نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره 3، جلد 10، مرداد - شهریور 1395، ص. 351-339

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 10, Jul.-Agu. 2016, p. 339-351

بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری در واحدهای زراعی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران اهواز

افشین نجفی[1]، ابراهیم امیری تکلدانی[2*]، حامد ابراهیمیان[3]، سید هادی میرابولقاسمی[4]

تاریخ دریافت: 1395/3/5 تاریخ پذیرش: 1395/6/10

چکیده

بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌ی آب در جهان، بخش کشاورزی است. در نتیجه بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این پژوهش، بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری در واحدهای زراعی تحت پوشش یک کانال درجه‌ی سه در شبکه آبیاری و زهکشی با استفاده از مدل AquaCropو بهینه‌سازی چند هدفه در مدل الگوریتم ژنتیک انجام گرفت. بدین منظور دو نوع برنامه‌ریزی آبیاری عمق ثابت- دور ثابت و عمق متغیر- دور متغیر متناسب با دو نوع بافت خاک (سبک و سنگین) در واحدهای زراعی تحت مطالعه، برای محصول ذرت دانه‌ای (گیاه پرمصرف الگوی کشت) بررسی شده و حالت بهینه برای دو برنامه‌ریزی پیشنهاد گردید. توابع هدف در نظر گرفته شده در مدل بهینه‌سازیدر خاک با بافت سبک عبارت از بهره‌وری آب، کسر آبشویی، عملکرد و تعداد نوبت آبیاری و در خاک با بافت سنگین، بهره‌وری آب، شوری عصاره اشباع خاک، عملکرد و تعداد نوبت آبیاری بود. نتایج حاصل از بهینه‌سازی،نشان‌دهنده کاهش تقریباً 50 درصد در مصرف آب،افزایش 94 درصد در مقدار بهره‌وری آب، کاهش 62 درصد در کسر آبشویی و کاهش سه نوبت آبیاری در برنامه‌ی عمق ثابت- دور ثابت و کاهش 50 درصد در مصرف آب، افزایش111 درصد در مقدار بهره‌وری آب، کاهش 66 درصد در کسر آبشویی و کاهش سه نوبت آبیاری در برنامه‌ی عمق متغیر- دور متغیر در خاک سبک، نسبت به برنامه پیشنهادی موجود می‌باشد. برای خاک با بافت سنگین نیز نتایج نشان‌دهنده کاهش 35 درصد در مصرف آب، افزایش 63 درصد در مقدار بهره‌وری آب، کاهش 52 درصد در کسر آبشویی و کاهش یک نوبت آبیاری در برنامه‌ی عمق ثابت- دور ثابت و کاهش 35 درصد در مصرف آب، افزایش70 درصد در بهره‌وری آب، افزایش11 درصد در عملکرد محصول و کاهش یک نوبت آبیاری در برنامه‌ی عمق متغیر- دور متغیرنسبت به برنامه پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی آبیاری، بهینه‌سازی چند هدفه،تابع هدف، ذرت، مدلAquaCrop

مقدمه

مدیریت و استفاده بهینه از منابع آب در بخش کشاورزی، از آن جهت که در سراسر جهان حدود 75 درصد از کل آب در دسترس به بخش کشاورزی اختصاص داده می‌شود حائز اهمیت زیادی است این در حالی است که، آبیاری خود به عنوان یک هدر دهنده آب مورد انتقاد شدیدی قرار دارد(Debaeke and Aboudrare., 2004). در نتیجه از دهه‌های گذشته تحقیقات متعددی به منظور ارائه برنامه‌ریزی مناسب برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی به عمل آمده است.به عنوان مثالمدلی برای ارائه تخصیص بهینه آب برای آبیاری چند گیاه بر اساس نیازهای آبی و منابع آب ورودی احتمالاتی توسعه داده شد (Vedula and Mujumdar., 1992). کورشی و همکاران با ترکیب‌های مختلفی از عمق و دور آبیاری، نهایتاً عمق 165 میلی‌متر با دور آبیاری 15 روز را به‌عنوان برنامه‌ریزی بهینه آبیاری نیشکر در منطقه سند پاکستان تشخیص دادند (Qureshi et al., 2001). قهرمان و سپاسخواه مدلی را برای تخصیص بهینه آب برای الگوی کشت تعیین شده معرفی و یک برنامه‌ی بهینه‌سازی غیرخطی در برگیرنده‌ی تعادل بین آب و خاک به منظور کاهش آب مصرفی ارائه نمودند (Ghahraman and Sepaskhah., 2002). لی و همکاران در پژوهش خود، با بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری برای گندم زمستانه در چین، با تعیین عمق و دور آبیاری بهینه، عملکرد محصول و بهره‌وری آب را افزایش دادند (Li et al., 2005). اکبری و همکاران (1387)در پژوهش خود، با بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری موجب افزایش 15 درصدی در عملکرد محصول و 40 درصدی در بهره‌وری آب شدند. وظیفه‌دوست و همکاران به تعیین کارائی اقتصادی آب برای چند محصول گندم، ذرت علوفه، آفتابگردان و چغندرقند در منطقه‌ی شمال ایران پرداختند. آنان بعد از صحت‌سنجی و کالیبره کردن مدل شبیه‌ساز

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه تهران و عضو هیئت مدیره شرکت دانش‌بنیان آرین خوشه پارس
2- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران
3- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران
4- مدیر بخش آبیاری و زهکشی شرکت مهندسین مشاور آب خاک تهران
(* - نویسنده مسئول: (Email: amiri@ut.ac.ir

SWAP، توانستند کارائی مصرف آب را برای گندم و ذرت را بـه 1/5، آفتابگردان 1/3 و چغندقند به 1/1 کیلوگرم به ازای مصرف واحد حجم آب افـزایش دهنـد (Vazifedoust et al., 2008).گارسـیا ویـلا و همکاران به تعیین عمق بهینه آبیاری برای گیاه پنبه در مناطق جنوبی اسپانیا پرداختند.با استفاده از مدل AquaCrop بعد از صـحت سـنجی مدل به این نتیجـه رسـیدند کـه مـدل دارای کـارائی مناسـب بـرای شبیه‌سازی عملکرد گیـاه و محاسـبه عمـق بهینـه آبیـاری مـی‌باشـد (Garcia Vila et al., 2009). دهقـان و همکـاران (1389) شاخص‌های مختلف بهره‌وری آب برای گندم در منطقه‌ی نیشـابور را توسط مدل شبیه‌سازی SWAP مورد بررسـی قـرار دادنـد و بـه ایـن نتیجه رسیدند که با بهبود برنامه‌ریزی آبیاری، ضمن کـاهش مصـرف آب، کارائی مصـرف آب تـا 61 درصـد افـزایش مـی‌یابـد. آقاجـانی و همکاران (1392) با تلفیـق مـدل شـبیه‌سـازی SWAPو روش حـل الگوریتم ژنتیک، به تعیین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم شامل عمق و دور آبیاری به‌منظور بیشینه نمودن بهره‌وری آب برای گیاه بـرنج در استان گیلان پرداختند.نتیجه پژوهش آنان افـزایش ایـن شـاخص بـه مقدار 1/59 کیلوگرم در مترمکعب مصرف آب بوده اسـت. محمـدی و همکاران (1393)با تلفیق داده‌های سنجش از راه دور و مدل شبیه‌ساز بیلان آب و خاک، وضعیت برنامـه‌ریـزی موجـود در منطقـه کشـت و صنعت میرزا کوچک خان اهـواز را مـورد بررسـی قـرار دادنـد. نتـایج حاصل از پـژوهش آنـان کـاهش 27 درصـدی مصـرف آبـو افـزایش 30درصدی کارائی مصرف آب بود. با توجه به پـژوهش‌هـای صـورت گرفته، هدف اصلی این تحقیق، بهینه‌سـازی برنامـه‌ریـزی آبیـاری در واحدهای زراعیتحت پوشش یک کانال درجه سه در شـبکه آبیـاری و زهکشی شهید چمران، با استفاده از مدل شـبیه‌سـازیAquaCrop و مدل بهینه‌سازی (الگوریتم ژنتیک) و مقایسه این برنامه‌ریزی بهینه بـا برنامه پیشنهاد شده موجود توسط شرکت مشاور است.

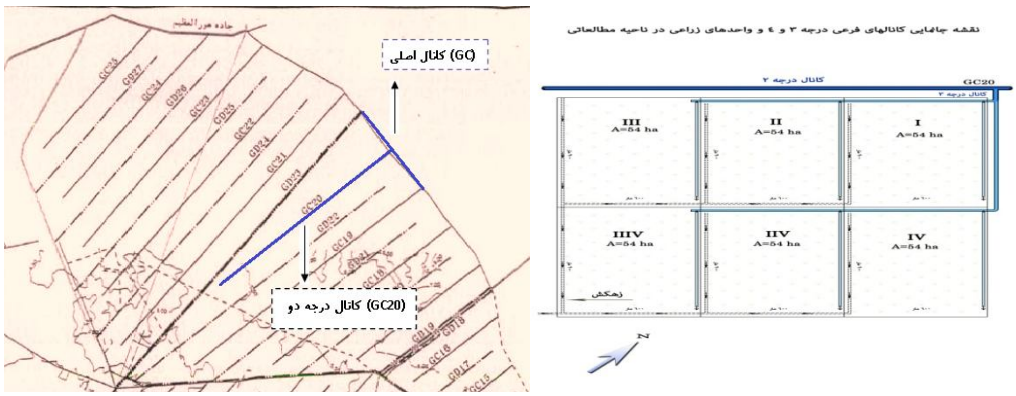
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

طرح توسعه اراضی شهید چمران، اراضـی واقـع در جنـوب غربـی طرح شهید چمران است که مساحتی بـالغ بـر63350 هکتـار را دربـر می‌گیرد. اراضی مورد مطالعه 45 کیلومتری جنوب غربی شهر اهواز در محدوده جغرافیایی 56َ و 47 تا 23َ و 48 ْ طول شـرقی از نصـف‌النهـار مبدا و 5َ و 31 ْ تا 21َ و 31 ْ عرض شمالی از خط استوا واقع شده اسـت. مکان مورد مطالعه در این پژوهش، اراضی تحت پوشـش یـک کانـال درجه سه می‌باشد که منبع تغذیه‌ی آن کانال درجه‌ی دو بـا نـام، GC 20 است که مطابق با نقشه جانمایی شبکه اصلی مکان آن مشـخص شده است. کانال درجه سه، با مقطع ذوزنقـه و بتنـی و بـه صـورت دو شاخه می‌باشد که هریک از شاخه‌های این کانال، سه واحـد زراعـی را تحت پوشش خود دارند و کانال‌های درجه چهـار بـه صـورت خـاکی طراحی شده‌انـد. نقشـه‌ی جانمـایی و موقعیـت کانـال‌هـای فرعـی و واحدهای مزرعه و همچنین کانال‌های اصلی در شـکل 1 آورده شـده است. جدول 1 مشخصات بیش‌تری از کانال‌های فرعـی و واحـدهای مزرعه را ارائه می‌کند. واحدهای مزرعه دارای مساحت 54 هکتار بوده و طول وعرض آن‌ها به‌ترتیب 900 و 600 متر می‌باشند.

جدول 2 مشخصات نوع خـاک هریـک از واحـدهـای زراعـی در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد.

جدول 3 متوسط هدایت الکتریکی (Ec_e) رودخانـه کرخـه، منبـع تأمین کننده آب در طرح شهید چمران، در ماه‌هـای مختلـف سـال را نشان می‌دهد. در جدول 4 نیز الگوی کشت پیشنهادی توسط شـرکت مهندسین مشاور، به همراه درصد زیر کشت هـر یـک از محصـولات آورده شده است.



شکل 1- نقشه جانمایی کانال‌های اصلی (شکل سمتچپ) و کانال‌های فرعی و واحدهای زراعی (شکل سمت راست)

جدول 1- مشخصات اصلی شبکه‌های فرعی و واحدهای زراعی در منطقه مطالعاتی(مهندسین مشاور آب خاک تهران، 1380)

درجه کانال	شاخه کانال	طول کانال (m)	وسعت تحت پوشش (ha)	مقطع کانال	پوشش کانال	ظرفیت کانال
3	GC20 (3-1)	1200	162	ذوزنقه	بتنی	258
3	GC20 (3-2)	2100	162	ذوزنقه	بتنی	258
4	فاقد شاخه	900	54	ذوزنقه	خاکی	116

جدول 2- مشخصات نوع خاک واحدهای زراعی مورد مطالعه در این پژوهش(مهندسین مشاور آب خاک تهران، 1380)

نوع خاک	واحدهای زراعی تحت پوشش	عمق خاک	درصد ذرات تشکیل دهنده خاک (%)				سایر مشخصات خاک		
			شن	سیلت	رس	بافت	Ece(ds/m)	pH	SAR
1	۳،۲،۱ واحدهای زراعی تحت پوشش شاخه بالا	0 -80	44/6	40/4	15	لوم	9/6	7/3	1/95
		80 -120	82	10/4	7	شن لومی	9/6	7/3	1/25
		120 -200	69	19/4	11/6	لوم شنی	6/8	6/1	1/87
2	۶،۵،۴ واحدهای زراعی تحت پوشش شاخه پایین	0 -50	24/4	54	21/4	لوم سیلتی	38/2	6/2	8/93
		50 -100	19	50/6	30/4	رس سیلتی	29/5	7/1	6/88
		100 -150	34/6	46/4	19	لوم	26	6/7	3/2

جدول 3- مقادیر متوسط هدایت الکتریکی آب رودخانه کرخه در ماه‌های مختلف سال (مهندسین مشاور آب خاک تهران، 1380)

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
شوری(ds/m)	1/77	1/56	1/4	1/15	1/06	1/11	0/83	0/85	1/43	1/86	2/06	2/21

جدول 4- الگوی کشت پیشنهادی طرح به همراه درصد زیر کشت هریک از محصولات(مهندسین مشاور آب خاک تهران، 1380)

محصولات	گندم	جو	شبدر	باقلا	سبزیجات	حبوبات	گوجه فرنگی	خیار	هندوانه	ذرت علوفه‌ای	ذرت دانه‌ای
مساحتزیر کشت (درصد)	20	14	9	5	9	10	8	10	15	10	10
نوع کشت	پاییزه							بهاره			

مدل شبیه‌سازی AquaCrop

سازمان خواربار جهانی در ادامه تلاش خود به منظور اطمینان از مصرف بهینه آب برای غذای کافی، مدل AquaCrop را از مفهوم ارائه شده توسط دورنباس و کسام (Doorenbos and Kassam., 1979)به مفهوم دیگری تحت عنوان بهره‌وری نرمال شده آب مصرفی برای گیاه ارتقاء داد (Steduto et al., 2009). از مزایای مدل جدید، سادگی استفاده از آن توسط کاربران، دقت، اعتبار و نیاز کم‌تر به داده‌های ورودی می‌باشد (Steduto et al., 2009; Hsiao et al., 2009)در مقایسه با مدل قبلی، مدل جدید دارای چهار مزیت به شرح زیر است: (1) تجزیه تبخیر و تعرق به تعرق گیاهی (Tr) و تبخیر از سطح خاک (E)؛ (2) توسعه یک مدل ساده رشدنهایی گیاه (Y) به‌عنوان تابعی از زیست‌توده (B) و شاخص برداشت (HI)؛ (3) شبیه‌سازی عملکرد و رسیدن پوشش تاجی به عنوان یک مبنا برای برآورد تعریق گیاهی و تبخیر از سطح خاک؛ (4) تفکیک اثرات تنش آبی در چهار جزء: رشد پوشش تاجی، پیری پوشش تاجی گیاهT_rو HI.

در مدل AquaCrop نیز همانند مدلCROPWAT، از معادله دورنبوس و کسام (Doorenbos and Kassam., 1979) به شرح زیر برای محاسبه عملکرد بر اساس مقادیر تبخیر-تعرق نسبی استفاده می‌شود:

$$\frac{Y_{max}-Y_a}{Y_{max}} = K_y \times \frac{ET_{max}-ET_a}{ET_{max}} \quad (1)$$

در رابطه Y_{max}1عملکرد حداکثر؛Y_a عملکرد واقعی؛ ET_{max} تبخیر- تعرق حداکثر؛ ET_a تبخیر- تعرق واقعی

و K_yضریب تناسب بین کاهش عمکرد نسبی و کاهش تبخیر- تعرق می‌باشد.

در مدلAquaCrop، تعرق روزانه گیاه (Tr_i) با استفاده از ET_o روزانه و بهره‌وری آب (WP) گونه گیاهی که با استفاده از نیاز تبخیری و غلظت CO_2 اتمسفری نرمال شده است به وزن قسمت هوایی گیاه تبدیل می‌گردد. معادله 2 بیان ریاضی این رابطه می‌باشد (Hanks., 1983; Tanner andSinclair., 1983).

$$B_i = WP \times \frac{Tr_i}{ETo_i} \quad (2)$$

در رابطه 2 ،WP بهره‌وری آب (زیست‌توده‌ی ناشی از هر واحد تعرق تجمعی) است.

مدل AquaCrop برای نیمرخ خاک در منطقه‌ی ریشه، بیلان روزانه‌ی آب شامل آب‌های ورودی و خروجی (نفوذ، رواناب، نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق) و تغییرات رطوبت خاک را از معادله 3 به شرح زیر محاسبه می‌کند (Raes et al., 2009).

$$\Delta\theta = P + I + U - R - D - ET \quad (3)$$

که در آن $\Delta\theta$ تغییرات رطوبت خاک؛ P بارندگی؛ I آبیاری؛U خیز مویناییی به ناحیه‌ی ریشه؛ Rرواناب؛ D نفوذ عمقی؛ و ET تبخیر و تعرق می‌باشد.

مدل AquaCrop برای محاسبه‌ی شوری خاک، نیمرخ خاک را به 12 لایه و هر لایه را به 2 تا 11 سلول تقسیم‌بندی می‌کند. تعداد سلول‌ها بستگی به نوع خاک لایه‌های افقی دارد. از آنجایی که نمک‌ها شدیداً به ذرات رس می‌چسبند، لایه‌ی افقی رسی، سلول‌های بیش‌تری در مقایسه با لایه‌ی افقی شنی دارند. مدل توسط روابط 4، 5 و 6 شوری عصاره‌ی اشباع پروفیل خاک را شبیه‌سازی می‌کند(Raes et al., 2009).

$$W_{cell} = 1000 \times \Delta Z \frac{\theta_{sat}}{n} \quad (4)$$

$$Salt_{cell} = 0.64 \times W_{cell} Ec_{cell} \quad (5)$$

$$Ec_e = \frac{\sum_1^n salt_{cell,j}}{0.64\left(1000 \times \theta_{sat} \times \Delta Z\right)} \quad (6)$$

که در روابط فوق W_{cell} حجم سلول (میلی‌متر آب)؛ θ_{sat} رطوبت اشباع خاک ($\frac{m^3}{m^3}$)؛ Δzضخامت لایه‌های خاک؛ n تعداد سلول‌ها؛ $Salt_{cell}$ مقدار نمک سلول ($\frac{gr}{m^2}$)؛ Ec_{cell} هدایت الکتریکی هر سلول (ds/m)؛Ec_e هدایت الکتریکی عصاره‌ی اشباع عمقی از خاک است.

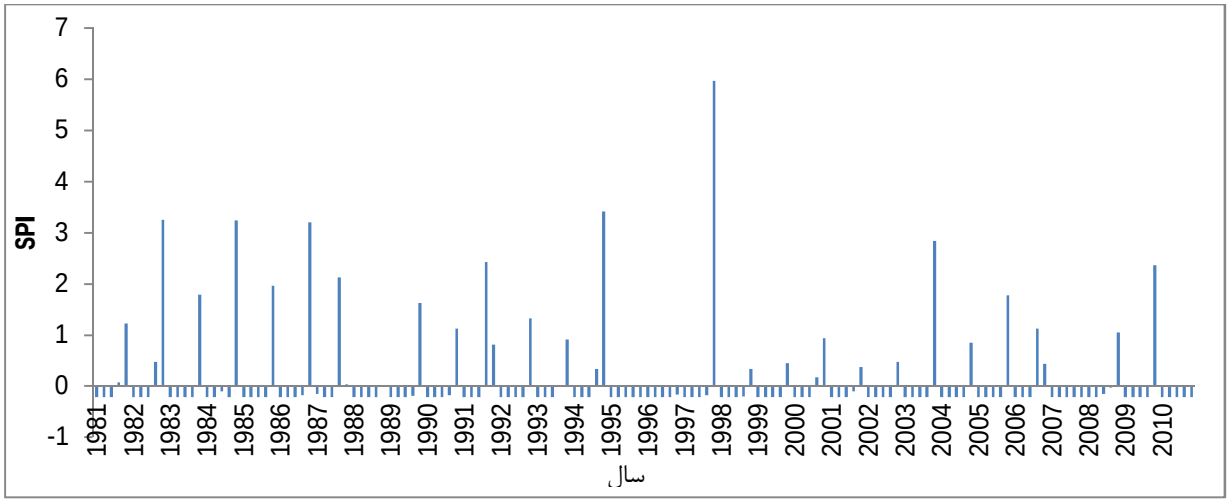
داده‌های ورودی به مدل

داده‌های مورد استفاده در این مدل به عنوان داده‌های ورودی شامل چهار دسته اطلاعات شامل داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه می‌باشند.برای وارد کردن داده‌های اقلیمی، بایستی یک سال هواشناسی مشخص، به‌گونه‌ایی که این سال معرف و مشخص کننده‌ی اقلیم منطقه مورد مطالعه (خوزستان) باشد انتخاب گردد. در این پژوهش، جهت وارد کردن داده‌های اقلیمی از شاخص خشکسالی SPI[1]استفاده شد. با جمع آوری 30 سال داده‌های بارندگی (از سال 1981 تا سال 2010) از ایستگاه هواشناسی اهواز که نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مطالعاتی بود، محاسبه شاخص خشکسالی SPI صورت گرفت. رطوبت خاک به تغییرات کوتاه مدت عکس‌العمل نشان می‌دهد، در حالی که آب زیرزمینی، جریان آب رودخانه‌ها و مخازن به تغییرات بلند مدت‌تر بارش، پاسخ می‌دهند(شکوهی، 1391). لذا با توجه به اینکه هدف پژوهش مسائل مربوط به کشاورزی و رطوبت خاک است، دوره زمانی مورد نظر جهت محاسبه این شاخص،کوتاه مدت و یک ماهه بوده است و از آنجایی که در طبقه‌بندی خشکسالی کشاورزی، محاسبه‌ی این شاخص در زمان فصل رشد گیاه مورد نظر صورت می‌گیرد. لذا شاخص در ماه‌های مربوط به رشد گیاه ذرت دانه‌ای در منطقه‌ی مطالعاتی محاسبه شد. پس از تعیین شاخص خشکسالی SPI در ماه‌های فصل رشد گیاه ذرت (شکل 2) سال‌های ترسال، خشکسالی و نرمال برای گیاه ذرت مشخص شد (شکل 3). لذا داده‌های هواشناسی سال نرمال شاخص،از ایستگاه هواشناسی اهواز استخراج و در فایل ورودی داده‌های اقلیمی مدل شبیه‌سازیAquaCrop وارد گردید.

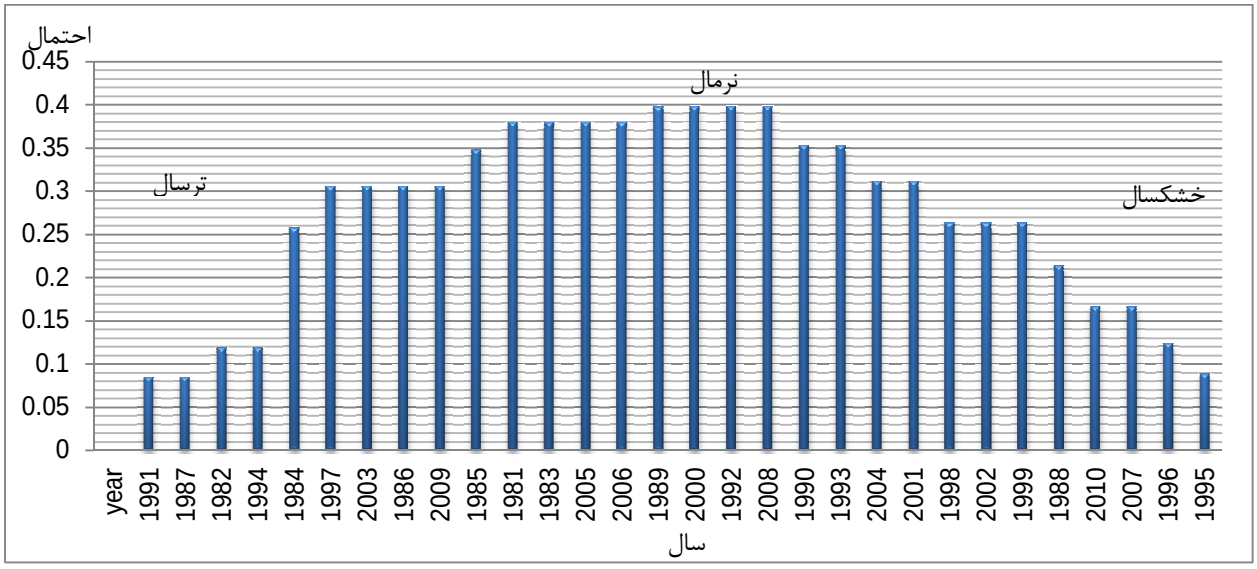
برخی دیگر از داده‌های مورد نیاز شامل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_{sat})، رطوبت حجمی اشباع (θ_{vsat})، رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی خاک (θ_{VFC})، رطوبت حجمی در نقطه‌ی پژمردگی (θ_{VPWP}) می‌باشند. این مقادیر بر حسب بافت خاک در داخل مدل تعریف شده و در مراحل محاسباتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در فایل ورودی داده‌های گیاهی، مشخصات محصول ذرت دانه‌ای به عنوان گیاه پرمصرف الگوی کشت شبکه که تعیین کننده‌ی ظرفیت نهایی کانال‌های مزرعه می‌باشد در مدل وارد شد. مقادیر پارامترهای گیاهی در مدل را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود: (1) پارامترهای ثابت که به‌صورت پیش فرض در بسیاری از گونه‌های زراعی مهم از قبیل: گندم، ذرت، پنبه و غیره وجود دارند. (2) پارامترهایی که متناسب با شرایط منطقه و نوع رقم رایج تحت کشت در آن منطقه، بایستی توسط کاربر تکمیل گردد. جدول 5 پارامترهای گیاهی ورودی در مدل را متناسب با رقم ذرت دانه‌ای رایج در منطقه، که رقم Singlecross 704 می‌باشدنشان می‌دهد.

1- Standard Precipitation Index



شکل2- شاخص خشکسالیSPI در ماه‌های فصل رشد گیاه ذرت از سال 1981 تا 2010



شکل3- تعیین سال‌های نرمال، خشکسال و ترسال برای گیاه ذرت دانه‌ای در منطقه‌ی مطالعاتی

جدول 5-پارامترهای گیاهی مربوط به مراحل فنولوژیکی ذرت دانه‌ای (چوکان، 1391)

تراکم کشت	روز پس از کشت					طول گل‌دهی	عمق ریشه
(بوته در هکتار)	سبز شدن	گل‌دهی	شروع پیری	رسیدگی	حاکثر عمق ریشه	(روز)	(متر)
64600	12	65	115	125	65	14	1/1

شوری عصاره اشباع قابل تحمل توسط گیاه (ds/m)		تنش دمایی در دوره گل دهی گیاه (درجه سانتی‌گراد)	
عدم تنش	بیش‌ترین تنش وارده	عدم تنش	بیش‌ترین تنش وارده
1	10	7	45

جهت وارد کردن شرایط اولیه‌ی شبیه‌سازی در مدل، قبل از کشت گیاه، شرایط خاک در لایه‌های مختلف آن از نظر درصد رطوبت و شوری عصاره اشباع اولیه ضروری است. مقدار شوری اولیه خاک از رابطه 7 محاسبه می‌شود. ضمن آنکه رطوبت اولیه خاک در نقطه پژمردگی هر لایه از خاک به مدل شناسانده شده است(علیزاده، 1385) :

$$Ec_e = \frac{3}{2}(Ec_{iw}) \quad (7)$$

Ec_e شوری عصاره اشباع خاک (ds/m)؛ و Ec_{iw} شوری آب آبیاری (ds/m)است. لذا مطابق جدول 3، از آنجا که متوسط شوری آب در ماه‌های فصل رشد برابر با 2 دسی زیمنس بر متر است، بنابرین شوری اولیه خاک برابر با 3 دسی زیمنس بر متر محاسبه شد.

بهینه‌سازی

بهینه‌سازی از لحاظ تعداد تابع هدف به دو بخش مسائل بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه تقسیم می‌شوند. در مسائل بهینه‌سازی تک هدفه، تنها یک تابع هدف، اما در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، بیش از یک تابع هدف موجود است که ممکن است این توابع باهم در تضاد نیز باشند. درحل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه دو رویکرد مختلف وجود دارد: (1) ترکیب و ادغام توابع هدف به یک تابع هدف با استفاده از روش‌هایی نظیر وزن‌دهی (2) بهینه‌سازی چند هدفه مبنی بر تولید یک دسته جواب بهینه که هیچ یک از جواب‌های بهینه برتری بر دیگر جواب‌ها ندارند که در اصطلاح « جبهه پرتو[1] » نامیده می‌شود. در این پژوهش جهت حل مسئله‌ی بهینه‌سازی از روش بهینه‌سازی چند هدفه کلاسیک مجموع وزن‌دار استفاده شد و وزن هریک از این توابع هدف، یکسان در نظر گرفته شد. شکل کلی تابع هدف در روش مجموع وزن‌دار مطابق رابطه 8 است.

$$\min \quad f_i(x) \qquad \forall i \in \{1,2,3,\dots m\}$$

$$\min \quad f_{ws}(x) = \sum_{1}^{m} w_i f_i(x) \quad (8)$$

که m تعداد تابع هدف؛ f_{ws} تابع هدف نهایی؛ w_i وزن تابع هدف iامکه وزن هریک از توابع هدف نشان دهنده ارزش آن تابع هدف است.

در این پژوهش، تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، متشکل از اهداف زیر می‌باشد: (1) بیشینه کردن بهره‌وری آب[2](WP) با هدف توسعه پایدار منابع آب؛ (2) بیشینه کردن عملکرد محصول (Yield) با هدف تولید؛ (3) کمینه کردن درصد آبشویی[3](LF) با هدف کنترل زهاب و مسائل زیست محیطی؛ (4) کمینه کردن شوری عصاره اشباع خاک (Ec_e) با هدف پایداری اراضی؛ و (5) کمینه کردن تعداد نوبت آبیاری (Event) با هدف بهبود مسائل بهره‌برداری و کاهش آب مصرفی. روش بهینه‌سازی در این تحقیق چندهدفه کلاسیک بوده و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی توابع هدف استفاده شد. برای هر دو نوع خاک، هدف‌های1، 2 و 5 در حل مساله بهینه‌سازی در نظر گرفته شد لیکن برای خاک سبک، هدف شماره 3 و برای خاک سنگین، هدف شماره 4 به اهداف 1، 2، 5 اضافه شد. در نتیجه تابع هدف برای دو نوع خاک استفاده شده به شرح زیر در نظر گرفته شد:

$$OF_1 = WP^{-1} + Yield^{-1} + LF + Event \quad (9)$$

$$OF_2 = WP^{-1} + Yield^{-1} + Ec_e + Event \quad (10)$$

هم‌چنین محدودیت‌های در نظر گرفته شده در حل مساله بهینه‌سازی عبارتند از:

$$Interval \le 10 \quad (11)$$

$$0 \le D_i \le (LF = 70\%) \quad (12)$$

مقادیر بهره‌وری و کسر آبشویی به شرح روابط زیر در مدل محاسبه می شوند(علیزاده، 1389):

$$WP = \frac{V_p}{V_w} \quad (13)$$

$$LF = \frac{\sum_{t=1}^{T} D_d}{\sum_{t=1}^{T} D_i} \quad (14)$$

در روابط بالا،V_p مقدار محصول تولید شده،V_wمقدار آب دریافتی از منبع آبی،LFکسر آبشویی؛ D_d عمق زهکشی شده یا نفوذعمقی (mm)؛ و D_i عمق آب آبیاری (mm) و T کل زمان فصل رشد محصول است.

متغیرهای تصمیم در این پژوهش، برنامه‌ریزی آبیاری[4] است که شامل عمق آبیاری[5] و دور آبیاری[6] می‌باشد. برنامه‌ریزی آبیاری برای دو حالت (1) عمق آبیاری ثابت- دور آبیاری ثابت و (2) عمق آبیاری متغیر- دور آبیاری متغیر مورد نظر قرار گرفت. در برنامه‌ریزی عمق - دور متغیر، با تقسیم‌بندی دوره فیزیولوژیکی گیاه به سه دوره: الف) دوره رشد رویشی شامل50 روز پس از کشت؛ ب) دوره رشد زایشی شامل14 روز قبل از گل‌دهی، دوره گل‌دهی و 14 روز پس از گل دهی؛ ج) دوره قطع آبیاری (به جهت کاهش رطوبت محصول و آمادگی برای برداشت،20 الی30 روز قبل از تاریخ برداشت عملیات آبیاری قطع می‌شود)، برنامه‌ریزی آبیاری صورت گرفت.

از آنجایی که خشکی بیش از یک هفته در دوره رشد رویشی گیاه ذرت، به اندام‌های گیاه صدمه وارد کرده و پتانسیل عملکرد دانه را کاهش می‌دهد(چوکان،1391). لذا محدودیت فاصله‌ی آبیاری در این تحقیق کم‌تر یا مساوی 10 روز در نظر گرفته شد (رابطه 11). محدودیت در عمق آبیاری بدین صورت در نظر گرفته شد که در هر مرحله، عمق آبیاری تا حدی افزایش یافته است که حداکثر،70% از مجموع کل عمق آب داده شده به زمین، در انتهای فصل رشد به نفوذ عمقی تبدیل گردد. در نتیجه در تعریف محدودیت برای عمق آبیاری، مقدار کم‌تر یا مساوی کسر آبشویی برابر با 70% در نظر گرفته شده

1- Pareto Front
2- Water Productivity
3- Leaching Fraction
4- Irrigation Scheduling
5- Irrigation Depth
6- Irrigation Frequency

است. در این پژوهش از نرم افزار (MATLAB 2014a) برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده شد. در این نرم افزار بسیاری از توابع و الگوریتم‌ها، مانند الگوریتم ژنتیک(GA) به صورت آماده موجود است. با تعریف توابع هدف در محیط برنامه‌نویسی و نوشتن دستور الگوریتم ژنتیک در صفحه‌ی دیگری از محیط برنامه‌نویسی، توابع مورد نظر فراخوانی شد و بهینه‌سازی صورت گرفت. جدول 6 مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک که در این پژوهش استفاده شده است را نشان می‌دهد.

جدول 6-مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک

تعداد جمعیت اولیه	تعداد نسل	احتمال فرزندان نخبه (%)	احتمال تزویج (%)	شرط توقف	احتمال جهش (%)
50	100	5	80	1×10^{-6}	15

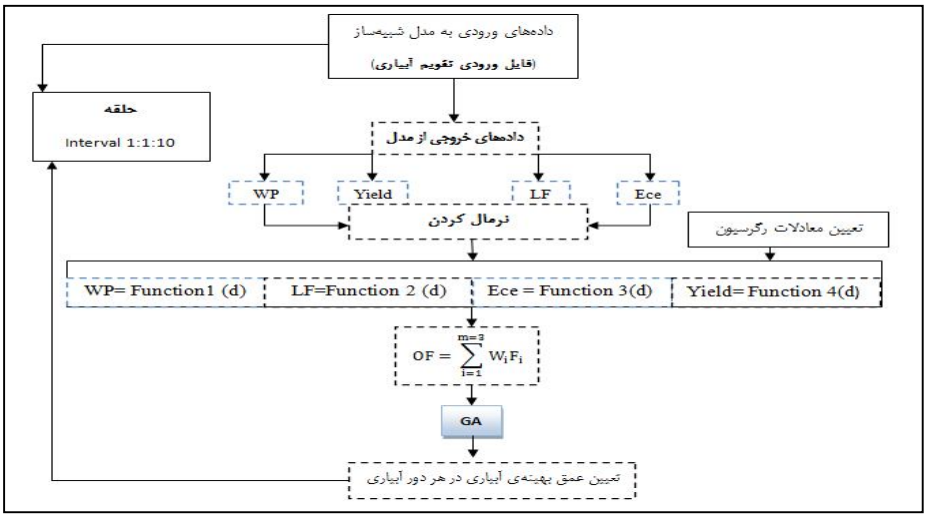
تعیین عمق بهینه آبیاری در هر دور آبیاری با استفاده از مدل تلفیقی شبیه‌ساز و بهینه‌ساز

شکل 4 مراحل تعیین عمق بهینه‌ی آبیاری را نشان می‌دهد. مطابق با فلوچارت فوق، پس از وارد نمودن داده‌های ورودی در مدل شبیه‌ساز،مقادیر مختلفی از عمق آبیاری با فاصله آبیاری ثابتبا در نظر گرفتن محدودیت عمق (تابع محدودیت) در مدل شبیه‌ساز وارد شده و با اجرای مدل، مقادیر مختلفی از بهره‌وری آب، عملکرد دانه، نسبت آبشویی و متوسط شوری عصاره اشباع پروفیل خاک، در فایل خروجی مدل ذخیره می‌شود. با تقسیم هر یک از این پارامترها بر مقدار بیشینه‌ی خود، مقادیر آن‌ها نرمال شده و سپس چهار معادله‌ی رگرسیونی برای نشان دادن رابطه بین عمق آبیاری و بهره‌وری آب، عمق آبیاری و عملکرد، عمق آبیاری و متوسط شوری عصاره اشباع خاک و عمق آبیاری و کسر آبشویی با استفاده از نتایج حاصله به دست می‌آید. در هریک از معادلات بدست آمده، عمق آبیاری متغیر مستقل و به‌ترتیب بهره‌وری آب، عملکرد، متوسط شوری عصاره‌ی اشباع و کسر آبشویی به‌عنوان متغیر وابسته یا خروجی معادله می‌باشند. مطابق با روش بهینه‌سازی چند هدفه کلاسیک مجموع وزن‌دار، سه تابع هدف عمق آبیاری- بهره‌وری آب، عمق آبیاری- عملکرد، عمق آبیاری- متوسط شوری عصاره اشباع خاک (توابع هدف مورد نظر برای خاک‌هایی با بافت سنگین) و سه تابع هدف عمق آبیاری- بهره‌وری آب، عمق آبیاری- عملکرد، عمق آبیاری- کسر آبشویی (توابع هدف مورد نظر برای خاک‌هایی با بافت سبک) با ضریب وزنی یکسان (W) به یک تابع هدف با متغیر مستقل عمق آبیاری تبدیل شده و سپس توسط الگوریتم ژنتیک، توابع مذکور بهینه شدند. خروجی بهینه‌ی ارائه شده به کاربر، همان عمق بهینه آبیاری با در نظر گرفتن توابع هدف تعیین شده می‌باشد. شایان ذکر است، عمق بهینه ارائه شده به کاربر، برای یک فاصله آبیاری مشخص می‌باشد (مثلاً یک روزه). لذا توسط این روش، مقادیر مختلف عمق آبیاری برای هریک از فواصل آبیاری متناسب با محدودیت فاصله‌ی آبیاری (یک تا ده روزه) به دست آمد. این عمل توسط ایجاد یک حلقه در مدل صورت گرفته و مقادیر عمق بهینه‌ی آبیاری برای هریک از فواصل آبیاری یک تا ده روزه تعیین شد.

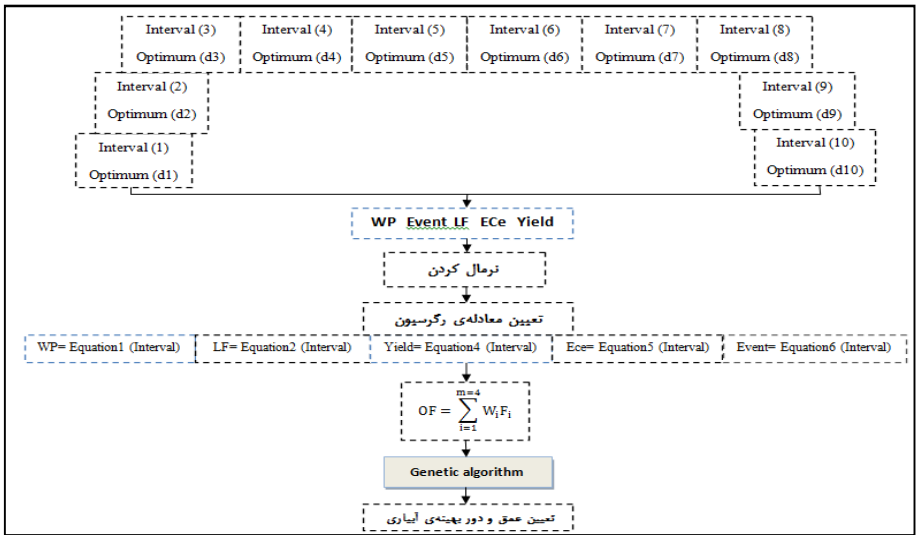
تعیین عمق و دور بهینه‌ی آبیاری (برنامه‌ریزی بهینه‌ی آبیاری)

با توجه به اینکه، محدودیت دور آبیاری در مدل بهینه‌سازی، کمتر یا مساوی 10 روز است لذا خروجی فلوچارت شکل 4، عبارتند از 10 عمق بهینه‌ی آبیاری در هریک از فواصل آبیاری یک تا 10 روز می‌باشد. در نتیجه با تعیین ده عمق بهینه آبیاری با فواصل آبیاری یک تا ده روز از مرحله‌ی قبل (با در نظر گرفتن اینکه در شکل 4 d_1 تا d_{10} مقادیر بهینه‌ی عمق آبیاری در هریک از فواصل آبیاری یک تا 10 روزه را نشان می‌دهند) مقادیر بهره‌وری آب، کسر آبشویی، متوسط شوری عصاره‌ی اشباع خاک، عملکرد و تعداد نوبت آبیاری متناظر با هریک، توسط مدل شبیه‌ساز تعیین شده و پس از نرمال کردن مقادیر آنان، این بار معادلات رگرسیونی بین فاصله‌ی آبیاری به‌عنوان متغیر مستقل و پارامترهای بهره‌وری آب، عملکرد، متوسط شوری عصاره‌ی اشباع خاک و تعداد نوبت آبیاری (توابع هدف مورد نظر برای خاک‌هایی با بافت سنگین) به‌عنوان متغیر وابسته یا خروجی معادله تشکیل می‌شوند. به عبارت دیگر چهار معادله‌ی دور آبیاری- بهره‌وری آب، دور آبیاری- عملکرد، دور آبیاری- متوسط شوری عصاره اشباع خاک، دور آبیاری- تعداد نوبت آبیاری برای خاک سنگین (خاک نوع2) استخراج می‌گردد. و در خاک نوع 1 نیز پارامترهای بهره‌وری آب، عملکرد، کسر آبشویی و تعداد نوبت آبیاری (توابع هدف مورد نظر برای خاک‌هایی با بافت سبک) به‌عنوان متغیرهای وابسته و دور آبیاری به‌عنوان متغیر مستقل بوده و متشابهاً برای این نوع خاک نیز چهار معادله‌ی دور آبیاری- بهره‌وری آب، دور آبیاری- عملکرد، دور آبیاری- کسر آبشویی و دور آبیاری- تعداد نوبت آبیاری بدست می‌آید. معادلات بدست آمده توسط روش بهینه‌سازی چند هدفه کلاسیک مجموع وزن‌دار به یک تابع هدف تبدیل شده و توسط الگوریتم ژنتیک تابع نهایی بهینه می‌گردد. جواب بهینه همان متغیر مستقل بهینه یا فاصله‌ی آبیاری است. لذا با تعیین عمق بهینه آبیاری مطابق فلوچارت شکل 4 و فاصله بهینه آبیاری در این مرحله (شکل 5)، برنامه‌ی بهینه آبیاری شامل عمق و دور بهینه آبیاری تعیین می‌گردد. شایان گفتن است، مقادیر تعیین شده شامل برنامه‌ریزی آبیاری عمق ثابت- دور آبیاری ثابت می‌باشد. لذا جهت تعیین برنامه‌ی بهینه آبیاری عمق متغیر-دور آبیاری متغیر، با توجه به تقسیم مراحل رشد فیزیولوژی گیاه ذرت به سه مرحله‌ی رشد رویشی، رشد زایشی، و

مرحله‌ی قطع آبیاری، مقادیر بهینه عمق آبیاری و فواصل آبیاری متناظر با هریک، به صورت تصادفی در مراحل رشد رویشی و رشد زایشی امتحان شده و در نهایت ترکیبی ازعمق و دور آبیاری که بهینه‌ترین مقدار را برای هریک از توابع هدف داشته باشد تعیین شد.



شکل4- فلوچارت تعیین عمق بهینه آبیاری در هر دور آبیاری



شکل5- فلوچارت تعیین دور بهینه آبیاری و برنامه‌ریزی بهینه

نتایج و بحث

نتایج حاصل از مطالعات صورت گرفته توسط شرکت مشاور در برنامه‌ریزی بهینه آبیاری

در فرآیند طراحی شبکه و در مرحلهبرنامه‌ریزی آبیاری، مهندس مشاور طراح با استفاده از مدلCROPWATو کاربرد برنامه‌ریزی خطی، برای تمامی گیاهان الگوی کشت، عمق آبیاری 100 میلی‌متر با دور آبیاری مضربی از شش روز را به عنوان برنامه‌ریزی بهینه ارائه نموده است. به عبارت دیگر طراح یک نوع برنامه‌ریزی آبیاری برای کلیه گیاهان الگوی کشت برای تمام خاک‌هایی با بافت و نوع متفاوت در نظر گرفته است. هم چنین به دلیل اینکه بافت اکثر اراضی تحت پوشش شبکه سنگین می‌باشد لذا درصد آبشویی به مقدار حداقل30 % برای کلیه خاک‌ها به منظور جلوگیری از شوری اراضی در نظر گرفته شده است.

در جدول 7 تحلیل برنامه‌ریزی بهینه آبیاری که توسط شرکت مشاور پیشنهاد شده است به تفکیک برای خاک‌های نوع 1 و نوع 2 نشان داده شده است. با استخراج نتایج حاصل از این برنامه‌ریزی آبیاری پیشنهاد شده توسط مدل شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که

مقادیر کسر آبشویی در این دو نوع از خاک، به‌خصوص در خاک نوع (1) که شامل خاکی با بافت سبک‌تر می‌گردد به مراتب زیاد است. همین عامل، موجب کاهش بهره‌وری آب و افزایش شدید مصرف آب شده است. لذا در نظر گرفتن حداقل30% کسر آبشویی برای سنگین‌ترین نوع خاک از کل اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری، موجب افزایش شدید هدر رفت آب در خاک‌هایی با بافت سبک‌تر همچون خاک نوع 1 و خاک نوع 2 می‌گردد.

جدول 7-تحلیل برنامه‌ریزی ارائه شده توسط شرکت مشاور به تفکیک خاک‌های نوع 1 و 2

نوع خاک	تعداد نوبت آبیاری	مصرف آب ($\frac{m^3}{ha}$)	بهره وری آب ($\frac{kg}{m^3}$)	عملکرد محصول ($\frac{ton}{ha}$)	کسر آبشویی	متوسط شوری عصاره اشباع خاک (ds/m)	
						در ابتدای فصل رشد	در انتهای فصل رشد
1	15	15000	0/52	7/9	0/53	3	2
2	15	15000	0/49	7/3	0/46	3	3/6

نتایج برنامه‌ریزی بهینه آبیاری در خاک نوع 1

در جدول 8نتایج حاصل از بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری ارائه شده است. مقادیر بهینه عمق و فاصله بهینه آبیاری در عمق و فاصلهثابت،به‌ترتیب 63 میلی‌متر و 9 روزبودهومقادیربهره‌وری آب، کسرآبشویی، عملکرد محصول و تعداد نوبت آبیاری به ترتیب 1/01 کیلوگرم دانه در متر مکعب آب، 20 %، 7/7 تن در هکتار و 12 می‌باشند.

جدول 8- نتایج برنامه‌ریزی بهینه آبیاری برای خاک نوع 1 (عمق آبیاری ثابت- دور آبیاری ثابت)

فاصله آبیاری (روز)	عمق آبیاری (mm)	بهره‌وری آب ($\frac{kg}{m^3}$)	کسر آبشویی	مصرف آب ($\frac{m^3}{ha}$)	عملکرد ($\frac{Ton}{ha}$)	متوسط شوری عصاره اشباع خاک (Ec_e)	تعداد نوبت آبیاری
9	63	1/01	0/2	7560	7/7	2/54	12

تابع هدف در نظر گرفته شده در بهینه‌سازی:

مقادیر بهینه‌ی متغیرهای تصمیم آن شامل عمق و دور آبیاری برای دو تابع هدف شامل تابع چهار هدفه‌ی بهره‌وری آب، عملکرد، کسر آبشویی و تعداد نوبت آبیاری و تابع تک هدفه‌ی بهره‌وری آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که مقادیر بهینه‌ی متغیرهای تصمیم بررسی شده برای این دو تابع هدف، یکسان می‌باشد. لذا در خاک‌هایی با بافت سبک مانند خاک نوع 1، برنامه‌ای که بتواند برای متغیرهای تصمیم (عمق و دور آبیاری)، بیش‌ترین بهره‌وری آب را ایجاد کند، مشابه حالتی است که تک تک اهداف تابع مذکور بهینه شده باشند.

مقایسه نتایج حاصل از برنامه بهینه پیشنهاد شده (جدول 8) با برنامه ارائه شده توسط شرکت مشاور (جدول 7) نشان دهنده افزایش حدود 94% در مقدار بهره‌وری آب، کاهش 62% در کسر آبشویی و کاهش سه نوبت آبیاری، کاهش حدوداً 50 % در مصرف آب بوده است. این در حالی است که در صورت کاربرد برنامه‌ریزی پیشنهادی، عملکرد محصول حدود 0/2 تن در هکتار کاهش خواهد یافت.

در جدول 9 نتایج برنامه‌ریزی بهینه آبیاری برای خاک نوع 1 برای حالت عمق و دور متغیر ارائه شده است.

جدول 9- نتایج برنامه‌ریزی بهینه آبیاری خاک نوع 1 (عمق آبیاری متغیر- دور آبیاری متغیر)

فاصله آبیاری (روز)		عمق آبیاری (mm)		بهره وری آب $\frac{kg}{m^3}$	عملکرد (دانه) ($\frac{ton}{ha}$)	مصرف آب (m^3/ha)	کسر آبشویی	تعداد نوبت آبیاری
دوران رشد رویشی	دوران رشد زایشی	دوران رشد رویشی	دوران رشد زایشی					
8	9	61/1	63	1/1	8/17	7446	0/18	12

تابع هدف در نظر گرفته شده: $OF_1 = WP^{-1} + Yield^{-1} + LF + Event$

مطابق با جدول9 با تقسیم دوره رشد گیاه ذرت به سه دوره رشد رویشی، رشد زایشی یا گل‌دهی و قطع آبیاری در دوره رشد رویشی، عمق بهینه‌ی 61/1 میلی‌متر با فاصله‌ی آبیاری 8 روز و در دوره رشد زایشی گیاه، عمق بهینه‌ی آبیاری 63 میلی‌متر با فاصله‌ی آبیاری 9 روز بدست آمده است. برنامه‌ریزی اول در50 روز اول دوره رشد گیاه و برنامه‌ریزی دوم در50 روز دوم دوره رشد گیاه ذرت اعمال گردید. در این برنامه، شاخص‌های بهره‌وری آب، عملکرد و کسر آبشویی در مقایسه با نتایج حاصل از برنامه‌ریزی آبیاری عمق ثابت- دور ثابت، بهبود یافته به طوری که عملکرد محصول (دانه)، 15 درصد، بهره‌وری آب 9 درصدو کسر آبشویی 10 درصد در مقایسه با برنامه‌ریزی عمق و دور ثابت تغییر نموده است.

نتایج برنامه‌ریزی بهینه آبیاری در خاک نوع 2

در جدول10 برنامه‌ریزی بهینه آبیاری در خاک نوع 2 با عمق آبیاری ثابت - دور آبیاری ثابت نشان داده شده است. تابع هدف در نظر گرفته شده برای خاک نوع 2 تابع چهار هدفه بهره‌وری آب، عملکرد محصول، متوسط شوری عصاره اشباع خاک و تعداد نوبت آبیاری است و نتایج نشان دهنده، عمق بهینه آبیاری 69/8 میلی‌متر و فاصله آبیاری 8 روز می‌باشد. مطابق با اهداف مدنظر در این تابع چهار هدفه، در کنار بیشینه کردن شاخص‌های مهمی همچون بهره‌وری آب، کمینه کردن متوسط شوری عصاره اشباع خاک به‌جهت حفظ پایداری اراضی به‌چشم می‌خورد. در این تابع هدف با افزایش عمق و کاهش فاصله‌ی آبیاری، مقدار مصرف آب در واحد هکتار بیش‌تر شده است. لذا کمینه کردن متوسط شوری عصاره اشباع خاک، به‌منظور پایداری اراضی درکنار بهینه کردن دیگر شاخص‌ها همچون بهره‌وری آب، عملکرد و تعداد نوبت آبیاری در خاک‌های با بافت سنگین‌تر پیشنهاد می‌گردد. مقادیر بهره‌وری آب، عملکرد، متوسط شوری عصاره اشباع خاک و تعداد نوبت آبیاری متاثر از این برنامه‌ی بهینه به‌ترتیب برابر با 0/8 کیلوگرم دانه به ازای یک مترمکعب مصرف آب، 7/84 تن محصول در هر هکتار، 3/87 دسی زیمنس بر متر و 14 نوبت آبیاری است.

جدول10- نتایج برنامه‌ریزی بهینه آبیاری خاک نوع 2 (عمق آبیاری ثابت- دور آبیاری ثابت)

فاصله آبیاری (روز)	عمق آبیاری (mm)	بهره‌وری آب $(\frac{kg}{m^3})$	عملکرد $(\frac{ton}{ha})$	مصرف آب $(\frac{m^3}{ha})$	متوسط شوری خاک (Ec_e)	تعداد نوبت آبیاری	کسر آبشویی
8	69/8	0/8	7/8	9772	3/8	14	0/22
تابع هدف در نظر گرفته شده در این بهینه‌سازی:							

مقایسه‌ی نتایج حاصل از این برنامه‌ریزی با برنامه‌ی پیشنهاد شده توسط شرکت مشاور، نشان‌دهنده افزایش 63 درصد در بهره‌وری آب، کاهش 35 درصد در مصرف آب، کاهش 52 درصد در کسر آبشویی و رشد ناچیز 7 درصدی در عملکرد محصول و کاهش یک نوبت آبیاری می‌باشد. نکته جالب توجه‌ی دیگر این است که، در برنامه‌ی پیشنهادی توسط مشاور، با وجود 2/22 برابر شدن در مقدار کسر آبشویی خاک نوع 2 در مقایسه با برنامه‌ی بهینه‌ی پیشنهاد شده در این پژوهش، متوسط شوری این نوع از خاک در انتهای فصل رشد، با کاهش بسیار ناچیزی همراه بوده است. به‌طوری که متوسط شوری عصاره اشباع خاک در برنامه‌ی پیشنهادی، در انتهای فصل رشد برابر با 3/62 دسی‌زیمنس بر متر با نسبت آبشویی 0/46 و در برنامه‌ی بهینه‌ی ارائه شده در این پژوهش با کسر آبشویی 0/22، متوسط شوری عصاره اشباع در انتهای فصل رشد برابر با 3/87 دسی‌زیمنس بر متر است. این نشان می‌دهد که مصرف زیاد آب در برنامه موجود (مصرف 15000 مترمکعب در هکتار) به‌منظور کاهش شوری، تأثیر به‌سزایی نداشته است. لذا برنامه پیشنهادی توسط مشاور، سبب کاهش شدید بهره‌وری آب و افزایش زهاب ناشی از نفوذ عمقی آن در خاک نوع 2 می‌گردد.

مقادیر بهینه عمق و فاصله آبیاری در برنامه‌ریزی عمق متغیر- دور متغیر، در جدول 11 ارائه شده است.

جدول 11- نتایج برنامه‌ریزی بهینه آبیاری خاک نوع 2 (عمق آبیاری متغیر- دور آبیاری متغیر)

فاصله آبیاری (روز)		عمق آبیاری (mm)		بهره وری آب $\frac{kg}{m^3}$	عملکرد $(\frac{ton}{ha})$ (دانه)	مصرف آب (m^3/ha)	متوسط شوری عصاره اشباع (ds/m)	کسر آبشویی	تعداد نوبت آبیاری
دوران رشد رویشی	دوران رشد زایشی	دوران رشد رویشی	دوران رشد زایشی						
7	8	68/6	69/8	0/83	8/13	9688	3/99	0/21	14
تابع هدف در نظر گرفته شده: $OF_2 = WP^{-1} + Yield^{-1} + Ece + Event$									

مقادیر عمق و فاصله بهینه‌ی آبیاری در دوران رشد رویشی68/6 میلی‌متر و 7 روز و در دوران زایشی 69/8 میلی‌متر و 8 روز می‌باشند. نتایج حاصل از این برنامه‌ریزی آبیاری در بهره‌وری آب، عملکرد، متوسط شوری عصاره اشباع و تعداد نوبت آبیاری به‌ترتیب، 0/83 کیلوگرم به ازای مصرف یک مترمکعب آب، 8/13 تن در هکتار، 3/99 دسی‌زیمنس بر متر و تعداد 14 نوبت آبیاری است. مقایسه نتایج حاصل از برنامه‌ی بهینه‌ی عمق متغیر- دور متغیر در خاک نوع 2 با نتایج برنامه‌ی پیشنهاد شده توسط شرکت مشاور، رشد 70 درصدی دربهره‌وری آب، افزایش 11 درصد در عملکرد محصول، کاهش یک نوبت آبیاری و کاهش 35 درصد در مقدار مصرف آب است. از طرفی، کاهش 54 درصد در مقدار کسر آبشویی نسبت به برنامه‌ی پیشنهاد شده توسط شرکت مشاور، تنها 0/37 دسی‌زیمنس بر متر بر مقدار متوسط شوری عصاره‌ی اشباع افزوده شده است. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که شاخص‌های مذکور در برنامه‌ی ارائه شده نسبت به برنامه‌ی پیشنهادی توسط شرکت مشاور افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت واحدهای زراعی و برنامه‌ریزی آبیاری در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، امکان بهبود شاخص‌های مهمی همچون: بهره‌وری آب، عملکرد محصول، کسر آبشویی (با هدف کنترل زهاب در خاک‌های سبک)، تعدیل شوری در خاک‌های نوع سنگین و کاهش تعداد نوبت آبیاری (به منظور بهبود مسائل بهره‌برداری و افزایش انعطاف‌پذیری برای بهره‌بردارن)با به‌کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی بیلان آب و خاک و استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی وجود دارد. به‌طوری که نتایج حاصل از بهینه‌سازی صورت گرفته در این پژوهش با نتایج پیشنهادی شرکت مشاور، نشان‌دهنده کاهش قابل توجه مصرف آب و بهبود هریک از شاخص‌های ذکر شده می‌باشد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت‌های دانشگاه تهران و شرکت مهندسین مشاور آب خاک تهران در انجام و پیشبرد این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

آقاجانی،م.، نوابیان،م.، وظیفه دوست،م و رضایی،م. 1392. مقایسه‌ی مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌یابی بهره‌وری آب با دور تناوب ثابت و متغیر آبیاری برنج رقم هاشمی در رشت. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. 27. 4: 635-623.

اکبری،م.، دهقانی سانیچ،ح و میرلطیفی،م. 1387. تأثیر اصلاح تقویم آبیاری در بهره‌وری آب کشاورزی. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب در ایران. دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.

چوکان،ر. 1391. ذرت و ویژگی‌های آن. انتشارات سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. 427 صفحه.

دهقان،ه.، علیزاده،او حقایقی مقدم،س.ا. 1389. تخمین اجزای بیلان آب در مقیاس مزرعه با استفاده از مدل شبیه‌سازیSWAP. نشریه آب و خاک دانشگاه فردوسی مشهد.24. 6: 1275-1265.

شکوهی،ع. 1391. مقایسه شاخص‌های RDI و SPIبرای تحلیل خشکسالی در مقیاس ایستگاهی با تکیه بر خشکسالی کشاورزی (مطالعه موردی: قزوین و تاکستان). فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. 3. 9: 122-111.

علیزاده،ا. 1389. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). 610 صفحه.

علیزاده،ا. 1385. طراحی سیستم‌های آبیاری سطحی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). 450 صفحه.

محمدی،س.، میرطیفی،س.م و اکبری،م. 1393. برنامه‌ریزی آبیاری نیشکر با استفاده از تلفیق داده‌های سنجش از دور و SWAP در کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان خوستان. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. 28. 1: 50-39.

مهندسین مشاور آب خاک تهران. 1380. گزارشات جلد یازدهم و چهاردم پروژه شبکه آبیاری و زهکشی اراضی حاشیه طرح شهید چمران.

Debaeke,P. Aboudrare,A. 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments. European Journal of Agronomy. 21: 433-446.

Doorenbos,J and Kassam,A.H. 1979.

Yield response to water. FAO irrigation and drainage paper no. 33. FAO, Rome, Italy.

Garcia-Vila,M., Fereres,E., Mateos,L., Orgaz,F and Steduto,P. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. Agronomy Journal. 101.3: 477-487.

Ghahraman,B and Sepaskhah,A.R. 2002. Optimal allocation of water from single purpose reservoir to an irrigation project with pre-determined multiple cropping patterns .Irrigtion. Science. 127-137.

Hanks,R.J. 1983. Yield and water-use relationships. 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 principles. Agronomy Journal. 101:426-437.

Tanner,C.B and Sinclair,T.R. 1983. Efficient water use in crop production: Research or re-search? In: Taylor,H.M., Jordan,W.A., Sinclair,T.R. (Eds.), Limitations to efficient water use in crop production. American Society of Agronomy, Madison.

Vazifedoust,M., Van Dam,J.C., Feddes,R.A and Feizi,M. 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. Agricultural Water Management. 95.2:89-102.

Vedula,S and Mujumdar,P.P. 1992. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops. Water Resources Research, 28.1: 1-9.

393-411.

Hsiao,T.C., Heng,L.K., Steduto,P., Rojas-Lara,B., Raes,D and Fereres,E. 2009. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water III.Parameterization and testing for maize.Agronomy Journal. 101: 448-459.

Li,J., Inanaga,S., Li, Z and Eneji,A.E. 2005. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the north china plain. Agricultural Water Management. 76.1: 8-23.

Qureshi,S.A., Madramootoo,C.A and Dodds,G.T. 2001. Evaluation of irrigation schemes for sugarcane in Sindeh, Pakistan, using SWAP93. Agricultural Water Management.54: 37-48.

Raes,D., Steduto,P., Hsiao,T.C and Fereres,E. 2009. AquaCrop- the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agronomy Journal. 101:438-447.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 10, Jul.-Agu. 2016, p. 339-351

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره 3، جلد 10، مرداد - شهریور 1395، ص. 351-339

Optimizationof Irrigation Schedulingin Farm's Units atShaidChamran Irrigation and Drainage Network

A. Najafi[1], E.Amiri Tokaldany[2*], H. Ebrahimian[3], H. Mirabolghasemi[4]
Recived: May.25, 2016 Accepted: Aug.31, 2016

Abstract

The biggest consumer of water in the world is agricultural sector. So, optimization of agricultural water usage is considered of a great importance. In this research, optimization of irrigation scheduling in ShahidChamran irrigation and drainage network has been investigated at the scale of farm channels using a combined model including AquaCrop simulation model, a multi-objective classic optimization algorithm (weighted sum), and genetic algorithm. Two types of irrigation scheduling methods of constant depth-interval and variable depth- interval proportionate with soil type in maize farm units (cropping pattern plant with high demand) were proposed. Objective functions were developed to optimize soil type 1 (coarse-textured) water productivity, leaching fraction, yield and the number of irrigation events while for soil type 2 (fine-textured) the objective functions were water productivity, soil saturated extract salinity, crop yield and the number of irrigation events. Each objective function component contains concepts of water resources sustainable development, control on drainage volume and environment, lands stability and utilization issues. For soil type 1, optimization results showed a reduction about 50% in water consumption, an increase up to 94 % in water productivity, a reduction of 62% in leaching fraction, three times reduction in irrigation events in constant depth-interval schedule. The results also showed a reduction of 50% in water consumption, 111% increase in water quantities efficiency, a reduction of 66% in leaching fraction, and three times reduction in irrigation events in variable depth-interval method in soil type 1. Furthermore, the results for soil type 2, were a reduction of 35% in water consumption, an increase of 63% in water productivity, 52% reduction in leaching fraction, reducing an irrigation event in constant depth-interval schedule. For variable depth-interval method, the results indicate a reduction of 35% in water concumption, an increase of 70% of water usage efficiency, 11% increase in crop yield and a reduction of an irrigation event, compared with the proposed irrigation scheduling.

Keywords: Irrigation schedule, Multi objective optimization, AquaCrop model, Objective function, Maize

1- M.Sc of water structures Engineering, Graduated from University of Tehran and Board Member of Arian-Khooshe-Pars Co, Iran
2- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Iran
3- Assistant Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Iran
4- Head of Department of Irrigation and Drainage, Tehran AB-KHAK Consulting Engineers Co, Iran
(*-Corresponding Author: Email: Amiri@ut.ac.ir)