مدلسازی منطقهای عملکرد گندم با استفاده از مدل اگروهیدرولوژیکی- توزیعی SWAP (مطالعه موردی: شبکه آبیاری و زهکشی درودزن)

الناز نوروزی*[1]، حسین بابازاده[1]، مجید وظیفه دوست[2] و فریدون کاوه[1]

چکیده

بسیاری از تصمیمگیریها و سیاستگذاریها در مدیریت آب آبیاری در مقیاس مکانی بزرگ تر از مزرعه صورت میگیرد. در این تحقیق مدل توزیعی SWAP برای شبیهسازی عملکرد گندم در اراضی شبکه آبیاری و زهکشی درودزن در سه سال مرطوب، نرمال و خشک مورد ارزیابی قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه به ۸۶ واحد شبیهسازی تفکیک گردید و عملکرد محصول در هر یک از واحدهای مکانی، توسط مدل توزیعی SWAP برآورد شد. برای منطقهای نمودن مدل SWAP و برقراری ارتباط بین این مدل و دادههای ورودی در هر واحد شبیه‌سازی، از برنامه MATLAB استفاده شد. شاخصهای آماری ضریب همبستگی و حداکثر خطا به ترتیب در حدود ۸۸ درصد و ۰/۹۴ تن در هکتار محاسبه گردید . میانگین مربعات خطا کمتر از انحراف معیار دادهها بوده و کارایی مدلسازی در حد مطلوبی ارزیابی شد. در این تحقیق میزان عملکرد در دوره شبیهسازی بیش از مقادیر اندازهگیری شده برآورد گردید. هم‌چنین در مزارع واقع در انتهای شبکه به دلیل کمبود آب و شوری خاک، خطای عملکرد شبیهسازی شده بیش از سایر واحدهای مکانی بـود. در مجموع ارزیابی نتایج مدلسازی حاکی از آن است که تطابق خوبی بین مقادیر عملکرد شبیهسازی شده با عملکرد اندازهگیری شده‌در شبکه آبیاری درودزن وجود دارد، بنابراین می‌توان از مدل توزیعیSWAP با دقت مناسبی برای شبیهسازی و پیشبینی عملکرد محصول و مدیریت آب آبیاری در شبکه استفاده نمود.

واژههای کلیدی: گندم، عملکرد محصول، شبیهسازی، مدل توزیعیSWAP.

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۱٤ تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۲٦

۱- به ترتیب دانشجوی دکتری، استادیار و دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار گروه آبیاری دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان

* نویسنده مسئول: **elnaz.norouzi.a@gmail.com**

مقدمه

رشد روز افزون جمعیت، بالا رفتن استانداردهای زندگی و نیاز فزاینده به مواد غذایی، استفاده منطقی و پایدار از منابع آب و خاک را برای تولید محصولات کشاورزی ضروری ساخته است. با توجه به شرایط خشکی کشور و توزیع نامناسب بارندگی، آب محدود قابل دسترس باید به صورت بهینه مصرف گردد. هدف از مدیریت بهینه آبیاری دستیابی به محصول حداکثر به ازای حداقل مقدار آب مصرفی و در عین حال حفظ پایدار محیط زیست، کنترل شوری و جلوگیری از هدر رفت آب میباشد (Bessembinder *et al.*, 2005). گزینههای مدیریتی که به وسیله مطالعات صحرایی بررسی میشوند، به دلیل زمانبر بودن و نبود منابع مالی و انسانی کافی محدود می‌گردند و به طور معمول اثرات بلندمدت مدیریتهای مختلف آبیاری بر عملکرد محصول و شوری خاک را در نظر نمیگیرند. از مدلهای شبیهسازی میتوان به عنوان طرح توسعه یافتهای از آزمایشهای میدانی برای مقابله با این محدودیتها استفاده نمود (Bastiaanssen *et al.*, 2007; Van Dam *et al.*, 2008). دقت نتایج حاصل از مدلهای شبیهسازی به دقت دادههای مورد نیاز بستگی دارد و در صورت دسترسی به این دادهها، میتوانند بدون محدودیتهای مکانی و زمانی موجود در تحقیقات میدانی و صرف هزینه کمتر، برای ارزیابی مدیریتهای مختلف آبیاری به کار گرفته شوند.

در چند دهه گذشته مدلهای اگروهیدرولوژیکی متعددی از جمله مدل SWAP به منظور شبیهسازی رشد گیاه و حرکت آب و نمک در خاک تدوین شده است. مدل SWAP در مناطق مختلف جهان از جمله ایران مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج مطلوبی در مقایسه با اندازهگیریهای صحرایی داشته است. وظیفه‌دوست (2007) Vazifedoust، از مدل SWAP برای شبیه‌سازی اجزای بیلان آب و عملکرد محصولات عمده منطقه برخوار اصفهان استفاده نمود. نتایج به دست آمده نشان داد که شبیهسازی عملکرد تولید محصول به پارامترهای شاخص سطح برگ ویژه، راندمان مصرف نور و سرعت بیشینه جذب دی اکسیدکربن به طور نسبی حساس است و مدل با دقت قابل ملاحظهای میتواند برای پیشبینی عملکرد محصول به کار رود. سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2006)، با استفاده از داده‌های میدانی و تصاویر ماهوارهای، مدل توزیعی SWAP را برای منطقه Sirsa کشور هند اجرا نمودند که عملکرد محصول بدست آمده از مدل SWAP در شرایط محدودیت آب و نمک، همبستگی بسیار خوبی با عملکرد به دست آمده از داده های سنجش از دور و دادههای میدانی نشان داد. ارزیابی شبیهسازی عملکرد ارقام گندم و انتقال آب و نمک در پروفیل خاک توسط مدل SWAP در استان خراسان جنوبی نشان داد که دادههای خروجی مدل به پارامتر ورودی عمق آب آبیاری حساسیت بالایی داشته و مدل، عملکرد محصول را با دقت خوبی برآورد مینماید. (Shahidi, 2008). امیری و همکاران (Amiri *et al.*, 2009) مدلها ی گیاهی ORYZA، SWAP و WOFOST را در مدیریتهای آبیاری مختلف ارزیابی نمودند. در بررسی مقدار عملکرد نهایی با این سه مدل، مدل ORYZA2000 نسبت به دو مدل دیگر دقت بیشتری نشان داد. نوری و همکاران (Noory *et al.*, 2011)، به ارزیابی مدل SWAP در شبیهسازی عملکرد گندم و ذرت علوفهای، در دو واحد زراعی واقع در شبکه آبیاری و زهکشی وشمگیر پرداختند. در این تحقیق تطابق خوبی بین مقادیر برآورد شده توسط مدل و مقادیر اندازهگیری شده به دست آمد و نتایج نشان داد که لحاظ نمودن شرایط مرزی پایین در مدل، در برآورد مناسب مقادیر رطوبت و شوری خاک بسیار مؤثر می‌باشد.

تحقیقات انجام شده بطور عمده در مقیاس مزرعه است، این درحالی است که بسیاری از تصمیمگیریها و سیاست‌گذاریها در مدیریت آب آبیاری در مقیاس منطقهای صورت میگیرد. در این پژوهش با استفاده از مدل اگروهیدرولوژیکی- توزیعی SWAP[1] و لایههای اطلاعاتی در سیستم اطلاعات جغرافیایی، میزان عملکرد تولید در شرایط واقعی و در مقیاس منطقهای در شبکه آبیاری و زهکشی درودزن، واقع در استان فارس، در سالهای زراعی ۱۳۸۸-۱۳۸۵، شبیهسازی شد. با توجه به اینکه عملکرد گیاه، شاخص نهایی ارزیابی مدیریت منابع آب است (Molden and Sakthivadivel, 1999)، این تحقیق میتواند امکان ارزیابی مدیریتهای مختلف آبیاری در سالهای خشک، نرمال و مرطوب و انتخاب بهترین گزینه را فراهم نموده و راه‌کارهایی برای افزایش کارایی مصرف آب در شرایط محدودیت منابع آب در شبکه ارایه دهد و در زمینه برنامهریزی

[1] Distributed SWAP

و مدیریت آب و زهآب کشاورزی در شبکههای آبیاری و زهکشی راهبردهایی را به همراه داشته باشد.

مواد و روشها

منطقه مورد مطالعه

شبکه آبیاری و زهکشی درودزن در ۵۰ کیلومتری شمال‌غربی شهرستان شیراز و در قسمت شمالی دشت رودخانه کر و غرب شهرستان مرودشت واقع شده است. این دشت با شیب ملایم شمال‌غربی- جنوب‌شرقی، بین سد درودزن تا جاده اصلی شیراز- مرودشت امتداد یافته و رودخانه کر تقریباً از مرکز آن عبور می‌نماید. شبکه آبیاری و زهکشی درودزن، در قالب ٦ ناحیه عمرانی تقسیم‌بندی شده است . شکل ۱ موقعیت شبکه درودزن و نواحی عمرانی آن را نشان میدهد. با گذشت بیش از ۳۰ سال از آغاز بهره‌برداری از این شبکه، بروز کاستی‌ها و مشکلات بهره‌برداری و نگهداری نظیر کاهش حجم ذخیره سد به واسطه خشکسالی‌های اخیر، شدت زیاد تبخیر در منطقه، وجود معضل کمبود آب در تقابل با مشکلات ساختار فیزیکی و استهلاک شبکه، کاهش میانگین سطح قطعات وافزایش تعداد بهره‌برداران، تغییر در الگوی کشت، هم چنین مشکلات مدیریت بهره‌برداری و فقدان برنامه‌ریزی منابع آب منسجم در دیدگاه کلان، موجب گردیده که به رغم سرمایه - گذاری‌های انجام شده، عملکرد مطلوبی از شبکه حاصل نگردد (Mahab Ghodss, 2011). دلایل مذکور لزوم برآورد عملکرد محصولات را برای بهبود و ارتقاء مدیریت بهره‌برداری به عنوان نیاز اصلی شبکه مطرح نموده و انجام مطالعات پایش و ارزیابی عملکرد شبکه آبیاری و زهکشی درودزن در جهت توسعه روشهای نوین مدیریتی و تحقق بهره‌برداری بهینه و برنامه‌ریزی توزیع مناسب آب با نگاه جامع به مسایل و مدیریت یکپارچه آب و خاک را نمایان میسازد.

مدل اگروهیدرولوژیکی SWAP

SWAP مدل اگروهیدرولوژیکی جامعی برای شبیهسازی جریان آب و انتقال املاح و حرارت در خاک، تبخیر از خاک و تعرق گیاه، مدیریت آبیاری و رشد و عملکرد محصول می‌باشد (Van Dam *et al.*, 2008). این مدل جریان عمودی حرکت آب و نمک در خاک را به همراه رشد گیاه شبیه‌سازی می‌کند. در مدل SWAP، حرکت ناپایدار و غیر یکنواخت آب در خاک بر اساس رابطه ریچاردز که مؤلفه جذب آب توسط ریشه گیاه را نیز در نظر می‌گیرد، محاسبه می‌شود. با استفاده از این رابطه، مقدار محصول تحت تنشهای آبی و شوری برآورد میگردد:

$$C_w(h)\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[k(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)\right]-S(z) \qquad (۱)$$

در معادله فوق C_w ظرفیت آب خاک، h مکش خاک، z و t مکان (عمق) و زمان ، θ رطوبت خاک، K ضریب هدایت هیدرولیکی خاک و S جذب آب توسط گیاه میباشد. در مدل شبیه‌سازی، حل عددی رابطه فوق بر اساس شرایط اولیه رطوبتی خاک، شرایط مرزی سطح خاک، شرایط مرزی پایین و روابط حاکم بین پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل رطوبت، مکش و هدایت هیدرولیکی انجام می‌شود. شرایط مرزی سطح خاک در مدل شامل مؤلفه‌های تبخیر و تعرق مرجع ، آبیاری و بارندگی است. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه و بر اساس روش استاندارد فائو پنمن مانتیث محاسبه می‌شود. هم چنین مدل به طور مستقیم قابلیت پذیرش مقادیر تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده را دارد. در مدل گزینههای مختلفی برای در نظر گرفتن شرایط مرزی پایین وجود دارد که مهم ترین آن ها عمق سطح ایستابی، زهکشی آزاد، جریان عمودی صفر و رابطه جریان عمودی و سطح ایستابی است. شبیه‌سازی رشد گیاه و محاسبه عملکرد تولید محصول در این مدل، بر اساس مدول رشد گیاه تفصیلی[1] انجام می‌شود. این مدل بر اساس مدل WOFOST[2] بوده و فرآیند فتوسنتز و توسعه گیاه را شبیه‌سازی می‌کند و اثرات تنش خشکی و شوری را توسط توابع پیشنهادی فدس و همکاران (Feddes *et al.*, 1978) و ماس و هافمن (Maasb and Hoffman, 1977) در توسعه گیاه لحاظ می‌کند. تشریح کامل اجزای مدل SWAP در راهنمای مدل ارایه شده است (Kroes and Van Dam, 2008).

دادههای ورودی مدل توزیعی SWAP

دادههای مورد نیاز مدل شامل دادههای هواشناسی، نقشه طبقهبندی پوشش گیاهی، پارامترهای گیاهی، پارامترهای هیدرولیکی خاک و اطلاعات آبیاری است. این اطلاعات از

[1] Detailed module
[2] World Food Studies

سازمان هواشناسی و شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس (Mahab Ghodss, 2011) تهیه گردید. مدل SWAP قادر به برآورد مؤلفههای اگروهیدرولوژیکی مختلف در یک واحد شبیهسازی همگن از نظر مؤلفههای شرایط مرزی بالا و شرایط مرزی پایین به همراه نوع خاک است. بر این اساس اراضی تحت پوشش یک آبگیر یا کانال درجه ۳ (واحد مزرعه) در شبکه درودزن، در محیط GIS مشخص شده و شبکه به ۸۸ واحد شبیهسازی همگن تفکیک گردید. لازم به ذکر است واحدهای شماره ۷۱ و ۸۵ آبخور شبکه آبیاری و زهکشی درودزن نمیباشند (شکل ۱). معیارهای هواشناسی، خاک، شوری آب سطحی و زیرزمینی در هر یک از واحدهای مطالعاتی تعیین شده، یکسان فرض شده است. به دلیل تعداد زیاد مزارع و فقدان اطلاعات اندازهگیری شده در هر مزرعه، نتایج مزارع واقع در هر ناحیه عمرانی جمعبندی و در قسمت نتایج ارایه گردیده است. تعیین عملکرد محصول در هر یک از واحدهای مکانی، توسط مدل توزیعی SWAP، انجام میگیرد. برای منطقهای نمودن مدل SWAP و برقراری ارتباط بین این مدل و دادههای GIS یا EXCEL، برنامهای در محیط MATLAB نوشته شد. این برنامه دادههای ورودی و خروجی را بین دو برنامه منتقل نموده و برنامه را در هر واحد مکانی اجرا مینماید. مدل برای دوره زراعت گندم (۱۰ آبان تا ۲۰ خرداد ماه سال بعد) اجرا میشود. به دلیل مسطح بودن اراضی شبکه و شیب ملایم آن، کل شبکه از نظر اقلیمی و هواشناسی شرایط مشابهی دارد، بنابراین به منظور بررسی اقلیمی، بارندگی، برآورد تبخیر و تعرق مرجع و پارامترهای هواشناسی مورد نیاز در بخش شبیهسازی مدل SWAP، از دادههای آماری ایستگاه هواشناسی واقع در محدوده شبکه- ایستگاه هواشناسی کشاورزی کوشکک- استفاده شد.

گندم مهم ترین محصول استراتژیک در منطقه است که بر اساس برنامهریزیهای کلان در سال های اخیر، سالانه حداقل سه چهارم از مساحت تحت کشت شبکه به آن اختصاص مییابد. گندم در فصل اول زراعی کشت شده و در هر سال چهار بار آبیاری میشود. پارامترهای گیاهی ورودی مورد نیاز مدل از تحقیقات انجام شده، اطلاعات موجود در منطقه و منابع علمی معتبر (Penning de Vries *et al.*, 1989; Bessembinder *et al.*, 2003) استخراج گردید. در مدل SWAP برای کمی کردن رابطه بین پارامترهای هیدرولیکی خاک از معادله Van Genuchten (1980) و Mualem (1976) استفاده میشود. ضرایب مورد نیاز این معادلات (Θs, Θr, ks, α, λ, n) با استفاده از توابع انتقالی HYPRESS (Wosten *et al.*, 1998) بر اساس دادههای دانهبندی، مواد آلی و جرم مخصوص ظاهری خاک محاسبه گردید. در این پژوهش، خصوصیات خاک در هر واحد مطالعاتی با توجه به سری خاک غالب هر مزرعه تعیین و وارد مدل شد. میانگین برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سریهای خاک غالب شبکه در دو لایه بالایی و زیرین در جدول ۱ ارایه شده است. دادههای بارندگی روزانه و مقادیر تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده به عنوان مؤلفههای شرایط مرزی بالا در مدل لحاظ گردید. هم چنین با استفاده از مقدار آب ورودی به هر واحد شبیهسازی و سطح زیر کشت، عمق آب آبیاری در تاریخهای مختلف برای محصول گندم محاسبه و به عنوان یکی دیگر از شرایط مرزی بالا وارد مدل شد. روش آبیاری در اغلب مزارع شبکه، آبیاری سنتی است. مهم ترین منابع آب زراعی در محدوده مطالعاتی، آب تنظیمی سد مخزنی درودزن و منابع آب زیرزمینی (چاه) میباشند. با توجه به این که در محدوده شبکه از منابع آب های سطحی و زیرزمینی به صورت تلفیقی استفاده میشود، در این پژوهش با توجه به اطلاعات موجود، کمیت و کیفیت منابع آب های سطحی و زیرزمینی مورد استفاده در هر واحد مطالعاتی برآورد شده و وارد مدل گردید. لازم به ذکر است در بیش از ۹۰ درصد از اراضی منطقه ، آب زیرزمینی در اعماق بیش از ۳ متر قرار گرفتهاند ، بنابراین در این مطالعه شرایط مرزی پایین دست به صورت زهکشی آزاد[1] در نظر گرفته شد.

به منظور ارزیابی مدل در برآورد عملکرد محصول، از شاخصهای آماری ضریب تبیین (R^2)[2]، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)[3]، انحراف معیار (SD)[4]، خطای حداکثر (ME)[5]، ضریب جرمی باقی مانده (CRM)[6] و کارایی مدل (EF)[7] استفاده شد. شکل ریاضی این آمارهها بصورت زیر میباشد، که در آن P_i مقادیر پیشبینی شده، O_i مقادیر

[1] Free drainage
[2] Coefficient of determination
[3] Root mean square error
[4] Standard deviation
[5] Maximum error
[6] Coefficient of residual mass
[7] Modeling efficiency

مشاهده شده، n تعداد دادهها و $\bar{O}$ متوسط مقادیر مشاهده شده است.

$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Pi-\bar{O})^2} \quad (۲)$$

$$RMSE=\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi-Oi)^2}{n}\right]^{0.5} \quad (۳)$$

$$SD=\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2}{n}\right]^{0.5} \quad (٤)$$

$$ME=MAX\left|Pi-Oi\right| \quad (۵)$$

$$CRM=\frac{\sum_{i=1}^{n}Oi-\sum_{i=1}^{n}Pi}{\sum_{i=1}^{n}Oi} \quad (٦)$$

$$EF=\frac{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2\sum_{i=1}^{n}(Pi-Oi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2} \quad (۷)$$

واسنجی و صحتیابی مدل ضروری میباشد .

واسنجی مدل توزیعی SWAP

به منظور بررسی کارایی مدل توزیعی SWAP، مدل بر اساس عملکرد محصول گندم واسنجی گردید. در این پژوهش پارامترهای هیدرولیکی خاک و پارامترهای گیاهی واسنجی شدند. در جدول ۲ مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک در لایههای فوقانی و زیرین و در جدول ۳ مقادیر پارامترهای گیاهی مورد استفاده در مدل، برای شبیهسازی عملکرد گندم زمستانه در شبکه آبیاری و زهکشی درودزن ارایه گردیده است.

ارزیابی عملکرد تولید محصول در مقیاس مکانی شبکه

برای تعیین اعتبار مدل، مجموعه بزرگی از اطلاعات شامل دادههای هواشناسی روزانه، پارامترهای گیاهی، توزیع مکانی و زمانی آب آبیاری، شوری آب آبیاری، خصوصیات خاک، عمق آب زیرزمینی و شوری آن در سه سال مرطوب (۸۶-۱۳۸۵)، نرمال (۸۷-۱۳۸٦) و خشک (۸۸-۱۳۸۷) جمعآوری و مورد پردازش قرار گرفت (برای تعیین سالهای تر و خشک از رابطه (P_n-P_{mean}) / ST بهرهگیری و ضریب شاخص ترسالی و خشکسالی محاسبه گردید. در این رابطه Pn، میانگین بارندگی سال n ام، P_{mean}، میانگین بارندگی n سال و ST، انحراف معیار بارندگی n سال میباشد). با استفاده از پارامترهای ورودی (جداول ۱، ۲ و ۳) و سایر ورودیهای مورد نیاز مدل، عملکرد محصول گندم در هر یک از واحدهای مطالعاتی و برای سه سال زراعی شبیهسازی شد. نتایج شبیهسازی واحدهای مکانی در سال نرمال در شکل ۲ به صورت نمونه ارایه گردیده است. همانطور که پیشتر اشاره گردید، به دلیل تعداد زیاد مزارع و فقدان اطلاعات مشاهداتی عملکرد محصول در هر مزرعه، نتایج در نواحی عمرانی شبکه ارایه میگردد. در جدول ٤ عملکردهای شبیهسازی محصول گندم و درصد خطا نسبت به عملکردهای واقعی در هر ناحیه عمرانی نشان داده شده است. مقایسه عملکردهای بدست آمده از مدل و عملکردهای اندازهگیری شده در مزرعه نشان داد که همبستگی خوبی بین مقادیر شبیهسازی شده و واقعی وجود دارد (شکل ۳).

نتایج و بحث

مقایسه آماری بین مقادیر عملکرد محصول شبیهسازی شده و اندازهگیری شده انجام شد که نتایج آن در جدول ۵ ارایه شده است. آماره R^2 نسبت پراکندگی بین مقادیر شبیهسازی شده و اندازهگیری شده را نشان میدهد و مقدار RMSE مشخص میکند که برآورد بیش از حد یا کمتر از حد مدل، در مقایسه با مشاهدات چقدر است. در این مطالعه ضریب همبستگی بالا و RMSE در حد پایینی بوده و RMSE کمتر از SD بود، که نشان دهنده کارکرد مطلوب مدل میباشد. حداکثر مقدار خطای شبیهسازی عملکرد در واحدهای مکانی، ۰/۹٤ تن در هکتار بدست آمد. مقدار شاخص EF، بیانگر کارایی مدل در امر شبیهسازی است که مقدار آن ۰/۸۵، نزدیک به یک بدست آمد که بهترین حالت میباشد. همانطور که در جدول ۵ مشاهده میشود، ضریب CRM مقداری کوچک و منفی است و تمایل مدل را در برآورد عملکرد بیش از مقادیر اندازهگیری شده نشان میدهد. تحلیلهای آماری ذکر شده نشان میدهد که عملکرد گندم با دقت قابل قبولی توسط مدل SWAP شبیهسازی شده است.

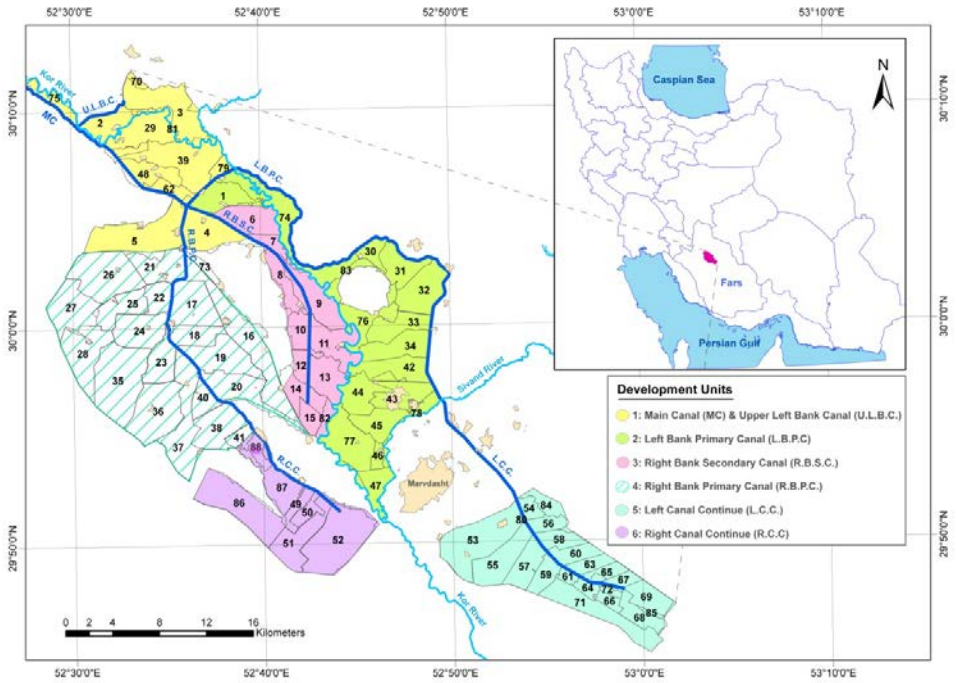
کوهی چلهکران و همکاران (Koohi Chellekaran *et al.*, 2011) در تحقیقی که روی محصول ذرت در ارزوئیه کرمان و با استفاده از SWAP انجام دادند، عملکرد ذرت را بیش از مقادیر اندازهگیری شده برآورد نمودند. کیانی و همایی (Kiani and Homaee, 2007) تمایل مدل در برآورد بیشتر عملکرد گندم را در منطقهای در شمال گرگان نشان دادند. نتایج بررسیهای ۵ ساله رویز و آتست (Utset and Ruiz, 2003)

روی مدل SWAP برای شبیهسازی عملکرد نسبی نیشکر نیز نشان داد که مدل تمایل به برآورد بالاتر از مقادیر واقعی عملکرد نسبی محصول دارد. در مقابل وردینژاد و همکاران (Verdinejad *et al.*, 2011) عملکرد محصولات جو، پنبه و آفتابگردان را در اکثر موارد بیشتر از مقدار واقعی و عملکرد گندم، چغندرقند و پیاز را کمتر از مقدار واقعی برآورد نمودند. نحوینیا و همکاران (Nahvinia *et al.*, 2011)، نیز عملکرد گندم روشن در بیرجند را کمتر از مقادیر واقعی برآورد نمودند. به رغم بیش یا کم برآورد بودن مدل SWAP در شبیهسازی عملکرد محصول، تمامی محققین ذکر شده، اذعان داشتند که مدل SWAP کارایی مطلوبی در برآورد عملکرد محصول دارد.

تفاوت بین مقادیر مشاهده شده و شبیهسازی شده عملکرد محصول، ناشی از خطاهای اندازهگیری، ناهمگنی مکانی دادههای اندازهگیری شده و احتمالاً عدم دقت رابطه کاهش عملکرد مدل SWAP در شرایط توأم شوری و خشکی است. علاوه بر این، در مدل SWAP برخی عوامل مؤثر بر عملکرد تولید از جمله بیماریها، آفات و کمبود مواد مغذی در نظر گرفته نشده است (Singh, 2006). تنش گیاه به دلیل کاهش رطوبت خاک یا افزایش شوری آب موجود در خاک، سبب کاهش جذب آب توسط ریشه و به تبع آن کاهش عملکرد محصول میگردد. همانطور که پیشتر اشاره گردید، میزان کاهش جذب آب به علت کاهش میزان آب و افزایش شوری در مدل SWAP به ترتیب توسط توابع پیشنهادی فدس و همکاران (Feddes *et al.*, 1978) و ماس و هافمن (Maas and Hoffman, 1977) تعیین میگردد. این تابع شیب عملکرد – شوری را بعد از آستانه و برای شرایط بدون تنش آبی، به صورت خطی در نظر میگیرد، در حالی که کیانی و همکاران (Kiani *et al.*, 2005)، نشان دادند که در اثر تغییر رطوبت خاک، شیب مذکور نیز ثابت نبوده و بصورت غیرخطی تغییر میکند. هم چنین در شرایط توأم دو تنش شوری و آبی، SWAP فرض میکند که تابع جذب آب از حاصلضرب دو تابع کاهش شوری و کم آبی پیروی میکند، در حالی که به گزارش همایی و همکاران و شهیدی (Homaee *et al.*, 2002; Shahidi, 2008) در شرایط توأم شوری و کم آبی، تابع حاصل ضربی نمیتواند اثر دو تنش را بخوبی کمی نماید. شاید همین عامل باعث شده است مدل در شرایط توأم خشکی و شوری، دقت کمتری داشته باشد. شوری آب و خاک بیشتر از ٦ دسیزیمنس بر متر، عملکرد گیاه گندم را تحت تأثیر قرار میدهد. در شبکه درودزن، شوری خاک برخی مزارع واقع در نواحی عمرانی ٥ و ٦ که در انتهای شبکه واقع شدهاند، بیش از ٦ دسیزیمنس است، هم چنین در این نواحی عمرانی مقدار آب تخصیص یافته نیز کمتر از سایر نواحی است. به همین دلیل همانطور که در جدول ٤ نشان داده شده است، عملکرد گندم در این نواحی با درصد خطای بیشتری برآورد شده است.

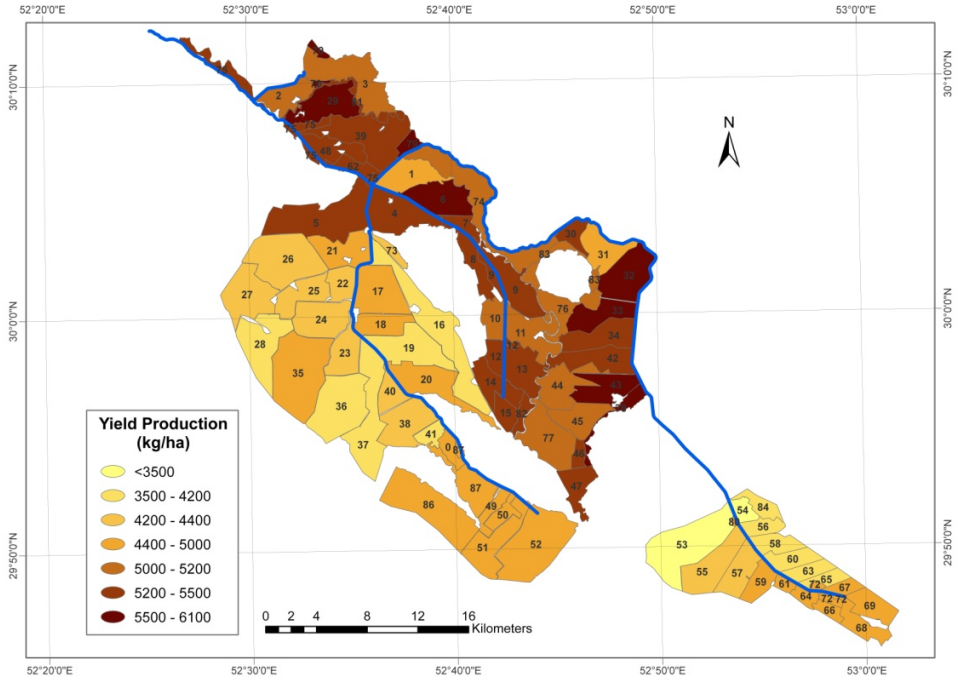
برای تحلیل بیشتر نتایج، پارامترهای آماری در سالهای مرطوب، نرمال و خشک نیز به طور جداگانه تعیین و در جدول ٦ ارایه گردیده است. تحلیلهای آماری انجام شده نشان داد که مدل در تمامی اقلیمهای شبکه آبیاری و زهکشی درودزن برای شبیهسازی عملکرد محصول گندم دارای اعتبار است. به نظر میرسد مدل در اقلیمهای خشک با ضریب همبستگی و شاخص کارایی بیشتر و مجذور میانگین مربعات خطا و خطای حداکثر کمتر، نتایج بهتری ارا یی میدهد. کم بودن شاخصهای ضریب تبیین و کارایی مدل در سال مرطوب و هم چنین کم برآورد بودن مقادیر عملکرد شبیهسازی شده، ممکن است به دلیل آبیاری بیش از نیاز گیاه و ماندابی شدن خاک باشد. در صورت ثبت دادههای رطوبتی در منطقه، میتوان نتایج را با دقت بیشتری تحلیل نمود.

نتایج ارزیابی مدل توزیعی SWAP نشان داد که این مدل در شرایط شوری و محدودیت آب در شبکه درودزن از دقت قابل قبولی برای برآورد عملکرد گندم برخوردار است و می‌توان برای مدیریت و برنامهریزی آبیاری از آن استفاده نمود. با توجه به نظام آبیاری سنتی در اکثر مزارع شبکه میتوان با بهبود مدیریت آب در شبکه، راندمان آبیاری، عملکرد و بهرهوری آب را افزایش داد. دقت نتایج این مدل به دقت پارامترهای ورودی وابسته است و در صورت واسنجی کامل، بدون محدودیت زمانی و مکانی موجود در آزمایشهای مزرعهای، میتواند برای شبیهسازی سناریوهای مختلف آبیاری به کار رود. پیشنهاد می‌گردد برای دست یافتن به نتایج واقعیتر میزان عملکرد محصول، دادههای ورودی مؤثر از قبیل شاخص سطح برگ، تشعشع خورشیدی و ... به دقت اندازهگیری شده و یا توسط تصاویر ماهوارهای، به خصوص در شبکههایی با وسعت زیاد، برآورد گردند.



شکل ۱- نواحی عمرانی ٦ گانه و واحدهای شبیهسازی شبکه آبیاری و زهکشی درودزن

Figure 1. Development and simulation units of Doroudzan network



شکل ۲- عملکرد شبیهسازی شده توسط مدل توزیعی **SWAP** در واحدهای مکانی شبکه

Figure 2. Simulated yield using distributed SWAP in spatial units of the network

جدول ۱- خصوصیات سریهای خاک در شبکه آبیاری و زهکشی درودزن

Table 1. Soil properties for main soil series in doroudzan irrigation and drainage network

Soil series	Soil codes	Layer (cm)	Texture	C (%)	Si (%)	pb (kg m^{-3})	OC (%)	EC (dS m^{-1})
Beyzad	2	0-35	CL	37	40	1.49	0.75	1.02
		35<	SiC	48	44	1.48	0.74	1.08
Takht-e-Jamshid	3	0-50	SiCL	37	47	1.24	0.71	1.24
		50<	SiC	49	41	1.44	0.80	2.20
Marvdasht	4	0-35	SiCL	34	51	1.36	1.38	1.34
		35<	SiC	43	47	1.49	0.90	1.22
Kooshkak	5	0-30	CL	32	46	1.43	1.28	2.05
		30<	CL	29	42	1.51	0.96	0.87
Kor	6	0-30	SiCL	33	55	1.33	1.13	1.78
		30<	C	60	33	1.50	1.09	1.78
Ramjerd	7	0-30	SiCL	36	45	1.35	1.52	1.37
		30<	SiCL	35	52	1.73	1.11	1.13
Jahan Abad	9	0-30	SiC	29	49	1.34	0.47	1.03
		30<	C	62	33	1.40	0.74	1.10
Hesam Abad	10	0-30	CL	29	43	1.32	1.03	0.92
		30<	CL	35	44	1.53	0.69	1.18
Karbal	14	0-30	SiCL	34	59	1.13	1.48	12.48
		30<	C	63	29	1.33	1.09	10.76

C رس، Si سیلت، L لوم، ρb جرم مخصوص ظاهری، OC درصد مواد آلی، ECe هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک

C: clay, Si: silt, L:loam, ρb: bulk density, OC: organic matter content, ECe: electrical conductivity

جدول ۲- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی واسنجی شده خاک در مزارع شبکه آبیاری و زهکشی درودزن

Table 2. Calibrated soil hydraulic parameters of main soil series in Doroudzan network

Soil series	Layer (cm)	Θs (cm^3 cm^{-3})	Θr (cm^3 cm^{-3})	Ks (cm d^{-1})	α (cm^{-1})	λ (-)	n (-)
Beyzad	0-35	0.42	0.01	23.1	0.03	-3.79	1.13
	35<	0.44	0.01	5.8	0.02	-3.65	1.08
Takht-e-Jamshid	0-50	0.50	0.01	39.4	0.02	-2.31	1.17
	50<	0.45	0.01	6.2	0.02	-3.44	1.08
Marvdasht	0-35	0.46	0.01	21.9	0.03	-3.31	1.15
	35<	0.43	0.01	7.0	0.02	-3.89	1.09
Kooshkak	0-30	0.44	0.01	22.3	0.03	-3.58	1.15
	30<	0.42	0.01	14.7	0.03	-3.66	1.13
Kor	0-30	0.47	0.01	21.6	0.02	-2.96	1.16
	30<	0.44	0.01	2.3	0.01	-3.61	1.06
Ramjerd	0-30	0.46	0.01	27.7	0.03	-3.47	1.14
	30<	0.35	0.01	4.3	0.01	-4.77	1.08
Jahan Abad	0-30	0.47	0.01	30.6	0.03	-2.20	1.19
	30<	0.48	0.01	3.0	0.01	-2.07	1.07
Hesam Abad	0-30	0.47	0.01	40.8	0.03	-2.88	1.18
	30<	0.42	0.01	10.7	0.03	-3.74	1.11
Karbal	0-30	0.53	0.01	31.1	0.02	-2.18	1.18
	30<	0.50	0.01	3.4	0.01	-1.62	1.08

Θs و Θr رطوبت اشباع و باقی مانده خاک، Ks هدایت هیدرولیکی اشباع، α و n پارامترهای شکل و λ ضریب تجربی

Θs&Θr: saturated & residual water content, Ks: saturated conductivity, α&n: empirical shape factor, λ: empirical coefficient

جدول ۳- مقادیر پارامترهای گیاهی واسنجی شده مدل پیشرفته گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد گندم

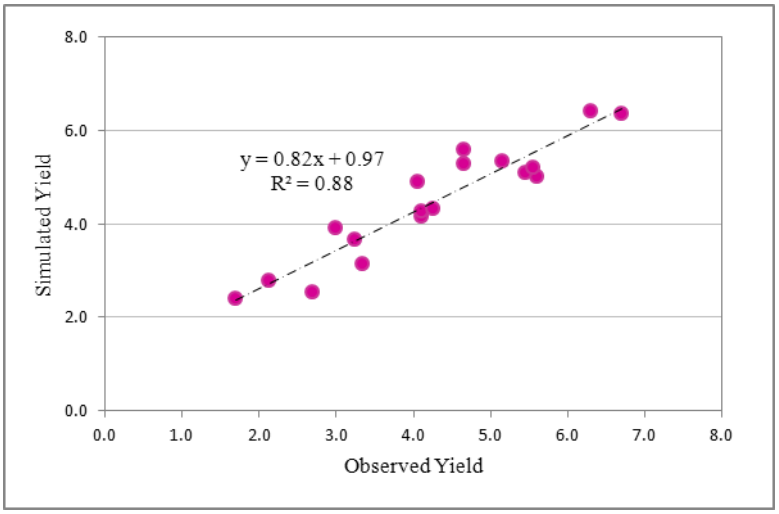
Table 3. Main crop parameters of the detailed crop growth module used in the wheat yield simulations

Parameter	wheat
Temperature sum from emergence to anthesis, TSUMEA (◦C)	1215
Temperature sum from anthesis to maturity, TSUMAM (◦C)	1033
Specific leaf area, S_{la}	0.0018
Maximum relative increase in LAI (m^2 m^{-2} day^{-1})	0.008
Light use efficiency, EFF (Kg CO_2 J^{-1})	0.44
Maximum CO_2 assimilation rate, A_{max} (Kg ha^{-1} hr^{-1})	45.0

جدول ٤- مقادیر مشاهده شده و شبیهسازی شده عملکرد محصول گندم (تن در هکتار)

Table 4. Observed and simulated wheat yield (ton/ha)

Development units	Wet year			Normal year			Dry year		
	Observed	Simulated	Error (%)	Observed	Simulated	Error (%)	Observed	Simulated	Error (%)
1	6.7	6.4	-4.9	5.6	5.2	-6.3	4.3	4.3	1.6
2	6.3	6.4	1.7	5.2	5.4	3.9	3.3	3.7	12.3
3	5.6	5.0	-10.7	4.7	5.3	13.5	3.4	3.2	-6.0
4	5.5	5.1	-6.4	4.1	4.3	4.1	2.7	2.5	-6.7
5	4.1	4.2	1.2	3.0	3.9	30.0	1.7	2.4	40.6
6	4.7	5.6	20.2	4.1	4.9	21.0	2.1	2.8	31.3
Total	5.6	5.4	-2.4	4.4	4.7	6.6	2.9	3.1	5.0



شکل ۳- عملکرد مشاهده شده و شبیهسازی شده محصول زراعی گندم در شبکه آبیاری و زهکشی درودزن (تن درهکتار)

Figure 3. Observed and simulated wheat yield production in Doroudzan network (ton/ha)

جدول ٥- مقادیر پارامترهای آماری برای ارزیابی مدل **SWAP** توزیعی در شبیهسازی عملکرد گندم در شبکه درودزن

Table 5. Statistical parameters for evaluating distributed SWAP for wheat yield simulation

R^2	RMSE	SD	ME	CRM	EF
0.88	0.51	1.36	0.94	-0.05	0.85

جدول ٦- مقادیر پارامترهای آماری برای ارزیابی مدل **SWAP** توزیعی در سالهای مرطوب، نرمال و خشک

Table 6. Statistical parameters for evaluating distributed SWAP during wet, normal and dry years

Year	R^2	RMSE	SD	ME	CRM	EF
Wet	0.69	0.50	1.47	0.94	0.01	0.86
Normal	0.76	0.59	2.36	0.90	-0.09	0.92
Dry	0.82	0.44	3.83	0.69	-0.08	0.96

References

Amiri E, Kavoosi M, Kaveh F (2009) Evaluation of crop growth models ORYZA2000, SWAP and WOFOST under different types of irrigation management. Journal of Agricultural Engineering Research 10(3): 13-28 [In Persian with English Abstract].

Bastiaanssen WGM, Allen RG, Droogers P, D'urso G, Steduto P (2007) Twenty-five years modeling of irrigated and drained soils: State of the art. Agricultural Water Management 92(3): 111-125.

Bessembinder JJE, Dhindwal AS, Leffelaar PA, Ponsioen T, Singh S (2003) Analysis of crop growth in water productivity of irrigated crops in Sirsa district, India. In: Dam JC, Malik RS (Eds), Integration of remote sensing, crop and soil models and geographical information systems. Wageningen university, Wageningen. pp. 59–82

Bessembinder JJE, Leffelaar PA, Dhindwal AS, Ponsioen T (2005). Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. Agricultural Water Management 73(2): 113-130.

Feddes RA, Kowalik PJ, Zaradny H (1978) Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, the Netherlands, 189 pp.

Homaee M, Dirksen C, Feddes RA (2002a) Simulation of root and water uptake, I. Nonuniforme transient salinity using different macroscopic reduction function. Agricultural Water Managment 57: 89-109.

Kiani AR, Homaee M (2007) Evaluating SWAP model for simulation of water and solute transport in soil profile. Journal of Agricultural Engineering Research 8(1): 13-30 [In Persian with English Abstract].

Kiani AR, Asadi ME, Homaee M, Mirlatifi M (2005) Wheat production function under salinity and water stress conditions. Proceedings of MTERM International Conference, 6-10 June 2005, AIT, Thailand. 609-616.

Koohi Chellekaran N, Eslami A, Asadi R (2011) Improving irrigation management for hybrid maize seeds in Kerman province using a SWAP model. Journal of Agricultural Engineering Research 12(1): 17-32. [In Persian with English Abstract].

Kroes JG, van Dam J (2008) Reference manual SWAP version 3.03. Altera Green World Research, Altera Report 773. Wageningen University and Research Center, Wageningen, the Netherlands, 211 pp. ISSN: 1566-7197.

Maas EV, Hoffman GJ (1977) Crop salt tolerance assessment. Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE 103: 115-134.

Mahab Ghodss Consulting Engineering Company (2011) Studies for yield evaluation, and monitoring management of operation and maintenance, improvement, repair and rehabilitation of Doroudzan irrigation and drainage network [In Persian with English Abstract].

Molden DJ, Sakthivadivel R (1999) Water accounting to assess use and productivity of water. International Journal of Water Research Development 1 (1–2): 55- 71.

Mualem Y (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research 12: 513–522.

Nahvinia MJ, Shahidi A, Parsinejad M, Karimi B (2011) Assessing the performance of SWAP model in estimating the production of wheat under salinity and water stress (case study: Birjand, Iran). Iranian Water Research Journal 4 (6): 43-58. [In Persian with English Abstract].

Noory H, Liaghat AM, Parsinejad M, Vazifedoust M (2011) Simultaneous condition of water and salinity limitations (case study: Voshmgir network, Golestan provinc). Journal of Water and Soil 24 (6): 1224-1235. [In Persian with English Abstract].

Penning de Vries, FWT, Jansen DM, Ten Berge HFM, Bakema A (1989) Simulation of ecofysiological processes of growth in several annual crops. Simulation monographs No. 29. IRRI Los Banos/Pudoc, Wageningen, the Netherlands.

Shahidi E (2008) Integration of deficit irrigation and salinity on yield components of wheat cultivars and determining water-salinity production function in the Birjand region, Iran. Ph.D. Thesis. Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran [In Persian with English Abstract].

Singh R, van Dam J, Feddes RA (2006) Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district. India. Agricultural Water Management 82: 253-278.

Van Dam JC, Groenendijk P, Hendriks RFA, Kroes JG (2008) Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. Vadose Zone Journal 7: 640-653.

Van Genuchten MTH (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal 44: 892-898.

Vazifedoust M (2007) Development of an agricultural drought assessment system. Integration of crop and soil modeling remote sensing and geographical information. Ph.D. Dissertation. Wageningen Agricultural University. The Netherland.

Verdinejad VR, Sohrabi T, Feizi M, Heydari N, Araghinejad SH (2011) Patterning different crops yield with saline water irrigation condition using SWAP model. Journal of Water and Soil 24(3): 463-475. [In Persian with English Abstract].

Wösten JHM, Lilly A, Nemes A, Le Bas C (1998) Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation models in environmental studies and in land use planning. SC-DLO Report 156. Wageningen, The Netherland, 106 pp.