداستفاده بسیاری از محققان قرار گرفته است (Deb, 1999). شکل ۲ روند نمای الگوریتم NSGAI را نشان می‌دهد.

$$\sum_{i=1}^{56} Y_{ij} \times A_{ij} \geq Y_j^* \times A_j^* \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{56} A_{ij} \leq k(at_i) \quad (13)$$

$$0 \leq A_{ij} \quad (14)$$

که در آن، $WF_{E(Green)(ij)}$ ارزش اقتصادی ردپای آب سبز برحسب مترمکعب بر میلیون ریال، $WF_{E(Blue)(ij)}$ ارزش اقتصادی ردپای آب آبی برحسب مترمکعب بر میلیون ریال، $WF_{Blue(ij)}$ حجم ردپای آب آبی محصول z در شهرستان i ، $WF_{Green(ij)}$ حجم ردپای آب سبز محصول z در شهرستان i ، A_{ij} سطح زیر کشت محصول z در



شکل ۲- روند نمای NSGAI

مرحله ارزیابی مقادیر تابع برای جمعیت والد انتخابی انجام می‌شود و این روند ادامه می‌یابد (Fallah-Mehdipour et al., 2012; Sarzaeim et al., 2016).

در این پژوهش برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، از کد نویسی الگوریتم بهینه‌سازی NSGAI در محیط نرم‌افزار (MATLAB R2020A V9.6 X64 MATHWORKS) استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد NSGAI ابتدا جمعیت اولیه تولید می‌شوند و به ازای آن‌ها مقادیر توابع هدف محاسبه و ارزیابی می‌گردند. سپس شماره نسل‌ها، اصلاح شده و پس از اعمال توزیع و جهش، جمعیت فرزندان تشکیل می‌شوند. در این مرحله مجدداً مقادیر تابع هدف مورد ارزیابی قرار گرفته و بر اساس نسل والد و فرزندان، جمعیتی ترکیبی حاصل و رتبه‌بندی می‌شود. سپس فاصله ازدحام برای صف‌های مختلف محاسبه شده، و بر اساس شاخص‌های رتبه و فاصله ازدحامی، نسل والد انتخاب می‌گردد. در صورت ارضا شدن شرط توقف، این روند متوقف و در غیر این صورت مجدداً،

سناریوهای امنیت آبی

در این تحقیق متوسط جهانی میزان تبخیر برای محاسبه آب تجدید پذیر در نظر گرفته شد. نتایج برآورد آب تجدیدپذیر در مقیاس منطقه مطالعاتی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- حجم آب تجدید پذیر در شرق کشور

استان	حجم آب تجدید پذیر (هزار مترمکعب)
خراسان جنوبی	۲۰۱۱۹۷۴
خراسان رضوی	۶۳۳۲۲۲۳
خراسان شمالی	۱۷۸۲۶۲۸
سیستان و بلوچستان	۷۵۴۴۱۹۲
کل منطقه	۱۷۶۷۱۰۲۴

بر اساس اطلاعات موجود در جدول ۲ مشاهده می‌گردد، استان‌های خراسان شمالی، خراسان جنوبی، خراسان رضوی و سیستان و بلوچستان به ترتیب ۱۰، ۱۲، ۳۵ و ۴۳ درصد از حجم کل آب تجدید پذیر منطقه مطالعاتی را به خود اختصاص داده‌اند.

نتایج برآورد میزان برداشت آب تجدید پذیر توسط محصولات مورد مطالعه نشان می‌دهد که در شرق ایران هم‌اکنون ۷۰ درصد کل آب تجدید پذیر صرفاً جهت تولید چهار محصول گندم، جو، یونجه و ذرت مورداستفاده قرار می‌گیرد، از این رو این منطقه بر اساس شاخص امنیت آبی سازمان ملل در وضعیت بحران شدید آبی قرار دارد.

مدل آمایش الگوی کشت این تحقیق مطابق روابط ۹ و ۱۰ برای چهار سناریو مختلف امنیت آبی در محیط نرم‌افزار MATLAB به کاررفته شد. جبهه‌های بهینه پارتو برای حداکثر نمودن ارزش اقتصادی ردپای آب کل محصولات و حداقل نمودن ردپای آب آبی در شکل ۳ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، تأثیر هم‌زمان سناریوهای مختلف امنیت آبی و مقادیر مختلف محدودیت‌های تولید می‌تواند مجموعه جواب به دست آمده را تا حد بسیار زیادی تحت تأثیر قرار دهد، یعنی به‌طور کلی میزان دسترسی به منابع آب در منطقه تأثیر بسزایی در میزان درآمد و تولید محصولات مورد مطالعه دارد و این موضوع نشان از وابستگی شدید محصولات عمده زراعی شرق کشور به آب آبی دارد. شکل ۴ (الف) نشان می‌دهد در صورتی که منطقه مورد مطالعه از منظر قید امنیت آبی در شرایط بدون بحران قرار گیرد، مسئله از منظر میزان تولید برای مقادیر بیشتر از ۲۵ درصد میزان فعلی دارای جواب موجه (شدنی) نیست، یعنی چنانچه ردپای آب آبی محصولات مورد مطالعه تنها ۱۰ درصد میزان آب دسترسی هر یک از ۵۶ شهرستان منطقه مطالعاتی را شامل شود، نمی‌توان بیش از ۲۵ درصد میزان فعلی از محصولات مورد مطالعه تولید کرد.

طبق تعریف، امنیت آبی به‌عنوان شرایطی در نظر گرفته می‌شود که در آن به لحاظ کمیت و کیفیت آب برای یک زندگی سالم، رشد اقتصادی و حفاظت محیط‌زیست به مقدار کافی در دسترس است (Bakker, 2012; Grey and Sadoff, 2007). یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌ها به‌منظور بررسی امنیت آبی شاخص کمیسیون توسعه پایدار سازمان ملل (UN) است (Lawrence, 2002). که در این تحقیق به‌منظور در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به امنیت آبی در منطقه مورد مطالعه، از آن استفاده شده است. برای این منظور ابتدا میزان آب تجدید پذیر موجود در هر شهرستان برآورد شده و سپس میزان استفاده از آن مطابق چهار وضعیت مختلف این شاخص به‌عنوان چهار سناریو به‌صورت قید (رابطه ۱۱) در مدل آمایش الگوی کشت لحاظ شده است.

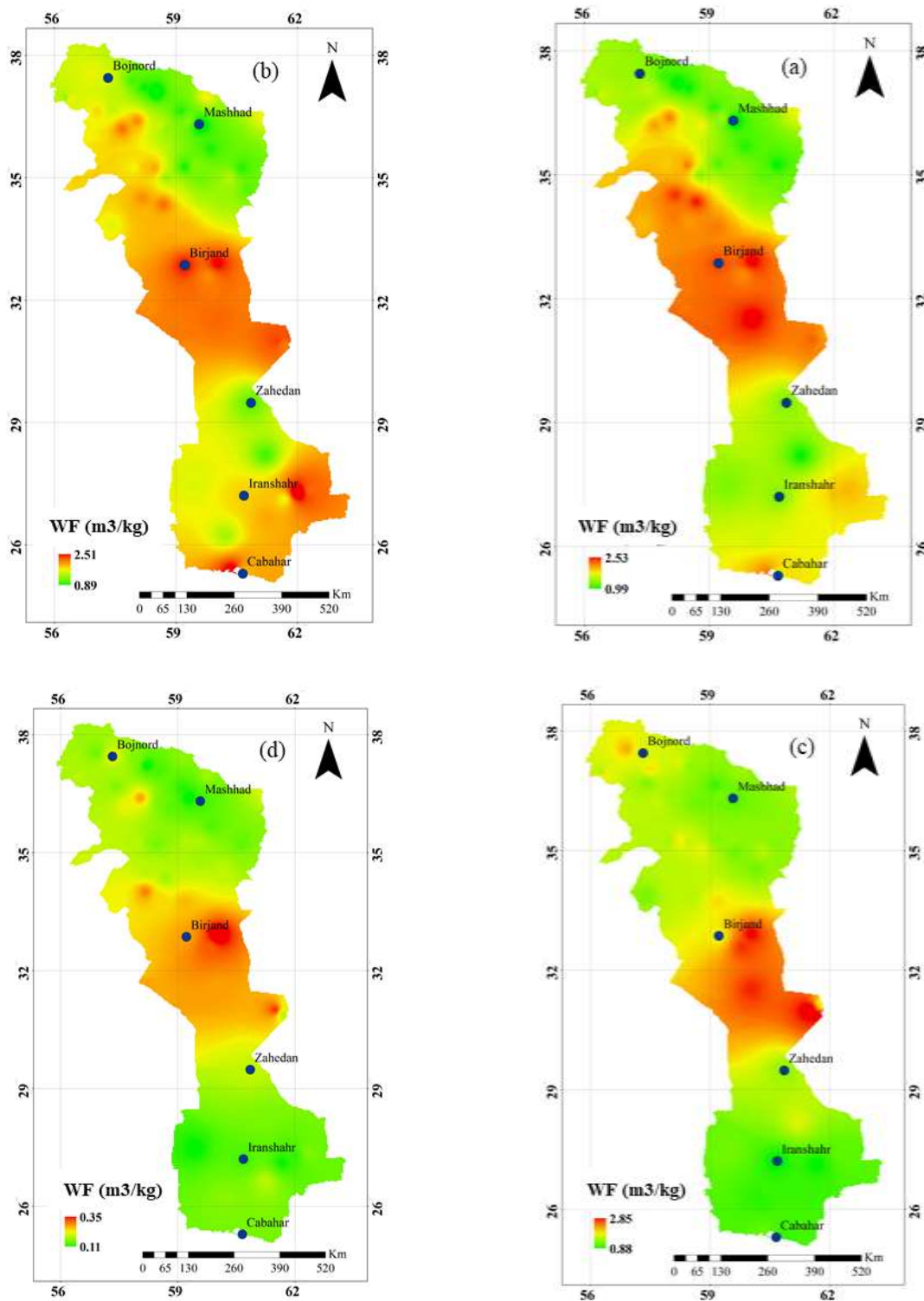
بنیاد کمیسیون توسعه پایدار سازمان ملل میزان درصد برداشت از منابع آب تجدید پذیر در هر کشور را به‌عنوان شاخص اندازه‌گیری بحران آب معرفی کرده است. بر اساس شاخص مذکور هرگاه میزان برداشت آب یک کشور بیشتر از ۴۰ درصد کل منابع آب تجدید پذیر آن باشد این کشور با بحران شدید آب (سناریو ۱) مواجه است و اگر این مقدار در حدفاصل ۲۰ تا ۴۰ درصد باشد بحران در وضعیت متوسط (سناریو ۲) و چنانچه این شاخص بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد بحران در حد متعادل (سناریو ۳) و کمتر از ۱۰ درصد بدون بحران (سناریو ۴) تلقی می‌شود.

نتایج و بحث

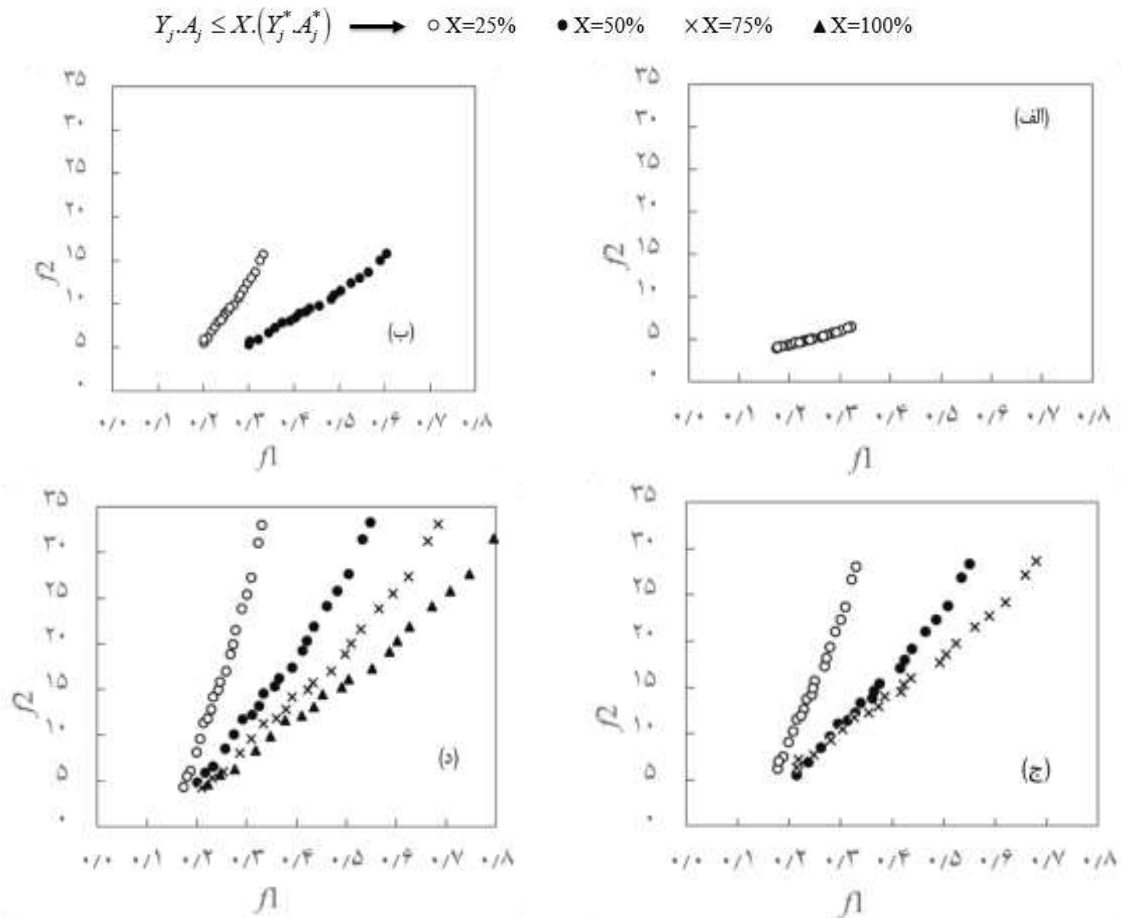
پراکنش مکانی ردپای آب برای محصولات مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، به‌طور کلی در میزان WF ، روندی افزایش-کاهش-افزایش از جنوب تا شمال منطقه وجود دارد. از بین محصولات مورد مطالعه کمترین میزان WF مربوط به ذرت در حدود ۰/۱۱ تا ۰/۳۵ مترمکعب بر کیلوگرم است در حالی که بالاترین میزان WF مربوط به یونجه در حدود ۰/۸۸ تا ۲/۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب در شرق ایران است.

به‌طور کلی WF محصولات مورد مطالعه در حدفاصل عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۳۳ درجه دارای بیشترین مقدار است و هرچه از این محدوده به سمت شمال و جنوب حرکت کنیم WF کاهش می‌یابد. علت اصلی کاهش میزان WF در مناطق جنوبی، برای محصولات گندم و جو کاهش قابل توجه طول دوره رشد گیاه و برای دو محصول یونجه و ذرت افزایش قابل توجه محصول است.

روند کلی میزان WF گندم و جو به‌جز در ناحیه جنوب شرقی، در مابقی مناطق تقریباً مشابه یکدیگر است. همچنین تغییرات WF یونجه و ذرت نیز تقریباً روندی مشابه به هم دارند.



شکل ۳- نقشه ردپای آب (a) گندم (b) جو (c) یونجه و (d) ذرت



شکل ۴- جبهه‌های پرتو: (الف) سناریو اول، (ب) سناریو دوم، (ج) سناریو سوم و (د) سناریو چهارم امنیت آبی

جواب موج (شدنی) است، یعنی چنانچه ردپای آب آبی محصولات مورد مطالعه بیش از ۴۰ درصد میزان آب تجدید پذیر هر یک از ۵۶ شهرستان منطقه مطالعاتی را شامل شود، می‌توان میزان فعلی از محصولات مورد مطالعه تولید کرد.

بهترین راه‌حل‌ها برای هر سناریو و در هر نمودار از شکل ۴ انتخاب شده و مقادیر آن‌ها در جدول ۳ ذکر شده است.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد، تحت سناریو ۱، بهترین مقدار تابع هدف اول (ماکزیمم) و دوم (مینیمم) به ترتیب برابر $6/48$ (10^9 میلیون ریال) و $0/17$ (10^6 هزار مترمکعب) است. همچنین، تحت سناریو ۲ بهترین مقدار تابع هدف اول (ماکزیمم) و دوم (مینیمم) به ترتیب برابر $15/61$ (10^9 میلیون ریال) و $0/18$ (10^6 هزار مترمکعب) است. بر اساس اطلاعات جدول ۳، تحت سناریو ۳ بهترین مقدار تابع هدف اول (ماکزیمم) و دوم (مینیمم) به ترتیب برابر $29/10$ (10^9 میلیون ریال) و $0/18$ (10^6 هزار مترمکعب) است و تحت سناریو ۴ بهترین مقدار تابع هدف اول (ماکزیمم) و دوم (مینیمم) به ترتیب برابر $32/86$ (10^9 میلیون ریال) و $0/17$ (10^6 هزار مترمکعب) است.

شکل ۴ (ب) نشان می‌دهد در صورتی که منطقه مورد مطالعه از منظر قید امنیت آبی در شرایط بحران متعادل قرار گیرد، مسئله از منظر میزان تولید برای مقادیر بیشتر از ۵۰ درصد میزان فعلی دارای جواب موج (شدنی) نیست، یعنی چنانچه ردپای آب آبی محصولات مورد مطالعه بین ۱۰ تا ۲۰ درصد میزان آب قابل دسترس هر یک از ۵۶ شهرستان منطقه مطالعاتی را شامل شود، نمی‌توان بیش از ۵۰ درصد میزان فعلی از محصولات مورد مطالعه تولید کرد. شکل ۴ (ج) نشان می‌دهد در صورتی که منطقه مورد مطالعه از منظر قید امنیت آبی در شرایط بحران متوسط قرار گیرد، مسئله از منظر میزان تولید برای مقادیر بیشتر از ۷۵ درصد میزان فعلی دارای جواب موج (شدنی) نیست، یعنی چنانچه ردپای آب آبی محصولات مورد مطالعه تنها ۲۰ تا ۴۰ درصد میزان آب تجدید پذیر هر یک از ۵۶ شهرستان منطقه مطالعاتی را شامل شود، نمی‌توان بیش از ۷۵ درصد میزان فعلی از محصولات مورد مطالعه تولید کرد.

شکل ۴ (د) نشان می‌دهد در صورتی که منطقه مورد مطالعه از منظر قید امنیت آبی در شرایط بحران شدید قرار گیرد، مسئله از منظر میزان تولید برای مقادیر فعلی از تولید محصولات مورد مطالعه دارای

موجود بین همین مقادیر، درآمد بیشتری خواهند داشت. از طرفی دیگر به طور کلی میزان تغییرات تابع هدف اول (حداکثر شدن درآمد) بین ۰/۱۷ تا ۰/۸۲ (۱۰^۶ هزار مترمکعب) متغیر است، که بیانگر این است که بسته به میزان تولید ردپای آب آبی بین همین مقادیر متغیر است.

اطلاعات موجود در جدول ۳ نشان می‌دهد که، به طور کلی میزان تغییرات تابع هدف اول (حداکثر شدن ارزش اقتصادی ردپای آب) بین ۳/۹۶ تا ۳۳/۲۵ (۱۰^۹ میلیون ریال) متغیر است. در واقع این موضوع بیانگر این است که در صورت عدم وجود محدودیت‌های آبی و غذایی در شرق کشور کشاورزان این منطقه با کشت محصولی که ارزش قیمتی بالاتری در هر هکتار به دست می‌دهد، در سطح زیر کشت

جدول ۳- بهترین مقادیر توابع هدف مرتبط با هر سناریو

$Y_j \cdot A_j \leq X \cdot (Y_j^*, A_j^*)$								بهترین نقطه بر اساس	سناریو
%۱۰۰X=		%۷۵X=		%۵۰X=		%۲۵X=			
f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2		
-	-	-	-	-	-	۶/۴۸	۰/۳۲	f_2	$10 < WS \leq 20$
-	-	-	-	-	-	۳/۹۶	۰/۱۷	f_1	
-	-	-	-	۱۵/۱۷	۰/۶۱	۱۵/۶۱	۰/۴۱	f_2	$20 < WS \leq 40$
-	-	-	-	۵/۰۲	۰/۲۹	۵/۶۸	۰/۱۸	f_1	
-	-	۲۸/۸۲	۰/۶۸	۲۸/۸۸	۰/۵۵	۲۹/۱۰	۰/۳۳	f_2	$40 < WS \leq 70$
-	-	۵/۹۴	۰/۲۲	۵/۵۳	۰/۲۱	۵/۷۹	۰/۱۸	f_1	
۳۳/۲۵	۰/۸۲	۳۲/۷۹	۰/۶۸	۳۲/۸۶	۰/۵۵	۳۲/۵۳	۰/۳۱	f_2	$< WS \leq AW40$
۴/۰۵	۰/۲۳	۴/۱۹	۰/۲۲	۴/۸۹	۰/۲۱	۳/۹۶	۰/۱۷	f_1	

متعادل، متوسط و شدید قرار می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد چنانچه منطقه مورد مطالعه از منظر شاخص امنیت آبی سازمان ملل به ترتیب در وضعیت بدون بحران، بحران متعادل، بحران متوسط و بحران شدید قرار داشته باشد حداکثر میزان ارزش اقتصادی تولید شده توسط محصولات مورد مطالعه در الگوی کشت بهینه به ترتیب برابر ۶/۴۸، ۱۵/۶۱، ۲۹/۱۰ و ۳۲/۸۶ (۱۰^۹ میلیون ریال) خواهد بود. با توجه به نتایج این تحقیق توصیه می‌شود در بهینه‌سازی‌های الگوی کشت و یا برنامه‌های کلان‌تر آمایش سرزمین کشاورزی که با توابع هدفی چون افزایش بهره‌وری مصرف آب، حفظ امنیت غذایی و ... انجام می‌گیرد، در کنار سایر قیود به مفهوم ردپای آب و شاخص‌های امنیت آبی نیز توجه گردد.

به طور کلی بر اساس شکل ۴ و جدول ۳ مشاهده می‌گردد که در منطقه مورد مطالعه تولید میزان کنونی (Y^*A^*) از محصولات مورد مطالعه باعث بروز بحران شدید آبی به لحاظ شاخص امنیت آبی سازمان ملل می‌گردد و تولید سه‌چهارم از میزان کنونی ($0.75Y^*A^*$) از محصولات مورد مطالعه باعث بروز بحران متوسط آبی به لحاظ شاخص امنیت آبی سازمان ملل می‌شود. همچنین تولید نیمی از میزان کنونی ($0.5Y^*A^*$) از محصولات مورد مطالعه باعث بروز بحران متعادل آبی به لحاظ شاخص امنیت آبی سازمان ملل و تولید یک‌چهارم از میزان کنونی ($0.25Y^*A^*$) از محصولات مورد مطالعه باعث بروز شرایط بدون بحران آبی به لحاظ شاخص امنیت آبی سازمان ملل می‌گردد.

منابع

علیزاده، ا.، مجیدی، ن.، قربانی، م. و محمدیان، ف. ۱۳۹۱. بهینه‌سازی الگوی کشت باهدف تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی دشت مشهد چناران). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱(۶): ۶۸-۵۵.

عربی، ا.، و نیکنیا، ن. ۱۳۸۹. ردپای آب، شاخصی از تأثیر الگوی مصرف کشورها. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد.

Ababaei, B. and Ramezani Etedali, HR. 2014. Estimation of water footprint components of Iran's

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات عمده زراعی استان‌های شرقی کشور شامل خراسان‌های شمالی، رضوی و جنوبی و استان سیستان و بلوچستان با دو هدف حداقل‌سازی مصرف آب آبی و حداکثر سازی ارزش اقتصادی ردپای آب نشان داد، برای تولید مقدار کنونی از محصولات مورد مطالعه در این استان‌ها با اعمال الگوی بهینه می‌توان تا ۳۰ درصد در مصرف منابع آبی این استان‌ها صرفه‌جویی کرد. از طرفی نتایج نشان داد به ترتیب تولید بیش از ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد محصولات مورد مطالعه بر اساس شاخص امنیت آبی سازمان ملل وضعیت منابع آبی منطقه را به ترتیب در وضعیت بحران

- Gollehon, N. and Quinby, W. 2004. Irrigation resources and water. USDA Economics Research Service. URL: http://www.ers.usda.gov/publications/AREI/EIB_16/Chapter2/2.1/.
- Grey, D. and Sadoff, C.W. 2007. Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy*. 9 (6): 545-571.
- Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K. 2008. Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. Blackwell Publishing, Oxford, UK. DOI: 10.1002/9780470696224.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., and Mekonnen, M.M., 2011. The Water Footprint Assessment Manual. Earthscan, London.
- Kondash, A. J., Lauer, N. E. and Vengosh, A. 2018. The intensification of the water footprint of hydraulic fracturing. *Science advances*. 4(8): eaar5982.
- Lawrence, P., Meigh, J. R. and Sullivan, C. A. 2003. The Water Poverty Index: An International Comparison, Keele Economic Research Papers 2003/18. Centre for Ecology and Hydrology (CEH), Wallingford, UK.
- Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. 2020. Sustainability of the blue water footprint of crops. *Advances in Water Resources*, 143: 103679.
- Pongkijvorasin, S. 2007. Stock-to stock externalities resources in renewable resource economics: watersheds, conjunctive water use, and mud. Ph.D dissertation in economics. University of Hawai'i.
- Ramezani Etedali, H., Ahmadaali, K., Gorgin, F. and Ababaei, B. 2019. Optimization of the cropping pattern of main cereals and improving water productivity: application of the water footprint concept. *Irrigation and Drainage*. 68(4): 765-777.
- Sarzaeim, P., Bozorg-Haddad, O., Fallah-Mehdipour, E. and Loáiciga, H.A. 2016. Discussion of "Multiobjective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern, *Journal of Irrigation and Drainage*, In Press.
- Sullivan, C. 2002. Calculating a Water Poverty Index, *World Development*. 30(7): 1195- 1210.
- Van Oel P.R., Mekonnen M.M. and Hoekstra A.Y. 2009. The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. *Ecological Economics*. 69: 82-92.
- wheat production: comparison of global and national scale estimates. *Environmental Processes*. 1(3): 193-205.
- Ababaei B. and Ramezani Etedali, H. 2017. Water footprint assessment of main cereals in Iran. *Agricultural Water Management*. 179: 401- 411.
- Allan, J. A. 1997. Virtual water: A long-term solution for water short Middle Eastern economies? Paper presented at the 1997 British Assoc. Festival of Sci., University of Leeds, UK.
- Allan, J. A. 2003. Virtual water eliminates water wars? A case study from the Middle East. PP. 137-145. In: A. Y .Hoekstra (Ed.), *Virtual Water Trade, Proc. of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series No. 12*, IHE, Delft, The Netherlands.
- Allen, R. G. 1998. Crop evapotranspiration. FAO irrigation and drainage paper. 56: 60-64.
- Bakker, K. 2012. Water security: research challenges and opportunities. *Science* 337. (6097): 914-915.
- Deb, K. 1999. Multi-Objective genetic algorithms: Problem difficulties and construction of test problem. *Evolutionary Computation*. 7(3), 205-230.
- Ewaid, S. H., Abed, S. A. and Al-Ansari, N. 2019. Water Footprint of Wheat in Iraq. *Water*, 11(3): 535.
- Fallah-Mehdipour, E., Bozorg-Haddad, O., Rezapour Tabari, M.M. and Mariño, M.A. 2012. Extraction of decision alternative in construction management projects: Application and adaptation of NSGA II and PSO. *Journal of Expert Systems with Applications*. 36: 2794-2803.
- FAO. 2015. Towards a water critical perspectives for policy-makers. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/3/ai4560e.pdf>.
- FAO. 2017. Water for Sustainable Food and Agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany.
- FAO. 2018. Transforming food and agriculture to achieve the SDGs. Retrieved from http://www.fao.org/family_farming/detail/en/c/1145621.
- Forin, S., Mikosch, N., Berger, M. and Finkbeiner, M. 2020. Organizational water footprint: a methodological guidance. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 25(2): 403-422.

Multi-Objective Optimization of Cropping Pattern by Emphasizing on Water Footprint in the Eastern Provinces of Iran

A. Arefinia¹, Kh. Ahmadaali^{2*}

Received: Nov.09, 2020

Accepted: Dec.30, 2020

Abstract:

Increasing the water productivity by cropping pattern optimization is one of the best ways for development in agriculture. In this study, in order to maximize farmers' income and minimize blue water footprint of wheat, barley, alfalfa, and maize, the NSGA-II multi-objective optimization algorithm and United Nations commission on sustainable development's indicator has been used in four cropping pattern scenarios in the 56 cities of the eastern provinces of Iran. The results showed that in some scenarios it was not possible to fully achieve these goals in the multi-objective model. The results also showed that the production of 50, 75 and 100% of the current values causes a low, moderate and severe water stress in the study region, that on average, save 55, 40 and 30 % of the region's water resources, respectively. Implementation of this model in the study area would increase revenue, reduce water consumption and, consequently make more environmental sustainability.

Keywords: Blue water, Green water, Multi-objective optimization, NSGA II, Optimum cropping pattern, Water security,

1- M.Sc. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Assistant Professor, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: khahmadauli@ut.ac.ir)

مقاله علمی-پژوهشی

مطالعه‌ی اثر تغییر ارتفاع و چیدمان پوشش گیاهی با آرایش منظم بر میرایی امواج با استفاده از مدل عددی Flow-3D

سید احمد قاهری نژاد^۱، مهدی بهداروندی عسکر^{۲*}، محمد انصاری فوجقار^۳، احسان پارسی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۳

چکیده

توسعه‌ی امواج آب از میان پوشش گیاهی مستغرق و غیر مستغرق با از دست دادن انرژی از طریق نیروی مقاومتی ناشی از پوشش گیاهی است که همراه با کم شدن ارتفاع امواج می‌باشد. میرایی موج توسط پوشش گیاهی تابعی از ویژگی‌های پوشش مانند هندسه و ساختار، نسبت استغراق، تراکم، سختی، و آرایش مکانی و همچنین شرایط موج مانند ارتفاع موج ورودی، مدت و جهت موج می‌باشد. در پژوهش حاضر، اثر تغییر ارتفاع و چیدمان هندسی پوشش گیاهی صلب با ارتفاع متغیر بر میرایی امواج با استفاده از مدل عددی Flow 3D، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور کانالی با طول ۴۸۰ cm و عرض ۱۰/۸ cm که پیشتر توسط Wu and Cox (2015) برای مطالعه اثر تراکم گیاهان با ارتفاع متغیر بر میرایی امواج مورد استفاده قرار گرفته است، مدل شد و نحوه‌ی عملکرد سه چیدمان شامل چیدمان بلند به کوتاه، چیدمان کوتاه به بلند و چیدمان زیگزاگ، تحت چهار موج متفاوت که همگی از نوع امواج خطی می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که در این پژوهش، ارتفاع موج به عنوان شاخص میرایی در نظر گرفته می‌شود. نتایج بدست آمده بر اساس اندازه‌گیری ارتفاع امواج در چهار نقطه‌ی متفاوت در طول کانال نشان می‌دهند که رفتار امواج در برخورد با چیدمان‌های متفاوت، از الگوی ثابتی تبعیت می‌کند و نیز تغییر در هندسه پوشش گیاهی می‌تواند تا حد زیادی منجر به افزایش میرایی امواج شود. نتایج نشان می‌دهد که تغییر در چیدمان ارتفاعی می‌تواند باعث تغییر در میرایی تا ۷/۱ درصد شود.

واژه‌های کلیدی: پوشش گیاهی، چیدمان هندسی، کمربند سبز، موج

مقدمه

به ساحل در حفظ سواحل در برابر فرسایش نقش مهمی را ایفا می‌کنند. مطالعه‌ی اثر تغییر ارتفاع، قطر و فواصل ساقه کمک بسزایی در پیش‌بینی و تخمین رفتار موج هنگام ورود به ساحل می‌کند. علاوه بر این تجربه نشان داده که حالات مختلف قرارگیری ارتفاعات می‌تواند باعث تغییراتی در میرایی امواج شوند که این مسئله هدف پژوهش حاضر می‌باشد. با توجه به مطالعات انجام شده در دهه‌های اخیر در زمینه پوشش گیاهی و اثرات آن بر میرایی امواج، همواره متغیرهای زیادی را می‌توان در استهلاک دخیل دانست که توسط پژوهشگران مختلف مطالعه و بررسی شده‌اند. در این میان چینه‌های هندسی ساقه‌ها با ارتفاع متغیر را نیز می‌توان یکی از عوامل مهمی دانست که اطلاع از اثرات آن نقش بسزایی در مطالعه‌ی پوشش‌های گیاهی دارد. لذا در این پژوهش سعی شده با اتکا به دستاوردهای پژوهشگران، مطالعه‌ی کاملی نسبت به این مسئله انجام شود. نتایج تحقیقات به عمل آمده در این زمینه مبین این مطلب است که به طور کلی پوشش گیاهی، مقاومت در برابر جریان را افزایش داده، جریان را کنترل می‌کند و میزان فرسایش و رسوب گذاری را تحت تاثیر قرار می‌دهد (قنبری

یکی از عواملی که می‌تواند اثر قابل توجهی در عملکرد گیاهان ساحلی داشته باشد نحوه‌ی قرارگیری و هندسه‌ی آن‌ها می‌باشد. چیدمان هندسی این گیاهان با ارتفاع متغیر و نحوه‌ی تغییر ارتفاع آن‌ها در امتداد خط ساحلی و یا عمود بر خط ساحلی می‌تواند بر میرایی امواج اثر بسزایی گذارد. این گیاهان علاوه بر جذب انرژی موج رسیده

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی دریا،

دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

۲- استادیار گروه عمران سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی، دانشگاه علوم و فنون

دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

۳- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع

طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- کارشناس مطالعات شرکت مهندسین مشاور آب و انرژی اروند

(* نویسنده مسئول: Email: sazehenteghal@yahoo.com

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.17.7

رسوب در حاشیه شهر مشهد مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش نتایج مقایسه میانگین در رابطه با پایداری خاکدانه‌ها نشان داد که با افزایش درصد آسمانه‌ی گیاهی پایداری خاکدانه‌ها افزایش یافت و بیشترین پایداری خاکدانه مربوط به پوشش گیاهی گل‌گاوزبان بود. فضلی و نور (۱۳۹۶)، اثر سناریوهای مختلف درصد پوشش گیاهی بر فرسایش خاک را شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد کاهش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی پوشش گیاهی به ترتیب باعث افزایش ۲۱، ۴۵ و ۸۲ درصدی فرسایش خاک در منطقه خواهد شد. خلیلی نفت چالی و همکاران (۱۳۹۴) اثر تراکم پوشش گیاهی بر مشخصه‌های جریان غلیظ را بصورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش تراکم پوشش گیاهی در ارتفاع‌های مختلف، سرعت پیشروی جریان نسبت به بستر صاف به میزان ۱۳ تا ۲۸/۵ درصد و غلظت جریان بین ۵۳/۵۴ تا ۸۱/۲۸ درصد کاهش می‌یابد.

متمدنی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی تاثیر پوشش گیاهی در کاهش اثرات مخرب امواج عبوری از ساحل و توانایی پوشش گیاهی در جذب نیروی امواج را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش ارتفاع موج ورودی، نیروی موج و همچنین سطح برخورد موج با پوشش افزایش یافته و باعث جذب بیشتر نیروی موج توسط پوشش می‌شود. زارعی و همکاران (۱۳۹۵) اثر پوشش گیاهی ساحلی بر میرایی نیروی امواج مخرب منفرد ناشکنا در سواحل شیبدار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش ارتفاع موج ورودی نیروی اعمال شده بر روی پوشش افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که با حضور پوشش گیاهی، نیروی مخرب نسبت به شرایط بدون پوشش به طور متوسط ۷۵ درصد می‌یابد. میرزاخانی و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقات خود به بررسی میرایی موج توسط پوشش گیاهی صلب در سواحل پرداختند و نتیجه گرفتند که پوشش گیاهی به عنوان مانعی برای انتشار موج عمل می‌کند و باعث کاهش انرژی و تضعیف موج می‌شود و ارتفاع موج ورودی به ساحل را کاهش می‌دهد.

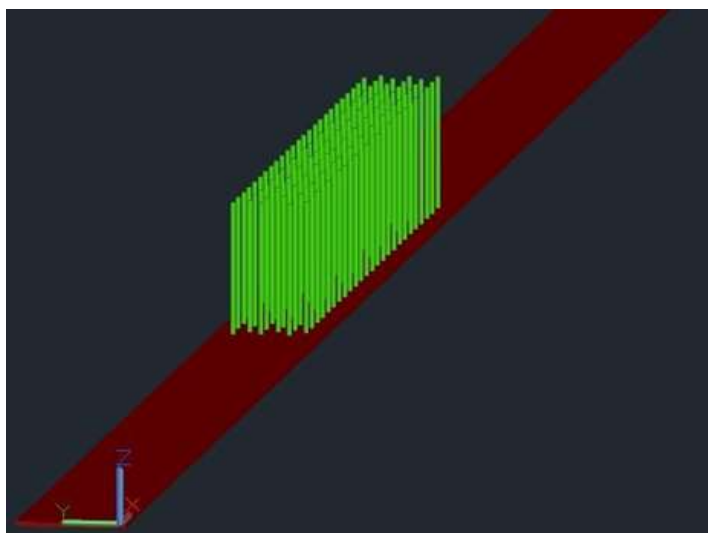
در مطالعات صورت گرفته در زمینه حفاظت از سواحل، به جنبه‌های زیست‌محیطی و تأثیرات منفی برخی سازه‌های حفاظتی بر اکوسیستم منطقه کمتر توجه شده است. با توجه به اهمیت محیط‌زیست دوست بودن سازه‌های آبی و دریایی و اینکه احداث سازه‌های حفاظت از سواحل باعث به هم ریختگی در اکوسیستم منطقه نگردد، در این تحقیق کوشش شده است، اهمیت و چگونگی تأثیر پوشش گیاهی بر میرایی امواج به عنوان یک جایگزین دوست‌دار محیط‌زیست برای سازه‌های موج‌شکن و سازه‌های وابسته به آن بررسی گردد. نوآوری این تحقیق بررسی اثر پوشش گیاهی در حفاظت از سواحل با عنایت به جنبه‌های زیست‌محیطی می‌باشد.

عدیوی و فتحی مقدم، (۱۳۹۳). به‌طور کلی استفاده از پوشش گیاهی با توجه به اهداف هر طرح، بستگی به شرایط محیطی، شدت تخریب پذیری خاک، نوع گیاه، روش کاشت و تثبیت زیستی و مدیریت نگهداری پوشش گیاهی دارد. اولین تحقیق برای بدست آوردن رابطه‌ای بین زبری هیدرولیکی جریان با عمق و سرعت و همچنین نوع و ارتفاع پوشش گیاهی، در آزمایشگاه سازمان حفاظت خاک ایالت کارولینای جنوبی واقع در شهر اسپارترگ ایالت متحده شروع شد. حاصل این آزمایش ارائه‌ی مجموعه‌ی ضرایب زبری کوتر و مانینگ در کانال‌های با عرض ۰/۳ تا ۱/۲ متر و شیب کناره متفاوت بود. (Cook and Campbell, 1939). لی و شین در تحقیقی اثر مقاومت گیاهان با ساقه‌های استوانه‌ای مختلف را در حالت مستغرق بر جریان بررسی کردند. نتایج نشان داد که الگوهای مختلف قرارگیری ساقه‌های استوانه‌ای، تاثیر مهمی بر دبی جریان دارد، علاوه بر آن مدل‌های فیزیکی برای تعیین ضریب زبری با ساقه‌های استوانه‌ای صلب مورد استفاده قرار گرفت، به طوری که یک بخش از این تحقیق، برای محاسبه دبی‌های مختلف منطقه رویش گیاه برنامه ریزی شده بود (Li and Shen, 1973). تحقیقات لی و شین در خصوص محاسبه ضریب اصطکاک، برای یک گیاه منفرد، با CWR، به علاوه‌ی محاسبه‌ی ضریب زبری برای پوشش گیاهی (fp) بسیار وسیع بود (Li and Shen, 1973). مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی مدل پوشش ساحلی مانگرو با استفاده از ساقه‌های استوانه‌ای ایستاده و سخت (بدون انعطاف) صورت گرفت، نتایج نشان داد که در حدود ۱۰ تا ۶۰ درصد انرژی موج حین عبور از این پوشش توسط موانع درختی مستهلک گردید (Kongko, 2004). در شرایط پوشش غیر مستغرق با نسبت طول ساقه (LS) به ارتفاع موج (H) بیش از یک، در مقایسه با شرایط پوششی مستغرق ($LS/H = 0.75$) میرایی موج در هر متر ۵۰ الی ۲۰۰ درصد افزایش می‌یابد (Augustin et al., 2009). مطالعه‌ی تجربی آزمایشگاهی نشان داد که اتلاف انرژی موج بستگی به میزان تراکم پوشش جنگل (شامل چیدمان و عرض پوشش) و قطر تنه‌ی درخت دارد (Furukawa et al., 1997). یک پژوهش تلفیقی، عددی شبه سه بعدی و آزمایشگاهی به منظور تجزیه و تحلیل، تدوین و تعیین فرمول درگ ناشی از پوشش گیاهی انجام شده است. پوشش در دو حالت مستغرق و غیر مستغرق با دو نوع ساقه انعطاف پذیر و ساقه‌ی سخت بدون انعطاف شبیه سازی شده است. در این بررسی، تئوری "پایه کانتیلور" برای محاسبه‌ی میزان انحراف و درگ ناشی از پوشش گیاهی انعطاف پذیر مورد استفاده قرار گرفته شد (Kutija and Erduran, 2003). مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی بر روی میرایی انرژی موج توسط جنگل‌های ساحلی مانگرو، کارایی این روش را در حفاظت از سواحل آشکار نمود (Harada and Imamura, 2006). گرمئی و همکاران (۱۳۹۶)، در مطالعات خود اثر تراکم سه نوع پوشش گیاهی را بر میزان رواناب و

مواد و روش‌ها

و صحت‌سنجی، از همان هندسه برای مطالعه چیدمان هندسی پوشش گیاهی با ارتفاع متغیر بر میرایی امواج استفاده شده است. در شکل ۱ نمایی از این هندسه‌ی مذکور را که بر اساس تحقیقات Wu and Cox (2015) و با استفاده از نرم افزار AutoCAD طراحی شده است و برای صحت‌سنجی در نرم افزار Flow-3D مورد استفاده قرار گرفته، مشاهده می‌شود.

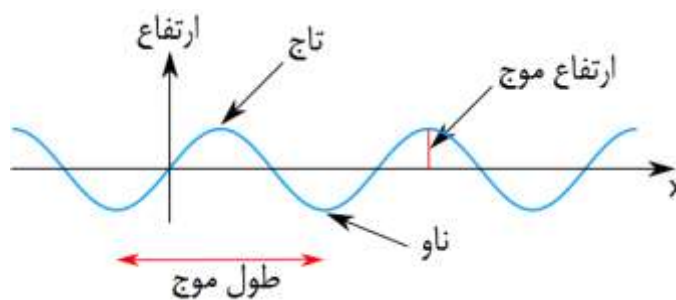
در این پژوهش از یک فلوم به طول ۴۸۰cm و عرض ۱۰/۸cm که پیش تر در دانشگاه ایالت اورگان ایالات متحده، توسط Wu and Cox (2015) برای مطالعه اثر تراکم گیاهان با ارتفاع متغیر بر میرایی امواج مورد استفاده قرار گرفته، استفاده شده است. در پژوهش حاضر ابتدا فلوم مذکور، با استفاده از نرم‌افزار مدل شده و پس از کالیبراسیون



شکل ۱- هندسه‌ی استفاده شده توسط Wu and Cox (2015)، برای مطالعه‌ی اثر تراکم گیاهان بر میرایی امواج

امواج در جدول ۱ درج شده است. قطر ساقه‌های مورد استفاده ۵ سانتی‌متر و ارتفاع آن‌ها در این تحقیق برابر با ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

برای این پژوهش ۴ نوع موج مختلف از نوع ایری، با پریود، ارتفاع شاخص و دیگر مشخصات متفاوت در نظر گرفته شده که شماتیک این موج در شکل ۲ نشان داده شده است و مشخصات این



شکل ۲- شماتیک موج ایری

جدول ۱- مشخصات امواج مورد مطالعه

n	H(cm)	T(cm)	H_s (cm)	kh	$k\alpha$	KC
۱	۱۲	۰/۴	۱/۴۹	۳/۰۴	۰/۱۹	۱۰
۲	۱۲	۰/۶	۱/۸۷	۰/۴۹	۰/۱۲	۱۳
۳	۱۲	۱	۲/۸۲	۰/۷۶	۰/۰۹	۲۸
۴	۱۲	۱/۴	۳/۴۲	۰/۵۲	۰/۰۷	۴۵

کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل عددی

برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی بر اساس مطالعات وو و کوکس (Wu and Cox, 2015)، پوششی شامل ۱۵۰ ساقه به ارتفاع ۱۴cm و قطر ۵mm در طول ۹۰cm از فلوم با طول ۴/۸m عرض ۱۰/۴cm ایجاد می‌گردد. موج تابیده شده به پوشش از نوع خطی می‌باشد که ارتفاع آن ۱/۸۷cm با پریود ۰/۶s می‌باشد. پس از طراحی مدل با استفاده از نرم افزار AutoCAD و انتقال مدل به محیط Flow-3D، لازم است تا شبکه‌ی مش‌بندی مناسب انتخاب می‌شد تا شبکه‌ی حل علاوه بر داشتن دقت کافی، از نظر زمانی نیز مناسب و به‌صرفه باشد. با توجه به طول زیاد مدل و عرض کم آن، و نیز با در نظر گرفتن قطر کم ساقه‌ها؛ نیاز است تا دو شبکه‌ی مش‌بندی ایجاد شود، تا در عین حفظ دقت، زمان حل شبکه نیز به حداقل برسد. جدول ۲ تعداد و ابعاد مش‌های در نظر گرفته‌شده و میزان خطای میانگین حاصل از هر کدام را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای این پژوهش از دو شبکه مش‌بندی استفاده شده است که نخستین شبکه از ابتدا تا انتهای کانال را شامل می‌شود، و دومین شبکه تنها شامل ابتدا تا انتهای پوشش می‌باشد. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، می‌توان با کوچک در نظر گرفتن ابعاد شبکه‌ی محاسباتی دقت را افزایش داد؛ ولی این نکته را نیز باید در نظر گرفت که کوچک‌شدن ابعاد شبکه، منجر به افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی و در نتیجه افزایش زمان لازم برای حل این شبکه می‌شود. در جدول ۲، حالت شماره‌ی ۳ مناسبترین حالت مش‌بندی می‌باشد، زیرا علاوه بر دقت خوب، مدت زمان لازم برای حل آن نیز قابل قبول می‌باشد. دقت شود که می‌توان با کوچک‌تر در نظر گرفتن این ابعاد، خطای محاسبات را از این مقدار نیز کمتر کرد، ولی به دلیل زمان‌بر بودن این کار، انجام آن به‌صرفه نمی‌باشد.

پس از طراحی کانال و شبیه‌سازی شرایط موردنیاز و نیز یافتن ابعاد مناسب برای شبکه‌ی محاسباتی، به تحلیل نتایج خروجی و مقایسه آن‌ها با نتایج حاصل از پژوهش وی چنگ وو و دنیل تی کوکس (Wu and Cox, 2015) پرداخته خواهد شد. با توجه به چهار موج انتخابی برای آزمایش، از موج حالت دوم ارائه شده در جدول ۱ برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی استفاده می‌شود. در این پژوهش از نسبت ارتفاع موج در هر نقطه نسبت به ارتفاع موج شاخص، به عنوان پارامتر (K_v) انتقال یاد شده است (رابطه ۱).

چیدمان مورد بررسی در این پژوهش عبارت‌اند از ساقه‌های استوانه‌ای صلب با آرایش مکانی منظم که در سه حالت ارتفاعی بلند به کوتاه، کوتاه به بلند و زیگزاگ مطالعه می‌شوند. نمای سه‌بعدی از این چیدمان‌ها در بخش‌های بعد نشان داده شده است.

الف- حالت چیدمان بلند به کوتاه

در این حالت ساقه‌های قرار گرفته در ردیف اول دارای بلندترین ارتفاع برابر با ۱۴cm می‌باشند. ساقه‌های ردیف دوم دارای ارتفاع ۱۲cm، ردیف سوم ۱۰cm، و ردیف‌های چهارم و پنجم دارای ارتفاع به ترتیب ۸cm و ۶cm می‌باشند. این الگوی هندسی، از نقطه‌ی شروع پوشش، یعنی از فاصله‌ی ۱/۳m از ابتدای کانال، تا ۹۰cm پس از آن متناوباً ادامه می‌یابد. دقت شود در تحلیل با نرم افزار Flow-3D و در کلیه نتایج ارائه شده، نقطه‌ی شروع پوشش به عنوان مبدأ طولی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۳-الف نمای سه‌بعدی از این چیدمان را نشان می‌دهند.

ب- حالت چیدمان کوتاه به بلند

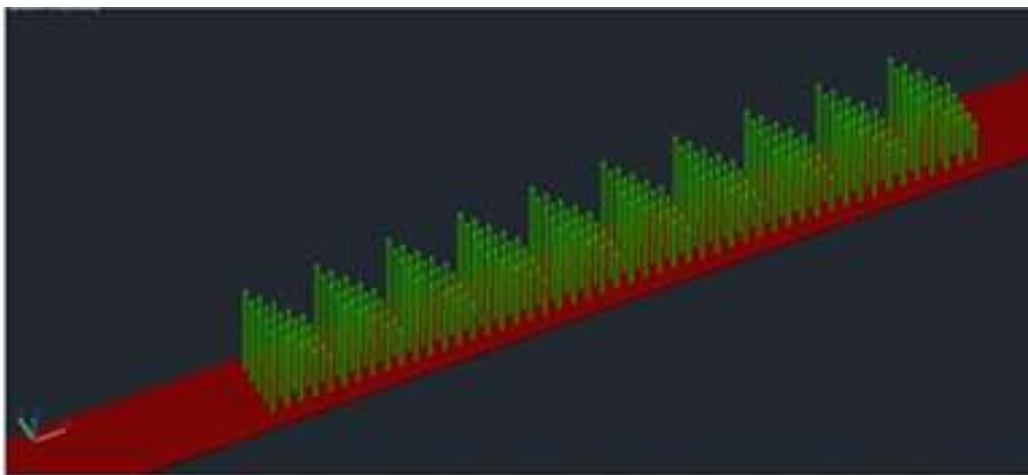
در این حالت ساقه‌های قرار گرفته در ردیف اول دارای کوتاه‌ترین ارتفاع برابر با ۶cm، و ردیف‌های دوم تا پنجم به ترتیب دارای ارتفاع ۸cm، ۱۰cm، ۱۲cm، ۱۴cm می‌باشند. این الگوی هندسی، از نقطه‌ی شروع پوشش، یعنی از فاصله‌ی ۱/۳m از ابتدای کانال، تا ۹۰cm پس از آن متناوباً ادامه می‌یابد. شکل ۳-ب نمای سه بعدی از این چیدمان را نشان می‌دهند.

ج- حالت چیدمان زیگزاگ

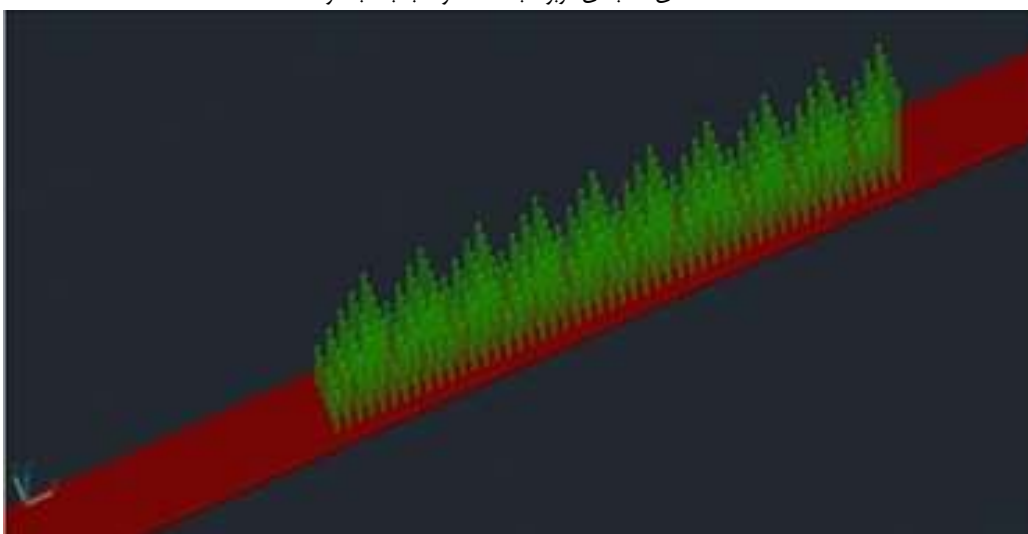
در این حالت طول ساقه‌های قرار گرفته در ردیف اول از چپ به راست و از بزرگ به کوچک تغییر می‌کنند. به همین منوال ساقه‌های ردیف دوم، برعکس ردیف اول از راست به چپ و از بزرگ به کوچک تغییر می‌کنند. این الگوی هندسی، از نقطه‌ی شروع پوشش، یعنی از فاصله‌ی ۱/۳m از ابتدای کانال، تا ۹۰cm پس از آن متناوباً ادامه می‌یابد. شکل ۳-ج نمای سه بعدی از این چیدمان را نشان می‌دهند.

جدول ۲- تعداد و ابعاد مش‌های در نظر گرفته‌شده

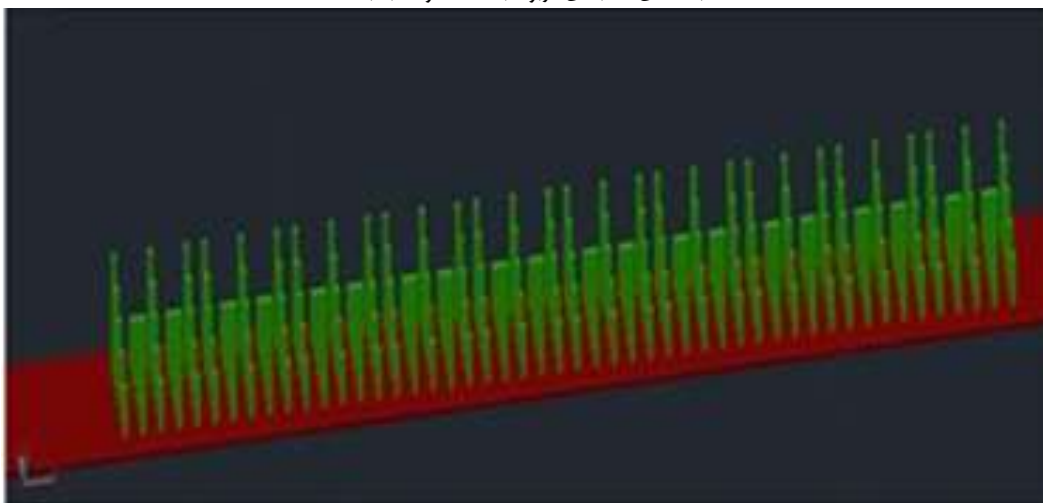
n	ابعاد شبکه اصلی (m)	ابعاد شبکه فرعی (m)	تعداد کل سلول‌های شبکه	خطای میانگین (درصد)
۱	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۹۰۴۱۸۶	۱۵/۴
۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۲	۲۷۸۵۳۲۰	۵/۱
۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۳۵۷۹۷۲۰	۲/۵



الف- نمای سه بعدی مربوط به حالت کوتاه به بلند به کوتاه



ب- نمای سه بعدی مربوط به حالت کوتاه به بلند

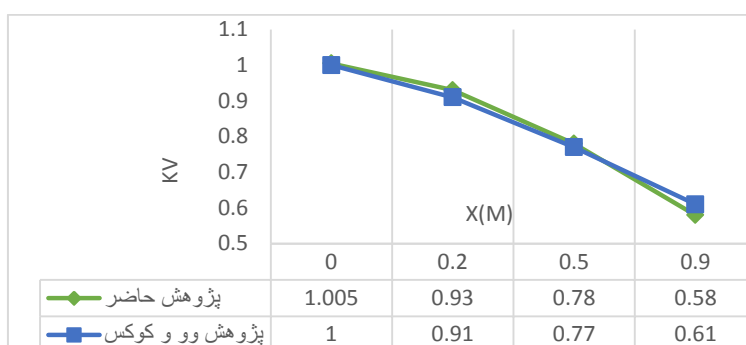


ج- نمای سه بعدی مربوط به حالت زیگزاگ
شکل ۳- نمای سه بعدی چیدمان پوشش گیاهی

جدارها صرف نظر شده است. این شکل که مهمترین نتیجه گیری در پژوهش حاضر می باشد، در واقع نشان دهنده ی نحوه ی میرایی امواج پس از ورود به محدوده ی پوشش گیاهی و شدت استهلاک ناشی از پوشش گیاهی بدون در نظر گرفتن اطاقک کف و دیواره است. در شکل ۹ ارتفاع امواج در چهار نقطه ی $X=0$ ، $X=0/2$ ، $X=0/5$ و $X=0/9$ ؛ اندازه گیری شده است. پس از استخراج این مقادیر از تحقیقات وی چنگ وو و دنیل تی کوکس، و نیز محاسبه ی ارتفاع به روش CFD، مقادیر خطا محاسبه شده. این مقادیر در جدول ۳ ارائه شده است.

$$K_v = \frac{H(x)}{H_s} \quad (1)$$

نتایج آزمایش به صورت ارائه شده در شکل ۴ می باشد. شکل ۴ نحوه ی تغییر پارامتر انتقال (K_v) را در چهار نقطه ی اندازه گیری شده نشان می دهد. نمودار مربعی شکل اندازه گیری هایی است که توسط وی چنگ وو و دنیل تی کوکس در آزمایشگاه مکانیک سیالات دانشگاه اریگان و بر اساس حالت موج شماره ۲ طبق جدول ۱ اندازه گیری شده اند و نمودار لوزی شکل اندازه گیری هایی است که به روش CFD اندازه گیری شده اند. در این اندازه گیری از اصطکاک کف و



شکل ۴- مقایسه نتایج مطالعات (Wu and Cox (2015)، با نتایج حاصل از پژوهش حاضر

جدول ۳- محاسبه ی میزان خطا در پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش (Wu and Cox (2015)

میزان خطا %	نتایج Wu and Cox (2015)	نتایج پژوهش حاضر	نقاط اندازه گیری	شماره نقاط
۰/۵	۱	۱/۰۰۵	۰	۱
۳/۲۹	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۲	۲
۱/۲۹	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۵	۳
۴/۹۱	۰/۶۱	۰/۵۸	۰/۹	۴

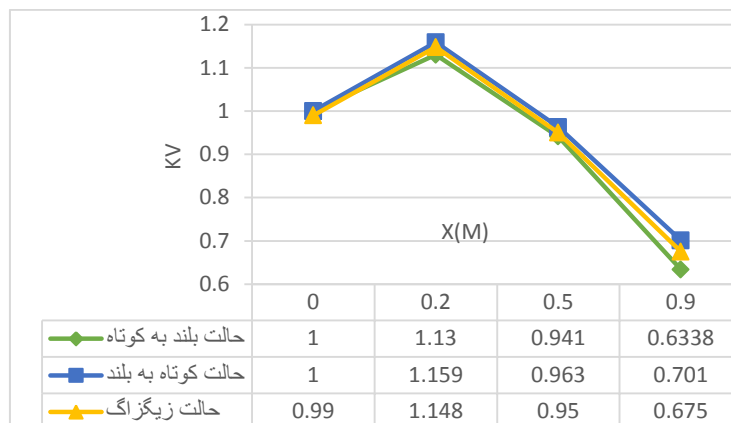
موج شماره ۱

شکل ۵، اثر سه حالت چیدمان ارتفاعی بلند به کوتاه، کوتاه به بلند و زیگزاگ را بر میرایی موج شماره ۱ نشان می دهد. در این حالت مشاهده می شود که بیشترین میرایی مربوط به حالت بلند به کوتاه، و پس از آن حالت زیگزاگ دارای بیشترین میرایی می باشد و نیز مشاهده می شود که حالت کوتاه به بلند کمترین میرایی را سبب می شود. همچنین در اولین بازه ی اندازه گیری، مشاهده می شود که موج اندکی افزایش ارتفاع می دهد، که این امر به دلیل اصل پیوستگی می باشد. این تغییر در تمامی چیدمان ها مشاهده می شود.

همینطور که در جدول ۳ مشاهده می شود، تفاوت مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه توسط وو و کوکس (Wu and Cox, 2015) و مقادیر محاسبه شده به روش CFD تفاوتی ناچیز و کمتر از ۵٪ را نشان می دهد. با استناد به این موضوع و اطمینان از دقت مدل مورد استفاده، می توان با استفاده از این مدل به بررسی اثر چینش هندسی پوشش گیاهی با ارتفاع متغیر بر میرایی امواج پرداخت.

نتایج و بحث

با توجه به جدول ۱، در این پژوهش چهار موج مختلف در نظر گرفته شد و برای هر طول موج هر سه حالت چیدمان مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۵- اثر پوشش گیاهی بر پارامتر Kv تحت موج شماره ۱

شده است. شبیه سازی و نتایج حاصل از آن به صورت شکل ۶ می-باشد. شکل ۶، اثر سه چیدمان ارتفاعی بلند به کوتاه، کوتاه به بلند و زیگزاگ، بر میرایی موج شماره ۲ را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل بیان شده است، چیدمان حالت بلند به کوتاه منجر به بیشترین میرایی از بین سه حالت موجود می‌شود، و کمترین میرایی توسط چیدمان حالت کوتاه به بلند اتفاق می‌افتد. در این حالت، حداقل مقدار پارامتر Kv که موج در عبور از پوشش به آن می‌رسد، برابر ۰/۶۴۱ می‌باشد، که این مقدار مربوط به چیدمان ارتفاعی فرعی بلند به کوتاه و در انتهای پوشش می‌باشد و حداکثر مقدار پارامتر Kv، به ازای چیدمان ارتفاعی کوتاه به بلند می‌باشد، که این مقدار در دومین نقطه-ی اندازه‌گیری و برابر با ۱/۱۶۲ می‌باشد. نتایج مربوط به درصد میرایی مربوط حالت های فرعی حالت منظم با فواصل یکسان در جدول ۶ ذکر شده است.

در جدول ۷، مشاهده می‌شود که همان الگوی میرایی تحت اثر موج شماره ۱، در این حالت نیز تکرار شده و بیشترین و کمترین میرایی به ترتیب تحت چیدمان‌های بلند به کوتاه و کوتاه به بلند انجام می‌شود.

موج شماره ۳

در این حالت با انتخاب موج شماره ۳ به عنوان موج مبنا، این سه چیدمان ارتفاعی به ترتیب مورد بررسی قرار گرفت. این موج که از نوع ایری می‌باشد، ارتفاع و پرپود و سایر ویژگی های آن در جدول ۱ ذکر شده است. شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن به صورت شکل ۷ می-باشد. همانطور که در شکل ۷ مشخص است، تحت این موج، حداقل مقدار پارامتر Kv که موج در عبور از پوشش به آن می‌رسد، برابر ۰/۶۴۷ می‌باشد، که این مقدار مربوط به چیدمان ارتفاعی بلند به کوتاه و در انتهای پوشش می‌باشد و حداکثر مقدار پارامتر Kv، به ازای چیدمان ارتفاعی کوتاه به بلند می‌باشد، که این مقدار در دومین نقطه-ی اندازه‌گیری و برابر با ۰/۱۶۸ می‌باشد. در این حالت نیز بیشترین

با توجه به شکل ۵، حداقل مقدار پارامتر Kv که موج در عبور از پوشش به آن می‌رسد، برابر ۰/۶۳۴ می‌باشد، که این مقدار مربوط به چیدمان ارتفاعی بلند به کوتاه و در انتهای پوشش می‌باشد. همچنین حداکثر مقدار پارامتر Kv، به ازای چیدمان ارتفاعی کوتاه به بلند می-باشد، که این مقدار در دومین نقطه‌ی اندازه‌گیری و برابر با ۱/۱۵۹ می‌باشد. ارتفاع موج در هر نقطه‌ی اندازه‌گیری، از حاصلضرب پارامتر Kv در ارتفاع اولیه موج بدست می‌آید. برای درک بهتر از میرایی برای هر حالت فرعی، پارامتر درصد میرایی مطابق رابطه‌ی (۲) تعریف می-شود:

$$POD = (1 - K_v) \times 100 \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، POD درصد میرایی می‌باشد و Kv برابر مقدار این پارامتر در آخرین نقطه‌ی اندازه‌گیری است. نتایج مربوط به درصد میرایی مربوط چیدمان ارتفاعی در اثر موج شماره ۱ در جدول ۵ ذکر شده است.

جدول ۵- درصد میرایی تحت اثر موج ۱

چیدمان	POD(درصد)
حالت بلند به کوتاه	۳۶/۶۲
حالت کوتاه به بلند	۲۹/۹۰
حالت زیگزاگ	۳۲/۵۰

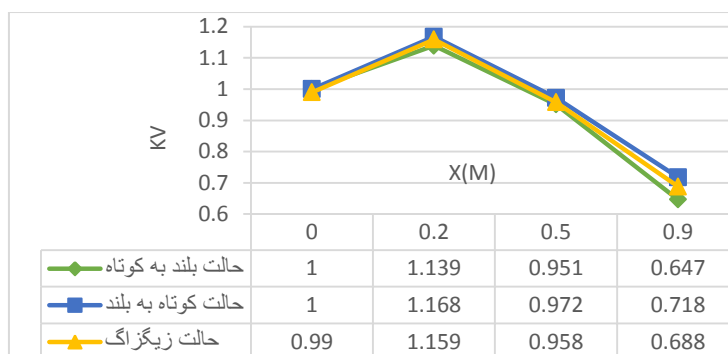
همانطور که در جدول ۵ مشخص است، بیشترین درصد میرایی مربوط به حالت چیدمان ارتفاعی بلند به کوتاه، و کمترین درصد مربوط به چیدمان ارتفاعی کوتاه به بلند می‌باشد.

موج شماره ۲

در این حالت با انتخاب موج شماره ۲ به عنوان موج مبنا، این سه چیدمان ارتفاعی به ترتیب مورد بررسی قرار گرفت. این موج از نوع ایری می‌باشد و ارتفاع، پرپود و سایر ویژگی‌های آن در جدول ۱ ذکر

درصد میرایی مربوط به این چیدمان‌ها تحت موج شماره ۳ در جدول ۷ ذکر شده است.

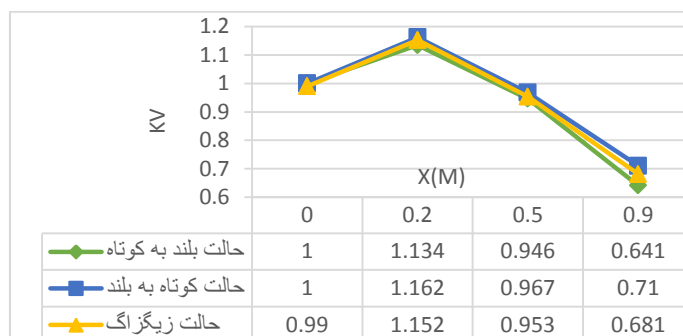
میرایی مربوط به چیدمان ارتفاعی بلند به کوتاه و کمترین میرایی مربوط به چیدمان ارتفاعی کوتاه به بلند می‌باشد. نتایج مربوط به



شکل ۶- اثر پوشش گیاهی بر پارامتر Kv تحت موج شماره ۲

جدول ۶- درصد میرایی تحت اثر موج ۲

چیدمان	POD(درصد)
حالت بلند به کوتاه	۳۵/۹
حالت کوتاه به بلند	۲۹
حالت زیگزاگ	۳۱/۹



شکل ۷- اثر پوشش گیاهی بر پارامتر Kv تحت موج شماره ۳

جدول ۷- درصد میرایی تحت اثر موج ۳

چیدمان	POD(درصد)
حالت بلند به کوتاه	۳۵/۳
حالت کوتاه به بلند	۲۸/۲
حالت زیگزاگ	۳۲/۲

چیدمان‌های این پژوهش به ترتیب مورد بررسی قرار گرفت. این موج که از نوع ابری می‌باشد، ارتفاع و پریود و سایر ویژگی‌های آن در جدول شماره ۱ ذکر شده است. شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن به صورت شکل ۸ می‌باشد. بر اساس شکل ۸، حداقل مقدار پارامتر Kv که موج در عبور از پوشش به آن می‌رسد، برابر ۰/۶۴۹ می‌باشد، که این مقدار مربوط به چیدمان ارتفاعی بلند به کوتاه و در انتهای پوشش

طبق جدول ۷، مشاهده می‌شود که بیشترین میرایی مربوط به چیدمان کوتاه به بلند و کمترین آن مربوط به چیدمان کوتاه به بلند می‌باشد.

حالت موج شماره ۴

در این حالت با انتخاب موج شماره ۴ به عنوان موج مینا،

ارتفاعی بلند به کوتاه و کمترین میرایی مربوط به چیدمان ارتفاعی کوتاه به بلند می‌باشد. نتایج مربوط به درصد میرایی مربوط به این سه چیدمان ارتفاعی در جدول ۸ ذکر شده است.

می‌باشد و حداکثر مقدار پارامتر K_v ، به ازای چیدمان ارتفاعی کوتاه به بلند می‌باشد، که این مقدار در دومین نقطه‌ی اندازه‌گیری و برابر با $1/171$ می‌باشد. در این حالت نیز بیشترین میرایی مربوط به چیدمان



شکل ۸- اثر پوشش گیاهی بر پارامتر K_v تحت موج شماره ۴

جدول ۸- درصد میرایی تحت اثر موج ۴

چیدمان	POD(درصد)
حالت بلند به کوتاه	۳۵/۱
حالت کوتاه به بلند	۲۸
حالت زیگزاگ	۳۰/۹

آن ارتفاع موج کاهش می‌یابد، تا در آخرین نقطه‌ی اندازه‌گیری که همان نقطه‌ی $X=0/9$ m می‌باشد به حداقل مقدار خود می‌رسد. با شروع فرآیند تابیدن موج به پوشش، و پس از برخورد موج به اولین ساقه‌های قرار گرفته در کانال، افزایش در ارتفاع موج رخ خواهد داد. این پدیده به دلیل اصل پیوستگی جریان می‌باشد و ارتباط مستقیمی با مساحت قسمتی از ساقه‌ها که در معرض حرکت موج و جریان قرار می‌گیرند، دارند. این مساحت که سطح ممانعت جانبی نام دارد عامل بسیار مهمی در میرایی امواج محسوب می‌شود. با دقت در نتایج، می‌توان مشاهده کرد که اختلاف موجود میان چیدمان‌های هندسی مختلف که در واقع همان اختلاف در سطح ممانعت جانبی پوشش در هر مقطع می‌باشند، سبب تغییر در میزان میرایی و استهلاک امواج می‌شود. با بررسی نمودارهای حاصل از نتایج می‌توان دریافت که در لحظه‌ی برخورد موج به پوشش، انرژی موج حداکثر میزان خود را دارد و به مرور موج با گذر از پوشش و از دست دادن مقداری از انرژی خود، اثر سطح ممانعت جانبی بیشتر و واضح‌تر خواهد بود. از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که برای دستیابی به حداکثر میرایی در پوشش گیاهی با ارتفاع متغیر لازم است که حداکثر سطح ممانعت جانبی در ابتدای پوشش و در مواجهه با حداکثر انرژی موج باشد. نتایج بدست‌آمده از پژوهش حاضر و نیز اطلاعات بدست‌آمده از پژوهش‌ها و و کوکس نشان می‌دهند که با مدیریت سطح ممانعت جانبی از

در جدول ۸ مشاهده می‌شود که بیشترین و کمترین میرایی به ترتیب مربوط به چیدمان بلند به کوتاه و کوتاه به بلند می‌باشد.

نتیجه‌گیری

با انتخاب چهار حالت موج متفاوت و سه چیدمان ارتفاعی مختلف، شبیه‌سازی بالا انجام شده است. در هر چیدمان اندازه‌گیری‌ها در چهار نقطه‌ی مشترک و یکسان برای ارتفاع موج انجام شده و در نهایت با بدست آوردن ضریب K_v ، نسبت میرایی موج در اثر وجود پوشش در طول پوشش گیاهی به صورت شکل‌های بالا ارائه شده است. با دقت در نتایج، می‌توان دریافت که تغییر در نوع چیدمان هندسی پوشش گیاهی منجر به تغییر در میرایی امواج رسیده به ساحل می‌شود. این میرایی علاوه بر چیدمان هندسی پوشش مورد بررسی، به عوامل دیگر همچون ضخامت ساقه‌ها، انعطاف‌پذیری، تراکم، ارتفاع ساقه‌ها و عرض پوشش بستگی دارد که این موارد از موضوع این پژوهش خارج می‌باشند. با برخورد موج به پوشش، از آنجایی که این ساقه‌ها دارای سطحی در برابر جریان هستند، لذا طبق قانون پیوستگی، سطح موجود جهت عبور جریان کاهش یافته و در نتیجه ارتفاع موج و پارامتر K_v کمی افزایش می‌یابد. و پس از آنکه موج مقدار قابل توجهی از انرژی خود را از دست داد، مشاهده می‌شود که پارامتر K_v و به تبع

- Cavallaro L., Re, C.L., Paratore, G., Viviano, A. and Foti, E. 2010. Response of Posidonia oceanic to wave motion in shallowwaters: Preliminary experimental results. Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering. Coastal Engineering Research Council. 1-10.
- Cook, H.L. and Campbell, F.B. 1939. Characteristics of some meadow strip vegetation. Agricultural Engineering. 20:345-348.
- Cooper, N.J. 2005. Wave dissipation across intertidal surfaces in the Wash Tidal inlet, Eastern England. Journal of Coastal Research. 21(1): 28-40.
- Dean, R.G. 1979. Effects of vegetation on shoreline erosional processes. Wetland Function and Values: The State of Our Understanding. 1: 415-426.
- Dean, R.G., and Dalrymple, R.A. 1991. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientist. World Scientific Publishing. Singapore.
- Dubi, A. 1995. Damping of water waves by submerged vegetation: A case study on Laminaria hyperborea. PhD thesis. University of Trondheim, the Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.
- Fathi Moghadam, M., Drikundi, K.h., Masjidi, A. and M. 2012. Investigation of the Effect of Vegetation Density and Flexibility on Roughness Coefficients in Riverside and Flood Plains, Iranian Water Resources Research Quarterly, Year 8, Issue 2, Fall 91.
- Fathi Moghadam, M. and Zaraei, M. 2016. Investigation of the Effect of Coastal Vegetation on the Damping of Destructive Force of Unbreakable Individual Waves on Shabidar Coasts, Journal of Irrigation and Water Engineering, Year 7, No. 26.
- Furukawa, K., Wolanski, E. and Mueller, H. 1997. Currents and sediment transport in mangrove forests. Estuar Coast Shelf Sci 44:301-310.
- Harada, K. and Imamura, F. 2006. Experimental study on the resistance by mangrove under unsteady flow, Proc. Congress. Asian and Pacific Coastal Engineering Dalia, 984-975.
- Jellilund, R., M. Zeid Ali, L. Nouri Hindi and M. 2012. Investigating the advantages and disadvantages of protection and organization of beaches with vegetation against morphological changes, Fifth National Conference and Specialized Environment Exhibition, 90.
- Journal 629, Guide to the Design and Implementation of a Coastal Protection Structure.
- Kongko, W. 2004. Study on tsunami energy dissipation in mangrove forest, Master Thesis Report, wate University, Japan, 43 pages.
- Kutija, V. and Erduran, K. S. 2003. Quasi-three-dimensional numerical model for flow through طریق تغییر در تراکم یا تغییر در هندسه‌ی پوشش، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای موثر در میرایی امواج در پوشش‌های گیاهی، می‌توان میرایی را تا حد زیادی افزایش داد (Wu and Cox, 2015).
- ### منابع
- خلیلی نفت‌چالی، آ. خزیمه‌نژاد، ح. اکبرپور، ا. ورجاوند، پ. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی تأثیر تراکم پوشش گیاهی بر مشخصه‌های جریان غلیظ. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۹ (۱): ۸۳-۹۵.
- زارعی، م. فتحی‌مقدم، م. داوودی، ل. ۱۳۹۵. بررسی اثر پوشش گیاهی ساحلی بر میرایی نیروی مخرب امواج منفرد ناشکنا در سواحل شبیدار. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران. ۷ (۲۶): ۷۵-۶۲.
- گرمئی، ا. امامی، ح. خراسانی، ر. ۱۳۹۶. اثر تراکم سه نوع پوشش گیاهی بر میزان رواناب و رسوب در حاشیه شهر مشهد. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱ (۱): ۲۰-۱۱.
- فضلی، س. نور، ح. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی و ارزیابی اثر سناریوهای مختلف درصد پوشش گیاهی بر فرسایش خاک. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱ (۴): ۵۷۱-۵۶۲.
- قنبری عدیوی، ا. فتحی‌مقدم، م. ۱۳۹۳. مروری بر تحقیقات استهلاک و میرایی امواج دریا از طریق پوشش گیاهی ساحلی. فصلنامه علوم و فناوری دریا. ۱۸ (۷۰): ۶۲-۵۴.
- معمدی‌نژاد، ع. فتحی‌مقدم، م. زارعی، م. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی اثر پوشش گیاهی ساحلی بر کاهش نیروی امواج شکنا. دهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- میرزاخانی، گ. قنبری عدیوی، ا. فتاحی‌نافچی، ر. ۱۳۹۸. میرایی موج توسط پوشش گیاهی صلب در سواحل. دومین همایش ملی مدیریت منابع طبیعی با محوریت آب، سیل و محیط زیست. دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران.
- Asano, T. S. Sutsui, T. and Sakai.T. 1988. Wave damping characteristics due to seaweed. Proceedings of the 35th Coastal Engineering Conference in Japan. JSCE. 138-142 (in Japanese).
- Asano, T., Deguchi, H. and N. Kobayashi. 1992. Interactions between water waves and vegetation. Proceedings of the 23rd International Conference on Coastal Engineering. ASCE. 2710-2723.
- Augustin, L.N., Irish, J.L. and Lynett, P. 2009. Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near emergent wetland vegetation. Coastal Engineering. 56(3): 332-340.

Division, ASCE. 99(5):739-814.

Wu, W.C. and Cox, D, T. 2015. Effects of Vertical Variation in Vegetation Density on Wave Attenuation. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Volume 142 Issue 2.

flexible, rigid, submerged and non-sub merged vegetation. Journal of Hydro informatics. 35(3): 189-202.

Li, R.M. and Shen, H.W. 1973. Effect of tall vegetations on flow and sediment. Journal of the Hydraulics

Study of the Effect of Changing the Elevation of Vegetation with Regular Layout on Wave Reduction using Flow-3D Numerical Model

S.A. Ghaheri Nejad¹, M. Behdarvandi Askar^{*2}, M. Ansari Ghojghar³, E. Parsi⁴

Recived: Nov.17, 2020

Accepted: Jan.12, 2021

Abstract

The development of water waves through submerged and non-submerged vegetation is accompanied by a loss of energy through the resistive force of the vegetation, resulting in a decrease in wave height. Wave damping by vegetation is a function of cover characteristics such as geometry and structure, immersion ratio, density, hardness, and spatial arrangement, as well as wave conditions such as input wave height, duration, and wave direction. In the present study, the effect of geometric arrangement of vegetation with variable height on wave damping has been investigated using the Flow 3D numerical model. For this purpose, a channel with a length of 480 cm and a width of 10.8 cm, which has been previously used by Cox and Wu (2015) to study the effect of plant density with variable height on wave damping, is modeled. The operation of the three arrangements, including long to short arrangement, short to long arrangement, and zigzag arrangement, is examined under four different waves, all of which are linear waves. It should be noted that in this study, wave height is considered as a damping index. The results obtained by measuring the height of the waves at four different points along the channel show that the behavior of the waves in dealing with different arrangements follows a fixed pattern and also changes in the geometry of the vegetation can greatly lead to Increase the damping of the waves. The results show that a change in height arrangement can cause a change in damping of up to 7.1%.

Keywords: Geometric layout, Green belt, Vegetation, Wave

1- M.Sc. Graduate, hydraulic Structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran

2- Assistant Professor, Department of Offshore Structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran

3- Ph.D. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Study Expert, Arvand Water and Energy Consulting Engineers Company, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: sazehenteghal@yahoo.com)

مقاله علمی-پژوهشی

تأثیر شکل‌های مختلف آبشکن منفرد بر آبستگي تکیه‌گاه پل در کانال مرکب

صمد امامقلی‌زاده^۱، امین ناظری^{۲*}، خلیل ازدری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴

چکیده

وقوع آبستگي از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده پایداری تکیه‌گاه‌های پل احداث‌شده بر روی رودخانه‌ها است. اکثر تکیه‌گاه پل‌ها در دشت سیلابی قرار گرفته‌اند. در پژوهش حاضر به بررسی اثر چهار شکل مختلف از آبشکن منفرد شامل آبشکن‌های ساده، T شکل، L شکل با زبانه پایین‌دست و L شکل با زبانه بالادست بر حداکثر عمق آبستگي تکیه‌گاه پل واقع در دشت سیلابی پرداخته شده است. این پژوهش بر روی فلوم مستطیلی شکل به عرض ۱ متر، طول ۱۲ متر و ارتفاع ۶۰ سانتیمتر صورت گرفت. کانال مرکب به صورت متقارن و مستطیلی با عرض کانال اصلی ۲۰ سانتی‌متر و عرض سیلاب‌دشت‌ها ۴۰ سانتی‌متر ساخته شد. آبشکن‌ها با سه طول ۴، ۸ و ۱۲ سانتی‌متر، در فاصله‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۲۸ و ۳۲ سانتی‌متر از تکیه‌گاه ۱۶ سانتی‌متری به صورت منفرد نصب شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد آبشکن‌های ساده، T شکل، L شکل با زبانه پایین‌دست و L شکل با زبانه بالادست حداکثر عمق آبستگي در تکیه‌گاه را به ترتیب ۸۰، ۹۳، ۹۶ و ۷۸ درصد کاهش داده‌اند.

واژه‌های کلیدی: آبستگي موضعی، آبشکن، تکیه‌گاه پل، سیلاب‌دشت، مدل آزمایشگاهی

مقدمه

آبستگي پایه و ۷۲ درصد به علت وقوع آبستگي در تکیه‌گاه بوده است (خزیمه‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به اهمیت موضوع جامعه تحقیقاتی همواره به دنبال پیدا کردن راه‌حل‌های علمی برای به حداقل رساندن اثرات چشمگیر آبستگي بر تکیه‌گاه پل‌ها بوده‌اند (EL-Ghorab, 2013). به‌منظور کاهش میزان آبستگي و مهار آن معمولاً از دو روش کلی استفاده می‌شود. در روش اول پایداری بستر با استفاده از سنگ‌چین حفاظتی (ریپر) یا قطعات پیش‌ساخته بتنی و گابیون افزایش داده می‌شود و در روش دوم الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه پل با تغییر در هندسه تکیه‌گاه و ایجاد موانع در مسیر جریان، مانند استفاده از آبشکن محافظ، طوقه، صفحه مستغرق و گروه شمع، تغییر داده می‌شود (محمدپور و شفاعی‌بجستان، ۱۳۹۶). کارایی و اثربخشی هر کدام از روش‌های ذکر شده در تحقیقات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود. کورکت و همکاران به بررسی نقش کیسه‌های خاک در کاهش آبستگي پیرامون تکیه‌گاه پل پرداخته و دستورالعمل‌های طراحی شامل محل قرارگیری کیسه‌های خاک و اندازه آن‌ها را پیشنهاد کردند (Korkut et al., 2007). کاردوسو و همکاران حفاظت دماغه تکیه‌گاه با دیوارهای عمودی را در برابر آبستگي بررسی کردند. هدف از این پژوهش طراحی پوشش ریپر به‌منظور حفاظت

یکی از عمده‌ترین مشکلات سازه‌هایی نظیر پل‌ها که پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های آن‌ها در رودخانه‌های قابل فرسایش قرار گرفته است، آبستگي ایجادشده در اطراف تکیه‌گاه و پایه‌ها است. پس از احداث پل در مسیر رودخانه، پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل به صورت یک مانع عمل کرده و باعث تغییر مسیر جریان در محل برخورد با سازه و توسعه جریان‌های گردابی می‌شوند. این گرداب‌ها ذرات بستر اطراف سازه را از جای حرکت داده و آن‌ها را در مسیر جریان رودخانه قرار می‌دهند، این عمل در نهایت باعث ایجاد و توسعه حفره آبستگي در محل استقرار تکیه‌گاه و پایه پل خواهد شد (ناظری، ۱۳۹۳). داده‌ها بیانگر این موضوع هستند که آبستگي تکیه‌گاه در مقایسه با آبستگي پایه مشکلات بیشتری را ایجاد خواهد نمود (Hong and Abid, 2019). طبق گزارشی که سازمان بزرگراه‌های ایالتی آمریکا در سال ۱۹۷۳ منتشر کرد از ۳۸۳ مورد تخریب پل ۲۵ درصد به علت

۱- دانشیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران
۳- دانشیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران
(* نویسنده مسئول: Email: aminnazeri97@gmail.com)

آبشستگی مؤثر هستند. خسروی نیا و همکاران کارایی طوقه‌های دوزنقه‌ای شکل را در کاهش میزان آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد به‌طور کلی کارگذاری طوقه موجب کاهش ۹ تا ۳۷ درصدی آبشستگی در تکیه‌گاه می‌شود. همچنین این تحقیق نشان داد افزایش عرض طوقه نه تنها باعث کاهش حداکثر عمق آبشستگی در تکیه‌گاه می‌شود بلکه زمان وقوع آبشستگی را نیز به تأخیر می‌اندازد (Khosravinia et al., 2018). صحت و همکاران تأثیر شکاف‌های همگرا و واگرا را بر میزان آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد وجود شکاف در بدنه تکیه‌گاه آبشستگی در اطراف آن را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. آبشستگی در تکیه‌گاه‌های دارای شکاف‌های همگرا و واگرا به ترتیب ۴۱ و ۱۷ درصد کمتر از آبشستگی در تکیه‌گاه بدون شکاف است (Sehat et al., 2020). ذوالقدر و شفاعی بجستان تأثیر کارگذاری المان‌های شش‌پایه را بر آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که المان‌های شش‌پایه به‌طور قابل توجهی می‌توانند آبشستگی را در شرایط جریان مختلف کاهش دهند. با یک آرایش بهینه، این المان‌ها آبشستگی را تا مقدار ۱۰۰ درصد کاهش می‌دهند (Zolghadr and Shafai Bejestan, 2020). کارایی هرکدام از روش‌های ذکرشده در کاهش حداکثر عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه به‌طور خلاصه در جدول ۱ نشان داده شده است.

تکیه‌گاه از آبشستگی در شرایط آب زلال بود. آن‌ها دریافتند که با افزایش طول تکیه‌گاه فاصله بین نقطه حداکثر آبشستگی و تکیه‌گاه افزایش می‌یابد و نیز زاویه موقعیت عمیق‌ترین نقطه آبشستگی نزدیک ۳۰ درجه است. شکل تکیه‌گاه و انقباض جریان تأثیری در میزان حداقل پوشش ریپرپ حول تکیه‌گاه ندارد (Cardoso et al., 2010). خادمی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی عملکرد صفحه‌ی مستغرق متصل به تکیه‌گاه در کاهش آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل با شکل مستطیلی پرداختند. نتایج آزمایش‌های این محققان نشان داد این سازه با ایجاد منطقه‌ی کم‌سرعت پیرامون تکیه‌گاه و مهار گرداب‌های اولیه، نقش مؤثری در کاهش آبشستگی دارد. خزیمه‌نژاد و همکاران (۱۳۹۵) عملکرد طوقه L شکل را در کاهش آبشستگی موضعی پیرامون تکیه‌گاه مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد طوقه‌ها بستر را در مقابل جریان‌های گردابی اطراف تکیه‌گاه محافظت کرده و آبشستگی را تا میزان ۶۰ درصد کاهش می‌دهند. امامقلی‌زاده و نوحانی (۱۳۹۶) با انجام آزمایش‌هایی تأثیر پره‌های مستغرق در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه پل واقع در دشت سیلابی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد پره‌های مستغرق موجب کاهش آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه و همچنین حرکت حفره آبشستگی به سمت مرکز کانال شده است. شهسواری و حیدرپور (۱۳۹۷) تأثیر زبری‌های موضعی را بر کنترل و کاهش آبشستگی تکیه‌گاه پل بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که این زبری‌ها در کاهش عمق آبشستگی و همچنین تأخیر در روند

جدول ۱- کارایی روش‌های کاهش حداکثر عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه

محقق	روش مورد استفاده	حداکثر کارایی (درصد)
کورکت و همکاران (۲۰۰۷)	کیسه‌های خاکی و بتنی	۱۰۰
خیراله خادمی و همکاران (۱۳۹۳)	صفحات مستغرق متصل به تکیه‌گاه	۸۰
خزیمه‌نژاد و همکاران (۱۳۹۵)	طوقه L شکل	۶۰
امامقلی‌زاده و نوحانی (۱۳۹۶)	پره‌های مستغرق	۸۷
شهسواری و حیدرپور (۱۳۹۷)	زبری‌های موضعی	۴۶
خسروی نیا و همکاران (۲۰۱۸)	طوقه‌های دوزنقه‌ای شکل	۳۷
صحت و همکاران (۲۰۲۰)	شکاف‌های همگرا و واگرا	۵۰
ذوالقدر و شفاعی بجستان (۲۰۲۰)	المان‌های شش‌پایه	۱۰۰

(al., 2013).

در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی در رابطه با تأثیر انواع آبشکن بر کاهش آبشستگی تکیه‌گاه‌های پل انجام گرفته است. صانعی و همکاران (۱۳۹۱) تحقیقاتی را در مورد بررسی اثر آبشکن از جهت فاصله با دماغه و طول آن بر میزان آبشستگی دماغه تکیه‌گاه پل در کانال مرکب پل انجام دادند. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان داد که استفاده از آبشکن محافظ تأثیر مثبتی در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه دارد. اژدری و همکاران (۱۳۹۶) به مطالعه تأثیر قرارگیری

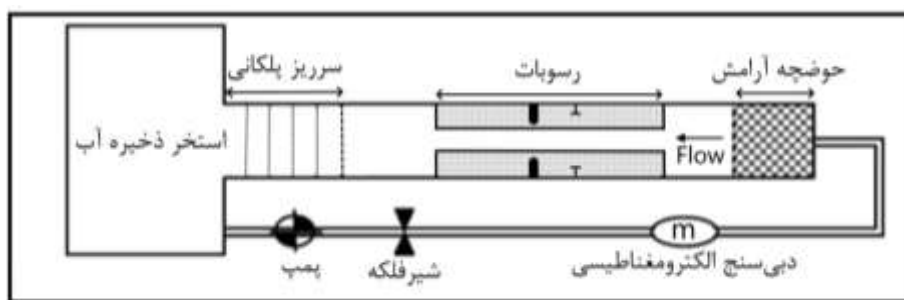
از جمله روش‌هایی که با تغییر در الگوی جریان موجب کاهش آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه می‌شود احداث آبشکن در بالادست تکیه‌گاه است. آبشکن‌ها به شکل دیواره‌هایی هستند که به‌صورت سری (چند آبشکن) و یا منفرد در عرض رودخانه و با طول مناسب و در اغلب موارد، عمود بر راستای عمومی جریان احداث می‌شوند (ناظری، ۱۳۹۳). آبشکن‌ها در اشکال مختلفی ساخته و مورد استفاده قرار می‌گیرند. رایج‌ترین نوع آبشکن‌ها عبارت‌اند از آبشکن ساده، آبشکن T شکل، آبشکن L شکل و آبشکن چوگانی (Dehghani et

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

به منظور انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌های لازم، کانال و تجهیزات مورد نیاز طراحی و ساخته شد. کانال مورد استفاده دارای طول ۱۲ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر بود. به منظور آرام نمودن جریان ورودی به کانال، یک صفحه مشبک فلزی در فاصله یک متری از ابتدای فلوم به صورت عمودی نصب گردید. به منظور قرائت دبی نیز یک دستگاه دبی‌سنج الکترومغناطیسی مدل PMAG، بر روی لوله رانش نصب و مورد استفاده قرار گرفت. فاصله بین دیواره‌ی بالادست کانال و صفحه مشبک به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر از قطعات سنگی با قطر متوسط ۵ سانتی‌متر پوشیده شد. آشفتگی جریان آب که از پمپ سانتریفوژ وارد می‌شد با ورود به این محفظه و برخورد با قطعات سنگی و صفحه مشبک گرفته شده و جریان به آرامی وارد فلوم می‌شد. عمق آب در کانال نیز با استفاده از تیرک‌های چوبی نصب شده در انتهای کانال تنظیم می‌شد. قسمت‌های مختلف مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

آبشکن سرسپری نامتقارن بر آبشستگی تکیه‌گاه پل واقع در دشت سیلابی پرداختند. نتایج تحقیق این پژوهشگران نشان داد آبشکن سرسپری نامتقارن به میزان قابل توجهی میزان آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه را کاهش می‌دهد. سعادت‌نیا و همکاران (۱۳۹۷) نیز با انجام آزمایش‌هایی تأثیر زاویه قرارگیری آبشکن ساده بر کاهش آبشستگی تکیه‌گاه پل را مورد بررسی قرار دادند. تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد در صورتی که زاویه قرارگیری آبشکن با جداره ۹۰ درجه باشد آبشکن بیشترین کارایی را در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه دارد. تاکنون تحقیقی که به طور جامع تأثیر آبشکن‌های مختلف بر آبشستگی تکیه‌گاه را در شرایط یکسان مورد مقایسه قرار دهد انجام نشده است لذا در پژوهش حاضر به مقایسه اثر چهار شکل مختلف از آبشکن منفرد (آبشکن‌های ساده، T شکل، L شکل با زبانه پایین‌دست و L شکل با زبانه بالادست) بر حداکثر عمق آبشستگی تکیه‌گاه پرداخته شده است.

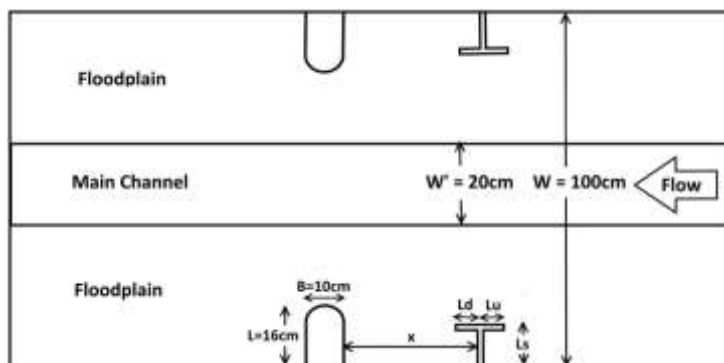


شکل ۱- نمای مدل آزمایشگاهی ساخته شده (پلان)



شکل ۲- اجزای مختلف مدل آزمایشگاهی

درجه یکنواختی رسوبات از ۱/۳ کوچک تر باشد می توان رسوبات را یکنواخت در نظر گرفت (Dey and Barbhuiya., 2005). با توجه به این که ضریب یکنواختی رسوبات استفاده شده برابر با ۱/۲۷ بود رسوبات یکنواخت در نظر گرفته شد. نمای کلی مقطع مرکب و موقعیت قرارگیری تکیه گاه ها و آبشکن ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمای مقطع مرکب

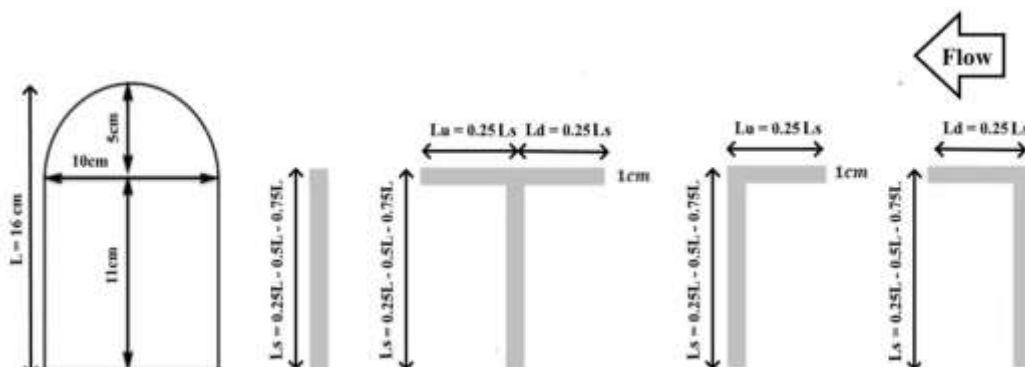
تقسیم بندی شدند. در آزمایش های سری اول یک آبشکن T شکل منفرد با ابعاد و فواصل مختلف در بالادست تکیه گاه نصب شد. در این نوع آبشکن نسبت طول بال آبشکن به طول آبشکن برابر با ۰/۵ بود. پس از مشاهده الگوی جریان در اطراف تکیه گاه و محل شکل گیری جریان چرخشی و نیز با توجه به این که هدف از استفاده آبشکن کاهش هزینه های ساخت تکیه گاه و استفاده از سازه ای مقرون به صرفه است، سه طول ۰/۲۵L، ۰/۵L، و ۰/۷۵L برای آبشکن در نظر گرفته شد (L طول تکیه گاه). در شروع کار آبشکن با فاصله ۰/۲۵L در بالادست تکیه گاه نصب شد که در هر آزمایش این فاصله به میزان ۰/۲۵L افزایش یافت. در آزمایش های انجام شده مشاهده شد که اگر میزان فاصله آبشکن از ۲L بیشتر شود تأثیر آن بر روی سازه پایین دست کاهش می یابد، به همین دلیل حداکثر فاصله آبشکن منفرد از تکیه گاه به ۲L محدود شد. آزمایش ها برای هر طول آبشکن در تمامی فاصله ها تکرار شد. در سری های بعدی آزمایش به ترتیب از آبشکن با شکل های L شکل با زبانه رو به پایین، L شکل با زبانه رو به بالا و آبشکن ساده استفاده شد. طول آبشکن و فاصله نصب آن ها از تکیه گاه مانند آزمایش های سری اول در نظر گرفته شد. در آبشکن های L شکل نسبت طول بال به طول آبشکن برابر با ۰/۲۵ بود. ابعاد تکیه گاه و آبشکن های مورد استفاده در شکل ۴ نشان داده شده است.

طول مقطع مرکب ساخته شده ۶ متر بود که در فاصله ۳ تا ۹ متری از ابتدای کانال نصب گردید. کانال اصلی مقطع مرکب از جنس شیشه و دارای عرض ۲۰ و عمق ۸ سانتی متر بود. دو طرف کانال اصلی به ارتفاع ۱۰ سانتی متر از رسوبات درشت دانه و به ارتفاع ۲۰ سانتی متر بر روی آن ها از رسوبات ریزدانه یکنواخت با قطر متوسط ۱ میلی متر و شیب طولی ۰/۰۱ پوشیده شد. چگالی رسوب ریزدانه برابر با $\rho_s = 2650 \text{ kg / m}^3$ و ضریب یکنواختی آن ۱/۲۷ بود. در صورتی که

ابعاد تکیه گاه و آبشکن های مورد استفاده و سایر پارامترهای مورد آزمایش

بر طبق تحقیقات ملویل، شکل تکیه گاه نقش بسیار مهمی در میزان آبستگي اطراف آن دارد. بیش ترین میزان آبستگي نیز به ترتیب در تکیه گاه های دیوار قائم و تکیه گاه های با دماغه نیم گرد اتفاق می افتد. تکیه گاه های با دماغه نیم دایره در مقایسه با تکیه گاه های دیوار قائم بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند (Melville, 1995). لذا برای انجام آزمایش ها از تکیه گاه با شکل دماغه نیم دایره استفاده شد. تکیه گاه مورد استفاده از جنس ورق گالوانیزه به طول ۱۶ سانتی متر و با شکل دماغه نیم دایره ای به قطر ۱۰ سانتی متر ساخته شد. مبنای انتخاب این طول تکیه گاه این است که به توصیه ملویل برای دستیابی به نتایج دقیق تر، نسبت طول تکیه گاه به عمق جریان باید بین اعداد ۱ و ۲۵ باشد (Melville, 1995). بر همین مبنای و با توجه به عمق جریان، طول ۱۶ سانتی متر برای تکیه گاه در نظر گرفته شد. عرض کوله نیز، بر مبنای عرض جاده عبوری از روی پل و در نظر گرفتن یک مقیاس فرضی برای مدل، انتخاب شد.

برای انجام آزمایش ها از چهار نوع آبشکن T شکل، آبشکن L شکل با زبانه رو به پایین، آبشکن L شکل با زبانه رو به بالا و آبشکن ساده استفاده شد. آبشکن های مورد استفاده نفوذناپذیر بوده و از جنس شیشه با ضخامت ۱۰ میلی متر و به ارتفاع ۳۵ سانتی متر ساخته شدند. به استثنای آزمایش های شاهد، آزمایش ها به چهار سری آزمایش



شکل ۴- ابعاد تکیه‌گاه و آبشکن‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

عمق سنج برداشت شد. عمق آبشستگی در گودترین نقطه حفره آبشستگی به عنوان معیار سنجش میزان آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه مورد استفاده قرار گرفت.

آنالیز ابعادی پارامترهای مورد آزمایش

با توجه به پارامترهای مؤثر بر آبشستگی تکیه‌گاه، می‌توان رابطه ذیل را برای حداکثر عمق آبشستگی تکیه‌گاه با حضور آبشکن تعریف نمود:

$$F(ds, dsc, V, y, W, L, B, B_s, L_s, L_u, L_d, X, S, \nu, \rho, \rho_s, d_{50}, g) = 0 \quad (1)$$

که در آن ds و dsc حداکثر عمق آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه به ترتیب با حضور و بدون حضور آبشکن، V سرعت متوسط جریان، y عمق جریان، W عرض کل کانال، W' عرض کانال اصلی، L طول تکیه‌گاه، B عرض تکیه‌گاه، B_s ضخامت آبشکن، L_s طول آبشکن، L_u طول بال بالادست آبشکن، L_d طول بال پایین دست آبشکن، X فاصله آبشکن از تکیه‌گاه، S شیب مواد بستر، ρ جرم مخصوص آب، ρ_s جرم مخصوص رسوبات بستر، ν لزجت سینماتیکی آب، d_{50} قطر متوسط ذرات بستر، g شتاب گرانش.

با انتخاب سه پارامتر ρ ، V و y به عنوان پارامترهای تکراری و با استفاده از روش π -باکینگهام، پارامترهای رابطه ۱ به پارامترهای بی‌بعد تبدیل شدند که پس از حذف پارامترهای بی‌بعدی که در این پژوهش ثابت بودند و همچنین با ترکیب برخی پارامترهای بدون بعد به صورت ضرب یا تقسیم، در نهایت رابطه ۲ به دست آمد:

$$F\left(\frac{dsc - ds}{dsc}, \frac{Vy}{\nu}, \frac{L_s}{L}, \frac{L_u}{L}, \frac{L_d}{L}, \frac{X}{L}, \frac{V}{\sqrt{gy}}\right) = 0 \quad (2)$$

با توجه به ثابت بودن دبی و عمق جریان در تمامی آزمایش‌ها، دو پارامتر V/\sqrt{gy} و Vy/ν نیز از رابطه ۲ حذف شدند.

با در نظر گرفتن پارامتر $\frac{dsc - ds}{dsc}$ به عنوان متغیر وابسته و حذف

پارامترهای بی‌بعد ثابت، رابطه ۳ برای حداکثر عمق آبشستگی در

برای تعیین مدت زمان انجام آزمایش‌ها در ابتدا یک آزمایش اولیه برای رسیدن به عمق ثابت آبشستگی بدون حضور آبشکن محافظ بر روی تکیه‌گاه انجام شد. در این آزمایش که ۴ ساعت به طول انجامید پس از ۹۰ دقیقه عمق آبشستگی به حدود ۸۵ درصد حداکثر عمق آبشستگی رسید؛ بنابراین مدت زمان انجام آزمایش‌ها ۹۰ دقیقه در نظر گرفته شد.

نحوه انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در آب زلال و شرایط ثابت هیدرولیکی انجام شد. به همین منظور ابتدا با استفاده از معیار شیلدز سرعت بحرانی ذرات بستر تعیین گردید سپس با توجه به دبی انتخابی عمق جریان به گونه‌ای تعیین شد که نسبت سرعت جریان U به سرعت بحرانی U_c کمتر از ۰/۹۵ شده و شرایط آبشستگی آب زلال برقرار شود (Raudkivi, 1998) که با انتخاب دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه برای انجام آزمایش‌ها عمق آب در دشت سیلابی برابر با ۱۰/۵ سانتی‌متر تعیین شد. با توجه به ابعاد کانال و همچنین مشخصات جریان پارامتر عدد رینولدز جریان برابر با ۲۸۰۰۰ و عدد فرود نیز برابر با ۰/۳ به دست آمد.

ابتدا پیش از شروع هر آزمایش سطح رسوبات بستر به طور کامل تسطیح می‌شد، سپس پمپ روشن شده و دبی به طور محدود از داخل کانال اصلی جریان پیدا می‌کرد تا حوضچه آرامش انتهایی (فاصله بین انتهای مقطع مرکب و تیرک‌های سدکننده) پر شود. به این ترتیب آب از بالادست و پایین دست به آرامی وارد سیلاب‌دشت شده تا روی رسوبات به ارتفاع تقریبی ۲۰ سانتی‌متر از آب پوشانده شود. سپس با استفاده شیرفلکه قابل تنظیم نصب شده بر روی پمپ و با مشاهده دبی سنج الکترومغناطیسی به آهستگی به دبی موردنظر رسانده می‌شد. در این حالت ارتفاع تیرک‌های انتهایی تا اندازه‌ای بود که رسوبات موجود در سیلاب‌دشت در این دبی به حرکت درنیاید. با کاهش ارتفاع تیرک‌ها عمق موردنظر تنظیم و آزمایش شروع می‌شد. پس از اتمام آزمایش و تخلیه کامل آب، پروفیل آبشستگی با استفاده از دستگاه

تکیه‌گاه به دست آمد:

$$Pr = F\left(\frac{L_s}{L}, \frac{L_u}{L_s}, \frac{L_d}{L_s}, \frac{X}{L}\right) \quad (3)$$

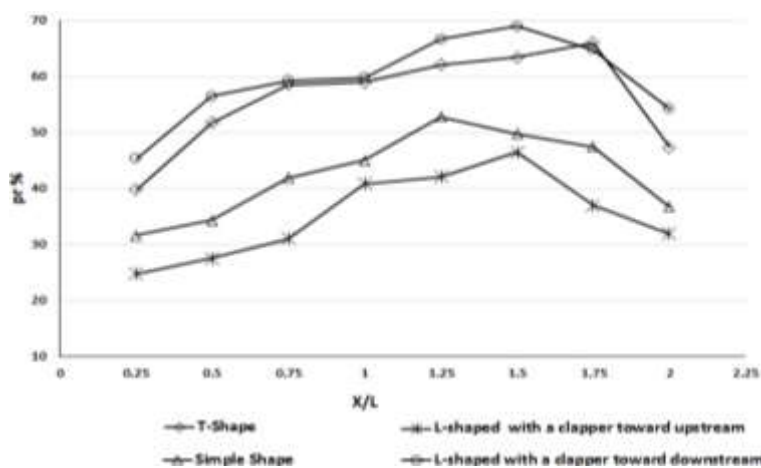
پارامتر Pr درصد کاهش آبستگي یا کارایی آبشکن است و از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$Pr \% = \frac{dsc - ds}{dsc} \times 100 \quad (4)$$

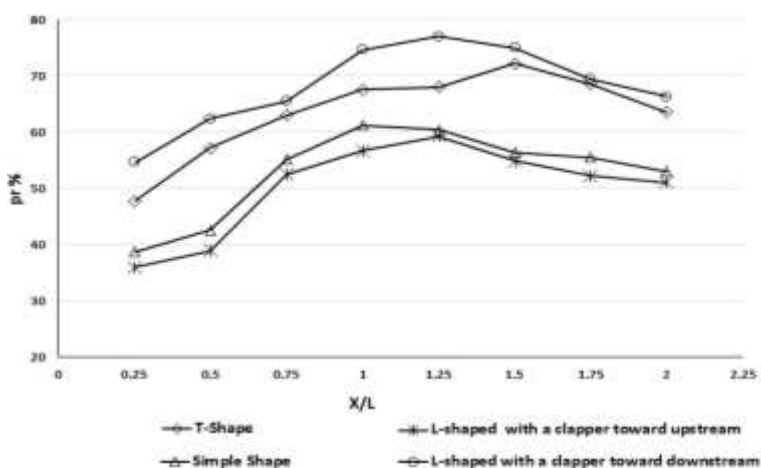
نتایج و بحث

در نمودارهای شکل‌های ۵ تا ۷ تغییرات درصد کارایی آبشکن به ازای تغییرات پارامتر X/L برای شکل‌های مختلف آبشکن نشان داده شده است:

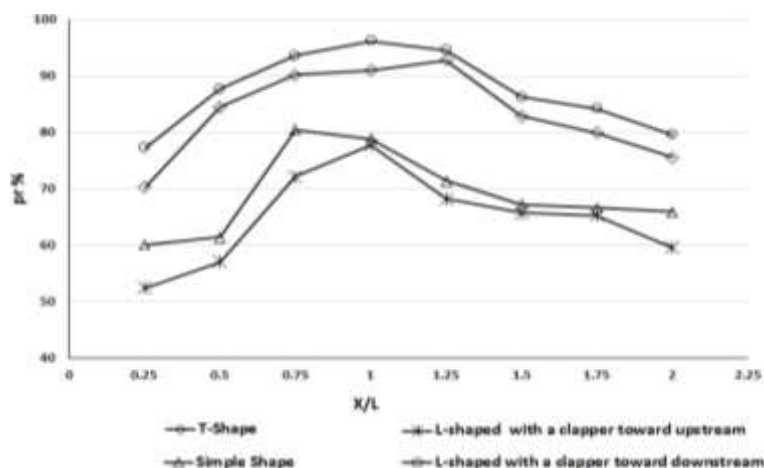
با نگاهی کلی به نمودار شکل‌های ۵ تا ۷ ملاحظه می‌شود که در تمامی ابعاد و شکل‌های آبشکن تغییرات کارایی آبشکن Pr به ازای تغییرات پارامتر X/L یک روند نسبتاً ثابت وجود دارد. به این صورت که در ابتدا افزایش X/L باعث افزایش کارایی آبشکن می‌شود. با افزایش X/L این روند افزایشی ادامه پیدا کرده تا کارایی آبشکن به بالاترین حد خود می‌رسد. سپس پارامتر Pr روند کاهشی به خود گرفته و با افزایش X/L، کارایی آبشکن کاهش پیدا می‌کند. این نتیجه‌گیری را می‌توان به این صورت نیز بیان نمود که با افزایش فاصله بی‌بعد آبشکن از تکیه‌گاه، کارایی آبشکن افزایش می‌یابد تا فاصله‌ای که کارایی به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵- تغییرات درصد کارایی شکل‌های مختلف آبشکن به ازای تغییرات پارامتر X/L در شرایط Ls/L=0.25



شکل ۶- تغییرات درصد کارایی شکل‌های مختلف آبشکن به ازای تغییرات پارامتر X/L در شرایط Ls/L=0.5



شکل ۷- تغییرات درصد کارایی شکل‌های مختلف آبشکن به ازای تغییرات پارامتر X/L در شرایط $L_s/L=0.75$

مرکز کانال حرکت می‌کنند. در واقع وجود آبشکن باعث می‌شود خطوط جریان همگرا شده و به عبارت دیگر جریان منقبض شود. بیشترین حالت انقباض در پایین دست و با یک مقدار فاصله از آبشکن به وقوع می‌پیوندد. پس از آن جریان دوباره شروع به باز شدن کرده و به حالت اولیه خود بازمی‌گردد هر چه میزان انقباض جریان در هنگام برخورد با تکیه‌گاه بیش تر بوده و جریان برخورد کم‌تری با تکیه‌گاه داشته باشد میزان آبستگی بیشتر کاهش می‌یابد. با این توضیح می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که یک آبشکن با طول ثابت در فاصله‌ای بیشترین تأثیر را بر آبستگی تکیه‌گاه خواهد داشت که جریان منحرف شده ناشی از برخورد با آبشکن در هنگام رسیدن به تکیه‌گاه بیشترین انقباض را داشته باشد. این فاصله در واقع همان فاصله X_0 است. با قرارگیری آبشکن در فاصله X_0 از تکیه‌گاه آبستگی در تکیه‌گاه به کم‌ترین میزان خود رسیده و آبشکن بیشترین تأثیر را بر آبستگی تکیه‌گاه دارد. در جدول ۲ بیشترین میزان کارایی آبشکن و همچنین مقدار پارامتر X_0/L در مقادیر مختلف L_s/L برای آبشکن ساده نشان داده شده است.

از این فاصله به بعد با افزایش فاصله، کارایی آبشکن کاهش پیدا کرده و از میزان تأثیر آبشکن بر تکیه‌گاه کاسته می‌شود. در این پژوهش این فاصله که در آن آبشکن بیش‌ترین اثر را بر آبستگی تکیه‌گاه داشته و به ابعاد و شکل آبشکن وابسته است با نماد X_0 نشان داده می‌شود. در ادامه این پژوهش با استفاده از نمودارهای شکل‌های ۵ تا ۷ به بررسی دقیق‌تر تأثیر قرارگیری آبشکن‌های مختلف بر میزان آبستگی تکیه‌گاه می‌پردازیم:

آبشکن ساده

مقدار پارامتر Pr نشان می‌دهد با قرارگیری آبشکن ساده در بالای دست تکیه‌گاه، آبستگی تکیه‌گاه در مقایسه با آزمایش شاهد کاهش یافته است. کم‌ترین میزان کاهش آبستگی $31/6\%$ درصد و بیشترین مقدار آن نیز برابر با $80/5\%$ درصد است. آبشکن ساده با منحرف کردن جریان به سمت ساحل مقابل درواقع خطوط جریان را از تکیه‌گاه و دماغه آن دور کرده و با هدایت آن‌ها به سمت خط مرکزی کانال باعث کاهش میزان آبستگی در تکیه‌گاه می‌شود. خطوط جریان پس از برخورد با آبشکن منحرف شده و به طرف

جدول ۲- مقدار پارامتر X_0/L و حداکثر کارایی آبشکن به ازای طول‌های مختلف آبشکن ساده

پارامتر	$L_s/L=0/75$	$L_s/L=0/5$	$L_s/L=0/25$
X_0/L	$0/75$	۱	$1/25$
حداکثر کارایی آبشکن $Pr\%$	$80/5$	$61/23$	$52/8$

است به بیان دیگر با افزایش طول آبشکن فاصله‌ای که در آن آبشکن تأثیر حداکثری بر آبستگی تکیه‌گاه را دارد کاهش می‌یابد.

آبشکن L شکل با زبانه رو به بالادست

قرارگیری این نوع آبشکن در بالادست تکیه‌گاه آبستگی در

آنچه از بررسی این جدول به دست می‌آید این است که اولاً با افزایش طول آبشکن میزان تأثیر آبشکن بر کاهش آبستگی تکیه‌گاه افزایش پیدا کرده است به طوری که با افزایش پارامتر L_s/L از مقدار $0/25$ به $0/75$ ، حداکثر کارایی آبشکن از $52/8\%$ درصد به $80/5\%$ درصد رسیده است. ثانیاً با افزایش L_s/L ، پارامتر X_0/L کاهش پیدا کرده

قرارگیری در راستای جریان باعث می‌شود جریان پس از برخورد با آبشکن همچنان راستای حرکت خود را حفظ کرده و انحراف کمتری پیدا کند. انحراف کم‌تر جریان برخورد بیش‌تر جریان با تکیه‌گاه و افزایش آبستتگی را به دنبال خواهد داشت.

جدول ۳ بیشترین میزان کارایی و همچنین مقدار پارامتر Xo/L در مقادیر مختلف Ls/L را برای این نوع آبشکن نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقدار پارامتر Xo/L و حداکثر کارایی آبشکن به ازای طول‌های مختلف آبشکن با زبانه بالادست

پارامتر	$Ls/L=0/75$	$Ls/L=0/50$	$Ls/L=0/25$	Xo/L
حداکثر کارایی آبشکن Pr%	۷۷/۸	۵۹/۲	۴۶/۵	۱

با عملکرد آبشکن با بال بالادست باشد اما در عمل همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های ۵ تا ۷ مشخص است نمودار این آبشکن بالاتر از نمودارهای آبشکن‌های ساده و زبانه بالادست قرار دارد. به این معنی که این آبشکن آبستتگی در تکیه‌گاه را بیشتر از دو نوع دیگر کاهش داده است. بااینکه آبشکن ساده و L شکل با بال بالادست در بهترین حالت توانستند آبستتگی را به ترتیب $80/5$ و $77/8$ درصد کاهش دهند آبشکن L شکل با زبانه پایین دست آبستتگی را تا $96/2$ درصد کاهش داده است. علت این افزایش تأثیرگذاری را می‌توان این دانست که بال پایین دست آبشکن باعث ایجاد یک منطقه آرامش و سکون مابین آبشکن و تکیه‌گاه می‌شود. ایجاد این منطقه آرامش بر آبستتگی تکیه‌گاه تأثیر گذاشته و مقدار آن را کاهش می‌دهد؛ بنابراین وجود بال پایین دست برعکس بال بالادست بر عملکرد آبشکن تأثیر مثبت داشته است. در جدول ۴ بیشترین درصد کاهش آبستتگی نسبت به آزمایش شاهد (کارایی آبشکن) و همچنین مقدار پارامتر Xo/L در مقادیر مختلف Ls/L برای این نوع آبشکن نشان داده شده است.

تکیه‌گاه را از $24/7$ تا $77/8$ درصد کاهش داده است. همان‌طور که در شکل‌های ۵ تا ۷ مشخص است نمودار مربوط به این نوع آبشکن پایین‌تر از نمودار آبشکن ساده قرار گرفته است. در نتیجه در مقایسه با آبشکن ساده این نوع آبشکن کارایی کمتری در کاهش آبستتگی تکیه‌گاه داشته است. به بیان دیگر با اضافه شدن یک بال بالادست به آبشکن ساده از میزان تأثیر آبشکن بر آبستتگی تکیه‌گاه کاسته شده است. علت این امر را می‌توان این عامل دانست که بال آبشکن با

همان‌طور که در جدول ۳ می‌بینیم مقادیر پارامتر Xo/L برای آبشکن L شکل با زبانه بالادست در مقایسه با آبشکن ساده افزایش داشته است در واقع حداکثر میزان کارایی این نوع آبشکن در فاصله بیشتری رخ داده است. هرچند وجود بال باعث انحراف و انقباض کمتر جریان پس از برخورد با آبشکن می‌شود اما از طرف دیگر از بازشدگی مجدد جریان جلوگیری کرده و در نتیجه جریان در فاصله دورتری از آبشکن باز شده و به حالت اولیه خود برمی‌گردد.

آبشکن L شکل با زبانه رو به پایین دست

قرار گرفتن آبشکن L شکل با زبانه پایین دست کاهش میزان کاهش آبستتگی در تکیه‌گاه را در پی داشته است. وجود این نوع آبشکن آبستتگی در تکیه‌گاه را از 69 تا $96/2$ درصد نسبت به آزمایش شاهد کاهش داده است. این نوع آبشکن نیز مانند آبشکن L با زبانه بالادست دارای بال بوده و تمامی مواردی که در مورد بال آبشکن بر جریان بیان شد در مورد این نوع آبشکن نیز صدق می‌نماید. پس قاعدتاً وجود بال باید تأثیر منفی بر عملکرد آبشکن داشته باشد و تأثیر این نوع آبشکن از تأثیر آبشکن ساده کمتر و مشابه

جدول ۴- مقدار پارامتر Xo/L و حداکثر کارایی آبشکن به ازای طول‌های مختلف آبشکن با زبانه پایین دست

پارامتر	$Ls/L=0/75$	$Ls/L=0/50$	$Ls/L=0/25$	Xo/L
حداکثر کارایی آبشکن Pr%	۹۶/۲	۷۷	۶۹	۱

آبشکن T شکل

این شکل از آبشکن نیز توانسته است بر آبستتگی تکیه‌گاه تأثیر گذاشته و میزان آن را کاهش دهد. آبشکن T شکل آبستتگی را حداقل $39/7$ درصد و حداکثر $92/8$ درصد کاهش داده است. نمودار مربوط به این نوع از آبشکن در شکل‌های ۵ تا ۷ مابین نمودار آبشکن

بااینکه حداکثر درصد کاهش آبستتگی تکیه‌گاه در این آبشکن نسبت به آبشکن L شکل با زبانه بالادست بیشتر است اما مقادیر پارامتر Xo/L برای این دو نوع آبشکن برابر است.

به عبارت دیگر اگر اثر مثبت بال پایین دست با اثر منفی بال بالادست برابر بود باید این دو بال یکدیگر را خنثی کرده و آبشکن عملکردی مشابه آبشکن ساده داشته باشد اما مشاهده می‌شود که عملکرد این نوع از آبشکن در مقایسه با آبشکن ساده بهبود یافته است و این بهبود عملکرد به خاطر وجود بال پایین دست است. جدول ۵ بیشترین درصد کاهش آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد (کارایی آبشکن) و نیز مقدار پارامتر Xo/L در مقادیر مختلف Ls/L را برای آبشکن T شکل نشان می‌دهد.

L شکل با زبانه پایین دست و آبشکن ساده قرار دارد. به این معنی که تأثیرگذاری این نوع آبشکن از آبشکن ساده بیشتر و از آبشکن L شکل با زبانه پایین دست کمتر بوده است. آبشکن T شکل با داشتن هر دو بال بالادست و پایین دست خصوصیات آبشکن‌های L شکل زبانه بالادست و زبانه پایین دست را دارا است؛ یعنی از یک طرف وجود بال بالادست موجب کاهش عملکرد آبشکن می‌شود و از طرف دیگر بال پایین دست عملکرد آن را بهبود می‌بخشد. اینکه این شکل آبشکن از آبشکن ساده عملکرد بهتری داشته است بیانگر این موضوع است که میزان تأثیرگذاری بال پایین دست از بال بالادست بیشتر بوده است

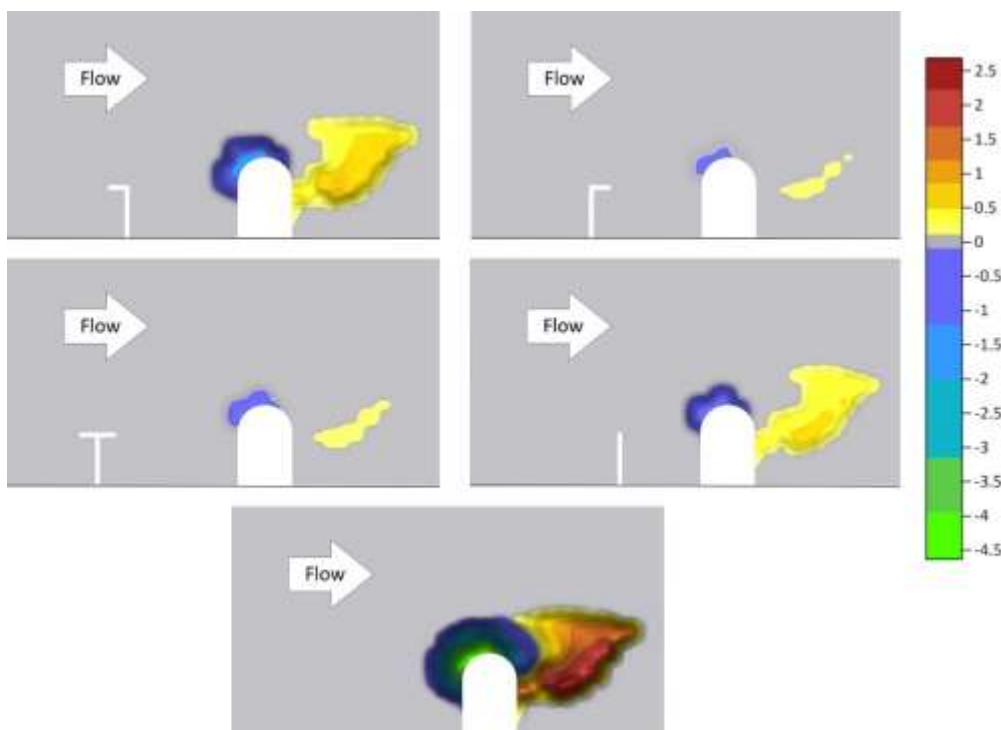
جدول ۵- مقدار پارامتر Xo/L و حداکثر کارایی آبشکن به ازای طول‌های مختلف آبشکن T شکل

پارامتر	$Ls/L=0/25$	$Ls/L=0/5$	$Ls/L=0/75$
Xo/L	۱/۷۵	۱/۵	۱/۲۵
حداکثر کارایی آبشکن Pr%	۶۶	۷۲/۲	۹۲/۸

بر آبشستگی تکیه‌گاه افزایش پیدا کرده و آبشستگی در تکیه‌گاه کاهش بیشتری داشته است. این امر را می‌توان به این علت دانست که آبشکن با طول بیش‌تر اولاً تأثیر بیش‌تری بر انحراف جریان و دور کردن آن از تکیه‌گاه دارد دوماً افزایش طول آبشکن باعث گسترش منطقه آرامش جریان در بالادست تکیه‌گاه می‌شود.

مقایسه جدول ۵ با جدول‌های ۲ تا ۴ نشان می‌دهد که پارامتر Xo/L برای آبشکن T شکل در مقایسه با انواع دیگر آبشکن دارای مقدار بیشتری است.

جدول‌های ۲ تا ۵ نشان می‌دهد که در تمامی شکل‌های آبشکن با افزایش پارامتر Ls/L آبشستگی در تکیه‌گاه کاهش پیدا کرده است؛ به عبارت دیگر با افزایش طول بی‌بعد آبشکن میزان اثرگذاری آبشکن



شکل ۸- ابعاد آبشستگی ایجادشده پیرامون تکیه‌گاه در حضور شکل‌های مختلف آبشکن و بدون حضور آبشکن

به منظور دریافت درک بهتر از میزان کارایی هر کدام از آبشکن‌ها، در شکل ۸، توپوگرافی آبشستگی ایجادشده پیرامون تکیه‌گاه در حضور هر شکل آبشکن (حالت حداکثر کارایی هر شکل آبشکن) و همچنین بدون حضور آبشکن به صورت سه‌بعدی نشان داده شده است. لازم به ذکر است توپوگرافی آبشستگی ایجاد شده در اطراف آبشکن‌ها از شکل حذف شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان راه‌حلی مؤثر برای مشکل آبشستگی تکیه‌گاه‌های پل قرارگرفته در دشت‌های سیلابی، مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این تحقیق نشان داد که کارگذاری آبشکن منفرد در چهار شکل رایج آن می‌تواند آبشستگی در تکیه‌گاه پل را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. جدول ۶ حداکثر میزان کاهش آبشستگی تکیه‌گاه را در حضور آبشکن با شکل‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۶- حداکثر درصد کاهش آبشستگی تکیه‌گاه در حضور

آبشکن‌های مختلف	
شکل آبشکن	حداکثر درصد کاهش آبشستگی
آبشکن L با زبانه پایین‌دست	۹۶/۲
آبشکن T شکل	۹۲/۸
آبشکن ساده	۸۰/۵
آبشکن L با زبانه بالادست	۷۷/۸

همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است آبشکن L با زبانه پایین‌دست، آبشکن T شکل، آبشکن‌های ساده و آبشکن L با زبانه بالادست به ترتیب دارای بیش‌ترین میزان تأثیرگذاری بر آبشستگی تکیه‌گاه هستند. اضافه کردن یک بال پایین‌دست به آبشکن ساده موجب افزایش ۱۶ درصدی کارایی این آبشکن می‌شود. بال بالادست تأثیر منفی بر کارایی آبشکن داشته و از تأثیر آبشکن بر آبشستگی تکیه‌گاه می‌کاهد.

حداکثر تأثیر آبشکن بر آبشستگی تکیه‌گاه با قرارگیری آبشکن در فاصله‌ای خاص از تکیه‌گاه رخ خواهد داد. این فاصله را که فاصله بهینه می‌نامیم وابسته به شکل و همین‌طور ابعاد آبشکن است. در مقایسه با سایر آبشکن‌ها آبشکن ساده و آبشکن T شکل به ترتیب دارای کم‌ترین و بیش‌ترین فاصله بهینه هستند. فاصله بهینه برای آبشکن‌های L شکل با زبانه بالادست و آبشکن‌های L شکل با زبانه پایین‌دست نیز با یکدیگر برابر است. این نتیجه نشان می‌دهد که جهت بال آبشکن تأثیری بر اندازه فاصله بهینه ندارد.

در انتخاب نوع آبشکن محافظ مناسب برای کنترل میزان

آبشستگی در تکیه‌گاه، علاوه بر حداکثر میزان تأثیرگذاری باید به مسائل اجرایی و همچنین اقتصادی نیز توجه داشت. به‌طور مثال باینکه آبشکن‌های L شکل با زبانه پایین‌دست و آبشکن T شکل در مقایسه با آبشکن ساده تأثیرگذاری بیش‌تری بر آبشستگی تکیه‌گاه دارند ولی ساخت آبشکن‌های ساده از نظر اجرایی ساده‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر است.

منابع

- اژدری، خ.، امامقلی‌زاده، ص. و رضایی، ح. ۱۳۹۶. مطالعه آزمایشگاهی اثر آبشکن T شکل نامتقارن در مقطع مرکب بر کاهش آبشستگی تکیه‌گاه پل. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک. ۲۴ (۱): ۲۹۵-۳۰۱.
- امامقلی‌زاده، ص. و نوحانی، ا. ۱۳۹۶. کاربرد پره‌های مستغرق در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه پل با دماغه گرد. تحقیقات مهندسی آبیاری و زهکشی. ۱۸ (۶۸): ۱۱۳-۱۲۸.
- خادمی، خ.، شفاعی بجزستان، م. و خزیمه‌نژاد، خ. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی تأثیر نصب تیغه متصل به تکیه‌گاه پل بر آبشستگی موضعی و الگوی جریان. نشریه پژوهش‌های آب‌و خاک. ۲۲ (۶): ۱۸۷-۲۰۱.
- خزیمه‌نژاد، ح.، قمشی، م.، شفاعی بجزستان، م. و رمضان‌ی، ی. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل با مقطع مستطیلی. نشریه پژوهش‌های آب‌و خاک. ۲۲ (۱): ۹۱-۱۱۰.
- سعادت‌نیا، م.، خداشناس، س.ر.، صانعی، م. و اسماعیلی، ک. ۱۳۹۷. بررسی آزمایشگاهی تأثیر آبشکن محافظ بر میزان آبشستگی دماغه تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲ (۴): ۷۶۳-۷۷۴.
- شهسواری، ح. و حیدرپور، م. ۱۳۹۷. بررسی تأثیر زبری‌های موضعی در کنترل و کاهش آبشستگی موضعی تکیه‌گاه پل. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۴۱ (۳): ۴۲۹-۴۴۴.
- صانعی، م.، ساغروانی، س.ف. و بصیرت، شمس. ۱۳۹۱. کاهش میزان آبشستگی تکیه‌گاه پل با استفاده از آبشکن محافظ. نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۶ (۱۸): ۱۱-۱۶.
- محمدپور، س. و شفاعی بجزستان، م. ۱۳۹۶. بررسی گستره کارگزاری المان‌های شش پایه به منظور کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه پل. مجله علوم مهندسی آبیاری. ۴۰ (۱): ۲۵-۳۵.
- ناظری، ا. ۱۳۹۱. بررسی اثر آبشکن سرسپری متقارن بر کاهش آبشستگی تکیه‌گاه پل واقع در دشت سیلابی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه

- collars as a scour countermeasure around wing-wall abutments. *Water Science and Engineering*. 11.1: 53-60.
- Korkut, R., Martinez, E.J., Morales, R., Ettema, R. and Barkdoll, B. 2007. Geobag performance as scour countermeasure for bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133.4: 431-439.
- Melville, B.W. 1995. Bridge abutment scour in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 121. 12: 863-868.
- Raudkivi, A. 1998. *Loose boundary hydraulics*. AA Balkema, Rotterdam. 496 PP.
- Sehat, M., Kamanbedast, A.A., Bordbar, A., Masjedi, A. and Heidarnejad, M. 2020. The study of convergent and divergent slots on scour reduction around abutment. *Ain Shams Engineering Journal*. Available Online.
- Zolghadr, M. and Shafai Bejestan, M. 2020. Six Legged Concrete (SLC) elements as scour countermeasures at wing wall bridge abutments. *International Journal of River Basin Management*. Available Online.
- Cardoso, A.H., Simarro, G., Le Doucen, O. and Schleiss, A. 2010. Sizing of riprap for spill-through abutments, in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, Thomas Telford Ltd, pp. 499-507.
- Dehghani, A., Azamathulla, H.M., Najafi, S.H. and Ayoubzadeh, S. 2013. Local scouring around L-head groynes. *Journal of hydrology*. 504: 125-131.
- Dey, S. and Barbhuiya, A.K. 2005. Time variation of scour at abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 131.1: 11-23.
- EL-Ghorab, E.A. 2013. Reduction of scour around bridge piers using a modified method for vortex reduction. *Alexandria Engineering Journal*. 52.3: 467-478.
- Hong, S.H. and Abid, I. 2019. Scour around an erodible abutment with riprap apron over time. *Journal of Hydraulic Engineering*. 145. 6.
- Khosravinia, P., Malekpour, A., Hosseinzadehdalir, A. and Farsadizadeh, D. 2018 Effect of trapezoidal

The Effect of Different Spur Dike Shapes on Bridge Abutment Scour in Compound Channel

S. Emamgholizadeh¹, A. Nazeri^{2*}, KH, Azhdary³

Received: Nov.25, 2020

Accepted: Jan.02, 2021

Abstract

Scouring is one of the most important factors threatening the stability of bridge abutments on rivers. Most of bridge abutments are located in floodplains. In the present study, the effects of four different single spur dike shapes including the simple spur dike, T-shaped spur dike, L-shaped spur dike with a clapper toward downstream, and L-shaped dike with a clapper toward upstream on the maximum scour depth at the abutment of a bridge, are studied. The present study was conducted on a rectangular flume with a width of 1m, a length of 12m, and a height of 60cm. The compound channel was constructed in a symmetrical and rectangular shape with the width of the main channel 20 cm and the width of the floodplains 40 cm. Spur dikes with three lengths including the 4, 8, and 12-cm lengths were installed as single spur dikes at 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 and 32-cm distances from the abutment. The results indicated that the simple spur dike, the T-shaped spur dike, the L-shaped spur dike with a clapper toward downstream and the L-shaped spur dike with a clapper toward upstream reduced the maximum scour depth at the abutment by 80%, 93%, 96% and 78% respectively.

Keywords: Abutment, Experimental model, Flood plain, Local scour, Spur dike

1- Associate Professor, Department of Water and Soil, Shahrood University of Technology, Iran

2- M.Sc. Graduate, Department of Water and Soil, Shahrood University of Technology, Iran

3- Associate Professor, Department of Water and Soil, Shahrood University of Technology, Iran

(*- Corresponding Author Email: aminnazeri97@gmail.com)

مقاله علمی-پژوهشی

مقایسه کارایی دو مدل دی‌ست و آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گندم

محمد رضا امداد^{۱*}، آرش تافته^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰

چکیده

بررسی عوامل محدودکننده عملکرد گیاهان نیاز به انجام تحقیقات متعدد و هزینه‌بر دارد، لذا استفاده از مدل‌ها می‌تواند شایان توجه باشد. از جمله مدل‌های کاربردی می‌توان به مدل‌های آکواکراپ و دی‌ست که به منظور شبیه‌سازی عملکرد گیاهان بکار می‌روند؛ اشاره نمود. در سال اول این مدل‌ها برای مزارع گندم کاری خوزستان در پایلوت رامسه واسنجی و در سال دوم برای دو پایلوت رامسه و حمیدیه مورد اعتبارسنجی واقع گردیدند. ریشه میانگین مربعات خطا، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال، شاخص توافق و کارایی با مدل دی‌ست برای عملکرد دانه به ترتیب ۰/۰۳۶، ۰/۰۱، ۰/۹۲ و ۰/۷۶ بود که مقایسه این مقادیر با شاخص‌های آماری مدل آکواکراپ بیانگر خطای کمتر و شاخص کارایی بیشتر برای مدل دی‌ست است. ریشه میانگین مربعات خطا، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال بیوماس گندم در مدل دی‌ست به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۰۴ تعیین شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که شاخص کارایی مدل دی‌ست برای عملکرد دانه و بیوماس گندم به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۵۷ بود که از مقادیر متناظر آن با مدل آکواکراپ (۰/۵۶ و ۰/۳۶) به مراتب بیشتر و حاکی از کارایی بالای مدل دی‌ست در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس گندم است.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، تبخیر-تعرق، تولید دانه گندم، خوزستان، مدیریت آبیاری

مقدمه

مختلف مدیریتی شبیه‌سازی کرد، به دنبال آن می‌توان با صرف وقت و هزینه کمتر به نتایج مطلوب و قابل ترویجی دست یافت (Zheng et al., 2017). مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان به منظور انتخاب سناریوهای مدیریتی مناسب از جمله انتخاب گیاه و رقم، مدیریت آب‌و خاک، تأثیر تغییر اقلیم بر رشد، عملکرد محصول و شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل گیاهان بکار می‌روند (Liu et al., 2011a و Bao et al., 2017).

یکی از مدل‌های گیاهی مدل آکواکراپ است که توسط سازمان خواروبار جهانی (فائو) در سال ۲۰۱۲ ارائه شده و از قابلیت و کارایی مناسبی نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار است (Bao et al., 2017). مدل آکواکراپ با استفاده از مراحل فنولوژی گیاه، سطح پوشش سبز، کیفیت آب‌و خاک به منظور شبیه‌سازی عملکرد و اجزای عملکرد و نیز ارتقا بهره‌وری آب در مزرعه مورد استفاده واقع می‌گردد. گیرتس و همکاران، مدل آکواکراپ را برای گیاه کینوا تحت سناریوهای مختلف آبیاری واسنجی و گزارش کردند که این مدل ابزار ارزشمندی برای بررسی و تأثیر تجمعی مکانیسم‌های تحمل به تنش آبی بر گیاه کینوا می‌باشد (Geerts et al., 2009).

ضیایی و همکاران، عملکرد مدل‌های آکواکراپ و سرس مایز^۷ را

مدل‌های رشد و نمو گیاهان زراعی از ابزارهای مهم و کارا در مطالعه و بررسی تأثیر شرایط و سناریوهای متفاوت مدیریتی بر روابط آب، خاک و گیاه بوده و از آن‌ها می‌توان به منظور تصمیم‌سازی و یا ارائه سناریوهای مدیریتی متناسب با شرایط منطقه و نیز برآورد عملکرد گیاهان در شرایط مختلف استفاده کرد. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل وفوست^۳، سالت مد^۴، دی‌ست^۵ و آکواکراپ^۶ اشاره کرد که هر کدام در راستای اهدافی خاص بکار رفته و دارای مزایا و معایبی می‌باشند. چنانچه بتوان پیشاپیش با توجه به شرایط حاکم بر منطقه و با اطلاعات موجود، وضعیت عملکرد گیاه را در شرایط

۱- استادیار بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۲- استادیار بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

(*-نویسنده مسئول: Email: emdadmr591@yahoo.com)

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.19.9

3 - WOFOST

4 - SALTMED

5 - DSSAT

6 - AQUACROP

7-CERES MAIZE

8- Cropsys

سازی عملکرد و مراحل فنولوژی گلرنگ است (Singh et al., 2015). همچنین مدل دی‌ست برای شبیه‌سازی عملکرد علوفه براکیاربا بررسی و نسبت عملکرد مقادیر شبیه‌سازی شده به اندازه‌گیری شده حدود ۱/۰۳ (با شاخص ریشه میانگین مربعات خطای حدود ۵۳۸ کیلوگرم ماده خشک بر هکتار) به دست آمد که بیانگر قرابت و نزدیکی مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری است (Pedreira et al., 2011). مدل دی‌ست که بر اساس سامانه‌های گیاهی توسعه یافته است از توانایی‌های بالایی در زمینه پیش‌بینی و شبیه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرات کربن خاک، موارد زیست‌محیطی، امنیت غذایی، تولید علوفه برای دام، تغییرات اقلیمی و سازگاری با آن برخوردار می‌باشد (Holzworth et al., 2015). پیشرفت‌های قابل توجهی در استفاده از مدل‌ها برای ارائه سناریوهای مدیریتی متفاوت و نیز تأثیر آن‌ها بر تغییر اقلیم و تولیدات گیاهی انجام پذیرفته است (Shelia et al., 2019). مطالعات متعدد انجام شده بر مدل دی‌ست غالباً نشانگر دقت بالای این مدل در خاک و اقلیم‌های متفاوت می‌باشد (McNider et al., 2014). کامارانو و همکاران در ارزیابی مدل دی‌ست بر محصول پنبه اظهار داشتند که این مدل دقت مناسبی در شبیه‌سازی عملکرد پنبه، زمان گلدهی و رسیدن دارد. متوسط مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد پنبه به ترتیب ۱۲۳۲ و ۱۲۴۸ کیلوگرم در هکتار گزارش شد. همچنین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای زمان گلدهی، به ترتیب ۷۸ و ۸۰ روز پس از کاشت و نیز مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای زمان رسیدن به ترتیب ۱۷۲ و ۱۷۵ روز پس از کاشت حاصل گردید (Cammarano et al., 2012). قاسمی و همکاران (۱۳۹۸) در ارزیابی مدل دی‌ست برای گیاه نیشکر در خوزستان گزارش کردند که کارایی این مدل برای وزن خشک هوایی و وزن خشک ساقه نیشکر به ترتیب حدود ۰/۷۲ و ۰/۷ بود. در تحقیقی کارایی مدل دی‌ست در شرایط مدیریت‌های مختلف آبیاری بر عملکرد برنج در سه سال بررسی و نتایج نشان داد که مدل دی‌ست از قابلیت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد برنج برخوردار بوده و همخوانی بالایی در عملکرد دانه و بیوماس برنج اندازه‌گیری شده با مقادیر شبیه‌سازی وجود دارد. ریشه میانگین مربعات خطا برای دانه و بیوماس برنج به ترتیب ۸ و ۱۰ درصد گزارش گردید (Amiri et al., 2013). اورتیز و همکاران در استفاده از مدل دی‌ست برای شبیه‌سازی عملکرد پنبه گزارش کردند که در شرایط بدون محدودیت آب، مقدار عملکرد پنبه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده به ترتیب ۳۹۷۴ و ۳۹۷۲ کیلوگرم در هکتار بوده (با درصد خطای نسبی ۱۰ درصد) که حاکی از کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد پنبه است. از این مدل به منظور بررسی تغییرات رطوبت خاک در آبیاری زیرسطحی برای گیاه سویا استفاده و گزارش گردید که ریشه میانگین مربعات خطا برای رطوبت خاک ۹/۹ درصد بوده است (Ortiz et al., 2014). از طرف دیگر

به منظور شبیه‌سازی اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت در منطقه کرج (در بافت خاک لومی) بررسی و نشان دادند که کارایی هر دو مدل مناسب بوده است. شاخص ریشه میانگین مربعات خطا در برآورد عملکرد برای مدل‌های آکواکراپ و سرس مایز به ترتیب بین ۲۰ تا ۴۰ و ۲۰ تا ۸۰ درصد گزارش شد (Ziaii et al., 2014). تودوروویچ و همکاران دو مدل پایه‌ای کراپسیس^۲ و وفوست را با مدل آکواکراپ برای کشت آفتابگردان تحت سه رژیم مختلف آبیاری شامل تیمارهای آبیاری کامل، کم آبیاری تنظیم شده و دیم مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل آکواکراپ کمتر از دو مدل مذکور نیاز به داده ورودی داشته، ضمن اینکه این مدل، مقدار ماده خشک تولیدی و عملکرد را در مرحله برداشت مشابه با دو مدل دیگر شبیه‌سازی می‌کند. مدل آکواکراپ بر اساس تعرق و ماده خشک تولیدی گیاه بوده در حالی که مدل کراپسیس بر اساس در نظرگیری شاخص آب و تشعشع عمل می‌کند (Todovic et al., 2009). حیدری نیا و همکاران مدل آکواکراپ را به منظور شبیه‌سازی عملکرد ذرت بررسی و گزارش نمودند که متوسط خطا برای عملکرد دانه ۳ تا ۶ درصد بوده و این مدل دقت مناسبی در برآورد عملکرد ذرت دارد (Heydarinia et al., 2017). ژانگ و همکاران تأثیر شرایط مختلف آبیاری را برای گندم با مدل دی‌ست بررسی و گزارش کردند که این مدل با دقت بالا مراحل فنولوژی، بیوماس، شاخص سطح برگ و عملکرد دانه را شبیه‌سازی می‌نماید. مقدار ریشه مربعات خطای نرمال برای مراحل فنولوژی، بیوماس، عملکرد دانه به ترتیب حدود ۲، ۱۵، ۱۴ درصد حاصل شد (Zheng et al., 2017). مدل‌های گیاهی ارائه شده در بسته دی‌ست به صورت گسترده به منظور شبیه‌سازی عملکرد و اجزای عملکرد برای غلات و سایر گیاهان دیگر مورد استفاده واقع می‌گردد. ریشه مربعات خطای حاصل از مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مدل دی‌ست برای مرحله گلدهی (روز)، رسیدن (روز) و عملکرد بادام‌زمینی (تن در هکتار) به ترتیب ۱/۶۴، ۲/۴۲ و ۰/۷۸ بوده که بیانگر کارایی مناسب مدل دی‌ست در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی و عملکرد بادام‌زمینی می‌باشد (Ahmed et al., 2016). سینگ و همکاران مدل دی‌ست را برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گل‌رنگ در مناطق نیمه‌خشک بکار برده و گزارش نمودند که این مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی زمان گلدهی و برداشت با خطای نسبی حدود ۰/۰۷ دارد. متوسط عملکرد دانه گل‌رنگ شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به ترتیب ۱۹۶۳ و ۱۹۰۲ کیلوگرم در هکتار ارائه گردید (با خطای نسبی حدود ۰/۱۲) که بیانگر شبیه‌سازی مناسب این مدل در پیش‌بینی مراحل فنولوژی و عملکرد دانه گل‌رنگ است. شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نسبی برای صفات تعداد روز از کاشت تا گلدهی، تعداد روز از کاشت تا رسیدن، شاخص برداشت و عملکرد گل‌رنگ به ترتیب ۰/۰۷، ۰/۰۶، ۰/۲۵ و ۰/۱۲ بود که حاکی از دقت و کارایی بالایی مدل دی‌ست در شبیه-

و به‌منظور ارتقای بهره‌وری آب توصیه نمود. نظر به اینکه گیاه غالب در منطقه دشت آزادگان استان خوزستان گندم بوده و بهره‌برداران مدیریت‌های مختلفی از نظر آب‌و‌خاک (شامل مدیریت‌های مختلف آبیاری از نظر دور و عمق و کود دهی) اعمال می‌کنند، لذا ضروری است که در راستای ارتقای بهره‌وری آب، تغییرات عملکرد گندم با سناریوهای آبیاری معمول زارعین منطقه با این دو مدل بررسی و مورد مقایسه واقع گردد. در این ارتباط کارایی دو مدل کاربردی دی‌ست و آکواکراپ پس از واسنجی و اعتبارسنجی به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد و اجزا عملکرد گندم در مدیریت‌های مختلف و در راستای پایداری منابع آب‌و‌خاک مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۹۴-۹۳ و ۹۵-۹۴ در اراضی گندم‌کاری دشت آزادگان استان خوزستان (در دو منطقه رامسه و حمیدیه) اجرا شد. شکل ۱ موقعیت پایلوت‌های منتخب را ارائه می‌کند. دو قطعه ۱۰ هکتاری در هر منطقه انتخاب و در هر یک از این قطعات سه پایلوت به مساحت ۲۰۰۰ مترمربع به‌منظور ارزیابی و اندازه‌گیری در نظر گرفته شد (جمعاً ۶ پایلوت).



شکل ۱- موقعیت پایلوت‌ها در دشت آزادگان

رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، بارندگی، ساعت آفتابی و سرعت باد) به‌منظور تعیین تبخیر-تعرق سطح مرجع و تبخیر-تعرق گندم استفاده شد. همچنین در طول فصل زراعی حجم آب آبیاری، ساعت آبیاری و عمق توسعه ریشه اندازه‌گیری گردید. در انتهای فصل کشت در هر دو سال مقدار عملکرد دانه و بیوماس گندم در مزارع منتخب اندازه‌گیری گردید. جدول ۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و

مقادیر ریشه میانگین خطای نرمال برای عملکرد ذرت و سویا بدست آمده با مدل دی‌ست در محدوده ۴/۳ تا ۱۴ درصد گزارش شد (Liu et al., 2011b). حمد و همکاران در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک گزارش نمود که در استفاده از مدل دی‌ست مقدار ریشه میانگین خطا برای محصول دانه ذرت در محدوده ۱۰/۴ تا ۱۱/۴ درصد حاصل شده است. در سال اول این مدل (بدون هیچ اختلافی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده) مراحل مهم فنولوژی شامل زمان کاشت تا گلدهی (۵۸ روز) و زمان کاشت تا رسیدن (۱۰۳ روز) را با دقت کامل شبیه‌سازی نمود. متوسط تفاوت بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در پیش‌بینی مراحل فنولوژی از ۰ تا ۴ روز گزارش گردید (Hammad et al., 2017). دقت نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی وابسته به دقت داده‌های مورد نیاز مدل بوده و در صورت اندازه‌گیری و تعیین دقیق داده‌های ورودی، مدل قابلیت کاربرد را در شرایط مختلف پس از واسنجی و اعتبارسنجی خواهد داشت (Cammarano et al., 2012). از آنجاکه در عمل امکان اجرای سناریوهای مختلف آبیاری به‌منظور بررسی عملکرد در شرایط مختلف مقدور نیست، لذا استفاده از مدل‌های کاربردی مانند دی‌ست و آکواکراپ این امکان را فراهم می‌آورد تا پس از واسنجی و اعتبارسنجی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر بتوان سناریوهای مختلف مدیریتی را در راستای افزایش عملکرد محصول با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی

از اطلاعات سال اول (در پایلوت رامسه) به‌منظور واسنجی دو مدل دی‌ست و آکواکراپ و از اطلاعات میدانی سال دوم (دو پایلوت حمیدیه و رامسه) در راستای اعتبارسنجی نتایج دو مدل استفاده شد. بذر گندم مورد استفاده رقم چمران و به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هر هکتار استفاده شد. در طول فصل زراعی از آمار و اطلاعات هواشناسی ایستگاه سینوپتیک اهواز (شامل درجه حرارت حداقل و حداکثر،

جدول ۲ ویژگی‌های کیفی آب آبیاری مورد استفاده در مناطق منتخب را نشان می‌دهد.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک پایلوت‌ها

منطقه	عمق	بافت	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی	جرم مخصوص	ظاهری	هدایت الکتریکی	نسبت جذبی سدیم
	سانتی‌متر		درصد	درصد	گرم بر سانتی‌متر مکعب		دسی زیمنس بر متر	-
	۰-۳۰	لوم رسی	۳۲	۱۹	۱/۴۸		۴/۸	۴/۳
رامسه	۳۰-۶۰	لوم رسی	۳۶	۲۳	۱/۵۳		۸/۵	۵/۱
	۶۰-۹۰	لوم رسی	۳۶	۲۳	۱/۵۲		۷/۵	۵/۴
	۰-۳۰	لوم رسی	۳۸	۲۰	۱/۴۸		۳/۵	۳/۴
حمیدیه	۳۰-۶۰	لوم رسی	۳۵	۱۴	۱/۵۲		۲/۶	۳/۶
یه	۶۰-۹۰	لوم رسی	۳۱	۱۴	۱/۵۰		۳/۴	۲/۹

جدول ۲- برخی ویژگی‌های کیفی آب آبیاری

منطقه	هدایت الکتریکی	انسیدید ته	بی‌کربنات	کلسیم	منیزیم	سدیم	نسبت جذبی سدیم
	دسی زیمنس بر متر	-	میلی‌اکی والان بر لیتر				-
حمیدیه و رامسه	۱/۹	۷/۹	۱/۷	۷	۷/۵	۸	۳

جدول ۳- اطلاعات گیاهی برداشت‌شده از پایلوت‌ها

اطلاعات گیاه	مقدار	اطلاعات گیاه	مقدار
تعداد روز تا جوانه‌زنی	۱۰-۱۴	طول دوره گلدهی	۱۰-۱۴
تعداد روز تا رسیدن به بیشینه پوشش گیاهی	۹۵-۱۰۵	تعداد روز تا آغاز گلدهی	۱۰۵-۱۱۵
تعداد روز تا پیر شدن برگ‌ها	۱۳۵-۱۴۵	بیشینه عمق ریشه (متر)	۰/۳-۰/۳۵
تعداد روز تا رسیدگی کامل	۱۶۰-۱۷۰	تعداد روز تا رسیدن به عمق ریشه بیشینه	۱۰۰-۱۱۰
طول دوره جوانه‌زنی	۱۰	طول دوره اولیه	۳۰
طول دوره توسعه	۳۵	طول دوره میانی	۵۵

همان‌گونه که از جدول ۱ ملاحظه می‌گردد بافت غالب خاک مناطق لوم‌رسی می‌باشد. کیفیت آب آبیاری مورد استفاده با میانگین شوری ۲ دسی زیمنس بر متر از نظر شوری مناسب و محدودیتی برای گندم ندارد. برخی از اطلاعات گیاهی اندازه‌گیری شده در جدول ۳ ارائه شده که به منظور واسنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. تاریخ کاشت و برداشت گندم در دشت آزادگان به ترتیب در محدوده ۱۵ آبان و ۳۰ فروردین ماه می‌باشد. جدول ۴ اطلاعات مدیریت آبیاری دو سال زراعی در مناطق مورد نظر را ارائه می‌کند. مقدار کل بارندگی در سال زراعی ۹۴-۹۳ و ۹۴-۹۵ در بازه زمانی مهر تا اردیبهشت‌ماه برای سال اول و دوم به ترتیب ۱۴۰ و ۲۲۸ میلی‌متر بوده است.

مدل آکواکراپ

در این پژوهش از مدل آکواکراپ نسخه ۴/۰ (سال ۲۰۱۲)

استفاده شد. با توجه به قابلیت و کارایی این مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم در شرایط مدیریت‌های مختلف آب‌و‌خاک، این مدل انتخاب و مورد واسنجی قرار گرفت. تنش آبی در این مدل به‌وسیله رابطه دورنباس و پروت (Pasquale et al. 2012) و بر اساس نسبت تبخیر-تعرق واقعی به تبخیر-تعرق پتانسیل در نظر گرفته می‌شود. داده‌های ورودی این مدل شامل پارامترهای اقلیمی بوده که با استفاده از مدل ایتی‌کلکیولیتور^۱، مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع تعیین و سپس در قالب اطلاعات ورودی در اختیار مدل آکواکراپ قرار داده شد. داده‌های گیاهی، اطلاعات خاک و برنامه‌ریزی آبیاری مورد نیاز در این مدل بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در هر پایلوت منتخب برای مدل تعریف شد.

جدول ۴- اطلاعات مدیریت آبیاری پایلوت‌های منتخب (سال اول و دوم)

دوم		اول	سال
رامسه	حمیدیه	رامسه	پایلوت
۴۸۰	۳۶۰	۹۵۰	آب کاربردی (میلی‌متر)
۴	۳	۵	تعداد آبیاری
۲۲۸		۱۴۰	بارش (میلی‌متر)
۸۳۰۰	۹۶۰۰	۶۶۷۳	بیوماس (کیلوگرم در هکتار)
۳۶۰۰	۴۵۰۰	۲۷۱۶	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)
۴۳	۴۶	۴۱	شاخص برداشت (درصد)

برای تعیین دقت مدل‌ها و مقایسه آن‌ها با مقادیر اندازه‌گیری استفاده شد (Yang et al., 2014b).

نتایج و بحث

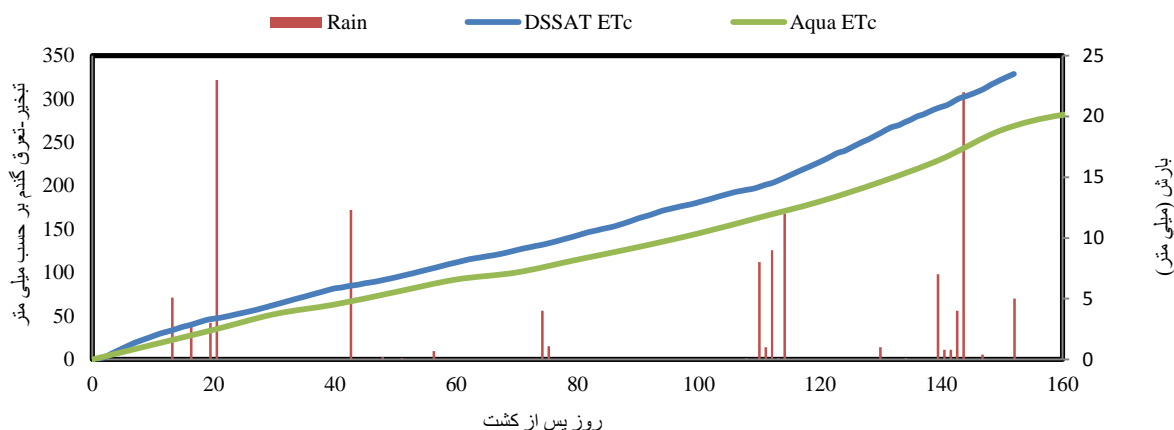
با استفاده از آمار و اطلاعات هواشناسی سال اول و دوم (ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اهواز) تبخیر- تعرق گندم با استفاده از مدل‌های دی‌ست و آکواکراپ تعیین گردید (شکل ۲).

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد روند تبخیر-تعرق گیاه گندم در دو مدل به‌صورت مشابه بوده و همخوانی نسبی با یکدیگر دارند. مقدار تبخیر-تعرق تجمعی گندم تعیین‌شده با مدل دی‌ست حدود ۳۲۳ میلی‌متر بوده که ۱۲ درصد نسبت به مقدار شبیه‌سازی‌شده توسط آکواکراپ بیشتر است. مقدار کل بارش در سال اول ۱۲۴ میلی‌متر و توزیع آن در طول فصل رشد در شکل ۲ ارائه شده است. شکل ۳ روند تغییرات تبخیر-تعرق گندم را در دو پایلوت منتخب در سال دوم ارائه می‌کند. مقادیر تبخیر-تعرق تعیین‌شده با مدل دی‌ست در پایلوت رامسه مقدار ۳۴۱ میلی‌متر بود که با مقدار متناظر آن با مدل آکواکراپ (۳۳۴ میلی‌متر) تفاوت معنی‌داری ندارد. به‌طور مشابه در پایلوت حمیدیه نیز مقدار تبخیر-تعرق تعیین‌شده با مدل دی‌ست معادل ۳۳۶ میلی‌متر بوده که نسبت به مقدار متناظر تعیین‌شده آن با مدل آکواکراپ (۳۵۰ میلی‌متر) به میزان ۴ درصد کمتر است. بنابراین ملاحظه می‌گردد که مقادیر تعیین‌شده نیاز آبی گندم در دو سال موردنظر با دو مدل مقادیر نزدیک به هم بوده و دقت مدل‌ها در تعیین تبخیر-تعرق گیاه گندم مشابه بوده است. مقدار بارش در سال دوم ۲۲۱ میلی‌متر و توزیع آن در طول فصل رشد در شکل ۳ ارائه شده است.

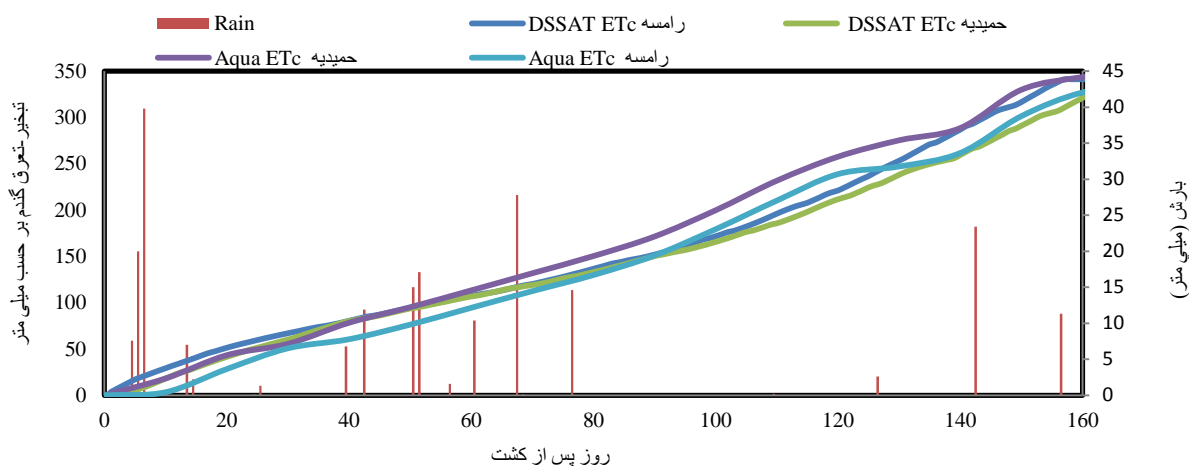
مدل دی‌ست

مدل گیاهی دی‌ست یک مدل تصمیم‌گیری گیاهی بوده که برای شرایط متفاوت اقلیم، آب، خاک و مدیریت‌های زراعی و در راستای تصمیم‌گیری مناسب و به‌منظور مصرف بهینه آب و کود و سایر عوامل تأثیرگذار بر تولیدات گیاهی قابل‌استفاده و کاربرد می‌باشد (Shelia et al., 2019). در این پژوهش از نسخه ۴/۷/۵ (۲۰۱۹) استفاده گردید. حداقل اطلاعات موردنیاز ورودی به مدل شامل اطلاعات پروفیل خاک (بافت و عمق خاک، شیب، ظرفیت زراعی و پژمردگی، جرم مخصوص ظاهری)، داده‌های روزانه هواشناسی (حداقل و حداکثر درجه حرارت، بارندگی و تشعشع خورشیدی)، مدیریت زراعی و آب‌و‌خاک (تراکم کاشت، سناریوهای مدیریتی آبیاری و حاصلخیزی، انواع شخم، کاربرد مواد آلی) می‌باشد (Bao et al., 2017). تاریخ کاشت و برداشت، زمان گلدهی و رسیدن، عمق و تراکم کاشت، مدیریت آبیاری، دور و عمق آبیاری، زمان، نوع و مقدار کود مصرفی، شرایط ابتدایی خاک از لحاظ رطوبت و اطلاعات هواشناسی از جمله ورودی‌های موردنیاز این مدل می‌باشند (Yang et al., 2014a).

داده‌های گیاهی و خاک اندازه‌گیری شده به همراه آمار هواشناسی مربوطه در سال اول برای واسنجی دو مدل آکواکراپ و دی‌ست در راستای شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس گندم استفاده گردید. از نتایج واسنجی سال اول به‌منظور صحت‌سنجی نتایج دو مدل در سال دوم استفاده گردید. به‌منظور صحت‌سنجی و ارزیابی نتایج در سال دوم در پایلوت حمیدیه و رامسه، سه مزرعه ۲۰۰۰ مترمربعی (به‌منظور تطابق نتایج اندازه‌گیری شده با مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط دو مدل) انتخاب گردید. شرایط کاشت، داشت و برداشت در دو پایلوت منتخب مشابه سال اول بوده و مراحل فنولوژی و سایر اندازه‌گیری‌های موردنیاز به‌منظور اطلاعات ورودی به دو مدل در مراحل زمانی مختلف از پایلوت‌های موردنظر برداشت گردید. از شاخص‌های آماری، خطای استاندارد، ریشه میانگین مربعات خطا، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده، ضریب تبیین، میانگین انحراف خطا و کارایی مدل



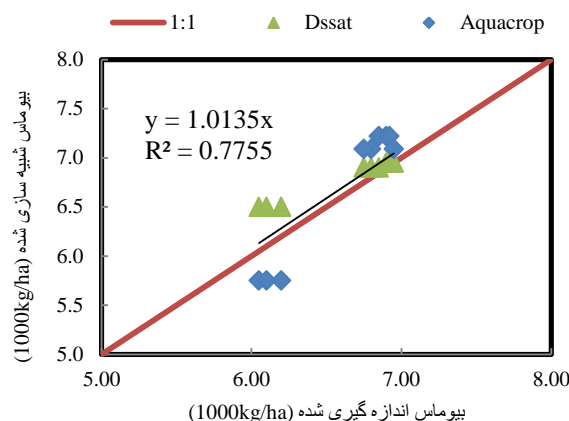
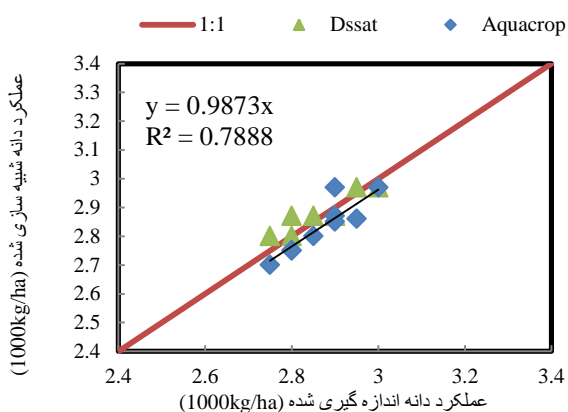
شکل ۲ - مقایسه تبخیر-تعرق برآوردشده گندم با دو مدل دیست و آکواکراپ در سال اول (رامسه)



شکل ۳ - مقایسه تبخیر-تعرق برآوردشده گندم با دو مدل دیست و آکواکراپ در دو پایلوت (سال دوم)

گندم شبیه‌سازی شده با مدل دیست و آکواکراپ با مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۴ نشان می‌دهد که دو مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی بیوماس گندم دارند. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (ریشه میانگین خطا)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (ریشه میانگین خطا نرمال) در مدل دیست به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۰۴ که نسبت به مقادیر متناظر به دست آمده با مدل آکواکراپ دارای خطای کمتری می‌باشد. همچنین شاخص توافق (d) در دو مدل مذکور نزدیک به هم بوده در صورتی که شاخص کارایی (EF) مدل دیست ۰/۵۷ بوده که تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای با شاخص کارایی مدل آکواکراپ دارد (جدول ۵).

مقایسه عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با دو مدل دیست و آکواکراپ در سال اول (شکل ۵) نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد دانه گندم بدست آمده با مدل دیست همخوانی و قرابت بیشتری با مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت به مدل آکواکراپ دارد. جدول ۵ شاخص‌های آماری مقایسه دو مدل را ارائه می‌نماید. ریشه میانگین مربعات خطا، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال، شاخص توافق (d) و کارایی مدل (EF) برای مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد دانه با مدل دیست به ترتیب ۰/۰۳۶، ۰/۰۱، ۰/۹۲ و ۰/۷۶ و مقایسه این مقادیر با شاخص‌های آماری حاصله از مدل آکواکراپ بیانگر خطای کمتر و کارایی مدل بیشتر دیست نسبت به مدل آکواکراپ می‌باشد. همچنین مقایسه تغییرات بیوماس



شکل ۵ - مقایسه عملکرد دانه گندم با دو مدل دی‌ست و آکواکراپ در سال اول

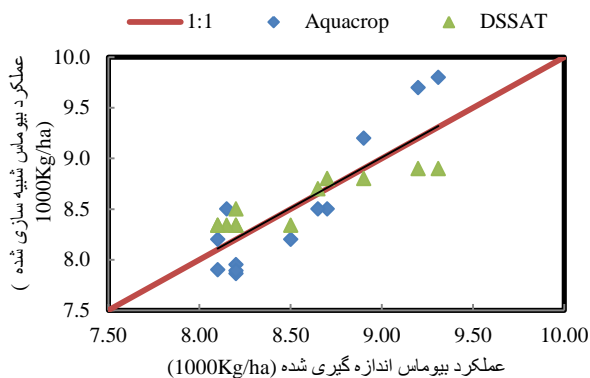
شکل ۴ - مقایسه بیوماس گندم با دو مدل دی‌ست و آکواکراپ در سال اول

جدول ۵ - مقایسه شاخص‌های آماری دو مدل دی‌ست و آکواکراپ در سال اول

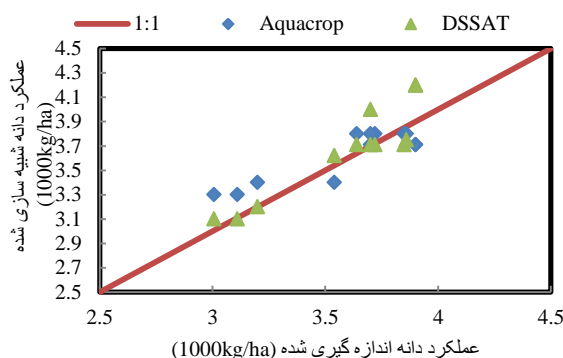
بیوماس		عملکرد دانه		شاخص
دی‌ست	آکواکراپ	دی‌ست	آکواکراپ	
۰/۲۳	۰/۳۳	۰/۰۳۶	۰/۰۵۵	ریشه میانگین خطا
۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۲	ریشه میانگین خطای نرمال
۰/۱۷	۰/۰۷	۰/۰۰۴	-۰/۰۳۶	میانگین انحراف خطا
۰/۸۲	۰/۹	۰/۹۲	۰/۸۸	شاخص توافق
۰/۵۷	۰/۳۶	۰/۷۶	۰/۵۶	کارایی مدل

اندازه‌گیری شده با نتایج شبیه‌سازی شده توسط دو مدل دی‌ست و آکواکراپ (شکل ۷) نشان می‌دهد که میانگین ریشه میانگین خطا و ریشه میانگین خطای نرمال به‌دست‌آمده با مدل دی‌ست به ترتیب ۰/۱۸ و ۰/۰۲ بوده که نسبت به مقادیر متناظر به‌دست‌آمده با مدل آکواکراپ به‌طور متوسط به میزان ۴۲ درصد کمتر می‌باشد. از طرف دیگر مقادیر شاخص توافق و کارایی مدل در مدل دی‌ست به ترتیب مقادیر ۰/۹۴ و ۰/۶۳ بوده که از مقادیر متناظر به‌دست‌آمده در مدل آکواکراپ بیشتر و بیانگر کارایی و دقت بالای مدل دی‌ست در شبیه‌سازی بیوماس گندم می‌باشد (جدول ۶). بنابراین با توجه به نتایج سال اول و دوم ملاحظه می‌شود که مدل دی‌ست با مقادیر خطای کمتر و شاخص کارایی مدل بیشتر از کارایی و دقت بالاتری نسبت به مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس برخوردار است. شکل ۶ و ۷ به ترتیب مقایسه عملکرد دانه و بیوماس گندم شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده را برای هر دو مدل آکواکراپ و دی‌ست ارائه می‌نماید.

بنابراین نتایج عملکرد دانه و بیوماس شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده گندم نشان داد که مدل دی‌ست از دقت و کارایی مناسب‌تری در تعیین عملکرد دانه نسبت به مدل آکواکراپ برخوردار است. نتایج مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد دانه گندم با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دو مدل دی‌ست و آکواکراپ در سال دوم در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود دو مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه از کارایی مناسبی برخوردار هستند. اگر مقدار ریشه میانگین خطای نرمال کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی بسیار خوب، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد شبیه‌سازی خوب، ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبتاً خوب و بالای ۳۰ درصد شبیه‌سازی ضعیف ارزیابی می‌شود. شاخص آماری توافق بین صفر و یک بوده که مقدار ۱ نشان‌دهنده بهترین برآزش می‌باشد. نظر به اینکه مقادیر ریشه میانگین خطا و ریشه میانگین خطای نرمال برای دو مدل نزدیک به هم می‌باشند ولی مدل دی‌ست از شاخص کارایی بالاتری (۰/۷۹) نسبت به شاخص کارایی مدل آکواکراپ (۰/۷۲) برخوردار بوده است. همچنین مقادیر بیوماس گندم



شکل ۷ - مقایسه بیوماس گندم با دو مدل دیست و آکواکراپ در سال دوم



شکل ۶ - مقایسه عملکرد دانه گندم با دو مدل دیست و آکواکراپ در سال دوم

می‌باشد. در راستای بررسی آماری نتایج حاصله دو مدل از شاخص‌های آماری ریشه میانگین خطا، ریشه میانگین خطای نرمال، انحراف خطا، شاخص توافق و کارایی مدل استفاده شد. نتایج مقایسه شاخص‌های آماری در سال دوم در جدول ۶ ارائه شده است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد دقت دو مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه نزدیک به هم بوده (شکل ۶)، اما مقادیر شبیه‌سازی شده بیوماس توسط مدل آکواکراپ از دقت کمتری نسبت به مدل دیست برخوردار بوده و به عبارت دیگر پراکندگی مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده توسط مدل آکواکراپ نسبت به خط یک‌به‌یک بیشتر

جدول ۶ - مقایسه شاخص‌های آماری برای ارزیابی دو مدل دیست و آکواکراپ در سال دوم

بیوماس		عملکرد دانه		شاخص
دی ست	آکواکراپ	دی ست	آکواکراپ	
۰/۱۸	۰/۳۰۳	۰/۱۶۰	۰/۱۵۹	ریشه میانگین خطا
۰/۰۲	۰/۰۳۶	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	ریشه میانگین خطای نرمال
۰/۰۴	۰/۰۰۰۸	۰/۰۷۴	۰/۰۳۴	میانگین انحراف خطا
۰/۹۴	۰/۹۱۲	۰/۹۳۶	۰/۸۹۵	شاخص توافق
۰/۶۳	۰/۵۳	۰/۷۹	۰/۷۲	کارایی مدل

بیشتری در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس گندم نسبت به مدل آکواکراپ است. نتایج مشابهی توسط قاسمی و همکاران (۱۳۹۸) در استفاده از مدل دی‌ست برای نیشکر گزارش شده که بیانگر کارایی مناسب این مدل می‌باشد.

نتیجه‌گیری

ریشه میانگین خطای نرمال، شاخص توافق و کارایی مدل با مدل دی‌ست برای مقادیر عملکرد دانه در سال اول به ترتیب ۰/۰۳۶، ۰/۰۱ و ۰/۹۲ و ۰/۷۶ بود که مقایسه این مقادیر با شاخص‌های آماری حاصله از مدل آکواکراپ بیانگر خطای کمتر و شاخص کارایی بیشتر برای مدل دی‌ست می‌باشد. همچنین کارایی مدل که شاخص تأثیرگذاری در انتخاب مدل‌ها می‌باشد نشان می‌دهد که مدل دی‌ست دارای کارایی بیشتری نسبت به مدل آکواکراپ است. نتایج سال دوم

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که دو مدل دارای شاخص ریشه میانگین خطای نزدیک به هم در برآورد عملکرد دانه (حدود ۴/۴ درصد) بوده که با نتایج گزارش شده توسط توفیق و همکاران (۱۳۹۹) همخوانی دارد. درحالی‌که شاخص ریشه میانگین خطا برای بیوماس گندم به میزان ۴۰ درصد در مدل دی‌ست نسبت به مدل آکواکراپ کمتر است. روند مشابهی در ریشه میانگین خطای نرمال برای عملکرد دانه و بیوماس برای هر دو مدل ملاحظه می‌گردد. از طرف دیگر شاخص میانگین انحراف خطا نشان می‌دهد که هر دو مدل مقادیر عملکرد دانه و بیوماس را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی می‌نمایند. شاخص توافق در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس گندم در استفاده از مدل دی‌ست بیشتر از مدل آکواکراپ و بیانگر توافق و سازگاری مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. همچنین کارایی مدل که شاخص تأثیرگذاری در انتخاب مدل‌ها می‌باشد نشان می‌دهد که مدل دی‌ست دارای کارایی

- Geerts S., Raes D., Garcia M., Miranda R., Cusicanqui J.A., Taboada C., Mendoza J., Huanca R., Mamani A., Condori O., Mamani J., Morales B., Osco V., and Steduto P. 2009. Simulating yield response of Quinoa to water availability with Aquacrop. *Agronomy journal*. 101: 499–508.
- Hammad, H., Abbas, F., Ahmad, A., Farhad, W., Anothai, J. and Hoogenboom, G. 2017. Predicting water and nitrogen requirements for maize under semi-arid conditions using the CSM-CERES-Maize model. *European Journal of Agronomy*. 10.1016/j.eja.2017.10.008.
- Heydarinia, M., BoroomandNasab, S., Naseri, A. and Albaji, M. 2017. Aquacrop model evaluation to estimate of Maize yield and soil salinity under different agriculture managements and irrigation with saline water. *Iranian. J. Soil and Water. Research*.48(1): 49-61. (In Persian with English abstract)
- Holzworth, Dean ., Snow, Val ., Janssen, Sander ., Athanasiadis, Ioannis ., Donatelli, Marcello ., Hoogenboom, Gerrit ., White, Jeffrey ., Thorburn, Peter. 2015. Agricultural production systems modelling and software: Current status and future prospects. *Environmental Modelling Software*. 72. 10.1016/j.envsoft.2014.12.013.
- Liu, H.L., Yang, J.Y. and Drury, C.F. 2011a. Using the DSSAT -CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize production. *Nutr Cycl Agroecosyst*89, 313–328 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9396-y>.
- Liu, H., Yang, J., Tan, C., Drury, C., Reynolds, W.D., Zhang, T.Q., Bai, Y., Jin, J., He, P. and Hoogenboom, G. 2011b. Simulating water content, crop yield and nitrate-N loss under free and controlled tile drainage with subsurface irrigation using the DSSAT model. *Agricultural Water Management*. 98. 1105-1111. 10.1016/j.agwat.2011.01.017.
- McNider, R.T., Handyside, C., Doty, K., Ellenburg, W., Cruise, J.F., Christy, J.R., Moss, D., Sharda, V. and Hoogenboom, G. 2014. An integrated crop and hydrologic modeling system to estimate hydrologic impacts of crop irrigation demands. *Environmental Modelling. Software*. 119. 10.1016/j.envsoft.2014.10.009.
- Ortiz, B.V., Hoogenboom, G., Vellidis, G., Boote, K., Davis, R. and Perry, C. 2014. Adapting the CROPGRO-Cotton Model to Simulate Cotton Biomass and Yield under Southern Root-Knot Nematode Parasitism. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*. 10.13031/2013.29201.
- Pasquale, S., Hsiao, C. and Fereres, E. Raes. 2012. Crop yield response to water. *FAO Irrigation and drainage*
- نشان داد که شاخص کارایی مدل در مدل دی‌ست برای عملکرد دانه و بیوماس به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۵۷ بوده که از مقادیر متناظر آن با مدل آکواکراپ (۰/۵۶ و ۰/۳۶) به مراتب بیشتر می‌باشد. شاخص توافق در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس گندم در استفاده از مدل دی‌ست بیشتر از مدل آکواکراپ و بیانگر توافق و سازگاری مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. با توجه به شاخص‌های آماری ملاحظه می‌شود که مدل دی‌ست با مقادیر خطای کمتر (حدود ۴ درصد) و شاخص کارایی مدل (۰/۹۲) بیشتر از کارایی و دقت بالاتری نسبت به مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس گندم برخوردار است که بیانگر جامعیت نسبی بیشتر مدل دی‌ست در لحاظ نمودن فاکتورهای تأثیرگذار بر شرایط آب، خاک و گیاه می‌باشد.

منابع

- توفیق، ص.، رحیمی، د. و یزدان پناه، ح. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی عملکرد، تبخیرتعرق، نیاز آبی و کارایی مصرف آب گندم با استفاده از مدل CERES-WHEAT-DSSAT در دشت شهرکرد. آب‌وخاک. ۳۴ (۳): ۵۹۲-۵۷۹. Doi: 10.22067/jsw.v34i3.84847..۵۷۹-۵۹۲
- قاسمی، م.، ناصری، ع. و معاضد، ه. ۱۳۹۸. پارامتر یابی و ارزیابی مدل دی‌ست برای نیشکر رقم CP57-614 در شرایط اقلیمی خوزستان. تحقیقات آب و خاک ایرا. ۵۰ (۶): ۱۳۴۰-۱۳۳۱. Doi : 10.22059/ijswr.2018.259986.667944
- Ahmed, M., Akram, M., Asim, M., Gill, M., Hassan, F., Higgins, S., Stockle, C. and Hoogenboom, Gerrit. 2016. Calibration and validation of APSIM-Wheat and CERES-Wheat for spring wheat under rainfed conditions: Models evaluation and application. *Computers and Electronics in Agriculture*. 123. 384-401. 10.1016/j.compag.2016.03.015.
- Amiri, E., Rezaei, M., Bannayan, M. and Soufizadeh, S. 2013. Calibration and Evaluation of CERES Rice Model under Different Nitrogen- and Water-Management Options in Semi-Mediterranean Climate Condition. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 44. 10.1080/00103624.2013.769565.
- Bao, Y., Hoogenboom, G., McClendon, R. and Vellidis, G. 2017. A comparison of the performance of the CSM-CERES-Maize and EPIC models using maize variety trial data. *Agricultural Systems*. 150. 10.1016/j.agry.2016.10.006.
- Cammarano, D., Jose, P., Basso, B., Paul, W. and Grace, Peter. 2012. Agronomic and economic evaluation of irrigation strategies on cotton lint yield in Australia. *Crop and Pasture Science*. 63. 647-655. 10.1071/CP12024.

- Yang, J., Yang, Jeng-Y., Liu, S. and Hoogenboom, G. 2014a. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. *Agricultural Systems*. 127. 10.1016/j.agsy.2014.01.008.
- Yang, Jeng-Y., Drury, C., Yang, J., Li, Zhuo-T. and Hoogenboom, G. 2014b. EasyGrapher: Software for Data Visualization and Statistical Evaluation of DSSAT Cropping System Model and the CANB Model. *International Journal of Computer Theory and Engineering*. 6. 210-214. 10.7763/IJCTE.2014.V6.864.
- Zheng, Z., Cai, H., Lianyu, Y. and Hoogenboom, G. 2017. Application of the CSM-CERES-Wheat Model for Yield Prediction and Planting Date Evaluation at Guanzhong Plain in Northwest China. *Agronomy Journal*. 109. 10.2134/agronj2016.05.0289.
- Ziaili, G., Babazadeh, H., Abbasi, F. and Kaveh, F. 2014. Evaluation of the Aquacrop and CERES-Maize models in assessment of soil water balance and maize yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 45 (4):435-445.
- paper 66.505 p.
- Pedreira, B., Pedreira, C., Boote, K., Lara, M. and Alderman, P. 2011. Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. *Field Crops Research*. 120. 370-379. 10.1016/j.fcr.2010.11.010.
- Shelia, V., Hansen, J., Sharda, V., Porter, C., Aggarwal, P.K., Wilkerson, C. and Hoogenboom, G. 2019. A Multi-scale and Multi-model Gridded Framework for Forecasting Crop Production, Risk Analysis, and Climate Change Impact Studies. *Environmental Modelling Software*. 115. 10.1016/j.envsoft.2019.02.006.
- Singh, Sukhbir ., Boote, Kenneth ., Angadi, Sangu ., Grover, Kulbhushan ., Begna, Sultan ., Auld, Dick. 2015. Adapting the CROPGRO Model to Simulate Growth and Yield of Spring Safflower in Semiarid Conditions. *Agronomy Journal*. 108. 10.2134/agronj15.0272.
- Todorovic, M., Albrizio R., Zivotic L., Abi Saab M., Stocle C. and Steduto P. 2009. Assessment of Aquacrop, Cropsyst, and Wofost models in the simulation of sunflower Growth under different water regimes. *Agronomy journal*. 101:509-521.

Comparison of DSSAT and AQUACROP Models Performance for Wheat Yield Simulation

M.R. Emdad ^{1*}, A. Taftah ²

Received: Nov.28, 2020

Accepted: Jan.09, 2021

Abstract

The investigation of plant production limiting factors requires extensive and costly research, so the use of models can be noteworthy. Practical models including Aquacrop and DSSAT are used to simulate plant production. In the first year, these models were calibrated for Khuzestan wheat farms in Ramseh pilot and in the second year for two pilots, Ramseh and Hamidiyeh. The normalized root mean square error, agreement index and model efficiency with DSSAT model for grain yield values in the first year were 0.036, 0.01, 0.92 and 0.76, respectively that Comparison of these values with statistical indices obtained from Aquacrop model indicates less error and more performance index for using DSSAT model. Also, the performance of the model, which is an indicator of the effectiveness in the selection of models, shows that the DSSAT is more efficient than the Aquacrop model. Mean root mean square error and normalized root mean square error of wheat biomass in the DSSAT model were determined to be 0.23 and 0.04 respectively that indicates the DSSAT model has higher efficiency and accuracy than the Aquacrop model in simulating grain yield and wheat biomass.

Keywords: Evapotranspiration, Grain wheat production, Irrigation management, Khuzestan, Validation

1- Assistant professor, Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

2-Assistant professor, Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(*-Corresponding Author Email: emdadmr591@yahoo.com)

مقاله علمی-پژوهشی

تعیین بهره‌وری مصرف آب در ذرت دانه‌ای (KSC 706) با استفاده از مدل AquaCrop در استان کرمانشاه

میثم پالاش^۱، علی بافکار^{۲*}، بهمن فرهادی بانسوله^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۳

چکیده

در میان شاخص‌های بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی، شاخص بهره‌وری مصرف آب مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. این شاخص با توجه به عملکرد و نیاز آبی محصولات برآورد گردیده که بستگی به پارامترهای هواشناسی، خصوصیات خاک، مدیریت مزرعه و نوع گیاه دارد. با توجه به تغییرات پارامترهای هواشناسی در مناطق مختلف می‌توان انتظار داشت که عملکرد و نیاز آبی محصولات در مناطق مختلف نیز تغییر کند. در این مطالعه ذرت دانه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۶ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با تیمارهای ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبیاری و سه تکرار کشت گردید. با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای به دست آمده مدل شبیه‌سازی رشد گیاهی AquaCrop واسنجی و صحت‌سنجی گردید. نتایج حاصل از خروجی مدل و داده‌های مزرعه‌ای نشان داد که تفاوت بین عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه در تیمارهای آبیاری در سطح یک درصد معنی‌دار بود. با توجه به فایل گیاهی واسنجی شده و داده‌های روزانه هواشناسی (۲۰۱۷-۱۹۸۸) نیاز آبی و عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل در پنج ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب، روانسر و کنگاور با استفاده از مدل برآورد شد. میانگین عملکرد دانه برای ۳۰ سال مورد بررسی در این ایستگاه‌ها به ترتیب ۹۴۰۳، ۹۲۶۱، ۹۱۷۱، ۹۰۱۶ و ۹۱۵۱ کیلوگرم در هکتار برآورد گردید. با توجه به مقادیر عملکرد و نیاز آبی برآورد شده مقدار بهره‌وری مصرف آب در شرایط آبیاری کامل محاسبه گردید که مقدار آن برای ایستگاه‌های کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب، روانسر و کنگاور به ترتیب ۰/۹۵، ۱/۰۹، ۱/۰۹، ۱/۰۸ و ۱/۱۸ کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب برآورد گردید.

واژه‌های کلیدی: تغییرات مکانی، ذرت دانه‌ای، شبیه‌سازی، کم آبیاری، AquaCrop

مقدمه

از راهکارهای بهینه‌سازی مصرف آب و مقابله با تنش خشکی در اراضی فاریاب است. تجربیات مربوط به کم آبیاری در نقاط مختلف دنیا، کارآمدی این شیوه در استفاده بهینه از هر واحد آب مصرفی و افزایش سود خالص را نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال در پاکستان به‌طور گسترده از کم آبیاری استفاده می‌شود، به‌نحوی که کل آب مصرفی، حدود ۲۵ درصد از آبیاری کامل کمتر است (Terimer, 1990) با اعمال مدیریت صحیح در سیستم آب، خاک و گیاه می‌توان ضمن افزایش محصول، یک کشاورزی پایدار ایجاد کرد (Xu et al., 2019; Fadul et al., 2020)

شبیه‌سازی مراحل رشد گیاه و در نتیجه پیش‌بینی عملکرد محصول، منجر به برنامه‌ریزی بهتر و مدیریت کاراتر در روند تولید محصول خواهد گردید. در دهه‌های اخیر مدل‌های زیادی برای شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی و مدیریت آب خاک ارائه شده است و محققین در تحقیقات مختلف از این مدل‌ها استفاده می‌کنند

در دهه‌های اخیر به دلیل افزایش روزافزون جمعیت، نیاز به تولیدات کشاورزی و دامی به صورت فزاینده‌ای افزایش یافته و موجب استفاده غلط و غیراصولی از منابع موجود گردیده که عدم توجه به قابلیت و توان تولید سبب تخریب منابع شده است. ایران کشوری است که متوسط بارندگی آن حدود یک‌سوم متوسط بارش جهانی است و از نظر منابع آب به شدت در تنگنا می‌باشد. لذا بهبود کار آبی مصرف آب مبتنی بر تولید بیشتر در بخش کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Hoogenboom et al., 2004). کم آبیاری یکی

۱ - فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲ - استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۳ - استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: alibafkar@yahoo.com)

در این تحقیق که برای ذرت علوفه‌ای در قزوین انجام شد، شاخص‌های آماری بررسی شده و ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف خطا به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۱/۵ تن در هکتار و ۰/۵ تن در هکتار برآورد شد. نتایج این تحقیق نشان داد که خطای برآورد در این منطقه با دیگر مناطق تفاوت چندانی ندارد و در کل ۱۲ درصد است. خیرتس و همکاران در بخش‌های شمالی، مرکزی و جنوبی منطقه Altiplano بولیوی، مدل AquaCrop را برای گیاه بومی Quinoa تحت سناریوهای مختلف آبیاری، واسنجی و اعتباریابی کردند. نتایج نشان داد که مدل ابزار ارزشمندی برای بررسی و امتحان اثر جمعی مکانیسم‌های تحمل به تنش آبی روی گیاه بومی Quinoa است. عملکرد محصول تحت سناریوهای مختلف آبیاری شبیه‌سازی شده و منحنی‌های احتمالاتی عملکرد در سطوح عملکرد قابل اعتماد ارائه شد. نتایج نشان داد که این منحنی‌های احتمالاتی در نظر گرفته شده دقیق‌تر و ارجح‌تر نسبت به مطالعات اقتصادی هستند (Geerts et al., 2009). در شمال ایتالیایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده و عملکرد دانه محصول جو تحت تأثیر مقادیر مختلف آب و تاریخ کشت‌های مختلف طی سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۰۹ مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مقادیر شبیه‌سازی شده زیست‌توده و عملکرد دانه از دقت مناسبی برخوردار بود (Araya et al., 2010).

ذرت اصلی‌ترین زراعت برای تأمین مواد غذایی در آمریکای شمالی و مرکزی و جنوبی تا قبل از کشف قاره جدید بوده است. ذرت به‌عنوان سلطان غلات معروف است، زیرا تولید و ارزش آن در جهان بیشتر از گندم، جو، یولاف، چاودار و برنج هست (افضلی و همکاران، ۱۳۹۱). این محصول در ایران نیز دارای سطح زیر کشت وسیعی است و از محصولات استراتژیک به شمار می‌رود. در این تحقیق از گیاه ذرت دانه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۶ که تاکنون به منظور تعیین بهره‌وری آب و میزان عملکرد و آب مصرفی مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته استفاده شد و تغییرات مکانی عملکرد، آب مصرفی و بهره‌وری آب این گیاه در استان کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تئوری مدل

با استفاده از مدل AquaCrop میزان تولید عملکرد در اندام‌های مختلف گیاه به‌عنوان معیاری برای بررسی مصرف آب در شرایط دیم، آبی و یا کم‌آبی شبیه‌سازی می‌شود (Steduto et al., 2009). ابزار محاسبه رشد در مدل چرخه آب است. میزان تولید زیست‌توده در ارتباط با آب یا به عبارتی تعرق، معیاری برای استفاده از CO₂ و بخار آب موجود در اتمسفر است. این معیار کمک می‌کند که مدل برای فصول و مکان‌های مختلف قابل کاربرد باشد. این مدل رشد

(Hoogenboom et al., 2004). یکی از اهداف مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، استفاده از آن‌ها برای پیش‌بینی عملکرد محصول می‌باشد (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۳). مدل‌های مختلفی برای این منظور توسعه داده شده و توسط محققین بکار رفته‌اند. مدل‌هایی چون CERES، EPIC، WOFOST، CROPSYST و غیره که البته مستلزم مهارت زیاد کاربر در واسنجی است و متغیرهای ورودی آن‌ها زیاد و اندازه‌گیری آن‌ها سخت می‌باشد (مؤمنی و همکاران، ۱۳۸۷). در سال ۲۰۰۹، فائو مدل شبیه‌سازی AquaCrop را بر اساس معادله دورنیاس و کاسام و به همراه تصحیحاتی بر آن ارائه داد که مقیاس محاسبات در آن بر اساس گام روزانه می‌باشد (Steduto et al., 2009). نتایج پژوهش امداد و تافته (۱۳۹۸) نیز نشان داد که مقدار خطای شبیه‌سازی مدل AquaCrop برای بهره‌وری مصرف آب (۱۳ درصد) بیشتر از عملکرد گندم (۵ درصد) می‌باشد. جوزی و همکاران (۱۳۹۹) در تحقیقی در منطقه همدان به این نتیجه رسیدند که مدل دقت کمتری در برآورد بهره‌وری مصرف آب نسبت به برآورد عملکرد سیب‌زمینی داشت.

سیستم گیاه در مدل AquaCrop با پنج مؤلفه اصلی فنولوژی، کانوبی هوایی، عمق ریشه دهی، تولید زیست‌توده و محصول قابل برداشت تعریف می‌شود. چهارده گیاه اصلی با استفاده از مدل AquaCrop و اندازه‌گیری‌های پارامترهای گیاهی و خاک از مطالعات تجربی در کشورهای مختلف واسنجی شده (Raes et al., 2009) و این امکان در حال حاضر در نسخه ۶ نرم‌افزار به‌عنوان فایل گیاهی پیش‌فرض گنجانده شده است. مدل AquaCrop که تکامل و توسعه‌یافته‌ی مدل Budget است، دارای ساختار پیوسته خاک، گیاه و اتمسفر بوده و با چهار جزء اساسی سروکار دارد: خاک، گیاه (رشد، توسعه و عملکرد)، اتمسفر (رژیم حرارتی، بارش، نیاز تبخیری و غلظت دی‌اکسید کربن) و روابط بین بخشی شرایط محیطی، تنش‌ها و واکنش گیاه (Raes et al., 2009). جنبه‌های مفهومی و پایه‌ای مدل را استدیو و همکاران در سال ۲۰۰۹ تشریح کرده‌اند و الگوریتم و نحوه‌ی استفاده از نرم‌افزار را راس و همکاران در سال ۲۰۰۹ توضیح داده‌اند.

کارایی مدل AquaCrop در منطقه‌ی کرج و تحت مدیریت‌های کم‌آبیاری بر روی گندم توسط علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) مورد مطالعه قرار گرفت. کشت در این تحقیق با شش تیمار آبیاری (تیمارهای ۱۰۰، ۸۰، ۶۰، ۴۰ و ۲۰ درصد نیاز آبی و تیمار تک آبیاری) و دو دور آبیاری هفت و چهارده روزه انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که مدل AquaCrop برای دور آبیاری هفت روزه، مقدار عملکرد دانه، تبخیر و تعرق گیاهی (ETc) و کارایی مصرف آب را به‌خوبی پیش‌بینی نموده اما مدل مذکور در پیش‌بینی این مقادیر با دور آبیاری چهارده روزه دقت کمتری داشت. در تحقیقی دیگر مدل AquaCrop توسط رحیمی‌خوب و همکاران (۱۳۹۳) مورد واسنجی و ارزیابی قرار گرفت.

T100 و T60 با توجه به جدول (۱) به منظور اعتبارسنجی استفاده شد.

آزمایش مزرعه‌ای

این آزمایش در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ در مزرعه تحقیقاتی و آزمایشگاه‌های گروه مهندسی آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی اجرا شد. مزرعه تحقیقاتی با مختصات طول جغرافیایی ۴۷ درجه ۶ دقیقه و ۱۲ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه ۱۹ دقیقه و ۳۳ ثانیه شمالی و ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱).

این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با چهار تیمار (۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰) درصد نیاز آبی در طول دوره رشد و سه تکرار انجام گرفت. لازم به ذکر است که علت انتخاب تیمار ۲۰ درصد بیش‌آبیاری، عدم اطمینان کافی به روش تعیین نیاز آبیاری تیمار شاهد (استفاده از رابطه پنمن ماتنیت فائو) در منطقه مورد مطالعه بود.

کد تیمار	درصد آبیاری اعمال شده
T120	۱۲۰
T100	۱۰۰
T80	۸۰
T60	۶۰

مشخصات و پارامترهای فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی با نمونه‌برداری از اعماق مختلف (متناسب با حداکثر عمق مؤثر ریشه) و انجام آزمایش‌های لازم تعیین شد. سپس از نرم‌افزار SPAW (Saxton and Rawls, 2006) که از بانک اطلاعاتی قدرتمندی برخوردار است و با داشتن درصد اجزای تشکیل‌دهنده بافت خاک، پارامترهای فیزیکی آن را تخمین می‌زند، برای کنترل صحت نتایج آزمایش‌های فیزیکی خاک استفاده شد (جدول ۲).

عملیات آبیاری به صورت جویچه‌ای با انتهای بسته با دور آبیاری ۷ روزه (تابعی از ظرفیت نگهداری آب خاک، حداکثر تبخیر و تعرق و عادت و الگوی منطقه) با استفاده از شیلنگ و کنتور حجمی انجام شد. لازم به ذکر است در مراحل اولیه رشد، جهت اطمینان از سبز شدن بذرها دور آبیاری کمتر در نظر گرفته شده و اعمال تیمارها از آبیاری مرحله پنجم به بعد شروع شد. تیمارهای T100، T120، T80 و T60 به ترتیب تیمارهای ۲۰ درصد بیش‌آبیاری، آبیاری کامل (تیمار شاهد)، ۲۰ درصد کم آبیاری و ۴۰ درصد کم آبیاری هستند (جدول ۱). قبل از هر آبیاری و در مجموع طی ۱۷ مرحله رطوبت خاک در اعماق ۱۵، ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متری به روش وزنی اندازه‌گیری گردید. تاریخ و عمق آبیاری در تیمارهای مورد مطالعه در جدول ۳ گزارش شده است.

گیاه را به صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند. این مدل به سه دسته داده برای اجرا نیاز دارد (Steduto et al. 2009) که عبارت‌اند از: داده‌های اتمسفری مانند بارندگی، تعداد روزهای آفتابی، دمای حداکثر و حداقل و تبخیر، داده‌های مربوط به گیاه، مانند فنولوژی، عمق ریشه و میزان ماده خشک و داده‌های خاک مانند میزان رطوبت اولیه و بافت خاک.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل:

برای ارزیابی نتایج مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی از آماره‌های شاخص سازگاری (d^1)، ضریب کارایی (EF^2) و شاخص جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^3$) (روابط ۳ تا ۵) استفاده شد. در تمام شاخص‌های زیر پارامترهای $P_i, O_i, \bar{O}, \bar{P}$ و N به ترتیب مقادیر مشاهده‌شده، مقادیر شبیه‌سازی‌شده، میانگین مقادیر مشاهده‌شده، میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و تعداد مشاهدات است.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] \quad (3)$$

$$0 \leq d \leq 1$$

$$O' = (O_i - \bar{O})$$

$$P' = (P_i - \bar{P})$$

شاخص سازگاری (d) یک پارامتر توصیفی است که مقدار آن از صفر تا یک متغیر است و هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، مدل کارتر است و مقادیر شبیه‌سازی‌شده قابل اطمینان‌تر هستند. در حالت مطلوب، این شاخص برابر یک است.

$$EF = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \right) \left/ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right. \quad (4)$$

مقدار ضریب کارایی (EF) نشان‌دهنده صحت ارزش داده‌ها هست و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا عدد ۱ در زمان برآزش کامل داده‌ها متغیر است. (Jamieson et al., 1991).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (5)$$

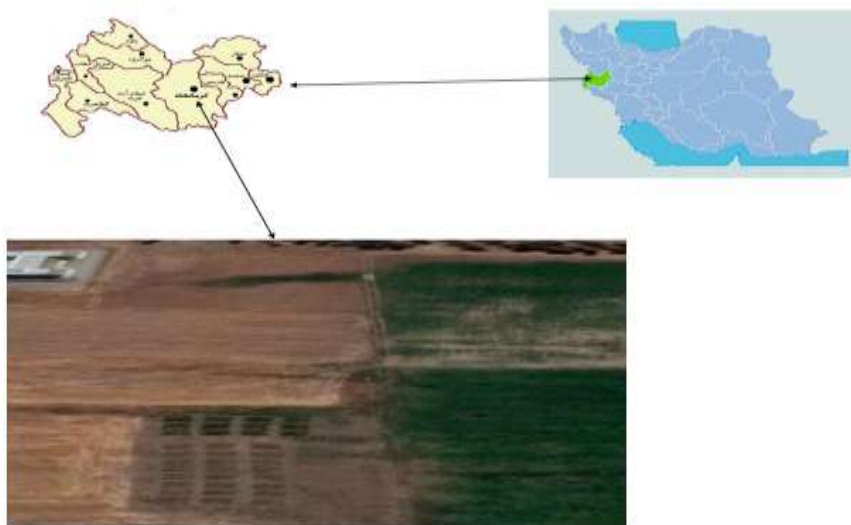
شاخص جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$) تفاوت میان مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل و مقدار واقعی هست. $RMSE$ ابزار خوبی برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی‌شده توسط یک مجموعه داده است و برای مقایسه چند مجموعه داده کاربرد ندارد.

در بخش دوم، برای حصول اطمینان از نتایج به‌دست‌آمده در مرحله واسنجی، بایستی صحت مدل واسنجی شده با مجموعه دیگری از تیمارها که در واسنجی مورد استفاده قرار نگرفته است، مورد ارزیابی قرار گیرد. لازم به ذکر است که نرم‌افزار AquaCrop با اخذ داده‌های مزرعه‌ای، امکان تحلیل آماری معیارهای آماری فوق را دارد. در این مطالعه از داده‌های دو تیمار T120 و T80 برای واسنجی و دو تیمار

1- Index of agreement

2- Coefficient of efficiency

3- Root Mean Square Error



شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای موقعیت محل اجرای آزمایش در استان کرمانشاه

جدول ۲- مشخصات فیزیکی خاک محل آزمایش

عمق خاک (cm)	بافت خاک	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/hr)	رطوبت اشباع (درصد حجمی)	رطوبت نقطه پژمردگی (درصد حجمی)	رطوبت ظرفیت زراعی (درصد حجمی)
۰ - ۳۰	clay	۰/۴۲	۰/۵۵	۰/۲۲	۰/۴۲
۳۰-۶۰	clay	۰/۴۲	۰/۵۵	۰/۲۲	۰/۴۲
۶۰-۹۰	silty clay loam	۰/۵۰	۰/۵۲	۰/۲۳	۰/۴۳

روزانه هواشناسی ۳۰ ساله (مربوط به سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷) از ایستگاه‌های هواشناسی پنج شهرستان مورد مطالعه تهیه و میانگین بلندمدت آن‌ها محاسبه شد. میانگین ۳۰ ساله میزان تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه برای مناطق مورد مطالعه با رابطه پنمن مانتیث اصلاح شده فائو (Allen et al., 1998) و با استفاده از میانگین داده‌های هواشناسی ۳۰ ساله محاسبه گردید.

محاسبه بهره‌وری

با استفاده از داده‌های بلندمدت هواشناسی و فایل گیاهی کالیبره شده مدل AquaCrop اجرا و بهره‌وری مصرف آب با توجه به عملکرد دانه و زیست‌توده با استفاده از روابط ۶ و ۷ به دست آمد.

$$WP_{\text{grain}} = \frac{Y_{\text{grain}}}{W} \quad (۶)$$

$$WP_{\text{biomass}} = \frac{Y_{\text{biomass}}}{W} \quad (۷)$$

در این روابط WP_{grain} و WP_{biomass} به ترتیب بهره‌وری مصرف آب نسبت به دانه و زیست‌توده تولیدی برحسب کیلوگرم بر مترمکعب

جهت واسنجی و صحت سنجی پارامترهای گیاهی مدل در طول دوره رشد وزن زیست‌توده و دانه و تاج پوشش گیاهی در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. درصد پوشش سبز اندام هوایی گیاه از طریق گرفتن عکس با استفاده از منو پاد از سطح فوقانی گیاهان و با استفاده از تحلیل تصویر گرفته‌شده در نرم‌افزار GIS با دقت مناسبی به دست آمد.

تاریخ کشت مناسب جهت اجرای مدل با توجه به نتایج یک تحقیق هم‌زمان دیگر که در جریان بود (صادقی، ۱۳۹۷)، برای ایستگاه‌های مختلف استان تعیین شد که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. مدل با توجه به این تاریخ کشت‌ها برای هر ایستگاه آماده و اجرا شد.

فایل هواشناسی

ابتدا یک فایل هواشناسی بر اساس داده‌های روزانه ایستگاه هواشناسی کرمانشاه که در ۲ کیلومتری محل انجام آزمایش واقع شده است تهیه گردید. از این فایل برای واسنجی و صحت سنجی مدل استفاده شد. در ادامه برای اجرای مدل واسنجی شده مقادیر داده‌های

آب، Y_{grain} و Y_{biomass} به ترتیب عملکرد دانه و زیست‌توده برحسب می‌باشند. کیلوگرم در هکتار و W مقدار آب آبیاری برحسب مترمکعب در هکتار

جدول ۳- اطلاعات مربوط به زمان و مقدار آبیاری

مقدار آب آبیاری (میلی‌متر)				روز پس از کشت	تاریخ آبیاری	مرحله آبیاری
T120	T100	T80	T60			
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۵	۱۳۹۶/۳/۹	۱
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۱۱	۱۳۹۶/۳/۱۵	۲
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۱۶	۱۳۹۶/۳/۲۰	۳
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۲۳	۱۳۹۶/۳/۲۷	۴
۸۰	۶۷	۵۴	۴۰	۲۹	۱۳۹۶/۴/۳	۵
۶۸	۵۷	۴۶	۳۴	۳۷	۱۳۹۶/۴/۱۰	۶
۵۰	۴۲	۳۴	۲۵	۴۴	۱۳۹۶/۴/۱۷	۷
۷۴	۶۲	۵۰	۳۷	۵۲	۱۳۹۶/۴/۲۵	۸
۴۹	۴۱	۳۳	۲۵	۵۸	۱۳۹۶/۴/۳۱	۹
۶۸	۵۷	۴۶	۳۴	۶۶	۱۳۹۶/۵/۱۸	۱۰
۵۲	۴۳	۳۴	۲۶	۷۳	۱۳۹۶/۵/۱۵	۱۱
۵۲	۴۳	۳۴	۲۶	۸۰	۱۳۹۶/۵/۲۲	۱۲
۵۸	۴۸	۳۸	۲۹	۸۷	۱۳۹۶/۵/۲۹	۱۳
۵۲	۴۳	۳۴	۲۶	۹۴	۱۳۹۶/۶/۵	۱۴
۴۴	۳۷	۳۰	۲۲	۱۰۱	۱۳۹۶/۶/۱۲	۱۵
۳۸	۳۲	۲۶	۱۹	۱۰۸	۱۳۹۶/۶/۱۹	۱۶
۳۵	۲۹	۲۳	۱۷	۱۱۵	۱۳۹۶/۶/۲۶	۱۷
۴۰	۳۳	۲۶	۲۰	۱۲۶	۱۳۹۶/۷/۶	۱۸
۱۰۰۰	۸۷۴	۷۴۸	۶۲۰	جمع کل ارتفاع آب مصرفی در هر تیمار در کل دوره رشد (میلی‌متر)		

جدول ۴- تاریخ کشت‌های بهینه در ایستگاه‌های تحت مطالعه

ایستگاه	کرمانشاه	اسلام‌آباد غرب	کنگاور	روانسر	سرپل ذهاب
تاریخ بهینه کشت	۱۵ اردیبهشت	۱۵ اردیبهشت	۲۵ اردیبهشت	۵ اردیبهشت	۱۶ فروردین

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

نخستین مرحله در استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز، واسنجی مدل برای شرایط منطقه مورد آزمایش و گیاه زراعی مورد استفاده است. در اینجا با سعی و خطا، فایل گیاهی مدل به شرح جدول (۵) واسنجی گردید. پس از واسنجی مدل، عملکردهای برآورد شده، با استفاده از مشاهده‌های میانگین عملکرد در سال زراعی ۱۳۹۶ ارزیابی شد. نتایج داده‌های کالیبره شده در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای تیمارهای موردبررسی به شرح جدول (۶) است.

همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود مدل برای تیمارهایی که در مرحله واسنجی استفاده شدند، پوشش گیاهی و زیست‌توده را با دقت عالی شبیه‌سازی نمود. از بین این تیمارها مدل تیمار T80 را در

شبیه‌سازی بین زیست‌توده و تیمارهای T80 و T120 را در شبیه‌سازی پوشش گیاهی و تیمار T120 را در شبیه‌سازی رطوبت خاک با بیشترین میزان دقت، شبیه‌سازی کرد. پس از واسنجی مدل AquaCrop با دو تیمار T80 و T120، برای بررسی دقت مدل اقدام به صحت‌سنجی مدل AquaCrop با دو تیمار T100 و T60 شد که نتایج به‌دست‌آمده از واسنجی مدل با استودتو و همکاران نیز مطابقت خوبی داشت (Steduto et al., 2009). در این مرحله پارامترهای گیاهی که در مرحله واسنجی تعیین شد، بدون تغییر باقی ماند و مدل AquaCrop برای دو تیمار دوم اجرا گردید و صحت مدل و دقت آن در شبیه‌سازی پوشش گیاهی، زیست‌توده و رطوبت خاک موردبررسی قرار گرفت. با مقایسه نتایج مزرعه‌ای و نتایج شبیه‌سازی مدل واسنجی شده AquaCrop برای زیست‌توده و پوشش گیاهی ذرت و کسب اطمینان از دقت مدل در برآورد عملکرد ذرت دانه‌ای در منطقه

مورد بررسی، از مدل برای برآورد عملکرد گیاه ذرت دانه‌ای در شرایط اقلیمی شهرستان‌های کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب، کنگاور و روانسر استفاده شد.

جدول ۵- پارامترهای گیاهی واسنجی شده مدل AquaCrop

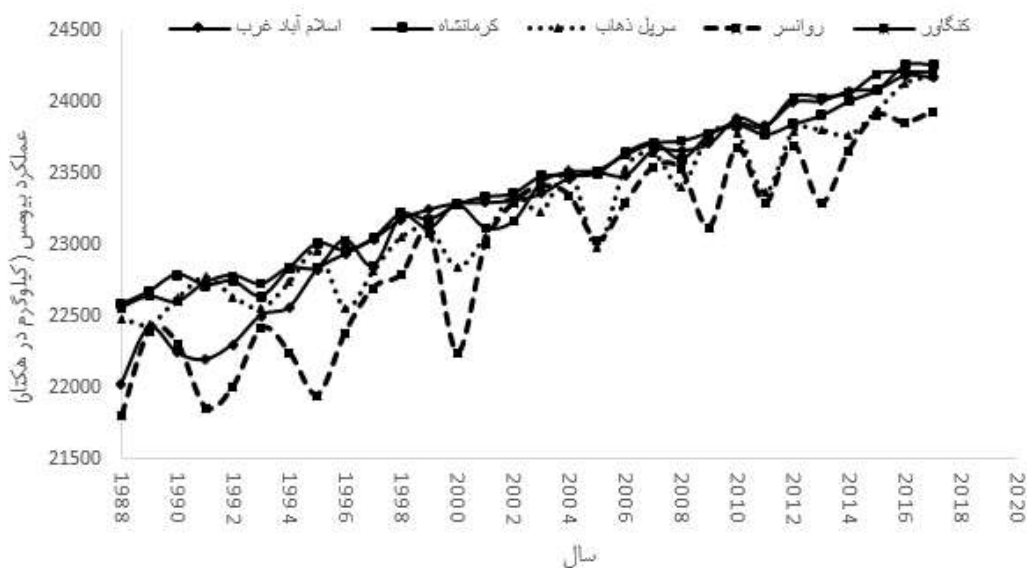
توضیحات	مقدار		واحد	پارامتر
	واسنجی	پیش‌فرض		
واسنجی شده	۰/۵۱	۰/۴۹	درصد	درصد پوشش گیاهی اولیه
اندازه‌گیری شده	۱۰۲۰۰۰	۷۵۰۰۰	بوته در هکتار	تراکم کشت
واسنجی شده	۱/۲	۱	متر	بیشینه عمق مؤثر
واسنجی شده	۱۲/۷	۱۶/۳	درصد روز	ضریب رشد پوشش تاجی
واسنجی شده	۷	۱۱/۷	روز	ضریب کاهش پوشش تاجی
اندازه‌گیری شده	۹۲	۹۴	درصد	بیشینه درصد پوشش گیاهی
اندازه‌گیری شده	۶۹	۶۹	درجه روز رشد	زمان جوانه‌زنی
اندازه‌گیری شده	۹۷۴	۷۶۷	درجه روز رشد	زمان رسیدن به بیشینه پوشش گیاهی
اندازه‌گیری شده	۱۴۲۰	۱۶۱۲	درجه روز رشد	زمان پیری
اندازه‌گیری شده	۱۸۱۷	۱۹۴۳	درجه روز رشد	زمان رسیدن فیزیولوژیک
اندازه‌گیری شده	۹۵۸	۹۵۸	درجه روز رشد	زمان گلدهی
اندازه‌گیری شده	۲۲۲	۲۲۰	درجه روز رشد	طول دوره گلدهی
واسنجی شده	۲۸/۱	۳۳/۷	گرم بر مترمربع	بهره‌وری آب
اندازه‌گیری شده	۳۸	۴۸	درصد	شاخص برداشت
واسنجی شده	۰/۲۵	۰/۱۴	بی‌بعد	حد بالای ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاهی
واسنجی شده	۰/۶۰	۰/۷۲	بی‌بعد	حد پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاهی
واسنجی شده	۳	۲/۹	بی‌بعد	ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت توسعه پوشش تاجی
واسنجی شده	۲	۱/۹	بی‌بعد	ضریب شکل میزان تنش وارد شده با بسته شدن روزنه‌ها
واسنجی شده	۶	۸/۵	بی‌بعد	ضریب تخلیه آب خاک برای مرحله پیری
پیش‌فرض	۳۰	۳۰	سانتی‌گراد	دمای بالا
پیش‌فرض	۸	۸	سانتی‌گراد	دمای پایه

جدول ۶- شاخص‌های آماری بین پارامترهای اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده جهت واسنجی و صحت‌سنجی

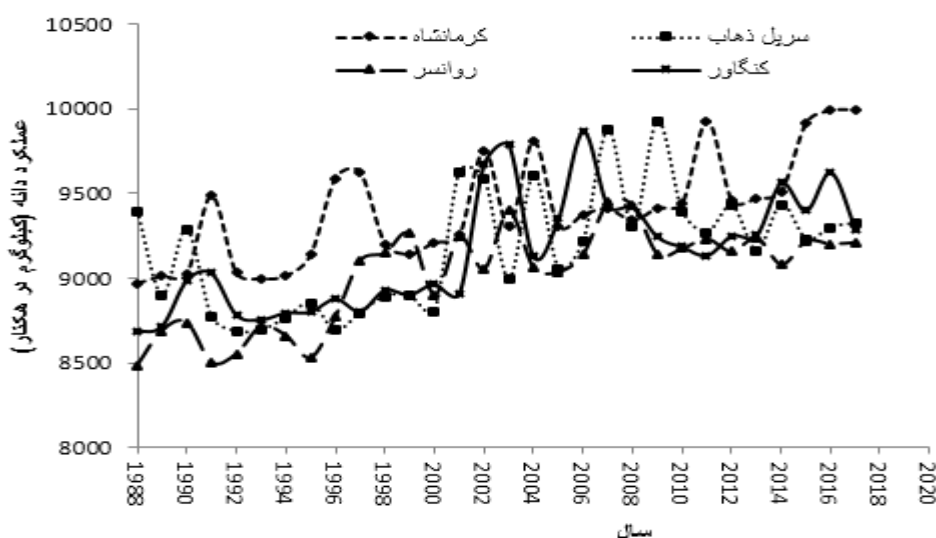
مرحله	تیمار	زیست‌توده				تاج پوشش گیاهی				رطوبت خاک			
		d	EF	RMSE	R	d	EF	RMSE	R	d	EF	RMSE	R
واسنجی	T120	۰/۹۹	۱/۳	۰/۹۸	۰/۹۹	۵/۲	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۳۱	۱۶/۴	۱/۷۳	-۱/۵۴	۰/۵۴
	T80	۰/۹۹	۰/۹	۰/۹۸	۱	۷/۲	۰/۹۳	۰/۹۸	۰/۷	۳۵	۱/۵۴	-۱/۵۳	۰/۵۳
صحت سنجی	T100	۱	۰/۹	۰/۹۹	۱	۹/۳	۰/۸۹	۰/۹۷	-۱/۰۵	۲۱/۵	۷/۸۲	-۲/۳۵	۰/۳۵
	T60	۱	۱/۱	۰/۹۵	۰/۹۹	۹/۸	۰/۸۶	۰/۹۷	۰/۹۰	۵۸/۲	۰/۷۴	-۰/۷۳	۰/۷۳

مقادیر عملکرد از صفر شروع نشده و ثانیاً افزایش میزان CO₂ که اثر بارور کنندگی در محصولات زراعی دارد و با افزایش آن بهره‌وری آب به دلیل کاهش تعرق افزایش می‌یابد. با استفاده از داده‌های بلندمدت هواشناسی و فایل گیاهی واسنجی شده مدل AquaCrop اجرا و عملکرد دانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه برآورد شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. متوسط عملکرد برآورد شده دانه در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۷ گزارش شده است.

عملکرد زیست‌توده در پنج ایستگاه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مقدار متوسط عملکرد زیست‌توده در ۳۰ سال گذشته در ایستگاه کرمانشاه ۲۳۳۸۰ کیلوگرم در هکتار، کنگاور ۲۳۳۶۸ کیلوگرم در هکتار، اسلام‌آباد غرب ۲۳۱۵۵ کیلوگرم در هکتار، سرپل‌ذهاب ۲۳۲۲۲ کیلوگرم در هکتار و روانسر ۲۲۹۳۷ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. در این نمودار ملاحظه می‌شود که روند عملکرد در این بازه زمانی افزایشی است. از دلایل عمده آن این است که اولاً روی محور عمودی نمودار



شکل ۲- عملکرد برآورد شده زیست توده ذرت دانه‌ای



شکل ۳- عملکرد برآورد شده دانه ذرت دانه‌ای

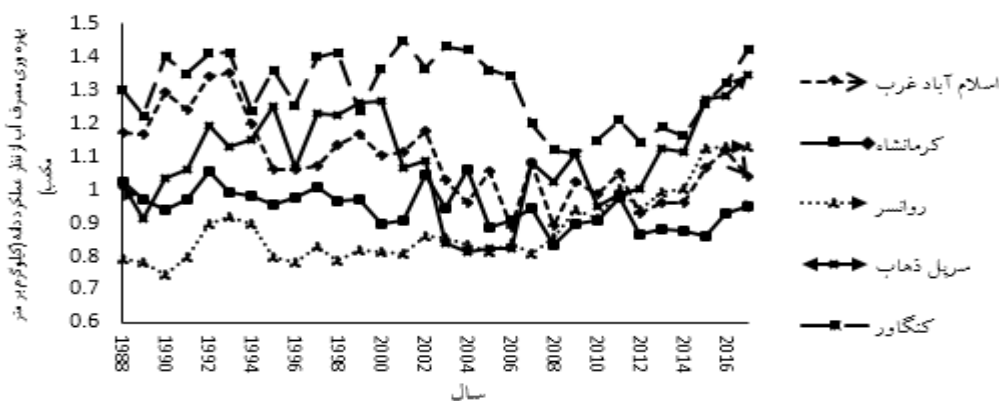
جدول ۷- متوسط عملکرد برآورد شده دانه ذرت دانه‌ای در ایستگاه‌های تحت مطالعه

ایستگاه	کermanشاه	اسلام‌آباد غرب	سرپل‌ذهاب	روان	کنگاور
عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	۹۴۰۳	۹۲۶۱	۹۱۷۱	۹۰۱۶	۹۱۵۱

بهره‌وری مصرف آب

با استفاده از داده‌های بلندمدت هواشناسی و فایل گیاهی واسنجی شده مدل AquaCrop اجرا شد و با توجه به عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده، بهره‌وری مصرف آب به دست آمد. با توجه به شکل ۴ متوسط بهره‌وری مصرف آب دانه در سی سال گذشته در ایستگاه‌های

کermanشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب، روان و کنگاور به ترتیب برابر با ۰/۹۴۶، ۱/۰۸۹، ۱/۰۸۵، ۰/۸۸۳ و ۱/۱۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب شبیه‌سازی شد. نتایج نشان‌دهنده بالاتر بودن ایستگاه کنگاور در بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد دانه بود.



شکل ۴- مقایسه بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد زیست‌توده در ایستگاه‌های تحت مطالعه

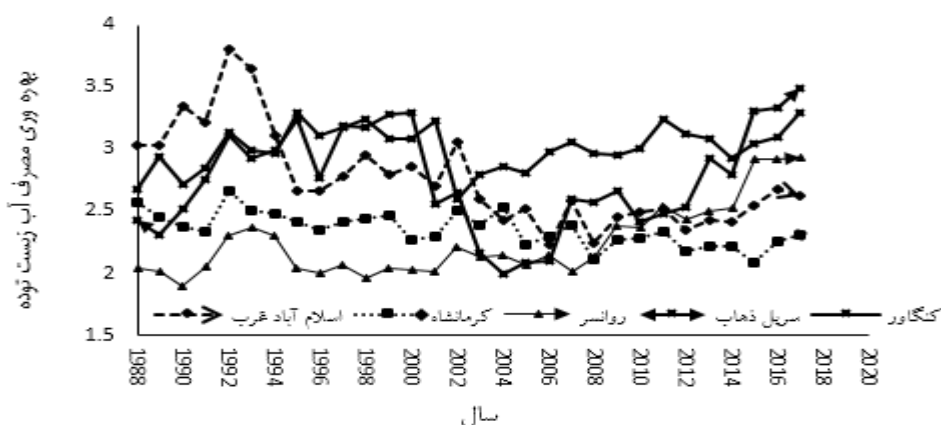
اینکه در ایستگاه کرمانشاه عملکرد دانه بیشتر از بقیه ایستگاه‌ها بوده ولی در ایستگاه کنگاور بهره‌وری آب بیشتر بوده است. این مورد بیانگر این است که ممکن است با افزایش عملکرد میزان بهره‌وری آب افزایش پیدا نکند. به‌طور کلی، نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه ابزار توانمندی جهت آنالیزهای مختلف مدیریت کشاورزی و منابع آب می‌باشند.

هرچند که در تحقیق حاضر فقط یک ابزار مدیریتی (مقدار آب آبیاری) مورد بررسی قرار گرفت اما نتایج این مدل فقط منحصر به همین یک مورد نیست. انتخاب بهترین تاریخ کشت، انتخاب رقم مناسب برای کشت در یک منطقه با واسنجی کردن پارامترهای گیاهی رقم‌های مختلف یک محصول و مقایسه نتایج آن‌ها در منطقه مورد نظر، از دیگر کاربردهای چنین مدل‌هایی هست.

متوسط بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد زیست‌توده در شکل ۵ نشان داده شده است. این میزان در ایستگاه‌های کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل ذهاب، روانسر و کنگاور به ترتیب برابر با ۲/۳۵۴، ۲/۷۵۴، ۲/۲۴۹ و ۳/۰۰۹ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد و نتایج حاکی از بالاتر بودن ایستگاه کنگاور در بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد زیست‌توده بود (جدول ۸).

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایجی که از این مطالعه به دست آمد می‌توان گفت که مدل AquaCrop نسبت به داده‌های واقعی به دلیل در نظر گرفتن شرایط پتانسیل و عدم هرگونه تنش، با شیب ملایم افزایشی بعد از واسنجی، عملکرد زیست‌توده و دانه را در این رقم از ذرت دانه‌ای در ایستگاه‌های تحت بررسی نشان داد. از دیگر نتایج بدست آمده



شکل ۵- مقایسه بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد زیست‌توده در ایستگاه‌های تحت مطالعه

جدول ۸- نتایج حاصل از اجرای مدل AquaCrop در ایستگاه‌های تحت مطالعه

کنگاور	روانسر	سرپل ذهاب	اسلام‌آباد غرب	کرمانشاه	پارامتر
۲۳۳۶۸	۲۲۹۶۲	۲۳۳۲۲	۲۳۲۷۶	۲۳۳۸۰	عملکرد زیست‌توده پتانسیل (کیلوگرم در هکتار)
۹۱۵۱	۹۰۱۶	۹۱۷۱	۹۲۶۱	۹۴۰۳	عملکرد پتانسیل دانه (کیلوگرم در هکتار)
۱۳۵۶	۱۶۵۸	۱۷۷۶	۱۴۴۳	۱۶۶۳	مجموع تبخیر تعرق مرجع (میلی‌متر در سال)
۷۷۹	۱۰۳۲	۸۶۲	۸۵۷	۹۹۷	تبخیر تعرق فصلی ذرت (میلی‌متر)
۱/۱۸	۰/۸۸	۱/۰۹	۱/۰۹	۰/۹۵	بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد دانه (کیلوگرم بر مترمکعب)
۳/۰۱	۲/۲۵	۲/۷۵	۲/۷۶	۲/۳۵	بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد زیست‌توده (کیلوگرم بر مترمکعب)

منابع

- افضلی، م، طاعی، ج، امیری نژاد، م. ۱۳۹۱. تخمین پتانسیل عملکرد ذرت دانه‌ای با استفاده از مدل‌های رشد و نمو گیاهان زراعی در مناطق نیمه گرمسیری جنوب کرمان. " سومین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار.
- امداد، م.ر. تافته، آ. ۱۳۹۸. تعیین مناسب‌ترین عمق آب آبیاری گیاه گندم با استفاده از مدل Aquacrop در راستای ارتقای کارایی مصرف آب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۲): ۴۲۵-۴۱۷.
- جوزی، م. قربانی، ز. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل AquaCrop تحت مدیریت کم آبیاری کلون‌های جدید سیب‌زمینی در همدان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۴ (۱): ۲۴۰-۲۳۰.
- خلیلی، ن، داوری، ک، علیزاده، ا، کافی، م، انصاری، ح. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم با استفاده از مدل گیاهی آکوآکراپ، مطالعه موردی ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم سیستان، خراسان شمالی. نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۸ (۵): ۹۳۹-۹۳۰.
- رحیمی خوب، ح. ۱۳۹۳. واسنجی و ارزیابی مدل AquaCrop برای ذرت علوفه‌ای قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ۸ (۱): ۱۱۵-۱۰۸
- صادقی، ب. ۱۳۹۷. تعیین تاریخ کشت بهینه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۶ و آفتابگردان رقم فرخ در استان کرمانشاه با استفاده از مدل AquaCrop به‌منظور افزایش بهره‌وری مصرف آب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه رازی.
- علیزاده، ح، نظری، ب، پارس‌نژاد، پ، رضانی‌اعتدالی، ه، جانباز، ح. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقه کرج. سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب، ۱۰ الی ۱۲ اسفند ۱۳۸۹.
- مؤمنی، ر، نظری‌فرهانی، م، منتظر، ع ا و نظری‌فر، م. ه. ۱۳۸۷.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, 293 pp.
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A. and Dejene, T. 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficit and irrigated barley. Agricultural Water Management, 97(11):1838-1846.
- Fadul, E., Masih, I., De Fraiture, C., and Suryadi, FX. 2020. Irrigation performance under alternative field designs in a spate irrigation system with large field dimensions. Agricultural Water Management, 231: 105989.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J. A., Taboada, C., Mendoze, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V., and Steduto, P. 2009. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. Agronomy Journal 101(3): 499-508.
- Hoogenboom G.J., White J.W., and Messina C.D. 2004. From genome to crop: integration through simulation modelling. Field Crop Research. 90: 145-163.1
- Jamieson P.D., Porter J.R., and Wilson D.R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Research, 27(4): 337-350.
- Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., and Fereres E. 2009. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- Saxton, K.E., and Willey, P.H. 2006. The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. p. 401-435. In V.P.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water. I. Concepts and underlying

کاربرد مدل رشد گیاهی CropSyst جهت بررسی آنالیزهای مدیریتی افزایش بهره‌وری مصرف آب گندم (شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران اهواز) " دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اهواز، دانشگاه چمران.

Xu, J., Bai, W., Li, Y., Wang, H., Yang, S., and Wei, Z. 2019. Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China. *Agricultural Water Management*, 213: 289-297.

principles. *Agronomy Journal*. 101:426–437.
Trimmer, W.L. 1990. Partial irrigation in Pakistan. *J. ASCE Irrigation and Drainage Division* 116 (3): 342-353.

Determination of Water Productivity in Grain Maize (KSC 706) using AquaCrop model in Kermanshah Province

M. Palash¹, A. Bafkar^{2*}, B. Farhadi Bansouleh³

Received: Dec.06, 2020

Accepted: Jan.12, 2021

Abstract

Among the indicators of optimizing water consumption in the agricultural sector; crop water productivity index has received more attention. This index is estimated based on the crop yield and water requirement, which depends on meteorological parameters, soil characteristics, field management and crop type. Due to changes in meteorological parameters in different regions, changes in the crop yield and water requirement in different regions can be expected. In this study, the Maize SC 706 was cultivated in the research farm of faculty of agriculture, Razi University, Kermanshah, in a randomized complete block design with treatments of 120, 100, 80 and 60% of irrigation requirement and three replications. The AquaCrop model was calibrated and validated using measured farm data. The results of model output and field data showed that the difference between biomass yield and grain yield in irrigation treatments was significant at the level of one percent. According to the calibrated crop file and daily meteorological data (1988-2017), water requirement and grain yield under full irrigation conditions in five synoptic stations of Kermanshah, Islam Abad Gharb, Sarpol-e Zahab, Ravansar and Kangavar were estimated using the model. The average of grain yield for the 30 years studied in these stations was estimated at 9403, 9261, 9171, 9016 and 9151 kg / ha, respectively. According to the estimated yield and water requirement, the amount of water productivity in the full irrigation conditions was calculated, the amount of which for Kermanshah, Islamabad Gharb, Sarpol Zahab, Ravansar and Kangavar stations respectively were 0.95, 1.09, 1.09, 0.88 and 1.18 kg of grain per cubic meter of water were estimated.

Keywords: AquaCrop, Deficit irrigation, Maize, Simulation, Spatial variation

1 - M.Sc. Graduated of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

2 - Assistant Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

3 - Assistant Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

(* - Corresponding Author Email: alibafkar@yahoo.com)

Contents

Effect of Using Lead-Contaminated Water by Surface Irrigation and Subirrigation on Silage Maize Yield and Uptake	16
A. Liaghat, M. R. Oveysi, H. Ebrahimian, M. Pourgholam-Amiji, M. Saleh	
Estimation of Runoff Using SIMTOP and BATS Schemes and Actual Evapotranspiration Using a Dynamic Vegetation Scheme in Noah-MP Land Surface Model in Neishaboor Watershed	26
S. Mirshafee, H. Ansari, K. Davary, A.N. Ziaei	
Modeling The Groundwater Quality (Salinity) Variations In Neyshabour Plain Using MODFLOW And MTDMS	37
P. Taherian, H. Ansary, K. Davari, A. Naghi Ziai, A. Beheshti	
The Isfahan values of Temperature and Precipitation Forecast Based on Two Fine scale models Lars_WG and SDSM and Artificial Neural Network Method	49
A. Zarfeshani, MH. Jahangir	
Comparison of Two Physically Capillary-Adsorption Based Models for Estimation of Unsaturated Hydraulic Conductivity at Both Near Dry and Saturated Water Contents	61
A. Tehrani, A. Liaghat, S. Norouzi	
Experimental Study of Combined Flow Trapezoidal Labyrinth Weir-Gate with One Cycle	74
B. Khalili, A. Abbaspour, D. Farsadizadeh, J. Parsa	
Economical Analysis of Deficit Irrigation Management: A Case Study in an Orange Orchard	86
M. I. Kamali, H. ansari	
Investigation Yield, Yield Components and Water Efficiency of Wheat in Three Systems: Surface, Sprinkler and Strip Drip Irrigation	97
S. Safarzadeh, M. Saremi, A. Farshid, M. Dehghani	
Investigation of Subsurface Drip Irrigation and the Time of the First Irrigation on the Quantity and Quality of Saffron	108
Y. Choopan, A. Hezar Jaribi , Kh. Ghorbani , M. Hesam and A. Khashei Siuki	
Modeling Discharge Coefficient of Radial Gates Under Submerged Flow Conditions using Kernel-Based Approaches	120
K. Roushangar, A. Alirezazadeh Sadaghiyani, S. Shahnazi	
Investigating of Climate Change Effects on the Surface Runoff with SWAT Model (Case study: Mazlaghan River)	137
Sh. HajiGhasemi, M. Zakeri Niri, A. Najafi Jilani	
Evaluation of Intelligent Models Due to Estimating Saturated Hydraulic Conductivity in Loamy Soils	150
S Heidari TashehKaboud, M Khoshravesh	
Flood Routing via Kinematic Wave Theory based on GIS (Case Study: Ghareh-Chay River)	163
M. Rezaei Anvar, M. Zakeri Niri, M. Sohrabi MollaYousefi	
Temporal and Spatial Distribution of Water Footprint and Water Use Efficiency of Barely in Different regions of Iran	176
H. Piri, M. Mobaraki	
Determining the Appropriate Values Of Irrigation System Design Parameters Tape And Strip System With Two Continuous Flow Regimes And Decrease Flow	187
H. Ramezani Etedali, K. zarakani, M. Fakhar	
Multi-Objective Optimization of Cropping Pattern by Emphasizing on Water Footprint in the Eastern Provinces of Iran	198
A. Arefinia and Kh. Ahmadaali	
Study of the Effect of Changing the Elevation of Vegetation with Regular Layout on Wave Reduction Using Flow-D Numerical Model	210
S.A. Ghaheri Nejad, M. Behdarvandi Askar, M. Ansari Ghojghar, E. Parsi	
The Effect of Different Spur Dike Shapes on Bridge Abutment Scour in Compound Channel	222
S. Emamgholizadeh, A. Nazeri, and KH, Azhdary	

Comparison of DSSAT and AQUACROP models performance for wheat yield simulation	233
M.R, Emdad and A, Tafteh	
Determination of Water Productivity in Grain Maize (KSC 706) using AquaCrop model in Kermanshah Province	244
M. Palash, A. Bafkar, B. Farhadi Bansouleh	

Iranian Journal of Irrigation and Drainage

Published by: Iranian Association of Irrigation and Drainage (IAID)

Manager in Charge: Eng. Keshavarz , A Agricultural Research Center, Tehran

Editor in Chief: Dr. Alizadeh, A. Prof.,of Water Eng. Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Abbasi, F.	Irrigation and Drainage	Prof., Agricultural Research Center (Karaj)
Alizadeh, A.	Irrigation and Drainage	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Ansari, H.	Irrigation and Drainage	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
DehghaniSanij, H.	Irrigation and Drainage	Assoc. Prof., Agricultural Research Center (Karaj)
Ghahraman, B.	Irrigation and Drainage	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A., M.	Irrigation and Drainage	Prof.,Tehran University
Mirlatifi, S., M.	Irrigation and Drainage	Assoc. Prof., Tarbiat Moddares University, Tehran
Moosavi, S., F.	Water Resources	Prof., Semnan University
Pazira, E.	Irrigation and Drainage	Prof., Islamic Azad University , Tehran
Sharifan, H.	Irrigation and Drainage	Assoc. Prof., Agricultural sciences and Natural Resources University of Gorgan

Coordinating Kanani, E

Typestting &Layout Asadi, R

Manager: Iranian Association of Irrigation and Drainage (IAID)

Printed by:

Address: Karimkhan-e-Zand Avenue, North Aban(Azodi) street, AllameTabatabaee
University Building, second floor, Room No: 201, Tehran, Iran

Post Code 15976-33131

Tel. +98 21 81032217

Fax: +98 21 81032200

E-Mail: iaid.2010@yahoo.com

Web Site: www.iaid.ir