نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۲، بهمن - اسفند ۱۳۹۷، ص. ۱۴۶۲-۱۴۴۸

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 12, Feb.-Mar. 2019, p. 1448-1462

برآورد تبخیر - تعرق و نیاز آبی محصولات زراعی در مناطق با تنوع اقلیمی و ارتفاعی (مطالعه موردی: استان قم)

خالد احمدالی[۱]، هادی رمضانی اعتدالی[۲*] و عباسعلی پورمحسنی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۱۷

چکیده

برآورد نیاز آبی محصولات زراعی در مناطقی مانند استان قم که دارای تنوع اقلیمی و ارتفاعی بوده و تراکم شبکه ایستگاهی کمی دارند همواره با مشکل روبرو بوده است. در این مطالعه به برآورد نیاز آبی محصولات زراعی مهم در این استان پرداخته شد. پارامترهای اقلیمی با استفاده از روابط رگرسیونی استخراج شده نسبت به ارتفاعات موجود در هر محدوده اصلاح و نیاز آبی خالص در هر محدوده در طبقات ارتفاعی مختلف محاسبه شد. نتایج نشان‌داد که نیاز آبی خالص همه‌ی محصولات مورد بررسی در محدوده‌ی ساوه بیش‌ترین مقدار را دارد. همچنین در محصولات پاییزه (گندم، جو و کلزا)، کم‌ترین نیاز آبی خالص در محدوده‌ی گرمسار و در بین محصولات بهاره (پنبه، یونجه و ذرت علوفه‌ای) در محدوده ساوه-تفرش مشاهده شد. میانگین نیاز آبی خالص سالانه‌ی گندم، جو و کلزا در محدوده‌ی ساوه به ترتیب برابر ۷۴۳/۷، ۶۴۷/۳ و ۷۴۳/۷ میلی‌متر است که بیش‌تر از محدوده گرمسار می‌باشد. این مقدار برای پنبه، ذرت علوفه‌ای و یونجه در محدوده ساوه به ترتیب برابر ۸۱۱/۵، ۴۳۵/۷ و ۸۷۵/۱ میلی‌متر است که بیش‌تر از محدوده‌ی ساوه-تفرش می‌باشد. پیشنهاد می‌شود از کشت محصولات پاییزه در محدوده‌ی ساوه به دلیل میزان آب مجازی بالاتر اجتناب و بیش‌تر محصولات بهاره کشت شود.

واژه‌های کلیدی: بارندگی موثر، روش فائو پنمن - مانتیث، ضریب گیاهی، محصولات بهاره و پاییزه

مقدمه

شرایط اقلیمی کشور ایران به گونه‌ای است که بخش کشاورزی آن برای تولید مواد غذایی به شدت به آبیاری وابسته است. از طرفی بخش کشاورزی در بین بخش‌های صنعت و شرب، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب محسوب می‌شود. طوری‌که از ۹۲ میلیارد مترمکعب آب استحصال‌شده از منابع سطحی و زیرزمینی در کشور، حدود ۸۴ میلیارد مترمکعب (۹۱٪) آن در بخش کشاورزی مصرف می‌گردد. شرایط خاص اقلیمی کشور که خشکی و پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی واقعیت گریزناپذیر آن است، هرگونه تولید مواد غذایی و کشاورزی پایدار را منوط به استفاده صحیح و منطقی از منابع آب محدود کشور نموده است. شرایط متفاوت اقلیمی و منابع آب ایران طلب می‌کند که کارشناسان، محققان، مدیران و مراکز علمی و پژوهشی کشور در بخش آب نیز متفاوت‌تر از سایر کشورهای جهان که شرایط طبیعی و نسبتا پایداری دارند، باشند. در طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی محاسبه‌ی نیاز آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، لذا برآورد صحیح نیاز آبی گیاه نه تنها به تولید محصول کمک میکند، بلکه در مدیریت منابع آب نیز موثر است (ابراهیمیان و حسن‌لی، ۱۳۹۵؛ قیصری و همکاران، ۱۳۸۵؛ قمرنیا و موسی‌خانی، ۱۳۹۳). اندازه‌گیری دقیق تبخیر - تعرق، نیازمند ابزارهای گران‌قیمت می‌باشد که امکان استفاده از آن‌ها در همه‌ی نقاط وجود ندارد. از این‌رو محققان همواره به دنبال روابط و روش‌های کاربردی، کم هزینه و با دقت مناسب برای برآورد صحیح مقادیر این پارامتر بوده‌اند. روش‌های مختلفی در برآورد تبخیر - تعرق در شرایط اقلیمی و جغرافیایی مختلف با استفاده از داده‌های هواشناسی ارایه شده است. این روش‌ها از روابط تجربی ساده گرفته تا روش‌هایی که اساس فیزیکی پیچیده‌ای دارند، متغیر می‌باشند (Allen et al., 1996; 1998؛ بختیاری و همکاران، ۱۳۹۴). تحقیقات زیادی در نقاط مختلف جهان نشان‌دهنده این نکته است که روش فائو پنمن- مانتیث به دلیل جامع بودن آن و دقت بالا در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتری، روشی مناسب برای بیش‌تر مناطق دنیا است (Allen., 2005; Gong et al., 2006; Khoob., 2008; Sun and Song., 2008). در مناطق

۱- استادیار گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین
۳-کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی
(* -نویسنده مسئول: Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

خشک ایران علیزاده و همکاران (۱۳۸۳) در مطالعه‌ای به ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر – تعرق پرداختند. با مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر – تعرق گیاه مرجع با اندازه‌گیری از لایسیمتر وزنی نشان دادند که روش‌های پنمن – مانتیث، پنمن فائو اصلاح‌شده، دارای بهترین برآورد و روش جنسن هیز دارای کم‌ترین دقت است. زارع‌ابیانه و همکاران (۱۳۸۹) به ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر– تعرق گیاه مرجع (هفت روش ترکیبی بر پایه روش پنمن، دو روش دمایی، سه روش تشعشعی–دمایی و یک روش تشعشعی) به کمک نرم‌افزار REFET و با مقایسه مقادیر لایسیمتری در کل کشور پرداختند و نهایتا نقشه‌ی هم تبخیر – تعرق کل کشور را تهیه نمودند. احمدپری و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی به برآورد نیاز آبی محصولات مختلف باغی و زراعی در منطقه برازجان با استفاده از نرم افزار CROPWAT و با بهره‌گیری ازرابطه پنمن – مانتیث پرداختند. مطالعات زیادی در زمینه محاسبه تبخیر– تعرق مرجع بر اساس داده‌های هواشناسی با روش‌های محاسباتی و شبکه عصبی استفاده شده که می‌توان به مطالعات شعبانی و همکاران (۱۳۹۶)، شمشیری‌بند و همکاران (Shamshirband et al., 2015)، شیری و همکاران (Shiri et al., 2015) اشاره نمود. در برخی مطالعات به برآورد تبخیر – تعرق با استفاده از داده‌های سنجش از دور، داده‌های هواشناسی و داده‌های لایسیمتری پرداخته شده است (دلگرم و همکاران، ۱۳۹۴؛ قمرنیا و همکاران، ۱۳۹۵؛ رمضانی خوجین و همکاران، ۱۳۹۵؛ علوی و رحیمی‌خوب، ۱۳۹۵).

بیش‌تر روش‌های برآورد تبخیر – تعرق به‌صورت ایستگاهی بوده و فقط مناسب همان نقطه و اطراف آن بوده و قابل تعمیم به مناطق با وسعت زیاد، واحدهای اقلیمی و ارتفاعات گوناگون نمی‌باشند. از این رو باید از روشی که قابلیت عمومیت بخشیدن به داده‌های نقطه‌ای برای مقیاس منطقه‌ای را داشته باشد، استفاده نمود (Li and Lyons., 2002 ;1999؛ ذاکری‌نیا و همکاران، ۱۳۹۳). هر چند که استفاده از سنجش از دور می‌تواند به برآورد تبخیر – تعرق به صورت منطقه‌ای کمک نماید (Price., 1990; Sucksdorff and Ottle, 1990; Bastiaanssen, 2000). نتایج استفاده از سنجش از دور به دلیل اشکال در فرکانس‌های ماهواره‌ها و شرایط گوناگون آب و هوایی دارای اشکالاتی هستند. در واقع در این روش‌ها نمی‌توان پارامترهای تغییرپذیر و غیرقابل پیش‌بینی آب و هوایی را به طور مجزا در محاسبه تبخیر – تعرق تاثیر داد. در بسیاری از مطالعات مانند برنامه‌ریزی‌های بلندمدت منابع آبی، محاسبه تبخیر – تعرق بایستی با در نظر گرفتن پارامترهای آب و هوایی، موقعیت اقلیمی و ارتفاع انجام گیرد. هدف از این مطالعه، برآورد نیاز آبی گیاهان زراعی (گندم، جو، کلزا، پنبه، ذرت علوفه‌ای و یونجه) در مناطقی نظیر استان قم با اقلیم‌های متفاوت و تغییرات ارتفاعی شدید، می‌باشد. این مقاله سعی دارد اهمیت اثر اصلاح برآورد تبخیر – تعرق و نیاز آبی نسبت به زیر واحدهای اقلیمی و ارتفاع را نشان دهد. در واقع آنچه این روش مطالعه را نسبت به روش‌های گوناگون دیگر که تاکنون انجام شده متمایز می‌نماید، لحاظ نمودن تاثیر مختصات جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا در محاسبات، استفاده از آمار تعداد زیادی از ایستگاه‌های موجود با دوره آماری طولانی در استان قم می‌باشد که به‌طور مسلم دقت و صحت نتایج بدست آمده را بسیار بالا برده و از این نظر قابل مقایسه با کارهای انجام شده در استان تا به امروز نیست.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان قم در محدوده مرکزی ایران واقع شده با وسعت ۱۱۳۱۶ کیلومترمربع تقریبا ۰/۶ درصد از مساحت کل کشور را در بر می‌گیرد. مختصات جغرافیایی این استان ″۵۲ ۸ خ۵۰ تا ″۲۵ ۸ خ۵۲ طول جغرافیایی و به عرض جغرافیایی ″۱۰ ۸ خ۳۴ تا ″۱۰ ۹ خ۳۵ قرار گرفته است. حدود ۲۵ درصد از وسعت استان را مناطق کوهستانی و کوهپایه‌ای تشکیل داده و مابقی به صورت دشت می‌باشد. با توجه به اختلاف زیاد ارتفاع در استان (از ۸۰۰ تا ۳۳۳۰ متر) و با در نظر گرفتن دو شاخص عمده آب و هوایی یعنی بارش و دما (دومارتن اصلاح شده) می‌توان گستره‌ی استان را از نظر تقسیمات اقلیمی به ۳ پهنه اقلیمی کوهستانی نیمه‌مرطوب (بخش خلجستان و کهک)، کوهپایه‌ای نیمه‌خشک (قسمت مرکزی و غربی بخش مرکزی و بخش جعفرآباد) و بیابانی خشک (قسمت‌های شرقی و شمالی استان، حاشیه دریاچه نمک و دریاچه حوض سلطان) تقسیم کرد (سایت سازمان هواشناسی کشور، احمدالی و همکاران، ۱۳۹۶). میانگین بارندگی سالیانه در سطح استان حدود ۱۳۵ میلی‌متر بوده که این میزان نیز به علت اختلاف ارتفاع در نواحی مختلف متفاوت است. پراکندگی بارش سالانه در سطح استان به گونه‌ای است که ۷۴ درصد بارش سالانه در فصول بهار و زمستان بوده و کم‌باران‌ترین فصل سال را تابستان با بارش حدود ۱/۹ میلی‌متر تشکیل می‌دهد. با در نظرگرفتن میزان اندک بارش در استان به علت هم‌جواری با مناطق کویری و وزش بادهای گرم و خشک از طرف کویر میزان متوسط تبخیر سالیانه در حدود ۳۰۰ میلی‌متر برآورد شده است. متوسط حداقل درجه حرارت سردترین ماه سال ۵/۱۶- و متوسط حداکثر گرم‌ترین ماه سال ۴۲/۵ درجه و حداکثر مطلق درجه حرارت هوا ۴۹ درجه در ماه‌های تیر و مرداد و حداقل آن ۲۴- در بهمن ماه می‌باشد. با توجه به ویژگی خاص توپوگرافی در مناطق مختلف استان، اختلاف دمای محسوسی به چشم می‌خورد. خلاصه اطلاعات مربوط به میانگین دمای ماهانه، میانگین دمای حداکثر، میانگین دمای حداقل (درجه سانتی‌گراد)، سرعت باد (متر بر ثانیه) و میانگین بارش (میلی‌متر) در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای هواشناسی قم (۱۳۳۰ تا ۱۳۹۳)

پارامتر / ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
میانگین دمای ماهانه	۱۸/۵	۲۴/۴	۳۰/۱	۳۲/۷	۳۱/۲	۲۶/۱	۱۹/۲	۱۱/۳	۵/۷	۴/۳	۷/۴	۱۲/۲
میانگین دمای حداکثر	۳۲/۴	۳۷/۴	۴۱/۷	۴۴/۰	۴۲/۸	۳۹/۴	۳۳/۷	۲۵/۳	۱۸/۴	۱۷/۰	۲۱/۰	۲۶/۲
میانگین دمای حداقل	۴/۲	۱۰/۱	۱۵/۷	۱۹/۳	۱۶/۹	۱۱/۴	۵/۵	-۱/۹	-۵/۲	-۶/۷	-۴/۲	-۱/۶
سرعت باد	۲/۸	۲/۸	۲/۸	۲/۹	۲/۴	۱/۹	۱/۷	۱/۵	۱/۴	۱/۷	۲/۳	۲/۶
میانگین بارش	۲۰/۱	۹/۵	۲/۰	۰/۷	۰/۲	۰/۷	۷/۱	۱۴/۸	۱۷/۱	۲۱/۵	۱۵/۴	۲۴/۷

گرادیان درجه حرارت

یکی از پارامترهای مهم در بخش هوا و اقلیم، بررسی و شناخت درجه حرارت منطقه می‌باشد. این پارامتر در برآورد تبخیر - تعرق نقش مهمی دارد. گرادیان حرارتی در هر منطقه با توجه به آمار ایستگاه‌ها، میانگین دمای سالانه یا ماهانه و یا میانگین حداقل و حداکثر دماهای ماهانه و ارتفاع ایستگاه‌ها از سطح دریا صورت می‌گیرد. رابطه‌ی کلی گرادیان حرارتی خطی و به صورت $T = \alpha - \beta H$ است که β گرادیان حرارتی، α دمای پایه است که بستگی به منطقه‌ی مورد نظر دارد (مهدوی، ۱۳۹۴). درجه حرارت در ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی سازمان هواشناسی و تبخیرسنجی وزارت نیرو مورد سنجش قرار گرفت. به‌منظور تعیین گرادیان سه شاخص حرارتی شامل متوسط حداکثر، میانگین روزانه و متوسط حداقل دمای ماهانه و سالانه پس از تجزیه و تحلیل آمار ایستگاه‌های مختلف سینوپتیک و کلیماتولوژی و تبخیرسنجی (در مجموع ۳۰ ایستگاه) برای ماه‌های مختلف روابط گرادیان آمار سه گانه با ارتفاع تعیین شده‌است.

تبخیر - تعرق گیاه مرجع (ET_o) و نیاز آبی گیاه

تبخیر - تعرق گیاه مرجع نشان‌دهنده‌ی مقدار تبخیر - تعرق نوع معینی از پوشش سبز با ارتفاع ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر است که در سطح گسترده کشت شده و دارای رشد فعال با پوشش کامل زمین و سایه‌انداز و نیز بدون تنش آبی است (Allen et al., 1998). معمولا در شرایط آزمایشی از گیاه چمن استفاده می‌گردد. این گیاه به دلیل پوشش دادن کامل خاک و نیاز آبی زیاد در طول سال به‌عنوان گیاه مرجع انتخاب گردیده است. به‌منظور برآورد رژیم تبخیر - تعرق گیاه مرجع از روش‌های مختلفی مانند تشت تبخیر، بلانی کریدل اصلاح شده، پنمن اصلاح‌شده و ترنت وایت اصلاح‌شده استفاده شد. از میان مدل‌های مختلف، روش فائو پنمن-مانتیث (PMF-56) که هم بیلان انرژی و هم تئوری آئرودینامیکی را در مدل در نظر گرفته است به‌عنوان مناسب‌ترین مدل در برآورد تبخیر - تعرق مرجع شناخته شده و توسط سازمان خوار و بار جهانی (FAO) برای محاسبه‌ی تبخیر - تعرق مرجع در همه‌ی اقلیم‌ها توصیه شده است (Xu et al., 2006).

لذا در این مطالعه روش PMF-56 به‌عنوان رایج‌ترین گزینه در برآورد مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل، انتخاب شد. پرکاربردترین شکل مدل PMF-56 برای محاسبه به‌صورت رابطه ۱ است (Allen et al., 1998).

(۱)

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)}$$

که در آن ET_0 تبخیر - تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز)، R_n پارامترهای تشعشع خالص در سطح گیاه (مگاژول بر مترمربع در روز)، G شار حرارتی خاک (مگاژول 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 (کیلوپاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، Δ شیب رابطه‌ی فشار بخار اشباع و دما (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) و γ ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) می‌باشد.

آب مورد نیاز گیاه به مجموع آب تعرق یافته در دوره رشد، آب نگهداری شده در بافت گیاهی و رطوبت تبخیر شده از سطح خاک و گیاه اطلاق شده و برحسب میلی‌متر برای دوره معین بیان می‌گردد. بخشی از این نیاز آبی ممکن است از طریق بارندگی تامین شود. مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل گیاهان با استفاده از تبخیر - تعرق گیاه مرجع و اعمال ضریب گیاهی (K_c) طبق رابطه ۲ محاسبه شد.

$$ET_c=K_cET_o \quad (۲)$$

که در آن K_c ضریب گیاهی است. مقادیر ضریب گیاهی برای کلیه‌ی گیاهان مورد نظر در استان قم، با توجه به معیارهای پیشنهادی نشریه شماره ۵۶ فائو برای دوره‌های مختلف رشد محاسبه و سپس به مقادیر K_c ماهانه تبدیل گردید. مقدار آب مورد نیاز گیاه از تفاضل تبخیر - تعرق پتانسیل و بارندگی موثر طبق رابطه ۳ محاسبه شد.

$$In=ET_c-Pe \quad (۳)$$

که در آن In آب مورد نیاز گیاه، Pe بارندگی موثر و ET_c تبخیر - تعرق پتانسیل گیاه است. قسمتی از باران که در خاک ذخیره و یا صرف تبخیر - تعرق گیاهی می‌گردد را باران موثر گویند. برای برآورد

باران موثر روش‌های متعددی مانند روش FAO/AGLW، روش درصد ثابتی از بارندگی و روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) وجود دارد. در روش حفاظت خاک آمریکا که روشی تجربی است و بر اساس ۵۰ سال آمار تجربی در ۲۲ نقطه در آمریکا بدست آمده است، بین میزان بارندگی، تعرق و تبخیر پتانسیل گیاه و ارتفاع خالص آب مورد نیاز، رابطه ۴ ارایه گردیده است (سهرابی، ۱۳۹۵):

$$P_e = S_F\ (1.25P_m^{0.824}\text{-}2.93)\ 10^{0.000955ET_c} \quad (۴)$$

که در آن P_e ، متوسط بارندگی موثر ماهانه (میلی‌متر) و P_m، متوسط بارندگی ماهانه (میلی‌متر)، ET_C تبخیر - تعرق گیاه زراعی در ماه (میلی‌متر) و S_F تابعی است که از رابطه‌ی ۵ قابل محاسبه است.

(۵)

$$S_F = 0.531747 + 0.01162D - 8.9443 \times 10^{-5}(D)^2 + 2.3210^{-7}(D)^3$$

که D، عمق رطوبت تخلیه شده از خاک قبل از آبیاری (میلی‌متر)، به عبارت دیگر D عمق آبی است که می‌تواند در منطقه توسعه ریشه‌ها ذخیره شود. در این روش با توجه مقادیر متوسط بارندگی سالانه برای احتمالات مختلف، ضرایبی محاسبه شده که حاصل‌ضرب آن با باران موثر، میزان بارندگی موثر با احتمال مشخص را تعیین می‌نماید.

در این مطالعه، از آمار شبکه ایستگاه‌های هواشناسی موجود در استان قم و استان‌های اطراف شامل ایستگاه‌های وابسته به سازمان هواشناسی کشور و ایستگاه‌های وابسته به وزارت نیرو استفاده شد. با توجه به تقویم جداگانه سازمان هواشناسی و وزارت نیرو (میلادی و شمسی) در ارایه آمار، همگی آن‌ها به‌صورت شمسی تحلیل و ارایه گردید. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در جدول ۲ آمده است.

نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این تحقیق محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل ماهانه (ET_o) به روش فائو پنمن- مانتیث و با استفاده از نرم افزار CROPWAT انجام گرفت که یک ابزار کاربردی برای مهندسان کشاورزی (آبیاری و زهکشی، هواشناسی و زراعت و ...) در انجام محاسبات استاندارد برای نیاز آبی گیاه، طراحی و مدیریت برنامه آبیاری می باشد (کریمی و پناهنده، ۱۳۸۸). از نرم‌افزارهای Excel و ArcGIS9.3 به ترتیب برای انجام محاسبات و ترسیم نقشه‌ها استفاده گردید.

الگوریتم برآورد نیاز آبی هر یک از محصولات در هر نقطه از استان قم به شرح زیر است:

۱- تعیین ارتفاع از سطح دریا و موقعیت جغرافیایی محل مورد نظر.

۲- محاسبه‌ی تبخیر - تعرق پتانسیل ماهانه (ET_o) به روش فائو پنمن- مانتیث با استفاده از نرم افزار CROPWAT و با توجه به ارتفاع محل و زیر محدوده‌ای که محل مورد نظر در آن واقع شده است.

۳- استخراج مقادیر ضریب گیاهی ماهانه (K_c) برای هر یک از محصولات مورد بررسی از جدول ۳.

۴- محاسبه تبخیر - تعرق ماهانه‌ی هر یک از محصولات مورد بررسی با استفاده از مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل و ضریب گیاهی ماهانه از رابطه ۲.

۵- به‌دست آوردن مقدار بارندگی سالانه برای محل مورد نظر با استفاده از رابطه گرادیان بارندگی و محاسبه‌ی بارندگی متناظر هر ماه به روش نسبت‌ها (با استفاده از آمار ایستگاه شاخصی که محل مورد نظر در زیر محدوده آن واقع شده).

۶- محاسبه‌ی باران موثر ماهانه (P_e) با استفاده از مقادیر بارندگی ماهانه محل مورد نظر.

۷- محاسبه‌ی مقدار نیاز خالص آبی ماهانه برای محصول و محل مورد نظر با استفاده از رابطه ۳.

نتایج و بحث

منطقه‌بندی تبخیر - تعرق در استان

از آنجا که استان قم تنها دارای یک ایستگاه سینوپتیک مهم (ایستگاه قم) است و با توجه به تنوع اقلیمی استان، این ایستگاه برای تجزیه و تحلیل پارامترهای آب و هوایی کافی نبود، بنابراین با استفاده از ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی واقع در محدوده هم‌جوار مرز استان، با استفاده از پلیگون‌بندی، چند زیر محدوده مطابق شکل ۱ در گستره استان تعیین‌گردید که هر کدام تحت تاثیر یک یا دو ایستگاه مذکور می‌باشد. محدوده‌های تعیین شده عبارتند از محدوده‌ی قم: تحت تاثیر ایستگاه شاخص سینوپتیک قم، محدوده‌ی ساوه-تفرش: تحت تاثیر ایستگاه‌های شاخص سینوپتیک ساوه و تفرش، محدوده‌ی ساوه: تحت تاثیر ایستگاه شاخص سینوپتیک ساوه و محدوده‌ی گرمسار: تحت تاثیر ایستگاه شاخص سینوپتیک گرمسار.

بررسی تغییرات بارندگی با ارتفاع

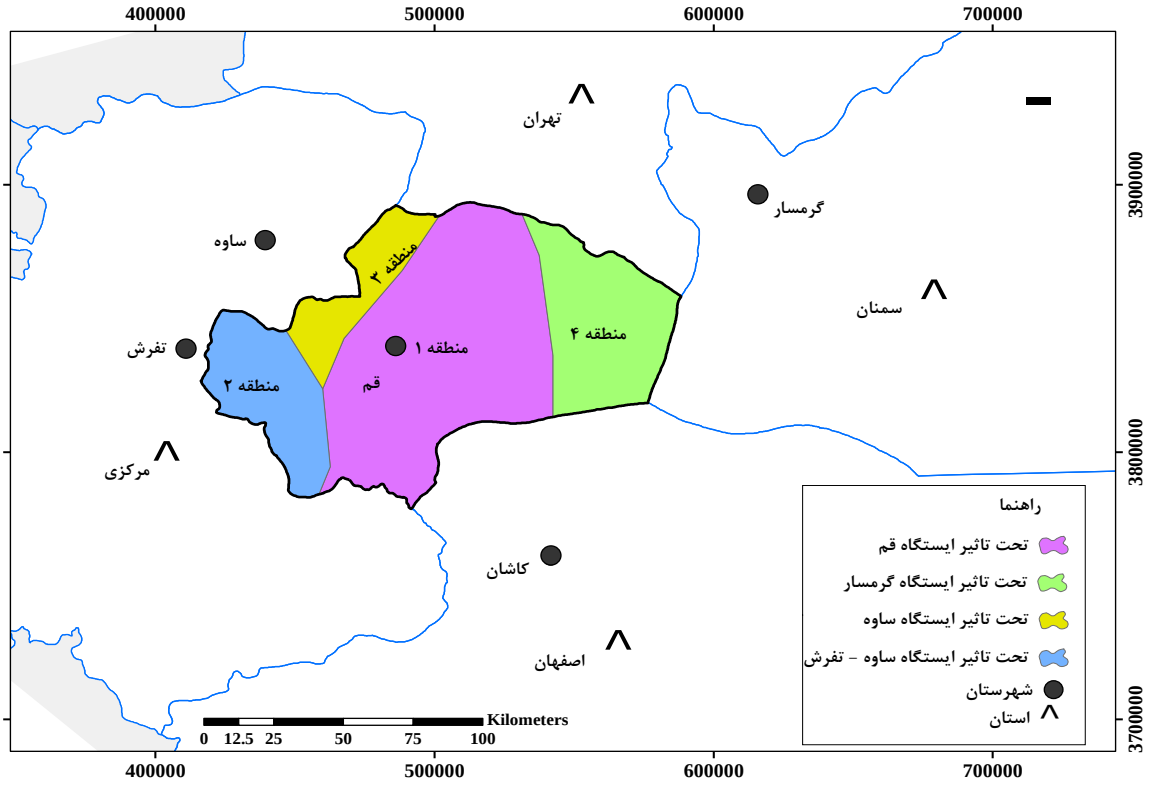
بدون شک یکی از پارامترهای موثر بر نوع ریزش‌های جوی، سیستم بارندگی و گرادیان بارش، شرایط توپوگرافی منطقه است. بررسی تغییرات بارندگی نسبت به ارتفاع و تعیین روابط منطقه‌ای گرادیان بارندگی به منظور برآورد میزان بارش به صورت نقطه‌ای با توجه به تراز ارتفاعی بخصوص بسیار حائز اهمیت است. انتخاب ایستگاه‌های دارای شرایط همگن محیطی و توپوگرافیک و یکسان بودن طول دوره‌ی آماری در طی پایه زمان منتخب از اصول معمول در تعیین گرادیان بارندگی منطقه‌ای محسوب می‌شود (هادیانی و همکاران، ۱۳۹۰).

جدول ۲- موقعیت و مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی استفاده شده

ردیف	ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع (متر)
۱	قم	سینوپتیک	۵۰/۸۵	۳۴/۷	۸۷۷/۴
۲	اراک	سینوپتیک	۴۹/۷۷	۳۴/۱	۱۷۰۸
۳	ساوه	سینوپتیک	۵۰/۳۳	۳۵/۰۵	۱۱۰۸
۴	کاشان	سینوپتیک	۵۱/۴۵	۳۳/۹۸	۹۸۲/۳
۵	گرمسار	سینوپتیک	۵۲/۲۷	۳۵/۲	۸۲۵/۲
۶	گلپایگان	سینوپتیک	۵۰/۲۸	۳۳/۴۷	۱۸۷۰
۷	تفرش	سینوپتیک	۵۰/۰۳	۳۴/۶۸	۱۹۳۰
۸	ابردژ	سینوپتیک	۵۱/۸	۳۵/۲۲	۹۰۰
۹	مامازن	سینوپتیک	۵۱/۶۸	۳۵/۴۷	۱۰۲۱
۱۰	دامنه فریدن	کلیماتولوژی	۵۰/۴۸	۳۳/۰۲	۲۳۰۰
۱۱	خنداب	کلیماتولوژی	۴۹/۲	۳۴/۴	۱۷۴۲
۱۲	خوانسار	کلیماتولوژی	۵۰/۳۲	۳۳/۲۳	۲۳۰۰
۱۳	میلاجرد	کلیماتولوژی	۴۹/۲۲	۳۴/۶۳	۱۶۷۵
۱۴	شمس آباد اراک	کلیماتولوژی	۴۹/۷۳	۳۳/۸۲	۲۴۰۰
۱۵	گرکان آشتیان	کلیماتولوژی	۴۹/۹۷	۳۴/۵۵	۱۷۹۱
۱۶	خمین	تبخیرسنجی	۵۰/۰۸	۳۳/۶۵	۱۸۰۰
۱۷	کرهرود	تبخیرسنجی	۴۹/۶۵	۳۳/۰۷	۱۹۰۰
۱۸	ساروق بالا	تبخیرسنجی	۴۹/۵۲	۳۴/۴۲	۱۸۰۰
۱۹	آشتیان	تبخیرسنجی	۵۰/۰۲	۳۴/۵۳	۲۰۸۰
۲۰	داود آباد	تبخیرسنجی	۴۹/۸۵	۳۴/۳	۱۶۶۰
۲۱	بند عباسی	تبخیرسنجی	۵۰/۱۳	۳۴/۹	۱۱۲۰
۲۲	رازین	تبخیرسنجی	۵۰/۸۵	۳۵/۰۳	۱۳۰۰
۲۳	قدمگاه	تبخیرسنجی	۴۹/۴۷	۳۳/۹۷	۱۸۰۰
۲۴	احمد آباد	تبخیرسنجی	۵۰/۴۲	۳۴/۹۸	۱۰۴۰
۲۵	امام آباد	تبخیرسنجی	۵۰/۴۷	۳۴/۸۸	۹۲۰
۲۶	پیک زرند	تبخیرسنجی	۵۰/۷۷	۳۵/۳۲	۱۱۶۰
۲۷	دودهک	تبخیرسنجی	۵۰/۵۷	۳۴/۱۳	۱۴۷۰
۲۸	کریم آباد	تبخیرسنجی	۵۰/۶۳	۳۵/۸۳	۱۱۶۰
۲۹	۱۵ خرداد	تبخیرسنجی	۵۰/۶۳	۳۴/۰۸	۱۴۲۴
۳۰	عباس آباد زیر سد	تبخیرسنجی	۵۰/۱	۳۳/۴۲	۱۹۴۵
۳۱	کوچری	بارانسنجی	۵۰/۱۸	۳۳/۴۳	۱۹۰۰
۳۲	قرمز تپه	بارانسنجی	۵۱/۹۲	۳۵/۳۳	۹۲۰
۳۳	پرندک	تبخیرسنجی	۵۱/۰۸	۳۵/۵۳	۱۰۷۰
۳۴	جواد آباد	تبخیرسنجی	۵۱/۶۸	۳۵/۲۲	۸۸۰
۳۵	موته	تبخیرسنجی	۵۰/۷۸	۳۳/۶۲	۱۸۰۰
۳۶	محمدآباد کاشان	تبخیرسنجی	۵۱/۷۷	۳۳/۸۸	۹۷۰
۳۷	سالاربه قم	بارانسنجی	۵۰/۸۷	۳۴/۶۳	۹۴۰
۳۸	قمصر	بارانسنجی	۵۱/۴۲	۳۳/۷۳	۱۹۵۰
۳۹	خنداب(جوشیروان)	تبخیرسنجی	۴۹/۱۸	۳۴/۳۸	۱۶۵۰
۴۰	امور آب اراک	تبخیرسنجی	۴۹/۷	۳۴/۰۵	۱۷۶۰
۴۱	زهتران	بارانسنجی	۴۹/۱۳	۳۵/۲۵	۱۷۷۰
۴۲	عمر آباد	تبخیرسنجی	۴۹/۲۵	۳۵/۱	۱۵۹۰
۴۳	جلایر	بارانسنجی	۵۰/۰۲	۳۴/۸۸	۱۲۰۰
۴۴	تفرش	بارانسنجی	۵۰/۰۲	۳۴/۷	۱۸۸۰
۴۵	سد ۱۵ خرداد	تبخیرسنجی	۵۰/۶۳	۳۴/۰۸	۱۴۲۴

جدول ۳- ضرایب گیاهی محصولات مورد مطالعه

محصول	تاریخ کاشت		تاریخ برداشت		فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	سالانه
	روز	ماه	روز	ماه													
گندم	۲۰	۷	۱۸	۳	۱/۱۰	۱/۰۵	۰/۵۰	–	–	–	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۳۰	۰/۵۵	۰/۷۵	۰/۹۵	۰/۶۱
جو	۲۰	۷	۸	۳	۱/۱۰	۰/۸۵	۰/۳۰	–	–	–	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۳۰	۰/۵۵	۰/۷۵	۰/۹۰	۰/۵۶
کلزا	۲۰	۷	۱۸	۳	۱/۱۰	۱/۰۵	۰/۵۰	–	–	–	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۳۰	۰/۵۵	۰/۷۵	۰/۹۵	۰/۶۱
پنبه	۲۰	۱	۱۳	۷	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۷۰	۱/۱۵	۱/۱۵	۰/۹۵	۰/۵۵	–	–	–	–	–	۰/۶۹
ذرت علوفه ای	۲۰	۲	۲۶	۵	–	۰/۱۵	۰/۲۵	۱/۰۰	۱/۱۵	–	–	–	–	–	–	–	۰/۶۴
یونجه	–	–	–	–	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	–	–	–	–	–	–	۰/۸۵

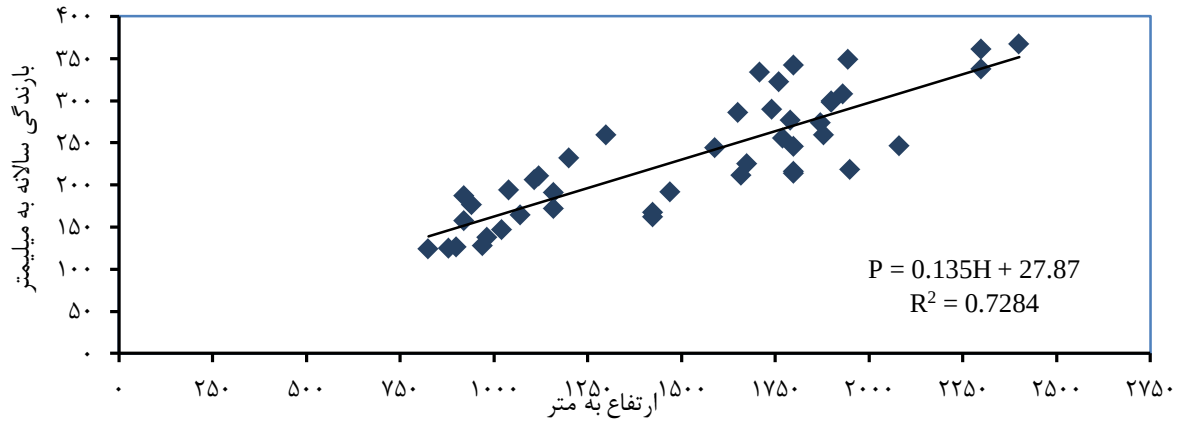


شکل ۱- منطقه‌بندی تبخیر - تعرق در استان قم

برای روشن شدن تغییرات مکانی بارش در سطح منطقه و امکان برآورد دقیق مقادیر بارش در سطح هریک از زیر محدوده‌های تعریف شده به کمک داده‌های ایستگاه‌هایی که در محدوده مورد مطالعه و پیرامون واقع شده‌است، گرادیان بارش نسبت به ارتفاع در ۴۵ ایستگاه برگزیده ترسیم‌گردید. بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی گرادیان بارندگی، رابطه‌ی منتخب (از بین معادلات خطی، توانی و لگاریتمی) در منطقه‌ی مورد مطالعه به صورت رابطه ۶ است.

$$P= 0.135\ H+27.87 \qquad (۶)$$

که در آن P مقدار باران سالانه به میلیمتر و H ارتفاع از سطح دریا برحسب متر است. این رابطه دارای ضریب همبستگی R=۰/۸۵۳۵ است و با ۴۵ داده دارای سطح معنی‌داری ۱ درصد می‌باشد. شکل ۲ نشان‌دهنده‌ی روند تغییرات بارندگی سالانه نسبت به ارتفاع در ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع از ۷۵۰ تا ۲۵۰۰ متر بر میزان بارندگی افزوده می‌شود.



شکل ۲- همبستگی ارتفاع-بارندگی سالانه در ایستگاه‌های مورد استفاده در منطقه طرح

نتایج حاصله از گرادیان‌های دماهای مختلف نسبت به ارتفاع در جدول ۴ ارایه شده‌است. بر اساس جدول ۴ ملاحظه می‌شود که معادلات گرادیان بسیار خوبی در ماه‌های مختلف بدست آمد که همگی در سطح یک درصد معنی‌دار هستند. دمای پایه برای گرادیان-های حرارتی سالانه بر اساس دمای حداکثر، حداقل و میانگین به ترتیب برابر ۳۰/۷۶، ۱۴/۴۷ و ۲۲/۶۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین گرادیان حرارتی سالانه برای دمای حداکثر، حداقل و میانگین به ترتیب برابر ۰/۰۰۵۹، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۵۴ می‌باشد.

گرادیان تبخیر - تعرق

با داشتن مقادیر دماهای میانگین حداقل و حداکثر (رابطه گرادیان)، رطوبت نسبی، میانگین سرعت باد در ارتفاع دو متری و میانگین ساعات آفتابی (ایستگاه‌های شاخص)، مقادیر ماهانه و سالانه تبخیر - تعرق پتانسیل به ازای ارتفاعات مختلف برای هر زیرمحدوده استان قم بدست آمد. با بدست آمدن مقادیر ماهانه و سالانه تبخیر-تعرق پتانسیل، روابط گرادیان خطی ماهانه و سالانه ارتفاع- تبخیر-تعرق برای برای هر زیرمحدوده تعیین شد که نتایج آن در جدول ۵ آورده شده‌است. بر اساس جدول ۵ ملاحظه می‌گردد که کلیه‌ی روابط بدست آمده در سطح یک درصد معنی‌دار است.

جدول ٤- گرادیان‌های دمای حداکثر، حداقل و میانگین ماهانه و سالانه نسبت به ارتفاع (۱۳۳۰ تا ۱۳۹۳)

ماه	دمای حداکثر		دمای حداقل		دمای میانگین	
	رابطه گرادیان	R^2	رابطه گرادیان	R^2	رابطه گرادیان	R^{2**}
مهر	T= -۰/۰۰۵۶ H + ۳۴/۷۹	۰/۸۹۴	T= -۰/۰۰۴۷۴ H + ۱۶/۰۹	۰/۵۳۴	T= -۰/۰۰۵۱ H + ۲۵/۴۴	۰/۸۲۱
آبان	T= -۰/۰۰۵۴ H + ۲۶/۷۳	۰/۸۵۸	T= -۰/۰۰۳۸ H + ۹/۷۶	۰/۶۱۶	T= -۰/۰۰۴۶ H + ۱۸/۲۴	۰/۸۶۹
آذر	T= -۰/۰۰۴۵ H + ۱۸/۲۵	۰/۷۶۹	T= -۰/۰۰۳۶ H + ۴/۸۰	۰/۶۴۶	T= -۰/۰۰۴۱ H + ۱۱/۵۳	۰/۷۹۲
دی	T= -۰/۰۰۴۵ H + ۱۴/۶۵	۰/۷۸۶	T= -۰/۰۰۴۵ H + ۳/۱۹	۰/۷۰۰	T= -۰/۰۰۴۵ H + ۸/۹۲	۰/۷۹۹
بهمن	T= -۰/۰۰۵۶ H + ۱۶/۶۳	۰/۷۸۸	T= -۰/۰۰۵۲ H + ۴/۱۰۵	۰/۷۱۸	T= -۰/۰۰۵۴ H + ۱۰/۳۷	۰/۷۹۱
اسفند	T= -۰/۰۰۶۱ H + ۲۱/۵۶	۰/۸۶۴	T= -۰/۰۰۴۸ H + ۷/۱۳	۰/۷۵۳	T= -۰/۰۰۵۴ H + ۱۴/۳۵	۰/۸۵۱
فروردین	T= -۰/۰۰۶۹ H + ۲۹/۱۴	۰/۹۱۱	T= -۰/۰۰۴۸ H + ۱۲/۲۸	۰/۷۳۲	T= -۰/۰۰۵۹ H + ۲۰/۷۱	۰/۸۷۹
اردیبهشت	T= -۰/۰۰۷۱ H + ۳۵/۴۵	۰/۹۳۴	T= -۰/۰۰۵۴ H + ۱۷/۷۱	۰/۶۹۹	T= -۰/۰۰۶۳ H + ۲۶/۵۸	۰/۸۶۸
خرداد	T= -۰/۰۰۶۹ H + ۴۱/۴۳	۰/۹۱۸	T= -۰/۰۰۶۰ H + ۲۲/۸۳	۰/۶۴۳	T= -۰/۰۰۶۴ H + ۳۲/۱۳	۰/۸۵۰
تیر	T= -۰/۰۰۶۲ H + ۴۴/۷۰	۰/۸۹۳	T= -۰/۰۰۶۰ H + ۲۶/۶۷	۰/۵۹۳	T= -۰/۰۰۶۱ H + ۳۵/۶۸	۰/۸۲۲
مرداد	T= -۰/۰۰۵۸ H + ۴۴/۴۵	۰/۸۸۶	T= -۰/۰۰۵۸ H + ۲۶/۵۴	۰/۵۴۷	T= -۰/۰۰۵۸ H + ۳۵/۴۹	۰/۸۰۳
شهریور	T= -۰/۰۰۵۷ H + ۴۱/۳۱	۰/۹۰۶	T= -۰/۰۰۵۵ H + ۲۲/۵۹	۰/۵۵۶	T= -۰/۰۰۵۶ H + ۳۱/۹۵	۰/۸۲۰
سالانه	T= -۰/۰۰۵۹ H + ۳۰/۷۶	۰/۹۰۱	T= -/۰۰۵۰ H + ۱۴/۴۷	۰/۶۷۴	T= -۰/۰۰۵۴ H + ۲۲/۶۲	۰/۸۵۷

** تمام معادلات در سطح یک درصد معنی دارند. H = ارتفاع متوسط از سطح دریا به متر. N = تعداد ایستگاه‌ها (۳۰).

جدول ۵- گرادیان تبخیر - تعرق پتانسیل روزانه (ET_0) در ماه‌های مختلف (۱۳۳۰ تا ۱۳۹۳)

ماه	محدوده قم		محدوده تفرش-ساوه		محدوده ساوه		محدوده گرمسار	
	رابطه گرادیان	R^2	رابطه گرادیان	R^2	رابطه گرادیان	R^2	رابطه گرادیان	R^{2**}
مهر	ET_0= -۰/۰۰۴ H + ۴/۱۱۸	۰/۹۹۷	ET0= -۰/۰۰۶ H + ۴/۷۲۱	۰/۹۹۷	ET0= -۰/۰۰۶ H + ۴/۸۳۷	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۰۲ H + ۳/۰۰۷	۰/۹۹۸
آبان	ET_0= -۰/۰۰۳ H + ۲/۳۶۴	۰/۹۹۷	ET0= -۰/۰۰۴ H + ۲/۸۵۸	۰/۹۹۶	ET0= -۰/۰۰۴ H + ۳/۰۵۰	۰/۹۹۷	ET0= -۰/۰۰۲ H + ۱/۸۱۲	۰/۹۹۷
آذر	ET_0= -۰/۰۰۲ H + ۱/۳۳۹	۰/۹۹۶	ET0= -۰/۰۰۲ H + ۱/۵۶۸	۰/۹۹۶	ET0= -۰/۰۰۲ H + ۱/۶۸۰	۰/۹۹۶	ET0= -۰/۰۰۱ H + ۱/۲۸۷	۰/۹۹۷
دی	ET_0= -۰/۰۰۲ H + ۱/۲۲۵	۰/۹۹۶	ET0= -۰/۰۰۳ H + ۱/۹۲۱	۰/۹۹۶	ET0= -۰/۰۰۲ H + ۱/۴۲۶	۰/۹۹۶	ET0= -۰/۰۰۲ H + ۱/۲۱۵	۰/۹۹۷
بهمن	ET_0= -۰/۰۰۳ H + ۱/۹۴۶	۰/۹۹۶	ET0= -۰/۰۰۵ H + ۳/۱۵۶	۰/۹۹۶	ET0= -۰/۰۰۴ H + ۲/۲۸۲	۰/۹۹۶	ET0= -۰/۰۰۳ H + ۱/۹۳۰	۰/۹۹۶
اسفند	ET_0= -۰/۰۰۵ H + ۳/۱۲۲	۰/۹۹۷	ET0= -۰/۰۰۸ H + ۵/۰۴۵	۰/۹۹۷	ET0= -۰/۰۰۶ H + ۳/۶۷۶	۰/۹۹۷	ET0= -۰/۰۰۵ H + ۳/۰۸۸	۰/۹۹۷
فروردین	ET_0= -۰/۰۰۷ H + ۴/۸۱۳	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۱۰ H + ۶/۹۰۸	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۰۹ H + ۵/۵۹۹	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۰۷ H + ۴/۷۹۰	۰/۹۹۸
اردیبهشت	ET_0= -۰/۰۰۹ H + ۶/۶۸۰	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۱۱ H + ۸/۵۴۰	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۱۱ H + ۷/۴۳۴	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۰۹ H + ۶/۵۵۸	۰/۹۹۸
خرداد	ET_0= -۰/۰۱۰H + ۸/۹۴۷	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۱۰ H + ۸/۹۴۷	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۱۱ H + ۸/۸۲۸	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۱۰H + ۸/۰۳۷	۰/۹۹۸
تیر	ET_0= -۰/۰۰۸ H + ۸/۱۴۷	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۰۸ H + ۷/۱۰۲	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۱۰ H + ۹/۰۵۵	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۱۰ H + ۸/۸۹۶	۰/۹۹۸
مرداد	ET_0= -۰/۰۰۶ H + ۶/۲۱۶	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۰۷ H + ۶/۰۸۹	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۰۹ H + ۸/۲۵۴	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۰۹ H + ۸/۲۴۸	۰/۹۹۸
شهریور	ET_0= -۰/۰۰۶ H + ۴/۷۷۰	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۰۶ H + ۴/۸۴۴	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۰۷ H + ۶/۶۷۴	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۰۶ H + ۶/۰۰۹	۰/۹۹۸
سالانه	ET_0= -۰/۰۰۶ H + ۴/۷۶۵	۰/۹۹۶	ET0= -۰/۰۰۵ H + ۴/۵۷۳	۰/۹۹۶	ET0= -۰/۰۰۷ H + ۵/۲۳۴	۰/۹۹۸	ET0= -۰/۰۰۵ H + ۴/۵۷۳	۰/۹۹۸

** تمام معادلات در سطح یک درصد معنی دارند. H = ارتفاع متوسط از سطح دریا به متر. N = تعداد ارتفاعات (۲۶).

در ادامه با اصلاح بارندگی و تبخیر - تعرق نسبت به ارتفاع، نیاز آبی خالص برای هر محدوده و در ارتفاع‌های مختلف محاسبه شد. در جداول ۷ تا ۱۰ نیاز آبی خالص برای محصولات زراعی به صورت ماهانه و سالانه ارایه شده است.

جدول ٦- نیاز آبی خالص محصولات زراعی در محدوده‌ی قم در ماه‌ها و ارتفاعات مختلف (۱۳۳۰ تا ۱۳۹۳)

محصول	ارتفاع	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	سالانه
گندم	۱۰۰۰	۱۲۰/۹	۱۳۹/۹	۳۷/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۷/۱	۴۶/۱	۳۶۵/۴
	۱۵۰۰	۱۰۱	۱۵۵/۹	۵۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۵/۵	۳۳/۷	۳۵۴/۱
	۲۰۰۰	۸۱/۱	۱۳۶/۱	۵۲/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۷/۶	۲۸۷/۲
	۲۵۰۰	۶۱/۱	۱۱۶/۳	۴۶/۹	۰/۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱/۴	۲۲۵/۸
جو	۱۰۰۰	۱۲۰/۹	۱۷۵/۷	۶۳/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۷/۱	۴۹/۹	۴۳۱/۴
	۱۵۰۰	۱۰۱	۱۲۲/۹	۳۳/۴	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۵/۵	۳۰/۳	۲۹۳
	۲۰۰۰	۸۱/۱	۱۰۵/۹	۲۹/۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۴/۵	۲۳۱/۱
	۲۵۰۰	۶۱/۱	۸۸/۹	۲۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۷۵/۹
کلزا	۱۰۰۰	۱۲۰/۹	۱۷۵/۷	۶۳/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۷/۱	۴۹/۹	۴۳۱/۴
	۱۵۰۰	۱۰۱	۱۵۵/۹	۵۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۵/۵	۳۳/۷	۳۵۴/۱
	۲۰۰۰	۸۱/۱	۱۳۶/۱	۵۲/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۷/۶	۲۸۷/۲
	۲۵۰۰	۶۱/۱	۱۱۶/۳	۴۶/۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱/۴	۲۲۵/۸
پنبه	۱۰۰۰	۰/۰	۲۳/۴	۱۵۴/۸	۲۸۲/۴	۲۶۱/۴	۱۶۵	۲۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۹۱۲
	۱۵۰۰	۰/۰	۱۵/۵	۱۴۲/۲	۲۶۴/۲	۲۴۷	۱۵۶	۲۲/۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۸۴۷/۶
	۲۰۰۰	۰/۰	۷/۵	۱۲۹/۶	۲۴۶	۲۳۲/۵	۱۴۷	۲۰/۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۷۸۳/۳
	۲۵۰۰	۰/۰	۰/۰	۱۱۷	۲۲۷/۸	۲۱۸	۱۳۸	۱۸/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۷۱۹/۴
ذرت علوفه‌ای	۱۰۰۰	۰/۰	۰/۰	۵۲/۶	۲۴۵/۴	۲۱۹/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۵۱۷/۳
	۱۵۰۰	۰/۰	۰/۰	۴۶/۹	۲۲۹/۶	۲۰۷/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۸۳/۶
	۲۰۰۰	۰/۰	۰/۰	۴۱/۳	۲۱۳/۷	۱۹۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۵۰
	۲۵۰۰	۰/۰	۰/۰	۳۵/۷	۱۹۷/۸	۱۸۲/۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۱۶/۴
یونجه	۱۰۰۰	۸۹/۱	۱۳۹/۹	۱۸۸/۸	۲۰۸/۵	۱۹۳/۱	۱۴۷/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۹۶۶/۹
	۱۵۰۰	۷۱/۸	۱۲۲/۹	۱۷۳/۹	۱۹۴/۹	۱۸۲/۴	۱۳۹/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۸۸۵/۴
	۲۰۰۰	۵۴/۶	۱۰۵/۹	۱۵۹	۱۸۱/۴	۱۷۱/۶	۱۳۱/۴	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۸۰۳/۹
	۲۵۰۰	۳۷/۴	۸۸/۹	۱۴۴/۱	۱۶۷/۸	۱۶۰/۹	۱۲۳/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۷۲۲/۳

جدول ۷- نیاز آبی خالص محصولات زراعی در محدوده ساوه-تفرش در ماه‌ها و ارتفاعات مختلف

محصول	ارتفاع	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	سالانه
گندم	۱۰۰۰	۱۲۵/۹	۱۷۵/۶	۶۳/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۴	۲۰/۲	۵۳/۹	۴۴۳/۷
	۱۵۰۰	۱۰۴/۴	۱۵۲/۴	۵۶/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۰/۱	۳۹	۳۶۲/۶
	۲۰۰۰	۸۲/۹	۱۲۹/۲	۵۰/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۲۴/۱	۲۸۸/۴
	۲۵۰۰	۶۱/۵	۱۰۶	۴۳/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۹/۲	۲۲۰/۳
جو	۱۰۰۰	۱۲۵/۹	۱۳۹	۳۶/۴	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۴	۲۰/۲	۵۰	۳۷۶/۵
	۱۵۰۰	۱۰۴/۴	۱۱۸/۹	۳۱/۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۰/۱	۳۵/۵	۳۰۰/۷
	۲۰۰۰	۸۲/۹	۹۸/۸	۲۷/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۲۱	۲۳۰
	۲۵۰۰	۶۱/۵	۷۸/۷	۲۲/۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۶/۴	۱۶۹/۳
کلزا	۱۰۰۰	۱۲۵/۹	۱۷۵/۶	۶۳/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۴	۲۰/۲	۵۳/۹	۴۴۳/۷
	۱۵۰۰	۱۰۴/۴	۱۵۲/۴	۵۶/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۰/۱	۳۹	۳۶۲/۶
	۲۰۰۰	۸۲/۹	۱۲۹/۴	۵۰/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۲۴/۱	۲۸۶/۴
	۲۵۰۰	۶۱/۵	۱۰۶	۴۳/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۹/۲	۲۲۰/۳
پنبه	۱۰۰۰	۰/۰	۱۹/۹	۱۵۴/۹	۲۸۱/۴	۲۲۳/۲	۱۵۷/۹	۲۷/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۸۶۴/۶
	۱۵۰۰	۰/۰	۹/۹	۱۴۰/۲	۲۶۲/۸	۲۰۸/۳	۱۴۷/۲	۲۴/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۷۹۲/۸
	۲۰۰۰	۰/۰	۰/۰	۱۲۵/۶	۲۴۴/۱	۱۹۳/۵	۱۳۶/۶	۲۱/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۷۲۱
	۲۵۰۰	۰/۰	۰/۰	۱۱۰/۹	۲۲۵/۵	۱۷۸/۶	۱۲۵/۹	۱۸/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۶۵۹/۲
ذرت علوفه‌ای	۱۰۰۰	۰/۰	۰/۰	۵۱/۱	۲۴۴/۴	۱۸۷/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۸۲/۷
	۱۵۰۰	۰/۰	۰/۰	۴۴/۱	۲۲۸/۱	۱۷۴/۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۴۷
	۲۰۰۰	۰/۰	۰/۰	۳۷/۲	۲۱۱/۸	۱۶۲/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۱۱/۳
	۲۵۰۰	۰/۰	۰/۰	۳۰/۲	۱۹۵/۵	۱۴۹/۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳۷۵/۵
یونجه	۱۰۰۰	۹۳	۱۳۹	۱۸۹/۵	۲۰۷/۵	۱۶۴/۶	۱۴۱/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۹۳۴/۷
	۱۵۰۰	۷۴/۶	۱۱۸/۹	۱۷۲/۳	۱۹۳/۵	۱۵۳/۴	۱۳۱/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۸۴۴/۳
	۲۰۰۰	۵۶/۲	۹۸/۸	۱۵۵/۱	۱۷۹/۵	۱۴۲/۳	۱۲۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۷۵۴
	۲۵۰۰	۳۷/۹	۷۸/۷	۱۳۷/۹	۱۶۵/۶	۱۳۱/۲	۱۱۲/۴	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۶۶۳/۶

جدول ۸- نیاز آبی خالص محصولات زراعی در محدوده‌ی ساوه در ماه‌ها و ارتفاعات مختلف

محصول	ارتفاع	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	سالانه
گندم	۱۰۰۰	۱۴۱/۳	۱۹۴/۲	۶۷/۴	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۵/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۲۵	۶۵/۵	۴۹۸/۹
	۱۵۰۰	۱۱۸	۱۷۱/۳	۶۱/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴/۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۳/۴	۴۹/۲	۴۱۸/۲
	۲۰۰۰	۹۴/۸	۱۴۸/۵	۵۵/۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳/۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱/۷	۳۲/۹	۳۳۷/۵
	۲۵۰۰	۷۱/۶	۱۲۵/۶	۵۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۶/۷	۲۶۳/۸
جو	۱۰۰۰	۱۴۱/۳	۱۵۴/۹	۳۹/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۵/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۲۵	۶۱	۴۲۷/۳
	۱۵۰۰	۱۱۸	۱۳۵/۵	۳۵/۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴/۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۳/۴	۴۵/۲	۳۵۲/۵
	۲۰۰۰	۹۴/۸	۱۱۶	۳۱/۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳/۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱/۷	۲۹/۳	۲۷۷/۷
	۲۵۰۰	۷۱/۶	۹۶/۵	۲۸/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۳/۵	۲۰۹/۸
کلزا	۱۰۰۰	۱۴۱/۳	۱۹۴/۲	۶۷/۴	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۵/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۲۵	۶۵/۵	۴۹۸/۹
	۱۵۰۰	۱۱۸	۱۷۱/۳	۶۱/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴/۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۳/۴	۴۹/۲	۴۱۸/۲
	۲۰۰۰	۹۴/۸	۱۴۸/۵	۵۵/۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳/۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱/۷	۳۲/۹	۳۳۷/۵
	۲۵۰۰	۷۱/۶	۱۲۵/۶	۵۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۶/۷	۲۶۳/۸
پنبه	۱۰۰۰	۰/۰	۲۷/۳	۱۶۴	۲۸۶/۳	۲۶۱/۸	۱۷۵/۷	۲۹/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۹۴۴/۳
	۱۵۰۰	۰/۰	۱۸/۹	۱۵۰/۶	۲۶۸/۲	۲۴۵/۶	۱۶۵/۳	۲۶/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۸۷۵/۲
	۲۰۰۰	۰/۰	۱۰/۵	۱۳۷/۲	۲۵۰	۲۲۹/۴	۱۵۴/۹	۲۳/۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۸۰۶
	۲۵۰۰	۰/۰	۲/۲	۱۲۳/۳	۲۳۱/۸	۲۱۳/۲	۱۴۴/۶	۲۱/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۷۳۶/۸
ذرت علوفه‌ای	۱۰۰۰	۰/۰	۰/۰	۵۶/۲	۲۴۸/۹	۲۱۹/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۵۲۴/۷
	۱۵۰۰	۰/۰	۰/۰	۵۰/۵	۲۳۳	۲۰۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۸۹/۵
	۲۰۰۰	۰/۰	۰/۰	۴۴/۷	۲۱۷/۲	۱۹۲/۴	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۵۴/۳
	۲۵۰۰	۰/۰	۰/۰	۳۸/۹	۲۰۱/۳	۱۷۸/۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۱۹/۱
یونجه	۱۰۰۰	۱۰۴/۸	۱۵۴/۹	۲۰۰	۲۱۱/۴	۱۹۳/۴	۱۵۷/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۰۲۱/۸
	۱۵۰۰	۸۵/۱	۱۳۵/۵	۱۸۴	۱۹۷/۹	۱۸۱/۴	۱۴۷/۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۹۳۱/۸
	۲۰۰۰	۵۶/۲	۹۸/۸	۱۵۵/۱	۱۷۹/۵	۱۴۲/۳	۱۲۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۷۵۴
	۲۵۰۰	۴۵/۷	۹۶/۵	۱۵۲	۱۷۰/۹	۱۵۷/۴	۱۲۹/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۷۵۱/۷

جدول ۹- نیاز آبی خالص محصولات زراعی در محدوده‌ی گرمسار در ماه‌ها و ارتفاعات مختلف

محصول	ارتفاع	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	سالانه
گندم	۱۰۰۰	۱۱۴/۸	۱۶۸/۸	۶۰/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳/۲	۰/۰	۰/۰	۱۱/۷	۲۲/۳	۴۶/۸	۴۲۸/۲
	۱۵۰۰	۹۲/۶	۱۴۷/۷	۵۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳	۱۳	۲۹/۷	۳۴۱
جو	۱۰۰۰	۱۱۴/۸	۱۳۳/۷	۳۵/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳/۲	۰/۰	۰/۰	۱۱/۷	۲۲/۳	۴۳	۳۶۴
	۱۵۰۰	۹۲/۶	۱۱۵/۵	۳۱/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳	۱۳	۲۶/۳	۲۸۱/۸
کلزا	۱۰۰۰	۱۱۴/۸	۱۶۸/۸	۶۰/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳/۲	۰/۰	۰/۰	۱۱/۷	۲۲/۳	۴۶/۸	۴۲۸/۲
	۱۵۰۰	۹۲/۶	۱۴۷/۷	۵۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳	۱۳	۲۹/۷	۳۴۱
پنبه	۱۰۰۰	۰/۰	۱۹/۷	۱۴۸/۱	۲۷۸/۹	۲۶۰	۱۵۸/۸	۱۸/۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۸۸۴/۲
	۱۵۰۰	۰/۰	۱۰/۵	۱۳۵/۳	۲۶۰/۱	۲۴۳/۱	۱۴۹/۷	۱۷/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۸۱۶/۳
ذرت علوفه‌ای	۱۰۰۰	۰/۰	۰/۰	۴۹/۹	۲۴۲/۲	۲۱۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۵۱۰/۲
	۱۵۰۰	۰/۰	۰/۰	۴۴/۱	۲۲۵/۷	۲۰۳/۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۷۳/۷
یونجه	۱۰۰۰	۸۳/۱	۱۳۳/۷	۱۸۰/۸	۲۰۵/۵	۱۹۱/۶	۱۴۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۹۳۶/۷
	۱۵۰۰	۶۳/۶	۱۱۵/۵	۱۶۵/۷	۱۹۱/۳	۱۷۹	۱۳۳/۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۸۴۸/۹

در شکل ۳ تغییرات نیاز آبی خالص سالانه برای محصولات گندم، جو، کلزا، پنبه، ذرت علوفه‌ای و یونجه در ارتفاعات مختلف (محدوده‌ی ارتفاعی ۸۰۰ تا ۳۰۰۰ متر از سطح دریا) نشان داده شده است. با توجه به شکل و در یک نگاه کلی، ملاحظه می‌شود که روند تغییرات نیاز آبی خالص با ارتفاع در همه‌ی محصولات نزولی است. با توجه به مدل گرادیان خطی بارش که نشان‌دهنده‌ی افزایش بارش به ازای افزایش ارتفاع است، این مسئله دور از انتظار نبود. شیب کاهش میزان نیاز آبی با افزایش ارتفاع از سطح دریا در سه محصول گندم، جو و کلزا بیش‌تر از محصولات پنبه، ذرت و یونجه است.

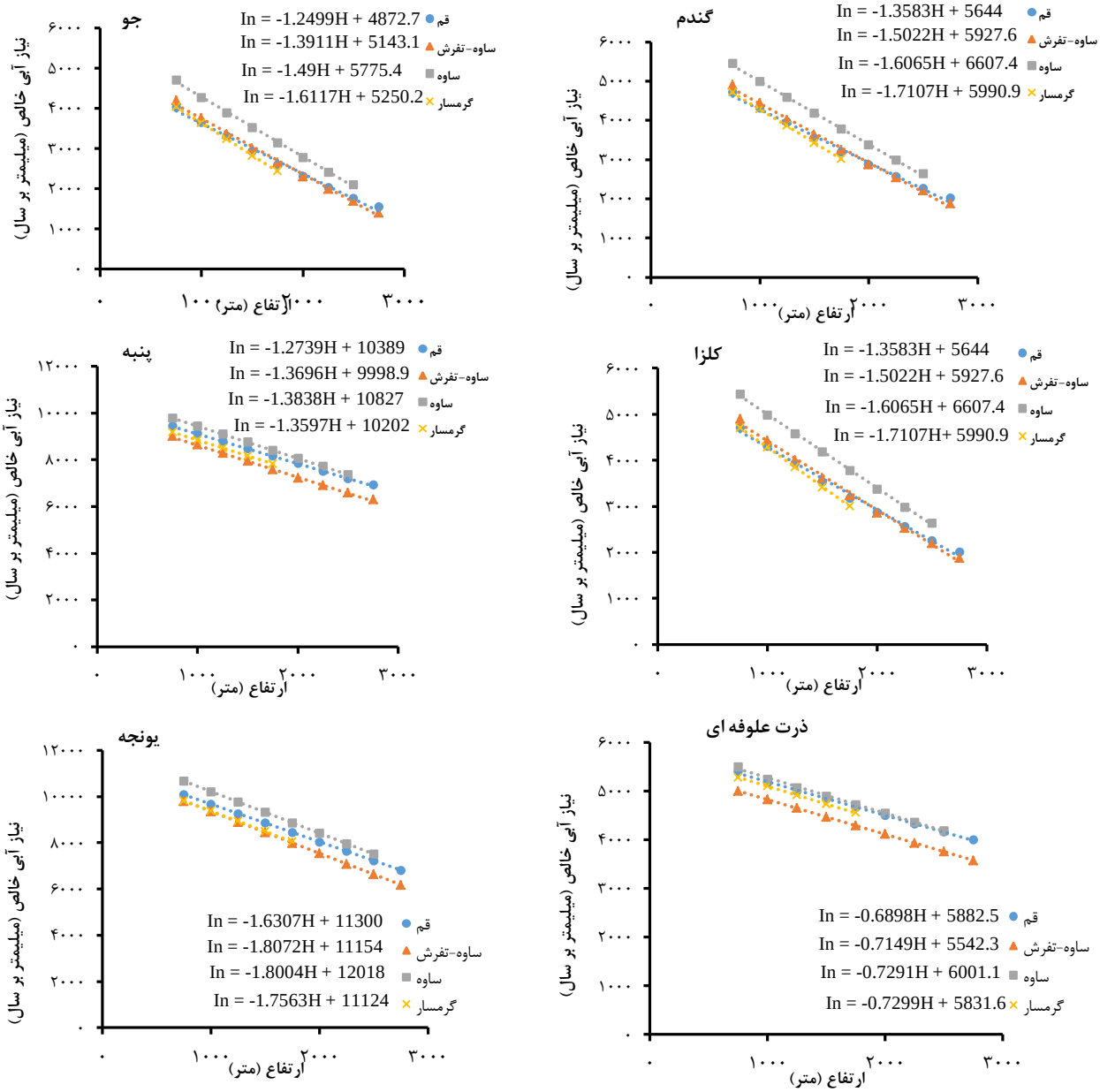
میزان نیاز خالص آبی محصولات پاییزه (گندم، جو و کلزا) در محدوده‌ی تحت پوشش ایستگاه‌های مورد بررسی به این صورت است که نیاز خالص آبی این محصولات در محدوده‌ی تحت پوشش ایستگاه ساوه به میزان قابل توجهی بیش‌تر از نیاز آبی خالص در محدوده‌های تحت پوشش سه ایستگاه ساوه-تفرش، قم و گرمسار است. به طور میانگین میزان نیاز آبی خالص سالانه‌ی گندم، جو و کلزا در بازه‌ی ارتفاعی ۷۵۰ تا ۱۷۵۰ متری در محدوده‌ی ساوه به ترتیب به میزان ۷۴۳/۷۴، ۶۴۷/۲۵ و ۷۴۳/۷۴ میلی‌متر بیش‌تر از محدوده‌ی گرمسار است. با توجه به این مسئله و با بهینه‌سازی الگوی کشت با توابع هدف حداکثرسازی بهره‌وری و یا حداقل‌سازی آب مجازی، این سه محصول در منطقه‌ی تحت پوشش ایستگاه ساوه کم‌ترین سطح را به خود اختصاص خواهند داد. پیشنهاد می‌شود از کشت محصولات پاییزه در محدوده‌ی ساوه اجتناب و بیش‌تر محصولات بهاره کشت شود. میزان نیاز آبی این محصولات در محدوده‌های تحت پوشش ایستگاه‌های ساوه-تفرش، قم و گرمسار اختلاف خیلی زیادی باهم ندارند. ترتیب میزان نیاز آبی خالص در محصولات بهاره (پنبه، یونجه و ذرت علوفه‌ای) در محدوده‌های تحت پوشش ایستگاه‌ها به این صورت است که نیاز آبی هر سه محصول در محدوده‌ی تحت پوشش ایستگاه ساوه بیش‌ترین مقدار و در ساوه-تفرش کم‌ترین مقدار است. همچنین نیاز آبی این محصولات در محدوده‌ی تحت پوشش ایستگاه قم بیش‌تر از گرمسار است. به طور میانگین میزان نیاز آبی خالص سالانه‌ی پنبه، ذرت علوفه‌ای و یونجه در بازه‌ی ارتفاعی ۷۵۰ تا ۲۵۰۰ متری در محدوده‌ی ساوه به ترتیب به میزان ۸۱۱/۵، ۴۳۵/۷ و ۸۷۵/۱ میلی‌متر، بیش‌تر از محدوده‌ی ساوه-تفرش است. ملاحظه می‌شود که بیش‌ترین اختلاف میزان نیاز آبی در دو محدوده مربوط به یونجه و کم‌ترین اختلاف مربوط به ذرت علوفه‌ای می‌باشد.

شکل ۴ تغییرات نیاز آبی خالص گندم در کل فصل رشد برای چهار محدوده‌ی استان قم ارایه شده است. این شکل برای نمونه برای محصول گندم به‌عنوان محصول استراتژیک و با سطح بالا کشت در استان ارایه شده و تاثیر ارتفاع و موقعیت مناطق مختلف استان قم بر نیاز آبی خالص گندم را به وضوح نشان می‌دهد. نیاز آبی خالص گندم در محدوده‌ی ایستگاه ساوه به وضوح بیش‌تر از مناطق دیگر استان قم است. این اختلاف در دیگر محصولات پاییزه شامل جو و کلزا نیز مشهود است (شکل ۳). در کل استان نیز تغییرات نیاز آبی خالص گندم در محدوده‌ی ایستگاه گرمسار و ساوه به دلیل وجود ارتفاعات کم‌تر از ایستگاه‌های قم و ساوه-تفرش است. تغییرات نیاز آبی خالص گندم در محدوده‌ی ایستگاه گرمسار در ۳۶۸۵ تا ۴۷۱۰ میلی‌متر در سال و در ایستگاه ۱۳۰۵ تا ۴۶۲۵ میلی‌متر در سال متغیر است.

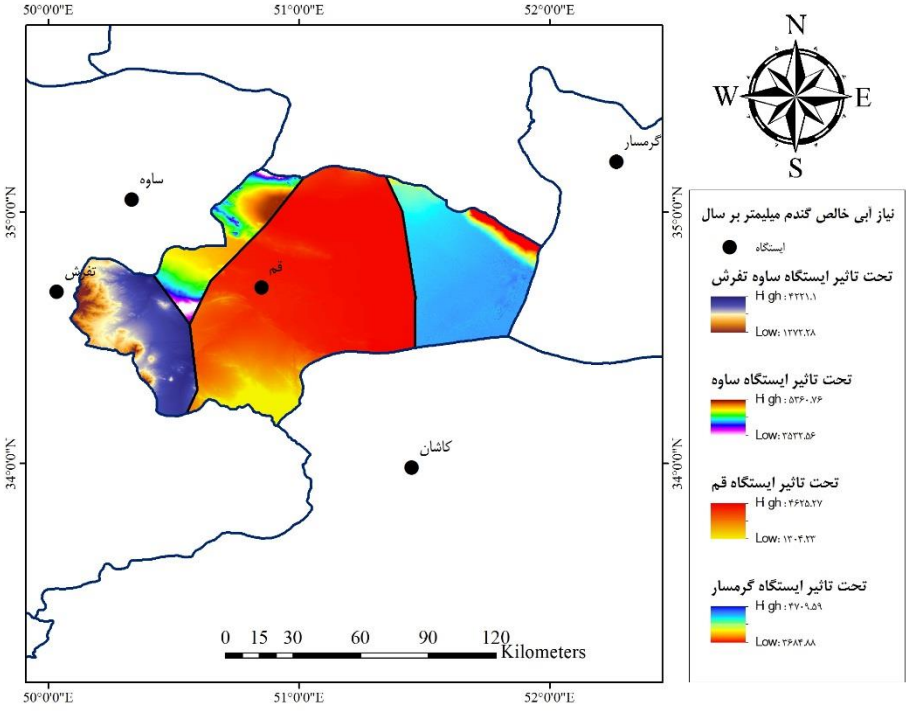
نتیجه‌گیری

آب کالایی ارزشمند برای کشور ایران به‌ویژه در مناطق با پتانسیل بالای تبخیر - تعرق در کشاورزی و منابع طبیعی و سایر بخش‌های مصرف‌کننده محسوب می‌شود. یکی از راه‌های کاهش بحران آب در بخش کشاورزی به سبب پایین بودن راندمان مصرف آن و استفاده‌ی بیش از حد از منابع موجود، مدیریت آب در تامین نیاز

آبی گیاهان زراعی است. برآورد تبخیر – تعرق و نیاز آبی محصولات کشاورزی به‌عنوان مهم‌ترین مصرف‌کننده منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه به برآورد تبخیر – تعرق و نیاز آبی محصولات زراعی مهم در استان قم که دارای تنوع اقلیمی و ارتفاعی بوده و شبکه ایستگاه‌های هواشناسی تراکم کمی دارند پرداخته شد. در ابتدا گرادیان بارندگی بر اساس داده‌های ۴۵ ایستگاه مدل‌سازی شد و مدل خطی با ضریب زاویه‌ی ۰/۱۳۵ و عرض از مبداء ۲۷/۸۷ با مقدار R برابر ۰/۸۵ به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. سپس گرادیان سه شاخص حرارتی شامل متوسط حداکثر، میانگین روزانه و متوسط حداقل دمای ماهانه و سالانه بر اساس ایستگاه‌های مختلف سینوپتیک و کلیماتولوژی و تبخیرسنجی (در مجموع ۳۰ ایستگاه) برای ماه‌های مختلف تعیین شد. با توجه به معادلات به‌دست آمده برای گرادیان، مشخص شد که دمای پایه برای گرادیان‌های حرارتی سالانه بر اساس دمای حداکثر، حداقل و میانگین به‌ترتیب برابر ۳۰/۷۶، ۱۴/۴۷ و ۲۲/۶۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین گرادیان حرارتی سالانه برای دمای حداکثر، حداقل و میانگین به ترتیب برابر ۰/۰۰۵۹، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۵۴ می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه نیاز آبی محصولات مختلف در محدوده‌ها و ارتفاعات مختلف



شکل ٤- پهنه‌بندی نیاز آبی گندم در محدوده‌ها و ارتفاعات مختلف استان قم

در ادامه منطقه‌ی مورد مطالعه به چهار زیر محدوده‌ی قم، ساوه‌تفرش، ساوه و گرمسار با شرایط اقلیمی مختلف تقسیم‌گردید. سپس پارمترهای اقلیمی با استفاده از روابط رگرسیونی استخراج شده نسبت به ارتفاعات موجود در هر محدوده اصلاح شد و نیاز آبی خالص در هر محدوده در محدوده‌های ارتفاعی مختلف محاسبه شد. نتایج نشان‌داد که نیاز آبی خالص همه‌ی محصولات زراعی مورد بررسی در محدوده‌ی ساوه بیش‌ترین مقدار را نسبت به دیگر محدوده‌ها دارد. همچنین در محصولات پاییزه، کم‌ترین نیاز آبی خالص در محدوده گرمسار و در بین محصولات بهاره در محدوده‌ی ساوه-تفرش مشاهده می‌شود. میانگین نیاز آبی خالص سالانه‌ی گندم، جو و کلزا در محدوده‌ی ساوه به‌ترتیب به‌میزان ۷۴۳/۷، ۶۴۷/۳ و ۷۴۳/۷ میلی‌متر بیش‌تر از محدوده‌ی گرمسار است. این مقدار برای پنبه، ذرت علوفه‌ای و یونجه در محدوده‌ی ساوه به‌ترتیب ۸۱۱/۵، ۴۳۵/۷ و ۸۷۵/۱ میلی‌متر بیش‌تر از محدوده‌ی ساوه-تفرش است. ملاحظه می‌شود که بیش‌ترین اختلاف میزان نیاز آبی در دو محدوده مربوط به یونجه و کم‌ترین اختلاف مربوط به ذرت علوفه‌ای می‌باشد. با توابع هدف حداکثرسازی بهره‌وری و یا حداقل‌سازی آب مجازی، الگوی کشت بهینه در منطقه‌ی تحت پوشش ایستگاه ساوه، محصولات پاییزه کم‌ترین سطح را به خود اختصاص خواهند داد. پیشنهاد می‌شود از کشت محصولات پاییزه در محدوده‌ی ساوه اجتناب و بیش‌تر محصولات بهاره کشت شود. تبدیل دیم‌زارهای کم‌بازده استان به کشت نباتات علوفه‌ای نظیر ذرت‌علوفه‌ای به علت تطابق خاص اکولوژیکی از یک سو و انطباق‌پذیری اقتصادی اجتماعی و نیز قابلیت‌های اجرایی در این مناطق از سوی دیگر، می‌تواند به عنوان یکی از اقدامات اضطراری و در عین حال پایدار جهت حفظ و بهره‌برداری پایدار از منابع پایه‌ی آب و خاک مطرح باشد. از طرف دیگر با توجه به کمبود بارش و بالا بودن میانگین تبخیر - تعرق پتانسیل در استان، اجرای طرح‌های آبخیزداری و ذخیره‌سازی آب‌های سطحی ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

ابراهیمیان،ح و حسن‌لی،م. ۱۳۹۵. آبیاری و تغذیه آب زیرزمینی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ص ۲۵۵.

احمدالی،خ.، رمضانی‌اعتدالی،ه.، حسینی‌پژوه،ن و پورمحسنی،ع. ۱۳۹۶. ارزیابی سامانه‌های نوین آبیاری استان قم. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۵. ۱۱: ۷۴۹-۷۳۶.

احمدپری،ه.، تنهاپور،م و حاجی‌زاده‌رودخانه،م. ۱۳۹۴. برآورد نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی شهر برازنجان با استفاده از مدل CropWat. اولین همایش بین المللی و سومین همایش ملی مهندسی و مدیریت کشاورزی، محیط زیست و منابع طبیعی پایدار، همدان.

بختیاری،ب.، محبی‌دهاقانی،ع و قادری،ک. ۱۳۹۴. برآورد تبخیر تعرق

مرجع روزانه با حداقل داده‌های هواشناسی در اقلیم‌های نیمه‌خشک منتخب ایران. تحقیقات منابع آب ایران. ۳. ۱۱: ۱۴۴ ت ۱۳۱.

دلگرم،س.، رحیم‌پور،م.، بختیاری،ب و سیاری،ن. ۱۳۹۴. مقایسه تبخیر تعرق واقعی حاصل از داده‌های لایسیمتری و الگوریتم SEBAL در دشت کرمان، با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS. تحقیقات آب و خاک ایران. ۲. ۴۶: ۳۸۳-۳۷۳.

ذاکری‌نیا،م.، قربانی،خ و هزارجریبی،ا. ۱۳۹۳. تعیین نیاز آبی گیاهان الگوی کشت شبکه آبیاری با استفاده از ArcET (مطالعه موردی: دشت درودزن فارس). نشریه پژوهش‌های آب و خاک. ۲. ۲۰: ۲۰۸- ۱۹۱.

رمضانی خوجین،ع.ر.، خیرخواه زرکش،م.، دانش کار آراسته،پ.، مریدی،ع. و علیمحمدی،ر. ۱۳۹۵. تحلیل حساسیت تبخیر – تعرق محاسبه شده با استفاده از مدل بیلان انرژی روزانه و مقایسه آن با مدل سبال. تحقیقات منابع آب ایران. ۱. ۱۲: ۲۸-۱۸.

زارع ابیانه،ح.، بیات ورکشی،م.،سبزی‌پرور،ع.ا.، معروفی،ص و قاسمی،ع. ۱۳۸۹. ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۷۴: ۱۱۰-۹۵.

سهرابی،ت و پایدار،ز. ۱۳۹۴. اصول طراحی سیستم‌های آبیاری. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ سوم. ص ۴۰۶.

شعبانی،ع.، سپاسخواه،ع.ر.، بهرامی،م و رزاقی،ف. ۱۳۹۶. کاربرد تلفیقی روش شبکه عصبی و روش‌های محاسباتی جهت تخمین دقیق‌تر تبخیر تعرق مرجع. تحقیقات منابع آب ایران. ۱. ۱۳: ۱۶۲-۱۵۲.

علوی،ع و رحیمی‌خوب،ع. ۱۳۹۵. ارایه یک رابطه ساده برای تعیین تبخیر – تعرق مرجع با استفاده از داده‌های ماهواره نوا. تحقیقات آب و خاک ایران. ۱. ۷۴: ۸۵-۷۷.

علیزاده،ا.، کمالی، غ.ع.، خانجانی،م.ج و رهنمود،م.ر. ۱۳۸۰ . ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر-تعرق در مناطق خشک ایران. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی.۷۳: ۱۰۵ ت ۹۷.

قمرنیا،ه.، غلامیان،م و کمالی،ن. ۱۳۹۵. برآورد تبخیر تعرق و ضرایب گیاهی در گیاه ذرت با استفاده از تصاویر ماهوارهای لندست ۸ مطالعه موردی (دشت سراب نیلوفر کرمانشاه). تحقیقات منابع آب ایران . ۴. ۱۲: ۱۰۷-۹۳.

قمرنیا،ه. و موسی‌بیگی،ف. ۱۳۹۳. برآورد نیاز آبی، ضرایب گیاهی یک جزئی و دوجزئی نعناع فلفلی (*Mentha pipertia* L.). نشریه آب و خاک. ۴. ۴۸: ۶۷۸ ت ۶۷۰.

قیصر،م.، میرلطیفی،س.م.، همایی،م و اسدی،م.ا. ۱۳۸۵. تعیین نیاز آبی ذرت علوفه‌ای و ضریب گیاهی آن در مراحل مختلف رشد. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۷. ۲۸: ۱۲۵-۱۴۲.

کریمی،ش و پناهنده،ع. ۱۳۸۸، راهنمای محاسبات استاندارد نیاز آبی گیاه با استفاده از نرم افزار CROPWAT8.0. دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان، دانشگاه شهید باهنر.

مهدوی،م. ۱۳۹۴. هیدرولوژی کاربردی (جلد اول). انتشارات دانشگاه تهران. چاپ یازدهم. ص ۳۶۰.

هادیانی،م.، جهانبخش،س.، رضایی‌بنفشه،م و دین‌پژوه،ی. ۱۳۹۰. نقش شرایط توپوگرافی در برآورد گرادیان بارندگی طبقات ارتفاعی مناطق کوهستانی (مطالعه موردی دامنه شمالی البرز مرکزی). فصلنامه علوم و فنون منابع طبیعی. ۲. ۶: ۲۵ -۱۵.

Allen,R.G., Pruitt,W.O., Businger,J.A., Fritschen,L.J., Jensen,M.E and Quinn,F.H. 1996. Evaporation and transpiration. In: Wootton et al (Task Com.) ASCE handbook of hydrology., chap 4, 2nd edition. American Society of Civil Engineers. New York, p 125ت252. 784 p.

Allen,R.G., Clemmens,A.J.t Burt,C.M., Solomon,K and Oب Halloran,T. 2005. Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. J. Irrigation and Drainage Engineering. 131.1: 24-36.

Allen,R.G., Pereira,L.S., Raes,D and Smith,M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome. 300.9: D05109.

Bastiaanssen,W.G.M. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin. Turkey. Journal of hydrology. 229.1:87-100.

Gong,L., Xu,C.Y., Chen,D., Halldin,S and Chen,Y.D. 2006. Sensitivity of the Penmanت Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. Journal of hydrology. 329.3: 620-629.

Jensen,M.E., Burman,R.D and Allen,R.G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE.

Khoob,A.R. 2008. Artificial neural network estimation of reference evapotranspiration from pan evaporation in a semi-arid environment. Irrigation Science. 27.1: 35-39.

Li,F., Lyons,T.J. 2002. Remote estimation of regional

external training of neuro-fuzzy and neural networks models for estimating reference evapotranspiration assessed through k-fold testing. Hydrology Research. 46.1: 72-88.

Sucksdorff,Y and Ottle,C. 1990. Application of satellite remote sensing to estimate areal evapotranspiration over a watershed. Journal of hydrology. 121.1-4: 321-333.

Sun,L and Song,C. 2008. Evapotranspiration from a freshwater marsh in the Sanjiang Plain, Northeast China. Journal of hydrology. 352.1: 202-210.

Xu,C.Y., Gong,L., Jiang,T., Chen,D and Singh,V.P. 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. Journal of hydrology. 327.1:81-93.

evapotranspiration. Environmental Modelling and Software. 17.1: 61-75.

Li,F., Lyons,T.J. 1999. Estimation of regional evapotranspiration through remote sensing. Journal Appllied Meteorology. 38.11: 1644-1654.

Price,J.C. 1990. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 28.5: 940-948.

Shamshirband,S., Amirmojahedi,M., Goci□,M., Akib,S., Petkovi□,D., Piri,J and Trajkovic,S. 2015. Estimation of reference evapotranspiration using neural networks and cuckoo search algorithm. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 142.2.

Shiri,J., Marti,P., Nazemi,A.H., Sadraddini,A.A., Kisi,O., Landeras,G and Fard,A.F. 2015. Local vs.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 12, Feb.-Mar. 2019, p. 1448-1462

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۲، بهمن - اسفند ۱۳۹۷، ص. ۱۴۶۲-۱۴۴۸

Estimation of Crop Evapotranspiration and Water Requirement Over Different Agro-Climatic Conditions (Case study: Qom province)

Kh. Ahmadaali[1], H. Ramezani Etedali[2]*, A. A. Pourmohseni [3]
Recived: May.23, 2018 Accepted: Sep.08, 2018

Abstract

Estimation of water requirement in areas such as Qom province have always been a difficult process due to their different agro-climatic zones and latitudinal ranges, and low density of weather station network. In this study, estimation of evapotranspiration and water requirement of major crops was studied in Qom province. Initially, the studied area was divided into four sub-areas of Qom, Saveh-Tafresh, Saveh, and Garmsar which have different climatic conditions. Then, the climate parameters were amended using the obtained regression equations from the elevations in each sub-area and the net irrigation requirement was calculated in each sub-area at various altitudes. The results showed that the amount of net irrigation requirement of all selected crops in Saveh was higher than other zones. The minimum net irrigation requirement of winter (wheat, barley, and canola) and spring (cotton, alfalfa, corn) crops was in the Garmsar and Saveh-Tafresh zone, respectively. The average net irrigation requirement of wheat, barley, and canola in Saveh zone was 743.7, 647.3 and 743.7 mm more than Garmsar zone, respectively. This amount for cotton, corn, and alfalfa in Saveh was 811.5, 354.7, and 1.875 mm more than Saveh-Tafresh zone, respectively. It was concluded that cultivation of winter crops in Saveh zone is not suitable due to higher virtual water compared to other areas and cultivation of spring crops is recommended in this zone.

Keywords: Effective rainfall, Penman-Monteith FAO 56, crop coefficients, spring and winter crops

1- Assistant Professor, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, University of Tehran, Karaj
2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin
3- MSc in Irrigation and Drainage Engineering
(*- Corresponding Author Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)