

بهبود برآورد عملکرد محصول در مدل شبیه‌سازی SWAP با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

علی‌رضا بادیه‌نشین^۱، حمیده نوری^{۲*}، مجید وظیفه‌دوست^۳

۱. کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی گروه آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۴/۲۴)

چکیده

به منظور برآورد عملکرد گیاهان در سطوح وسیع، از روش به‌روزرسانی مدل‌های رشد گیاه با داده‌های ماهواره‌ای استفاده می‌شود. هدف این تحقیق تعیین میزان بهبود برآورد عملکرد محصول در مدل شبیه‌سازی SWAP با استفاده از این روش بود. این تحقیق در سال زراعی ۱۳۹۰-۱۳۹۱ در سه سامانه آبیاری عقربه‌ای، واقع در شبکه آبیاری قزوین، تحت کشت گیاهان ذرت علوفه‌ای و چغندر قند، انجام شد. اجرای مدل SWAP در دو مرحله بدون به‌روزرسانی و با به‌روزرسانی با شاخص سطح برگ ماهواره‌ای انجام شد. برآورد عملکرد محصول چغندر قند و ذرت با مدل SWAP به‌روزرسانی‌شده به ترتیب ۱۳/۷ و ۱۴/۵ درصد در مقدار درصد خطا و ۳/۳۲۱ و ۱/۶۲۱ تن بر هکتار در مقدار RMSE بهبود یافت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد با به‌روزرسانی شاخص سطح برگ ماهواره‌ای می‌توان خطاهای داده‌های ورودی مدل و عدم قطعیت موجود در آن‌ها را به میزان زیادی کاهش داد و با دقت مطلوبی عملکرد را در سطح وسیع و با تفکیک مزرعه به مزرعه برآورد کرد.

کلیدواژه‌گان: ذرت علوفه‌ای، سنجش از دور، شاخص سطح برگ، چغندر قند، مدل SWAP

مقدمه

تولید گیاهی نتیجه ترکیب داده‌های محیطی، مانند تابش خورشیدی و آب و دیگر عامل‌های مؤثر بر رشد گیاه، است. به میزان تولید گیاهی در بازه‌ای خاص عملکرد محصول می‌گویند که هدف کشت محصول به‌دست‌آوردن این عملکرد است (Ferencz et al, 2004). برآورد عملکرد محصول در مدیریت کشاورزی و اتخاذ تصمیم‌های به‌موقع برای تأمین غذا اهمیت بسیار دارد. ایران دارای سطوح وسیع کشت محصولات مختلف است و برآورد عملکرد محصول گیاهان در زمان مناسب و با دقت مطلوب ضروری است. مدل‌های شبیه‌ساز رشد محصول، در مقیاس کوچک، ابزار تحقیقاتی قدرتمندی است که در پیش‌بینی عملکرد محصول در سامانه‌های زراعی مختلف استفاده می‌شود (Mokhtari, 2012). از این مدل‌ها می‌توان به مدل Wofost (Diepen et al, 1989)، CERES (Godwin and Jones, 1991)، WTGROWS (Aggarwal et al, 1994)، SVAT (Mo and Liu, 2001) و SWAP (Kroes and van Dam, 2003) اشاره کرد.

مدل SWAP^۱ از مدل‌هایی است که محققان زیادی در کشورهای مختلف برای برآورد عملکرد محصولات از آن استفاده کرده‌اند. از آن‌ها می‌توان به تحقیق در مزارع نیشکر کوبا (Ruiz and Utset, 2003)، در زاراکوزای اسپانیا (Utset et al, 2007)، در مزارع ذرت شمال ایتالیا (Bonfante et al, 2010)، در مزارع گندم و جو و پنبه هند (Singh et al, 2006)، و در مزارع غرب چین (Singh et al, 2010) اشاره کرد. بررسی مطالعات انجام‌شده در برآورد عملکرد محصول با استفاده از مدل SWAP نشان می‌دهد دقت این مدل به دقت داده‌های ورودی بستگی زیادی دارد. مدل SWAP در چهار بخش گیاهی، خاک، هواشناسی، و شرایط مرزی بالا و پایین به داده‌های ورودی متعددی نیاز دارد و در صورت وجود داده‌های دقیق این مدل می‌تواند عملکرد محصول را با دقت خوبی شبیه‌سازی کند (Badiehneshin and Noory, 2013; Noory et al, 2011). آنالیز حساسیت نشان داده در این مدل بیشترین ضریب حساسیت مربوط به عمق آب آبیاری است (Vazifedoust et al, 2008; Mostafazadeh-fard et al, 2009; Verdinejad et al,

1. Soil Water Atmosphere Plant

* نویسنده مسئول: hnoory@ut.ac.ir

(ماهواره NOAA)، عملکرد ماده خشک ذرت علوفه‌ای و گندم با خطای ۳۳ و ۲۳ درصد برآورد شد (Mo *et al*, 2005). در ایتالیا برای بهبود برآورد عملکرد گندم از مدل CERES به‌روزشده با مقادیر LAI سنجنده‌های ASAR و MERIS استفاده شد (Dente *et al*, 2008). در رومانی نیز با استفاده از مدل WOFOST^۲ به‌روزشده با مقادیر LAI سنجنده SPOT خطای موجود در نتایج عملکرد گندم ۲۵ درصد کاهش یافت (Curnel *et al*, 2011). در ایران در برخوار اصفهان مدل SWAP با استفاده از داده‌های سطح برگ و تبخیر-تعرق مستخرج از سنجنده TM ماهواره Landsat به‌روز شد و مقدار خطای برآورد عملکرد گندم در سطح شبکه آبیاری از ۲۰٫۷٪ (بدون به‌روزرسانی مدل) به ۹٫۳٪ (با به‌روزرسانی مدل) درصد کاهش یافت (Vazifedoust *et al*, 2009). در تحقیق آن‌ها دقت مدل در کل سطح شبکه آبیاری تعیین شد. در صورتی که هدف بررسی تأثیر به‌روزرسانی در سطح مزارع شبکه آبیاری باشد، نتایج متفاوت خواهد بود. از طرفی در بسیاری از تحقیق‌ها از تصاویر سنجنده‌های پرهزینه یا دارای تأخیر استفاده شده است؛ در حالی که مدیریت کشاورزی نیازمند تصویر بدون تأخیر است. امروزه تصاویر سنجنده MODIS^۳ ماهواره Terra به صورت رایگان، روزانه، و بدون تأخیر ارائه می‌شود که برای استفاده در مدیریت مزارع بسیار مناسب است.

هدف تحقیق حاضر به‌روزرسانی مدل زراعی-آب‌شناختی SWAP به کمک داده LAI مستخرج از سنجنده MODIS ماهواره Terra و بررسی میزان بهبود برآورد عملکرد محصول (در سطح مزرعه) به وسیله مدل به‌روزرسانی شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

این تحقیق در سال زراعی ۱۳۹۰-۱۳۹۱ در شبکه آبیاری قزوین انجام شد. مزارع مطالعه شده از کشت و صنعت دامپروری هزارجلفا با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۱۱ دقیقه شرقی انتخاب شدند. این کشت و صنعت در قسمت شرقی شبکه آبیاری قزوین و در شهرستان آبیک واقع است و از شرق به روستای هزارجلفا، از جنوب به روستای عبدالآباد، از غرب به کشت و صنعت دامپروری مگسال، و از شمال با فاصله ۱۰ کیلومتری به شهر

(2010; Nahvinia *et al*, 2011). این ضریب بیانگر حساسیت زیاد خروجی مدل به داده‌های ورودی عمق آب آبیاری است. علاوه بر عمق آبیاری، داده‌های گیاهی در برآورد عملکرد محصولات اهمیت زیادی دارد، به گونه‌ای که ناهماهنگی روند رشد گیاه در مدل با واقعیت و یکنواخت نبودن پوشش گیاهی مزرعه باعث ایجاد خطا در نتایج مدل می‌شود (Kroes and van Dam, 2003; Khani *et al*, 2007). مدل SWAP قابلیت شبیه‌سازی رشد گیاه در شرایط تنش‌های خشکی و شوری را دارد. ولی شرایط محیطی رشد گیاه را از نظر مواد مغذی، آفات، و بیماری‌ها بهینه و نامحدودکننده فرض می‌کند و این امر باعث ایجاد خطا در نتایج می‌شود (Kroes and van Dam, 2003). در کاربرد مدل در سطوح وسیع در مقیاس بزرگ‌تر از مزارع آزمایشی اندازه‌گیری مقدار عمق آبیاری و برقراری هماهنگی روند رشد گیاه در مدل و واقعیت دشوار است و باعث ایجاد خطا در ورودی مدل می‌شود. استفاده از داده‌های سنجنش از دور در به‌روزرسانی برخی داده‌های ورودی مدل‌های شبیه‌سازی (مشابه تبخیر و تعرق و شاخص سطح برگ) جهت کاهش خطا در خروجی مدل پیشنهاد شده است (Vazifedoust *et al*, 2009).

سنجنش از دور فناوری بسیار مفیدی است که با داشتن خصوصیتی نظیر فراهم‌ساختن دیدی وسیع و یکپارچه از یک منطقه، قابلیت تکرارپذیری، سهل‌الوصول بودن اطلاعات، دقت زیاد اطلاعات حاصل، و صرفه‌جویی در زمان می‌تواند مشکلات موجود در آماده‌سازی داده‌های ورودی متعدد مدل‌های شبیه‌سازی را کاهش دهد (Ferencz *et al*, 2004). در این روش مقدار یک شاخص گیاهی ماهواره‌ای از قبیل شاخص سطح برگ^۱ (LAI) در تاریخ‌های مشخص به صورت مستقل از داده‌های ورودی دیگر در مدل وارد می‌شود (به‌روزرسانی می‌شود) و مدل شبیه‌سازی بر اساس آن‌ها مقادیر شاخص سطح برگ را در گام‌های زمانی بعدی اصلاح می‌کند و این عمل باعث بهبود شبیه‌سازی رشد گیاه و برآورد عملکرد محصول به وسیله مدل می‌شود. با این روش تفاوت شبیه‌سازی روند رشد گیاهان در مدل با واقعیت کاهش می‌یابد و خطاهای موجود در داده‌های ورودی مدل، مانند داده‌های عمق آبیاری و گیاهی، تعدیل می‌شود. در هند با استفاده از مدل WTGROWS، به‌روزشده با شاخص LAI سنجنده IRS عملکرد مزارع گندم با خطای حدود ۱۰ درصد برآورد شد (Sehgal, 2002). در چین نیز با استفاده از مدل SVAT به‌روزرسانی شده با مقادیر LAI سنجنده AVHRR

2. World Food Studies

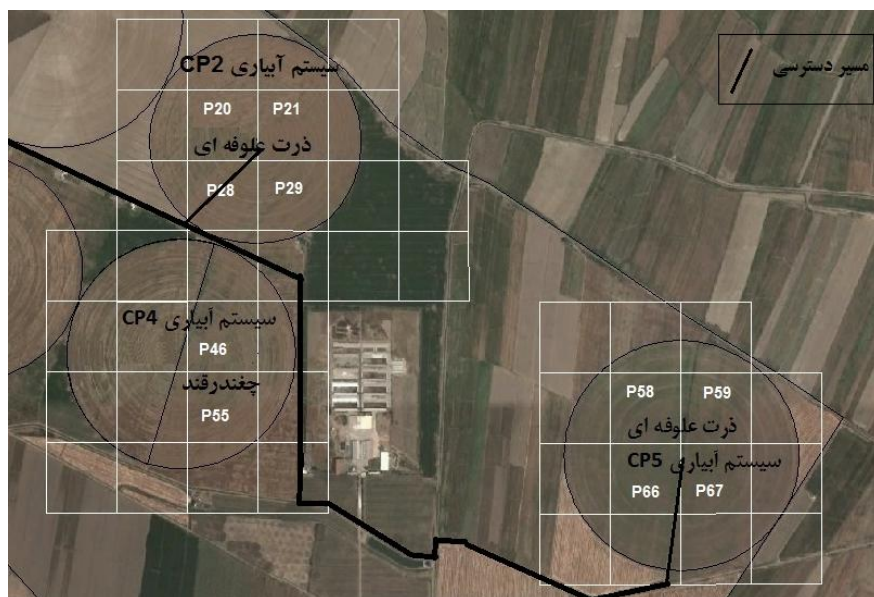
3. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

1. Leaf area index

نمونه‌برداری از آن‌ها استفاده شد. در مجموع، در سه سامانه آبیاری عقربه‌ای ۱۰ قطعه تصویری سنجنده MODIS برای نمونه‌برداری انتخاب شد. در شکل ۱ موقعیت مکانی قطعات مطالعه‌شده در کشت و صنعت هزارجلفا دیده می‌شود. محصول‌های غالب این منطقه مشابه شبکه آبیاری قزوین است و در کشت پاییزه جو و گندم و کلزا و در کشت بهاره چغندرقد و ذرت کاشته می‌شود. به دلیل کمبود آب در کشت بهاره سال زراعی ۱۳۹۰-۱۳۹۱ دو دستگاه آبیاری عقربه‌ای CP1 و CP3 خاموش بوده و کشت محصول در آن‌ها انجام نشده است. اطلاعات گیاهان مورد بررسی در این تحقیق در جدول ۱ می‌آید.

محمدیه منتهی می‌شود. کشت و صنعت هزارجلفا دارای وسعت ۱۰۰۰ هکتار و شامل ۵ سامانه آبیاری عقربه‌ای (CP1 تا CP5) و تعدادی سامانه آبیاری کلاسیک و ثقلی است. این منطقه اقلیم نیمه‌خشک دارد و متوسط بارندگی سالیانه آن ۲۵۰ میلی‌متر و متوسط تبخیر آن ۲۲۰۰ میلی‌متر است. بافت خاک منطقه غالباً لوم شنی است.

طی این تحقیق، تصویر سنجنده MODIS و همچنین تصویر ماهواره‌ای از منطقه (ماهواره SPOT) در تاریخ ۱۴ فروردین ۱۳۹۱ دریافت شد. این دو تصویر در نرم‌افزار ARC GIS زمین‌مرجع و بر هم تطابق داده شد. سپس مکان قطعات تصویری سنجنده به صورت نقشه تصویری^۱ به آن اضافه شد. هر سامانه آبیاری شامل چهار قطعه کامل است که برای



شکل ۱. شبکه‌بندی مزارع آبیاری عقربه‌ای در منطقه مطالعه‌شده

جدول ۱. گیاهان بررسی‌شده همراه اطلاعات کشت آن‌ها

نام گیاه	رقم گیاه	سامانه آبیاری	وسعت مزرعه (هکتار)	تعداد مزرعه	تاریخ کاشت	طول دوره رشد (روز)
ذرت علوفه‌ای	سینگل گراس	CP2	۳۷	۴	۲۸ خرداد	۱۲۰
ذرت علوفه‌ای	هیدو	CP5	۴۵	۴	۱۳ تیر	۱۰۵
چغندرقد	ماریبو	CP4	۲۲	۲	۱۹ فروردین	۱۹۰

گیاه شبیه‌سازی می‌کند. حرکت ناپایدار و غیر یکنواخت آب در خاک بر اساس معادله ریچاردز، که مؤلفه جذب آب به وسیله ریشه گیاه را نیز در نظر می‌گیرد، محاسبه می‌شود (رابطه ۱):

ساختار مدل شبیه‌سازی SWAP

مدل SWAP مدلی زراعی-آب‌شناختی است که بر اساس قوانین فیزیکی و قطعی حاکم بر فرایندهای آب‌شناختی و شیمیایی موجود در زنجیره پیوسته آب، خاک، گیاه، و اتمسفر تدوین و توسعه یافته است (Kroes and van Dam, 2003). این مدل جریان عمودی حرکت آب و نمک را در خاک همراه رشد

1. Shape file

استفاده شد. این اطلاعات شامل مدت زمان آبیاری و دبی آبیاری به‌ازای هر سامانه آبیاری عقبه‌ای بود. با توجه به این اطلاعات، شدت متوسط آبیاری با تقسیم دبی سامانه آبیاری (Q) بر سطح کل سامانه آبیاری (A) محاسبه شد. با ضرب شدت متوسط آبیاری (I) در مدت آبیاری (T)، مقدار آبیاری (Y) در هر تاریخ به‌دست آمد. مقدار آبیاری با رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$Y = I \times T = \frac{Q}{A} \times T \quad (\text{رابطه ۳})$$

در هر قطعه مطالعه‌شده داده‌های بافت خاک، چگالی ظاهری، و مواد آلی در چهار لایه ۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰، ۴۰ تا ۶۰، و ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. در هر لایه داده‌های بافت خاک از روش هیدرومتری و با استفاده از مثلث بافت خاک، چگالی ظاهری خاک با استفاده از نمونه‌گیر استوانه‌ای مغزی^۱، و مقدار ماده آلی با استفاده از اطلاعات خاک‌شناسی کشت و صنعت هزارجلفا اندازه‌گیری و تعیین شد. در مدل SWAP توابع هیدرولیکی خاک بر اساس معادلات van Genuchten (1980) و Mualem (1976) است. ضرایب این معادلات با استفاده از تابع انتقالی Wosten *et al* (1998) بر اساس داده‌های دانه‌بندی، مواد آلی، و وزن مخصوص ظاهری خاک محاسبه شد. طول رشد دو گیاه مطالعه‌شده به چهار مرحله اولیه، توسعه، میانی، و پایانی رشد گیاه تقسیم شد. این تقسیم‌بندی بر اساس نشریه فائو شماره ۵۶ (۱۹۹۸) و با استفاده از اطلاعات موجود در مزرعه انجام شد. در این تقسیم‌بندی مراحل رشد از کاشت شروع می‌شود و در زمان خشکیدگی کامل محصول پایان می‌یابد. به منظور اندازه‌گیری عملکرد محصول دو محدوده یک متر مربعی از داخل قطعات به صورت تصادفی انتخاب و بوته‌های آن قطع شد. پس از قطع بوته‌ها از قطعات مطالعه‌شده اجزای مختلف بوته‌ها جدا و کاملاً خشک و سپس با ترازویی با دقت ۰٫۱ گرم وزن شد. از این مقادیر برای محاسبه وزن خشک کل و وزن خشک ذخیره‌ای (دانه) در هر قطعه استفاده شد. در جدول ۲ داده‌های اندازه‌گیری‌شده همراه تناوب اندازه‌گیری آن‌ها می‌آید.

اجرای مدل SWAP

در این تحقیق مدل SWAP در دو مرحله، شامل مرحله اول با استفاده از مدل بدون به‌روزرسانی و مرحله دوم با استفاده از مدل به‌روزرسانی‌شده با LAI ماهواره‌ای، اجرا شد. در هر دو مرحله مقدار ماده خشک گیاهی در انتهای دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای و چغندر قند (تاریخ ۱۳۹۱/۷/۲۴) با مدل برآورد

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

$C_w(h)$ شیب منحنی نگه‌داشت رطوبتی خاک (cm^{-1})، z عمق خاک (cm)، t زمان (sec)، k ضریب هدایت هیدرولیکی خاک (cm d^{-1})، و S مقدار جذب آب به وسیله ریشه ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) است. (s^{-1})

مدل SWAP می‌تواند مؤلفه‌های زراعی-آب‌شناختی مختلف را در یک واحد شبیه‌سازی همگن از نظر نوع خاک، زهکشی، شرایط آب زیرزمینی، شرایط آب‌وهوایی و بارش، گیاه یا ترکیب گیاهی، و آبیاری (روش، عمق، شوری) برآورد کند. شبیه‌سازی رشد گیاه و محاسبه عملکرد تولید محصول بر اساس مدول رشد گیاه تفصیلی^۱ در مدل شبیه‌سازی SWAP انجام می‌شود. این مدول بر اساس مدل WOFOST است و عملکرد پتانسیل را بر اساس شرایط محیطی و ویژگی‌های گیاهی برآورد می‌کند. شدت تابش، غلظت CO_2 ، دما، و ویژگی‌های گیاهی مهم‌ترین عوامل این مدول‌اند. شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل تولید محصول از طریق محاسبه شدت جذب پتانسیل CO_2 گیاه بر اساس تابش فعال جذب‌شده گیاه^۲ (PAR) و خصوصیات فتوسنتزی برگ گیاه انجام می‌شود (رابطه ۲):

$$A_{p \text{ gross}} = A_{\text{max}} \left(1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon_{\text{PAR}} \times \text{PAR}_{L,a}}{A_{\text{max}}}\right) \right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$A_{p \text{ gross}}$ حداکثر جذب و ماده‌سازی ناخالص ($\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$)، A_{max} حداکثر سرعت تثبیت ($\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$)، شیب اولیه یا راندمان مصرف نور ($\text{kg CO}_2 \text{ J}^{-1} \text{ absorbed}$)، و $\text{PAR}_{L,a}$ تابش فعال جذب‌شده ($\text{J m}^{-2} \text{ leaf d}^{-1}$) است. شبیه‌سازی فتوسنتز و جذب تابش بر اساس مقدار سطح برگ به منزله سطح جذب‌کننده تابش انجام می‌شود. بنابراین در هر گام زمانی مقدار سطح برگ از نتایج گام قبل برداشت می‌شود.

داده‌های مورد نیاز مدل شبیه‌سازی SWAP

داده‌های هواشناسی از ایستگاه هواشناسی کشت و صنعت مگسال واقع در ۵۰۰ متری محدوده مطالعه‌شده دریافت شد. این داده‌ها شامل دمای حداکثر و حداقل، رطوبت نسبی، سرعت باد، باران، و ساعت آفتابی است. زمان آبیاری جزء مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رشد گیاه و ورودی مدل SWAP است. از این رو دقت این متغیر باید در حد مناسب باشد. به منظور اندازه‌گیری این متغیر از اطلاعات موجود در کشت و صنعت هزارجلفا

1. Detailed module
2. Photosynthetic active radiation

شد. برای گیاه ذرت علوفه‌ای فقط مقدار کل ماده خشک گیاهی، به دلیل برداشت این گیاه قبل از رسیدن به انتهای دوره رشد، و برای گیاه چغندر قند، علاوه بر مقدار کل ماده خشک گیاهی، مقدار ماده خشک ذخیره‌ای (وزن خشک غده ریشه) شبیه‌سازی شد.

جدول ۲. داده‌های مورد نیاز مدل SWAP

داده	روش اندازه‌گیری	تناوب اندازه‌گیری	ذرت	چغندر
سطح برگ (LAI)	اندازه‌گیری آزمایشگاهی	۹-۱۱ بار	۸٫۸-۰٫۱ (m ² /m ²)	۳۶-۸٫۴ (m ² /m ²)
تراکم کاشت	اندازه‌گیری مزرعه‌ای	۹-۱۱ بار	۱۶-۱۰ (تعداد در m ²)	۱۱-۶ (تعداد در m ²)
عملکرد تولید نهایی	اندازه‌گیری مزرعه‌ای	۱ بار	۲۵-۱۶ (ton/ha)	۲۵-۲۴ (ton/ha)
مراحل توسعه و رشد گیاه	مشاهدات مزرعه‌ای	۱ بار	مراحل اولیه، توسعه، و نهایی رشد گیاه	
داده هواشناسی	ایستگاه هواشناسی مزرعه مجاور	روزانه	اطلاعات دمایی، رطوبت نسبی، تابش، باد، و باران	
بافت خاک	روش هیدرومتری	۱ بار در هر لایه از خاک	لوم رسی	
چگالی ظاهری	نمونه‌گیر استوانه‌ای مغزی	۱ بار در هر لایه از خاک	۱٫۴-۱٫۰ (g/cm ³)	
درصد مواد آلی	اطلاعات خاک‌شناسی مزرعه	۱ بار	۰٫۶۶-۰٫۵۵ (%)	
داده‌های هیدرولیکی	توابع انتقالی	۱ بار	داده‌های مورد نیاز مدل ون گنوختن و معلم	
عمق آبیاری	شدت آبیاری در زمان آبیاری	در هر آبیاری	۱۰-۴ (cm)	
تاریخ آبیاری	مشاهدات مزرعه‌ای	در هر آبیاری	شماره روز سال میلادی	
شوری آب آبیاری	EC متر	۱ بار	۰٫۶۱ (mg/cm ³)	

خطا^۲ (RMSE) و شاخص درصد خطای مطلق^۳ (PAE) محاسبه شد. میزان بهبود در برآورد عملکرد محصول با مدل SWAP به‌روزرسانی و با مقایسه شاخص‌های آماری مذکور در دو مرحله شبیه‌سازی مشخص شد.

یافته‌ها و بحث

برآورد عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای به وسیله مدل SWAP مقدار ماده خشک کل گیاه ذرت علوفه‌ای اندازه‌گیری شده همراه مقدار برآورد شده آن با مدل SWAP در دو مرحله شبیه‌سازی بدون به‌روزرسانی و با به‌روزرسانی و مقدار خطای هر مرحله در جدول ۳ می‌آید.

در گیاه ذرت علوفه‌ای، مدل SWAP (مرحله اول) عملکرد محصول را با متوسط درصد خطای ۲۷٫۴ درصد برآورد کرد و این برآورد اغلب بیشتر از واقعیت بود. دلیل بیش‌برآورد مدل شبیه‌سازی رشد گیاه در شرایط بهینه و عدم وجود عوامل محدودکننده رشد، از قبیل آفات و بیماری‌ها و کمبود مواد غذایی، بود (Kroes and van Dam, 2003). این در حالی است که در واقعیت همواره عوامل محدودکننده رشد وجود دارند که باعث می‌شوند رشد گیاه در حالت بهینه نباشد. در تحقیق‌های مشابه نیز این مدل عملکرد گیاه جو و پنبه و آفتابگردان را

در مرحله اول پس از آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز (هواشناسی، گیاهی، خاک، آبیاری) مدل SWAP بدون به‌روزرسانی اجرا و مقدار ماده خشک گیاهی برآورد شد. در مرحله دوم اجرای مدل، علاوه بر آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز مرحله اول، مقادیر شاخص LAI ماهواره‌ای در مدل SWAP به‌روزرسانی شد. به منظور تعیین LAI از تصاویر سنجنده MODIS ماهواره Terra، به دلیل داشتن تصویر روزانه و رایگان از منطقه، استفاده شد. مقدار LAI در قطعات مورد نظر با استفاده از شاخص گیاهی تعدیل شده خاک^۱ (SAVI) (Huete, 1988) و رابطه برتر به‌دست آمده در منطقه مطالعه شده (Badiehneshin et al, 2014) تعیین شد (رابطه ۴):

$$LAI = - \frac{\ln\left(\frac{3.8 - SAVI}{3.66}\right)}{0.018} \quad (\text{رابطه ۴})$$

به منظور به‌روزرسانی مدل SWAP، مقدار LAI ماهواره‌ای همراه شماره روز سال (سال میلادی) در فایل ورودی اصلی مدل SWAP، که قابلیت پذیرش داده‌های LAI ماهواره‌ای را دارد (Vazifedoust et al, 2009)، وارد شد. به‌روزرسانی مدل SWAP با فواصل پنج روزه در طول دوره رشد محصولات انجام شد. به منظور سنجش دقت مدل SWAP، خطای نتایج دو مرحله شبیه‌سازی با استفاده از شاخص مجذور میانگین مربع

2. Root Mean Square Error
3. Present Absolute Error

1. Soil adjusted vegetation index

و گندم را حدود ۱۰ درصد (Nahvinia et al, 2011) بیشتر از واقعیت برآورد کرده است.

حدود ۱۰ تا ۱۸ درصد (Verdinejad et al, 2010)، ذرت علوفه‌ای و گندم را حدود ۱۳ تا ۲۰ درصد (Noory et al, 2011)

جدول ۳. مقدار ماده خشک کل گیاه ذرت علوفه‌ای اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل

مقدار ماده خشک کل (ton/ha)		مقدار درصد خطا (%)		مقدار متوسط	شماره قطعاتی مطالعاتی
مدل SWAP	مدل SWAP	مدل SWAP	مدل SWAP		
۲۱,۷۰۲	۱۶,۸۳۸	-۳۰	-۱۰	۲۴,۱۳۰	P۲۰
۲۲,۶۷۱	۱۵,۷۰۴	-۲۰	+۱۵	۱۹,۶۶۳	P۲۱
۲۳,۰۱۳	۱۵,۸۰۸	-۲	+۴۲	۱۶,۱۶۶	P۲۸
۲۵,۲۳۵	۱۵,۴۴۱	-۲۱	+۳۰	۱۹,۴۴۲	P۲۹
۲۲,۹۲۹	۱۶,۵۱۵	+۱	+۴۰	۱۶,۴۳۲	P۵۸
۲۲,۹۲۹	۱۴,۷۴۱	-۶	+۴۶	۱۵,۶۷۳	P۵۹
۱۸,۶۵۳	۱۶,۲۳۷	-۳	+۱۲	۱۶,۶۸۹	P۶۶
۲۲,۳۳۱	۱۴,۱۶۹	-۲۱	+۲۴	۱۷,۹۵۳	P۶۷
۲۲,۴۳۳	۱۵,۶۸۲	*۱۲,۹	*۲۷,۴	۱۸,۲۶۸	

* متوسط مطلق درصد خطا

سامانه آبیاری مزارع (سامانه آبیاری عقربه‌ای)، انتظار می‌رود پوشش گیاهی در این سامانه آبیاری یکنواختی زیادی در رشد داشته باشد. در حالی که در بعضی قطعات به دلیل عدم یکنواختی در خاک این گونه نیست و قطعات مجاور عملکردی غیریکنواخت دارند (جدول ۳).

مدل SWAP به‌روز شده (مرحله دوم) عملکرد را با متوسط درصد خطای ۱۲,۹ درصد برآورد کرد. این تغییر در دقت شبیه‌سازی نشان می‌دهد به‌روزرسانی مدل با LAI ماهواره‌ای در گیاه ذرت علوفه‌ای باعث بهبود برآورد عملکرد محصول توسط مدل SWAP می‌شود. به عبارت دیگر، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای LAI باعث می‌شود تأثیر عوامل مختلف محدودکننده رشد گیاه، مانند آفات و عدم یکنواختی در پوشش گیاهی و مدیریت‌های آبیاری و زراعی، در مدل لحاظ شود. گفتنی است در بررسی میدانی در طول فصل رشد وجود آفات و عدم یکنواختی پوشش گیاهی در اراضی و مزارع مطالعه شده مشاهده شد.

در قطعه P۲۸ برای آبرسانی به سامانه آبیاری قسمتی از خاک مزرعه برای کارگذاری لوله دست خورده شده بود. در نتیجه پروفیل خاک تخریب شد. در این قسمت گیاه دارای رشد بسیار کم بود (جدول ۳). از طرفی مسیر دسترسی به مرکز سامانه آبیاری قسمتی از این قطعه است که در مدل در نظر گرفته نشده است. به دلیل تأخیر موجود در هنگام کاشت، دو

نتایج نشان می‌دهد در قطعه P۲۰ عملکرد محصول برآورد شده با مدل در مرحله اول کمتر از عملکرد واقعی است. دلیل این موضوع عدم تسطیح صحیح زمین در قسمتی از قطعه P۲۱ است. در این قسمت شیب زمین به گونه‌ای است که آب از قطعه P۲۱ به قطعه P۲۰ وارد می‌شود و در نتیجه قطعه P۲۰ آب بیشتری دریافت می‌کند که این مقدار آب دریافتی بیشتر در مدل در نظر گرفته نشده است و عملکرد این قطعه را کمتر از واقعیت شبیه‌سازی می‌کند. تغییرات مکانی و زمانی داده‌های آبیاری یکی از منابع مهم خطا در مدل SWAP است. این خطا در شرایط کاربرد مدل در اراضی و مزارع وسیع تأثیرگذارتر است (Vazifedoust, 2009; Singh et al, 2006). در دو قطعه P۲۰ و P۲۱ مقدار مطلق خطا در مرحله دوم نسبت به مرحله اول افزایش یافت. دلایل احتمالی این افزایش خطا برآورد اشتباه شاخص سطح برگ ماهواره‌ای و تعداد ناکافی نمونه عملکرد محصول ذرت به دلیل عدم یکنواختی در رشد است.

در بعضی قطعات، مانند قطعه P۲۸ و P۲۹ و P۵۸ و P۵۹، خطای مدل در مرحله اول شبیه‌سازی زیاد بود. ولی در مرحله دوم شبیه‌سازی (مدل SWAP به‌روز شده) به مقدار زیادی کاهش یافت. این اختلاف نشان‌دهنده یکنواخت نبودن رشد پوشش گیاهی در این قطعات است. عدم یکنواختی توسط داده‌های سنجهش از دور (شاخص LAI ماهواره‌ای) به‌خوبی وارد مدل شده و خطای آن تعدیل شد. گفتنی است با توجه به نوع

مکانی بالاتر از قبیل سنجنده‌های TM و ETM و ASTER ماهواره Landsat انجام شود، نتیجه‌ای بهتر به دست خواهد آمد. گفتنی است در صورت استفاده از تصاویر با دقت مکانی بیشتر هزینه به‌روزرسانی مدل شبیه‌سازی افزایش می‌یابد.

دامنه درصد خطا در مرحله اول از ۱۰- تا ۴۶+ درصد و در مرحله دوم از ۳۰- تا ۱+ درصد بود؛ که نشان‌دهنده کاهش مقدار خطاست. نتایج نشان می‌دهد در مرحله اول اغلب بیش‌برآورد عملکرد محصول و در مرحله دوم با اعمال شاخص سطح برگ اغلب کم‌برآورد عملکرد محصول با مدل SWAP انجام شده است. به دلیل دقت مکانی متوسط سنجنده MODIS (۲۵۰ در ۲۵۰ متر) شاخص سطح برگ ماهواره‌ای اغلب کمتر از مقدار واقعی آن است. از این رو در مرحله دوم اغلب کم‌برآورد عملکرد محصول توسط مدل SWAP انجام شده است.

برآورد عملکرد محصول چغندر قند به وسیله مدل SWAP

مقادیر اندازه‌گیری شده ماده خشک ریشه و ماده خشک کل گیاه چغندر قند همراه مقادیر برآورد شده با مدل SWAP در دو مرحله شبیه‌سازی، بدون به‌روزرسانی و با به‌روزرسانی، و مقدار خطای هر مرحله در جدول ۴ می‌آید.

طرف مسیر دسترسی دارای رشدی متفاوت بود. عملکرد به‌دست‌آمده در داده‌برداری مزرعه‌ای مربوط به دو طرف مسیر است؛ ولی مدل شبیه‌سازی قادر به در نظر گرفتن این تفاوت نیست. در نتیجه، عملکرد شبیه‌سازی شده به وسیله مدل مزرعه‌ای در قطعه P28 دارای خطای بالاست. ولی این خطا در مدل SWAP به‌روز شده با استفاده از LAI ماهواره‌ای بسیار کمتر شده است (جدول ۳).

در این تحقیق عملکرد نهایی محصول شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد آخرین تاریخ به‌روزرسانی (روز قبل از برداشت) تأثیر زیادی در دقت برآورد عملکرد محصول به وسیله مدل در مرحله دوم دارد. LAI ماهواره‌ای در قطعه P67، در آخرین به‌روزرسانی (محاسبه شده با رابطه ۳)، ۵/۹۳ متر مربع بر متر مربع بود. این در حالی است که مقدار واقعی این شاخص، که در مزرعه اندازه‌گیری شده، ۷/۵۰ متر مربع بر متر مربع بوده است. در صورتی که برای به‌روزرسانی از مقدار LAI اندازه‌گیری شده استفاده شود، مقدار خطای مدل از ۲۱- درصد به ۱- درصد خواهد رسید. این تغییر زیاد نشان می‌دهد اگر تصویر ماهواره‌ای دقت مکانی بیشتر و خطای کمتر داشته باشد، نتیجه مطلوب‌تر خواهد بود. به عبارت دیگر، اگر به‌روزرسانی با تصاویری با دقت

جدول ۴. مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده ماده خشک ریشه و کل گیاه چغندر قند

درصد خطای مدل (%)		مقدار ماده خشک گیاهی (ton/ha)		اندازه‌گیری شده	شماره قطعه	داده‌های شبیه‌سازی شده
مدل SWAP به‌روز شده	مدل SWAP	مدل SWAP به‌روز شده	مدل SWAP			
-۱۴	+۲۷	۲۱,۴۶۷	۳۱,۵۳۰	۲۴,۸۴۴	P۴۶	ماده خشک کل گیاه
+۲۴	+۳۸	۳۰,۲۴۶	۳۳,۶۹۰	۲۴,۴۲۴	P۵۵	ماده خشک کل گیاه
*۱۸,۷	*۳۲,۴	۲۵,۸۵۷	۳۲,۶۱۰	۲۴,۶۳۴	مقدار متوسط	ماده خشک کل گیاه
-۲۱	-۲۶	۱۴,۴۱۴	۱۳,۴۲۵	۱۸,۱۵۶	P۴۶	ماده خشک ریشه
-۳	-۱۹	۱۷,۷۴۹	۱۳,۹۴۳	۱۷,۲۶۱	P۵۵	ماده خشک ریشه
۱۱,۷*	۲۲,۶*	۱۶,۰۸۲	۱۳,۶۸۴	۱۷,۷۰۹	مقدار متوسط	ماده خشک ریشه

* متوسط مطلق درصد خطا

مرحله اول ماده خشک کل گیاه را بیشتر از واقعیت برآورد کرده است. این بیش‌برآورد، مشابه ذرت، به دلیل عدم یکنواختی پوشش گیاهی در قطعات و لحاظ‌نشدن عوامل محدودکننده رشد گیاه با مدل SWAP است. با وارد کردن LAI ماهواره‌ای در مرحله دوم این بیش‌برآورد به میزان زیادی بهبود یافت و اغلب در مرحله دوم کم‌برآورد وجود دارد. در قطعات مطالعه شده منحصراً در قطعه P۵۵ (گیاه چغندر قند) در مرحله دوم

در گیاه چغندر قند مدل SWAP (مرحله اول) مقدار ماده خشک کل را با متوسط مطلق درصد خطای ۳۲/۴ درصد برآورد کرده است؛ که پس از به‌روزرسانی (مرحله دوم) این مقدار به ۱۸/۷ درصد کاهش می‌یابد. روند تغییر مقدار ماده خشک ریشه هم به همین صورت بوده است و میزان متوسط مطلق خطا از ۲۲/۶ درصد در مرحله اول به ۱۱/۷ درصد در مرحله دوم کاهش می‌یابد. در گیاه چغندر قند نیز، مشابه ذرت، مدل SWAP در

شبیه‌سازی ماده خشک ریشه در مرحله اول کم‌برآورد (درصد خطای منفی) توسط مدل انجام شده است. این کم‌برآورد در مرحله دوم کاهش یافته است. می‌توان گفت نتیجه مرحله دوم بسیار مناسب‌تر از مرحله اول است.

میزان بهبود دقت در برآورد کل ماده خشک گیاهان توسط به‌روزرسانی LAI ماهواره‌ای

به منظور تعیین میزان بهبود برآورد عملکرد در مدل شبیه‌سازی SWAP، پس از به‌روزرسانی با شاخص سطح برگ ماهواره‌ای، از شاخص‌های درصد خطا و RMSE استفاده شد. مقدار این دو شاخص در برآورد ماده خشک گیاهی برای دو گیاه ذرت و چغندر قند در جدول ۵ می‌آید.

بیش‌برآورد دیده می‌شود که مقدار آن کمتر از بیش‌برآورد مرحله اول بود. می‌توان گفت نتیجه مرحله دوم بهتر از نتیجه مرحله اول بود (جدول ۳).

مدل SWAP دوره رشد گیاه را برای همه گیاهان به دو مرحله قبل و بعد از گل‌دهی تقسیم می‌کند و تا گیاه به دوره گل‌دهی نرسد از ماده خشک تولیدی درصدی را به اندام ذخیره‌ای اختصاص نمی‌دهد؛ در حالی که گیاه چغندر قند قبل از اینکه به مرحله گل‌دهی برسد برداشت می‌شود. بنابراین این محدودیت مدل نه تنها باعث می‌شود شبیه‌سازی عملکرد در طول دوره رشد بر نتایج واقعی منطبق نباشد، بلکه در پایان فرایند شبیه‌سازی نیز نسبت وزن خشک غده به وزن خشک کل گیاه کم برآورد شود (Khani et al, 2007). از این رو در

جدول ۵. مقدار شاخص RMSE و درصد خطا در برآورد ماده خشک کل محصولات در دو مرحله شبیه‌سازی

گیاه	مقدار عملکرد اندازه‌گیری شده (ton/ha)	مقدار RMSE (ton/ha)		متوسط مطلق درصد خطا (%)
		مدل SWAP به‌روزشده	مدل SWAP	
ذرت علوفه‌ای	۱۸,۲۶۸	۳,۵۴۳	۵,۱۶۳	مدل SWAP به‌روزشده ۱۲,۹
چغندر قند	۲۴,۶۳۴	۴,۷۵۹	۸,۰۸۰	مدل SWAP ۱۸,۷

منطقه مطالعه شده منجر به خطا در مرحله اول اجرای مدل شد. اندازه‌گیری دقیق این داده‌ها در سطح وسیع (مساحت هر قطعه حدود ۶ هکتار بود) مستلزم کار و هزینه زیاد است. تحقیق‌های مذکور در مزارع آزمایشی دارای یکنواختی نسبی بیشتر و کنترل شده از نظر مدیریت آبیاری و آفات بوده است؛ در حالی که تحقیق حاضر در سطح مزارع شبکه آبیاری و در سطح وسیع انجام شد.

پس از به‌روزرسانی مدل SWAP، نتایج برآورد عملکرد در گیاه چغندر قند و ذرت به ترتیب ۱۳,۷ و ۱۴,۵ درصد در مطلق درصد خطا و ۳,۳۲۱ و ۱,۶۲۱ تن بر هکتار در مقدار RMSE بهبود یافت. در تحقیقی مشابه، محققان توانستند عملکرد گندم را، پس از به‌روزرسانی مدل SWAP با داده‌های LAI مستخرج از سنجنده TM ماهواره Landsat از ۲۰,۷ به ۹,۳ درصد در درصد خطا برسانند. به عبارت دیگر برآورد عملکرد این گیاه را ۱۱,۴ درصد در کل سطح شبکه آبیاری بهبود دادند (Vazifedoust et al, 2009). آن‌ها، به منظور بررسی دقت مدل، نتایج مدل را با عملکرد محصول به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای در کل سطح شبکه مقایسه کردند. در تحقیق حاضر مقدار عملکرد محصولات در هر قطعه جداگانه (مزرعه به مزرعه) اندازه‌گیری و با نتایج مدل مقایسه شد. به عبارت دیگر، دقت مدل در هر قطعه

مدل SWAP عملکرد گیاه ذرت را با متوسط مطلق درصد خطای ۲۷,۴ درصد برآورد کرد. در تحقیق‌های مشابه مقدار درصد خطای برآورد ماده خشک در گیاه گندم حدود ۱۵ تا ۶۰ درصد (Singh et al, 2006; Eitzinger et al, 2004) بوده است. از طرفی مقدار RMSE در این تحقیق برابر ۵,۱۶۳ تن بر هکتار برآورد شده است که این آماره در سایر تحقیقات در حدود ۰,۳۲۰ تا ۱۲,۹۰۰ تن بر هکتار بوده است (Verdinejad et al, 2010; Noory et al, 2011). در مورد گیاه چغندر قند مدل SWAP توانسته است در مرحله اول عملکرد این گیاه را با متوسط مطلق درصد خطای ۳۲,۴ برآورد کند؛ که در تحقیق‌های مشابه در حدود ۱۰ درصد بوده است. مقدار RMSE در این تحقیق برای گیاه چغندر قند برابر ۸,۰۸۰ تن بر هکتار بود؛ که در تحقیق مشابه برابر ۵,۳۷۰ تا ۱۰ تن بر هکتار بوده است (Khani et al, 2007; Verdinejad et al, 2010). همان‌گونه که بیان شد، لحاظ‌نکردن عواملی از قبیل آفات و بیماری‌ها و عدم مدیریت صحیح توسط مدل باعث ایجاد خطا در مرحله اول شد. علاوه بر این، عدم قطعیت در برخی داده‌های گیاهی، مانند عمق توسعه ریشه، داده‌های خاک به دلیل استفاده از توابع انتقالی در تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک، و آبیاری به دلیل استفاده از اطلاعات سامانه‌های سنتریپوت موجود در

توسط مدل SAWP برآورد شد. درباره گیاه چغندر قند این مدل توانست عملکرد گیاه را با متوسط مطلق درصد خطای ۳۲/۴ و RMSE برابر ۸/۰۸۰ تن بر هکتار برآورد کند. پس از به‌روزرسانی مدل SWAP با داده‌های LAI ماهواره‌ای، نتایج برآورد عملکرد در گیاه چغندر قند و ذرت به‌ترتیب ۱۳/۷ و ۱۴/۵ درصد در متوسط مطلق درصد خطا و ۳/۳۲۱ و ۱/۶۲۱ تن بر هکتار در مقدار RMSE بهبود یافت. با به‌روزرسانی می‌توان خطاهای داده‌های ورودی مدل و عدم قطعیت آن‌ها را به میزان زیادی کاهش داد و با دقت مطلوبی عملکرد را در سطح وسیع و با تفکیک مزرعه به مزرعه برآورد کرد.

جداگانه و با دقت بالا بررسی شد. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر مقدار بهبود ۱۴ درصد در سطح تفکیک مزرعه به مزرعه بود، این دقت بسیار مطلوب‌تر از تحقیق قبل (Vazifedoust *et al*, 2009) است.

نتیجه‌گیری

لحاظ‌نکردن عواملی از قبیل آفات، بیماری‌ها، و عدم مدیریت صحیح توسط مدل و همچنین خطا در داده‌های ورودی مدل از قبیل آبیاری، خاک، و هواشناسی باعث ایجاد خطای زیاد در مدل SAWP شده است. عملکرد گیاه ذرت با متوسط مطلق درصد خطای ۲۷/۴ درصد و RMSE برابر ۵/۱۶۳ تن بر هکتار

REFERENCES

- Aggarwal, P. K., Kalra, N., Singh, A. K., and Sinha, S. K. (1994). Analyzing the limitations set by climatic factors, geotype, water and nitrogen availability on productivity of wheat I. The model description, parameterization and validation, *Field Crops Research*, 38(12), 73-91.
- Badieneshin, A. R. and Noory, H. (2013). Comparison investigations that done with the SWAP simulation model and determine the performance of this model. In: *The 1st national conference on solutions to access sustainable development in agriculture, natural resources and the environment (sdconf)*, 10 March, Department of the Interior, Tehran, Iran, pp. 853-858. (In Farsi)
- Badieneshin, A. R. and Noory, H. (2014). Calibration of leaf area index estimating equations in maize and sugar beet based on MODIS sensor satellite data (Qazvin irrigation network), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 44(1), 25-39. (in Farsi)
- Bonfante, A., Basile, A., Acutis, M., Mascellis, R., Manna, D., Perego, P., and Terribile F. (2010). SWAP, CropSyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in Northern Italy, *Agricultural Water Management*, 97(7), 1051-1062.
- Curnela, Y., Allard, J. W., Duveillerc, G., and Defourny, P. (2011). Potential performances of remotely sensed LAI assimilation in WOFOST model based on an OSS Experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1843- 1855.
- Dente, L., Satalino, G., Mattia, F., and Rinaldi, M. (2008). Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield. *Remote Sensing of Environment*, 112(4), 1395-1407.
- Diepen, C. A., Van Wolf, J., and van Keulen, H., (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use Manage*. 5(1), 16-24.
- Eitzinger, J., Trnka, M., Hosch, J., Zalud, Z., and Dubrovsky, M. (2004). Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecological Modelling* 171(3), 223-246.
- Ferencz, Cs., Bogнар, P., Lichtenberger, J., Hamar, D., Tarcsai, Gy., Timar, G., and Molnar, G. (2004). Crop yield estimation by satellite remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 25(20), 4113-4149.
- Godwin, D. C. and Jones, C. A. (1991). Nitrogen dynamics in soil-plant systems, In: R. J. Hanks, J. T. Ritchie (Eds.). *Modelling plant and soil systems*, Agron. Monog. 31, ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA.
- Khani, M., Davari, K., Alizadeh, A., Hashminia, H., and Zolfagharan, A. (2007). SWAP model assessment for simulating Sugar beet yield under different irrigation water quantities and qualities. *Water and Soil Science*, 1(2), 107-118. (In Farsi)
- Kroes, J. G. and Van Dam, J. C. (2003). Reference Manual SWAP version 3.03. (Ed). *Alterra-report: Alterra Green World Research* (Vol. 773). (pp.1-211). MI: Wageningen University and Research Centre.
- Huete, A. R. (1988). A soil- adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25(3), 295-309.
- Mo, X. and Liu, S. (2001). Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over the growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109(10), 203-222.
- Mo, X., Liu, S., Lin, Z., Xu, Y., Xiang, Y., and McVicar, T. R. (2005). Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling*, 183(2), 301-322.
- Mokhtari, J. (2012). *Development and application of a simple model (VSM) to estimate regional rice yield using satellite data*. M. Sc. Irrigation and Drainage, University of Gilan, Iran. (In Farsi)
- Mostafazadeh-fard, B., Mansouri Mousavi, H., and SF Feyzi, M., (2009). Effects of different levels of

- irrigation water salinity and leaching on yield and yield components of wheat in an arid region. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 135(1): 32-38.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resource Research*, 12: 513-522.
- Nahvinia, M. J., Shahidi, A., Parsinejad, M., and 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 Farsi)
- Noory, H., Liaghat, A. M., Parsinejad, M., and Vazifedoust, M. (2011). Evaluation of SWAP model in simulating yield of Wheat and Fodder Maize in simultaneous condition of water and salinity limitations (Case study: Voshmgir network, Golestan provinc). *Journal of Water and Soil*, 24(6), 1224-1235. (In Farsi)
- Noory, H., van der Zee, S. E. A. T. M., Liaghat, A. M., Parsinejad, M., and van Dam, J. C. (2011). Distributed agro-hydrological modeling with SWAP to improve water and salt management of the Voshmgir Irrigation and Drainage Network in Northern Iran. *Agricultural Water Management*, 98(6), 1062-1070.
- Ruiz, M. E. and Utset, A. (2003) Models for predicting water use and crop yields. *Report of college on soil Physics*. 323-328.
- Sehgal, V. (2002). Remote sensing for crop growth and crop simulation modeling. I.A.R.I: New Dehli.
- Singh, R., Van Dam, J. C., and Feddes, R. A. (2006). Water Productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India, *Agricultural Water Management*, 82(3), 253-278.
- Singh, U. K., Ren, L., and Kang, S. (2010). Simulation of soil water in space and time using an agrohydrological model and remote sensing techniques, *Agricultural Water Management*, 97(8), 1210-1220.
- Utset, A., Velicia, H., Delrio, B., Morillo, R., Centenio, J. A., and Martinez, J. C. (2007) Calibrating and validating an agrohidlogical model to simulate sugar beet water use under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 94(3), 11-21.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*. 44: 892-898.
- Vazifedoust, M., van Dam, J. C., Bastiaanssen, W. G. M., and Feddes, R. A. (2009) Assimilation of satellite data into agrohydrological models to improve crop yield forecasts, *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), 2523-2545.
- 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.
- Verdinejad, V. R., Sohrabi, T., Feizi, M., Heydari, N., and Araghinejad, SH. (2010). Patterning different crops yield with saline water irrigation condition using SWAP model. *Water and Soil Science*, 1(4), 11-97. (In Farsi)
- Wosten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A., and Le Bas, C. (1998). Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulations models in environmental studies and in land use planning. Report 156. DLO Winand Staring Centre, the Netherlands.