

## تعیین نیاز آبی محصولات ذرت علوفه‌ای و چغندر قند با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: دشت قرین)

حمیده نوری<sup>۱\*</sup>، علی مختاری<sup>۲</sup> و علیرضا بادیه نشین<sup>۳</sup>

(۱) استادیار گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران.

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [hnoory@ut.ac.ir](mailto:hnoory@ut.ac.ir)

(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران.

(۳) دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۸

### چکیده

تبخیر-تعرق (ET) یکی از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین اجزای بیابان آب و انرژی است. بر اساس روش پیشنهادی فائو، تبخیر-تعرق گیاه ( $ET_c$ ) از حاصل ضرب تبخیر-تعرق گیاه مرجع ( $ET_0$ ) در ضریب گیاهی حاصل می‌گردد، اما به دلیل ساده‌سازی در ترسیم منحنی رشد و ضریب گیاهی، برآوردهای صورت گرفته از میزان تبخیر-تعرق پتانسیل ( $ET_p$ ) بر اساس روش پیشنهادی فائو با واقعیت انطباق نداشته و برآورد هرچه دقیق‌تر میزان  $ET_p$  نیازمند اصلاح منحنی ضرایب گیاهی در هر منطقه است. در این تحقیق، منحنی‌های ضرایب گیاهی برای دو گیاه ذرت علوفه‌ای و چغندر قند با استفاده از دو روش مبتنی بر سنجش از دور شامل نسبت  $ET_p$  به  $ET_0$  (روش نسبت‌ها) و شاخص‌های گیاهی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های مادیس و لندست ۸ (OLI) و لندست ۷ (+ETM) استخراج گردید. در روش نسبت‌ها، ضرایب گیاهی پایه ( $K_{cb}$ ) و تک جزئی ( $K_c$ ) به ترتیب مستقیماً از نسبت تعرق پتانسیل ( $T_p$ ) (مدل (SWAP) و  $ET_p$ ) (مدل SWAP و معادله پرستلی-تیلور) به  $ET_0$  به دست آمد. منحنی ضرایب گیاهی حاصل از روش‌های فوق با استفاده از منحنی‌های شاخص سطح برگ که در سال زراعی ۲۰۱۲ با عملیات میدانی برداشت شده بود مورد ارزیابی قرار گرفتند.  $K_{cb}$  حاصل از روش شاخص‌های گیاهی انطباق مناسبی با روند واقعی رشد گیاه داشت ولی این روش در برآورد منحنی  $K_c$  محدود به مقادیر ارائه شده در فائو ۵۶ بود که روش پرستلی-تیلور با محاسبه مستقیم  $K_c$  از روش نسبت‌ها و استفاده از باند حرارتی ماهواره‌های لندست روند منطبق‌تری با واقعیت برای  $K_c$  نشان داد. به‌طور کلی با تدقیق منحنی ضریب گیاهی، برنامه‌ریزی آبیاری در طی دوره رشد گیاه با دقت بالاتری انجام می‌گیرد.

**کلید واژه‌ها:** تبخیر-تعرق پتانسیل، ضریب گیاهی، شاخص گیاهی ماهواره‌ای، پرستلی-تیلور، مدل SWAP

### مقدمه

در ضریب گیاهی ( $K_c$ ) معرفی نمودند.  $K_c$  نشان دهنده میزان رشد گیاه در طی زمان است، از این رو به آن منحنی رشد نیز می‌گویند و به دو صورت تک جزئی و دو جزئی قابل تعریف است (Allen et al., 1998). ضریب گیاهی تک‌جزئی با تقسیم  $ET_p$  بر  $ET_0$  در هر دوره از رشد گیاه، ترسیم می‌شود (رابطه ۱).

$$K_c = \frac{ET_p}{ET_0} \quad (1)$$

درصد بسیار زیادی از آب مصرفی گیاهان صرف تبخیر-تعرق (ET) می‌گردد. پس مدیریت صحیح آب در مزارع به برآورد دقیق ET هر گیاه وابسته است. Allen و همکاران (۱۹۹۸) در نشریه شماره ۵۶ فائو با ساده‌سازی منحنی رشد گیاه، تبخیر-تعرق گیاهی در شرایط پتانسیل ( $ET_p$ ) را برابر با حاصل ضرب تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_0$ )

نسبتاً بالایی به دست آورد. ولی این روش‌ها تنها ET نقطه‌ای را محاسبه می‌کنند و آن را نمی‌توان به یک منطقه گسترده تعمیم داد. از این رو به دلیل وجود چنین محدودیت‌هایی استفاده از سنجش از دور برای محاسبه ET<sub>p</sub> مورد توجه بیشتری قرار گرفت ( Bastiaanssen et al., 1998). استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای محاسبه K<sub>c</sub> مربوط به هر گیاه در مناطق مختلف یکی از سریع‌ترین و در عین حال دقیق‌ترین روش‌های موجود در مقیاس‌های وسیع است.

محققین بسیاری با استفاده از معادله بیلان انرژی و تلفیق آن با تکنیک سنجش از دور میزان ET<sub>c</sub> را محاسبه نمودند و نتایج قابل قبولی کسب کردند ( Bastiaanssen et al., 2002; Bastiaanssen et al., 1998; Jensen and Haise, 1963; Samani, 2000). در این تحقیقات تنها مقادیر ET<sub>c</sub> محاسبه شده است و منحنی K<sub>c</sub> مربوط به هر گیاه ارائه نگردید. مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه نیز با به‌کارگیری روابط پیچیده‌تر ولی در عین حال دقیق‌تر، میزان ET<sub>p</sub> را برآورد می‌نمایند. یکی از پرستفاده‌ترین آن‌ها مدل آگروهیدرولوژیکی SWAP است که با در نظر گرفتن بیلان آبی و به کارگیری معادله پنمن-مانتیت، ET<sub>p</sub> را برآورد می‌نماید (Kroes et al., 2008). معادله پنمن-مانتیت به عنوان مناسب‌ترین رابطه توسط فائو معرفی گردیده است (Allen et al., 1998). Jensen و همکاران (۱۹۹۰) ۲۰ فرمول مختلف را جهت برآورد ET<sub>c</sub> با استفاده از داده‌های لایسیمتری ۱۱ ایستگاه متفاوت در ۱۱ نقطه جهان با اقلیم‌های مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند و در نتیجه آن معادله پنمن-مانتیت را به عنوان دقیق‌ترین معادله برآورد ET<sub>c</sub> معرفی نمودند. اما از طرفی، محیط در هر دو بعد زمان و مکان متغیر است و مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه تنها یک واقعه را شبیه‌سازی می‌کنند. پس نیاز است با داده‌گذاری مشاهدات ماهواره‌ای مانند شاخص سطح برگ (LAI)، که به خودی خود منحنی رشد گیاه محسوب می‌شود، در مدل کالیبره شده SWAP، میزان تغییرات رشد گیاه را در دو بعد زمان و مکان وارد

در این رابطه ET<sub>p</sub> و ET<sub>0</sub> بر حسب میلیمتر هستند. ET<sub>p</sub> در این معادله مقدار حد بالای تبخیر-تعرق گیاه است، یعنی تبخیر-تعرق در شرایطی قرار دارد که هیچ محدودیت آبی، گیاهی، شوری، جانوری و یا بیماری بر روی رشد گیاه یا میزان ET مؤثر نباشد (Allen et al., 1998). در روش ضریب گیاهی دو جزئی دو عامل تعرق (T) و تبخیر (E) به صورت جداگانه وارد محاسبات می‌شوند. K<sub>c</sub> به دو ضریب گیاهی پایه (K<sub>cb</sub>) و ضریب تبخیر خاک خیس (K<sub>e</sub>) که به ترتیب بیان‌کننده بخش T و E هستند، تقسیم می‌گردد (رابطه ۲).

$$(K_{cb} + K_e) = \frac{ET_p}{ET_0} \quad (2)$$

در غیاب تنش آبی، K<sub>cb</sub> از نسبت تعرق پتانسیل (T<sub>p</sub>) به ET<sub>0</sub> دست می‌آید:

$$K_{cb} = \frac{T_p}{ET_0} \quad (3)$$

منحنی‌های K<sub>c</sub> و K<sub>cb</sub> با در اختیار داشتن طول مراحل چهار گانه رشد و ضرایب گیاهی دوره‌های آغازین، میانی و پایانی رشد برای هر گیاه قابل ترسیم است. منحنی K<sub>c</sub> منطبق با روش پیشنهادی فائو به دلیل ماهیت تجربی آن، در اقلیم‌های مختلف و تحت شرایط خاک متفاوت باعث ایجاد خطا در محاسبه ET<sub>p</sub> می‌گردد (Neale et al., 1990). این خطا منتج به کم برآورد و یا بیش‌برآورد نیاز خالص آبیاری (NIR) شده و در نتیجه برنامه‌ریزی‌های آبیاری را با مشکل مواجه می‌سازد. علاوه بر این به دلیل عدم انطباق نیاز خالص آبیاری با مقدار واقعی آن، هدررفت آب در بخش کشاورزی اجتناب‌ناپذیر است. از این رو تعیین دقیق منحنی K<sub>c</sub> مربوط به هر گیاه در مناطق جغرافیایی متفاوت یکی از بهترین راهکارهای مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی و استفاده بهینه از آن‌ها است (Kamble et al., 2013).

ET<sub>p</sub> را می‌توان با لایسیمترهای وزنی<sup>۱</sup>، تکنیک‌های همبستگی جریان ادی<sup>۲</sup> و روش نسبت بوون<sup>۳</sup> با دقت

<sup>1</sup> Weighing Lysimeter

<sup>2</sup> Eddy Correlation Techniques

<sup>3</sup> Bowen Ratio Technique

به‌طور کلی نیاز به محاسبه منحنی  $K_c$  بدون محدودیت استفاده از مقادیر ارائه شده در فائو ۵۶ و توسط تصاویر ماهواره‌ای احساس می‌گردد، به گونه‌ای که این روش در مقیاس منطقه‌ای نیز قابل اجرا باشد. هدف از انجام این تحقیق ارزیابی روش‌های برآورد ضریب گیاهی تک‌جزئی و پایه با روش‌های شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای مستخرج از تصاویر لندست و MODIS، معادله پرستلی-تیلور و داده‌گذاری داده‌های ماهواره‌ای در مدل آگروهیدرولوژیکی SWAP و مقایسه آن با روش پیشنهادی فائو است. همچنین ما در این تحقیق با استفاده از تصاویر حرارتی MODIS اقدام به محاسبه تبخیر-تعرق بدون نیاز به تبدیل تبخیر-تعرق لحظه‌ای به روزانه کردیم. علاوه بر این، تأثیر هر یک از روش‌های فوق در برآورد نیاز خالص آبیاری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه

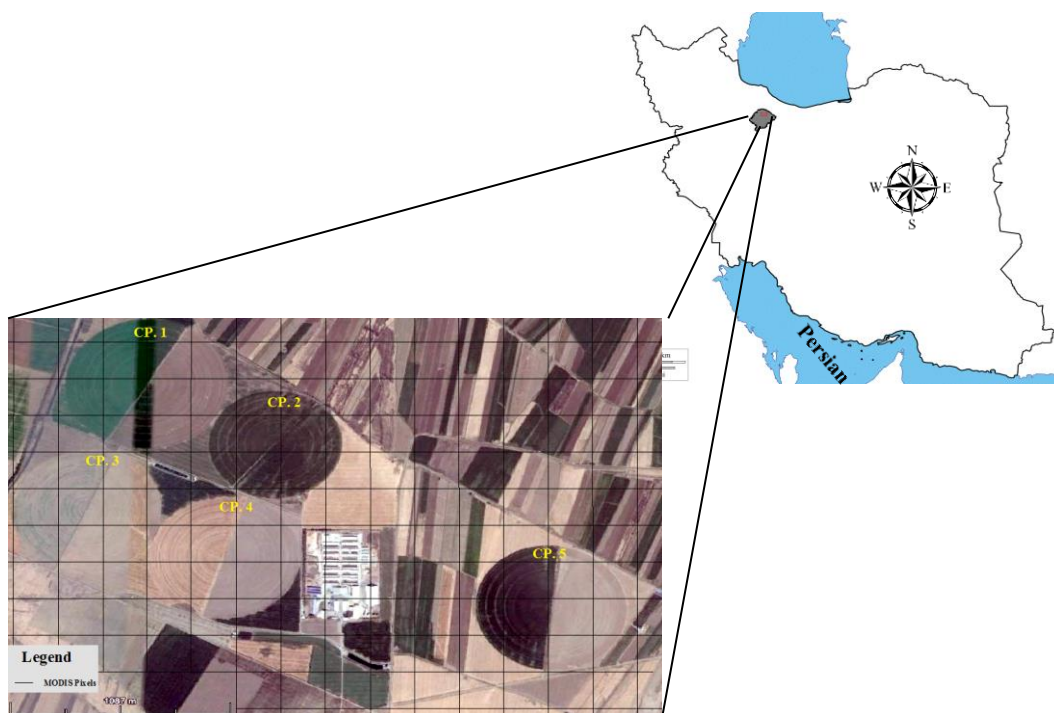
منطقه مورد مطالعه در شبکه آبیاری قزوین واقع است. مزارعی که در این تحقیق مورد مطالعه بودند از کشت و صنعت و دامپروری هزارجلفا، با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۸ دقیقه شمالی طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۱۱ دقیقه شرقی انتخاب گردید. این کشت و صنعت در قسمت شرقی شبکه آبیاری قزوین و در شهرستان آبیک واقع است و از شرق به روستای هزارجلفا، از جنوب به روستای عبدل آباد، از غرب به کشت و صنعت و دامپروری مگسال و از شمال با فاصله ۱۰ کیلومتری به شهر محمدیه منتهی می‌شود. کشت و صنعت هزارجلفا ۸۵۰ هکتار وسعت دارد و همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است شامل ۵ سیستم آبیاری عقربه‌ای (CP1) تا CP5) و چند سیستم آبیاری کلاسیک و ثقلی است. اقلیم این منطقه نیمه خشک، متوسط بارندگی سالانه ۲۵۰ میلی متر و متوسط تبخیر آن ۲۲۰۰ میلی متر است. محصولات این کشت و صنعت مشابه شبکه آبیاری قزوین است و در کشت پاییزه گندم و کلزا و در کشت بهار ذرت دانه‌ای و

مدل نمود و با دقت بالایی میزان  $ET_p$  را برآورد کرد. معادله پنمن-مانتیث به عنوان یک معادله ترکیبی (Combination) نیازمند داده‌های ورودی اعم از گیاهی و هواشناسی بسیار زیادی است. این داده‌ها در هر وضعیت و مکانی قابل دسترس نیستند، از این رو این معادله توسط محققین بسیاری ساده‌سازی شده است. معادله پرستلی-تیلور (Priestley and Taylor, 1972) تنها با استفاده از بخش شار انرژی معادله پنمن-مانتیث اقدام به برآورد  $ET_p$  می‌نماید. تصاویر ماهواره‌ای که حاوی باندهای الکترومغناطیس طیف حرارتی هستند قادر خواهند بود که شار انرژی جذب شده توسط پوشش گیاهی را با دقت مناسبی تخمین بزنند. Bastiaanssen و همکاران (۱۹۹۸) در الگوریتم سبال، نحوه محاسبه پارامتر  $ET_c$  را با استفاده از باندهای اپتیکی و حرارتی ماهواره‌های لندست بیان کرده است. Parodi و Gabriel (۲۰۰۲) در الگوریتم AHAS نشان دادند که استفاده از تصاویر لندست امکان اندازه‌گیری  $ET_p$  را توسط معادله پرستلی-تیلور در اختیار ما می‌گذارد.

شاخص‌های گیاهی مختلف از قبیل NDVI (Rouse et al., 1974)، Savi (Huete, 1988)، Wdvi (Clevers, 1988) و بسیاری دیگر، که با استفاده از دو باند قرمز و مادون قرمز نزدیک مربوط به سنجنده‌های مختلف قابل محاسبه هستند، بسط داده شده‌اند تا این امکان را فراهم کند که به خوبی و با دقت مناسب میزان پوشش سبز گیاهی مورد بررسی قرار گیرد. ضریب  $K_{cb}$  با استفاده از رابطه آن با شاخص‌های طیفی گیاهی (VI) - خصوصاً طیف‌های قرمز و مادون قرمز نزدیک که از تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آیند- قابل محاسبه است (Jackson et al., 1980). این روش برای محاسبه نیاز آبی گیاه توسط بسیاری از محققین استفاده شده است. نتایج حاصل از تحقیقات آنها نشان‌دهنده دقت قابل قبول این روش است (González-Dugo and Mateos, 2008; Mateos et al., 2013; González-Dugo et al., 2013; Melton et al., 2012; Kamble et al., 2013).

جغرافیایی ۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه و ۱۲ ثانیه شرقی در فاصله ۵۰۰ متر از منطقه مورد مطالعه واقع شده است.

علوفه‌ای و چغندرقد کاشته می‌شود. داده‌های هواشناسی از ایستگاه هواشناسی مگسال دریافت شد. این ایستگاه با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۹ دقیقه شمالی و طول



شکل ۱. مزارع تحت آبیاری سنتریوت‌های ۱ تا ۵. مربع‌های سیاه‌رنگ مربوط به پیکسل‌های MODIS می‌باشد و شماره مزارع به صورت CP. X با رنگ زرد مشخص شده‌اند

داخل مزرعه مورد مطالعه قرار گرفته است - به عنوان یک پلات تقریباً ۶ هکتاری در نظر گرفته شد و برای هر پیکسل ۳ زیرپلات نمونه برداری انتخاب گردید. نمونه‌برداری‌ها با روش تخریبی صورت گرفت که این کار هر ۷ تا ۱۰ روز انجام شد. نمونه‌ها در شرایط مناسب وارد آزمایشگاه شدند و با دستگاه سنجش سطح برگ (مدل DeltaT Device, UK) که میزان سطح برگ را از طریق عکس‌برداری از برگ محاسبه می‌کند اندازه‌گیری گردید (Jonckheere *et al.*, 2004) سطوح برگ اندازه‌گیری شده با توجه به مساحت زیرپلات نمونه‌برداری تبدیل به LAI شد. در آخر برای هر مزرعه سری زمانی LAI میدانی به دست آمد. این سری‌های زمانی نشان دهنده روند رشد گیاه در مزارع مورد مطالعه بودند و جهت بررسی میزان دقت نمودارهای ضرایب گیاهی مورد استفاده قرار گرفتند.

#### اندازه‌گیری‌های میدانی

گیاهان مورد مطالعه ذرت علوفه‌ای و چغندرقد بودند. ذرت علوفه‌ای (در سال ۲۰۱۲ در CP2 و CP5 کشت شده بود) و چغندرقد (در سال ۲۰۱۲ سمت غربی CP4 کشت شده بود) دو گیاه بهاره در منطقه هستند (شکل ۱). داده‌های میدانی استفاده شده در این تحقیق شامل پارامترهای هیدرولیکی خاک، پارامترهای گیاهی شاخص سطح برگ (LAI) و عملکرد خشک گیاهان ذرت و چغندرقد و مدت زمان و مقدار آبیاری بود. مشخصات داده‌های LAI، تاریخ‌های کاشت و برداشت، رقم گیاه و تاریخ و مقدار آبیاری اول مربوط به هر گیاه در جدول ۱ آورده شده است. پلات‌بندی برداشت LAI میدانی بر اساس پیکسل‌های مادیس انجام گرفت. به این صورت که هر پیکسل مادیس - که قسمت اعظم آن

جدول ۱. مشخصات LAI میدانی، تاریخ‌های کاشت و برداشت، رقم گیاه و تاریخ اولین آبیاری و مقدار آن برای گیاهان ذرت علوفه‌ای و چغندرقد.

نام گیاه	شماره مزرعه	تاریخ کاشت	تاریخ برداشت	رقم	تاریخ اولین آبیاری	عمق اولین آبیاری (cm)	تعداد نمونه‌ها	حداقل شاخص سطح برگ	حداکثر شاخص سطح برگ
ذرت علوفه‌ای	CP2	۳۱/۰۳/۱۳۹۱	۲۴/۰۷/۱۳۹۱	Single Cross 704	۰۴/۰۴/۱۳۹۱	۸	۱۳۲	۰/۰۱	۷/۶
	CP5	۱۳/۰۴/۱۳۹۱	۲۴/۰۷/۱۳۹۱	Single Cross 704	۱۷/۰۴/۱۳۹۱	۸	۷۲	۰/۰۱	۸/۸
چغندرقد	CP4	۱۹/۰۱/۱۳۹۱	۲۴/۰۷/۱۳۹۱	Iran 004	۲۱/۰۱/۱۳۹۱	۷	۵۴	۲/۲	۷/۸

چگالی ظاهری محاسبه شد ( Buckman and Brady, 1960). داده‌های آبیاری و میزان مواد آلی از دفاتر ثبت آبیاری و اطلاعات خاکشناسی کشت و صنعت هزارجلفا دریافت گردید. داده‌برداری مربوط به عملکرد خشک گیاه نیز همانند LAI صورت گرفت، با این تفاوت که تعداد زیر-پلات‌های هر پیکسل تا ۵ عدد افزایش داده شد. تمامی این داده‌ها برای واسنجی مدل SWAP مورد استفاده قرار گرفتند.

پارامترهای بافت خاک و چگالی ظاهری با استفاده از نمونه‌گیری در چهار لایه مختلف خاک تا عمق ۸۰ سانتی‌متری در مزارع برداشت شد (جدول ۲). نمونه‌ها به آزمایشگاه انتقال داده شدند و بافت خاک توسط روش هیدرومتری و مثلث بافت خاک تعیین گردید (Bouyoucos, 1962). نمونه‌برداری برای چگالی ظاهری با استفاده از نمونه‌گیر دستی انجام شد. نمونه‌های خاک وارد آزمایشگاه گردید، وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد و از تقسیم وزن خشک در حجم نمونه‌برداری مقدار

جدول ۲. مقدار میانگین مشخصات بافت خاک، چگالی ظاهری خاک و مقدار ماده آلی در ستریپوت‌های ۲، ۴ و ۵

نام مزرعه	عمق خاک	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	pb	ماده معدنی
CP2	۲۰-۰	۳۳/۳۱	۳۴	۳۲/۶۹	۱/۲	۰/۶۵
	۴۰-۲۰	۳۳/۶۷	۳۱	۳۵/۳۳	۱/۱۹	۰/۶۵
	۶۰-۴۰	۲۳/۹	۳۷/۵	۳۸/۶	۱/۳۲	۰/۶۵
	۸۰-۶۰	۲۷/۸۵	۳۲	۴۰/۱۵	۱/۳	۰/۶۵
CP4	۲۰-۰	۲۴	۲۸	۴۸	۱/۱۹	۰/۶
	۴۰-۲۰	۲۵/۱۸	۲۶	۴۸/۸۲	۱/۲۵	۰/۶
	۶۰-۴۰	۲۴/۵۴	۲۵	۵۰/۴۶	۱/۱۷	۰/۶
	۸۰-۶۰	۲۳/۳۶	۲۸	۴۸/۶۴	۱/۲۲	۰/۶
CP5	۲۰-۰	۲۸	۳۰	۴۲	۱/۲	۰/۵۵
	۴۰-۲۰	۳۱/۱۸	۲۹	۳۹/۸۲	۱/۲۴	۰/۵۵
	۶۰-۴۰	۳۱/۹	۲۹	۳۹/۱	۱/۳۸	۰/۵۵
	۸۰-۶۰	۲۸	۳۴	۳۸	۱/۱۹	۰/۵۵

مجموعه داده‌های هواشناسی و ماهواره‌ای

در این تحقیق برای محاسبه ضرایب گیاهی تک‌جزئی و پایه از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ ETM+، لندست ۸ OLI و تصاویر روزانه بازتابش سطح زمین و دمای سطح

زمین سنجنده MODIS و نیز مدل رقومی ارتفاعی استفاده گردید و داده‌های هواشناسی ایستگاه مگسال دریافت شد. جزئیات مربوط به این محصولات در جدول ۳ درج شده است.

جدول ۳. مشخصات مکانی و زمانی مربوط به داده‌های هواشناسی، مدل رقومی زمین و محصولات لندست و مادیس مورد استفاده در این تحقیق.

نام داده	منبع	نام محصول	قدرت تفکیک مکانی (متر)	قدرت تفکیک زمانی	تاریخ داده‌ها
داده‌های هواشناسی	ایستگاه مگسال	حداقل و حداکثر دمای روز حداقل و حداکثر رطوبت نسبی سرعت باد بارندگی	-	روزانه	۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲
مدل رقومی ارتفاعی	earthexplorer.usgs.gov	-	۳۰	-	-
لندست ۷	earthexplorer.usgs.gov	Land Surface Reflectance	۳۰	۱۶ روزه	۲۱ آوریل ۲۰۱۲ تا ۳۱ اکتبر ۲۰۱۲
دمای سطح زمین مادیس	reverb.echo.nasa.gov	MOD11A1 & MYD11A1	۱۰۰۰	روزانه	۲۱ آوریل ۲۰۱۲ تا ۳۱ اکتبر ۲۰۱۲
بازتابش سطح زمین مادیس	reverb.echo.nasa.gov	MOD09GQ	۲۵۰	روزانه	۲۱ آوریل ۲۰۱۲ تا ۳۱ اکتبر ۲۰۱۲

برآورد  $K_c$  و  $K_{cb}$  با استفاده از روش پیشنهادی فائو

منحنی‌های  $K_c$  و  $K_{cb}$  با در اختیار داشتن طول مراحل چهار گانه رشد و ضرایب گیاهی دوره‌های آغازین، میانی و پایانی رشد برای هر گیاه قابل ترسیم است.  $K_{cb, max}$  و  $K_{c, max}$  از نشریه ۵۶ فائو و همچنین طول مراحل چهارگانه رشد برای گیاهان مورد مطالعه با استفاده از جدول ۱۱ فائو و داده‌های منطقه‌ای به دست آمد (Allen)

(*et al.*, 1998).  $K_{c, max}$  و  $K_{cb, max}$  مربوط به دو گیاه ذرت علوفه‌ای و چغندر قند با استفاده از داده‌های هواشناسی سرعت باد و رطوبت نسبی مینیمم (روابط ۶۲، ۶۵ و ۷۰ نشریه ۵۶ فائو) برای منطقه مورد نظر اصلاح گردیدند. این ضرایب برای سه دوره ابتدایی، میانی و انتهایی هر گیاه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. ضرایب گیاهی پایه ( $K_{cb}$ ) و ضرایب گیاهی تک‌جزئی ( $K_c$ ) اصلاح شده دوره‌های ابتدایی، میانی و انتهایی رشد به همراه طول چهار دوره اصلی رشد مربوط به دو گیاه ذرت علوفه‌ای و چغندر قند (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

نام گیاه	شماره مزرعه	$K_{cb}$			$K_c$			دوره‌های رشد (روز)			
		$K_{cb, end}$	$K_{cb, mid}$	$K_{cb, ini}$	$K_{c, end}$	$K_{c, mid}$	$K_{c, ini}$	ابتدایی	توسعه	میانی	انتهائی
ذرت علوفه‌ای	۲	۱/۰۶	۱/۱۸	۰/۱۵	۱/۱۱	۱/۲۳	۰/۳	۱۸	۳۱	۳۸	۲۷
چغندر قند	۴	۰/۵۵	۱/۲	۰/۱۵	۰/۷۷	۱/۲۸	۰/۳۵	۳۰	۴۱	۶۱	۲۳

پتانسیل مربوط به خاک خیس و بدون پوشش گیاهی  $E_{p0}$  با استفاده از معادله پنمن-مانتیت محاسبه می‌شود. این پارامترها با ایجاد تغییر در مقاومت سطحی گیاه، ارتفاع گیاه و آلبیدو در معادله پنمن-مانتیت محاسبه می‌گردند. زمانی که پوشش گیاهی خیس است،  $\Gamma_{crop}$  برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. زمانی که پوشش گیاهی خشک است، با فرض اینکه آب به مقدار کافی در اختیار گیاه قرار دارد، مقدار  $\Gamma_{crop}$  بین  $30 \text{ s.m}^{-1}$  برای گیاهان زراعی و  $150 \text{ s.m}^{-1}$  برای گیاهان جنگلی منظور می‌شود (Allen *et al.*, 1989; 1986). زمانی که خاک خیس و بدون پوشش است،  $\Gamma_{crop}$  برابر با صفر و ارتفاع گیاه برابر با  $0.1$  سانتی‌متر منظور می‌شود. زمانی که گیاه در سطح زمین وجود دارد (خیس یا خشک) ضریب آلبیدو برابر با  $0.23$  و زمانی که خاک بدون پوشش است ضریب آلبیدو برابر با  $0.15$  فرض می‌شود.

سپس، تبخیر پتانسیل ( $E_p$ ) و  $T_p$  به صورت جداگانه با استفاده از مقادیر  $E_{p0}$ ،  $E_{T_{p0}}$ ،  $E_{T_{w0}}$  (روابط ۵ و ۶) محاسبه شده و  $E_{T_p}$  با جمع جبری دو مقدار  $T_p$  و  $E_p$  به دست می‌آید.

$$E_p = E_{p0} e^{-k_{gr} LAI} \quad (5)$$

$$T_p = (1 - W_{frac}) E_{T_{p0}} - E_p \quad \text{With } T_p \geq 0 \quad (6)$$

در این معادلات،  $k_{gr}$  = ضریب انقراض تابش خورشیدی برابر با  $0.39$ ؛  $LAI$  = شاخص سطح برگ گیاه ( $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ )؛  $W_{frac}$  = کسری از روز که گیاه خیس است و تابعی از  $E_{T_{w0}}$  و کسر میزان بارندگی روزانه‌ای است که به گیاه می‌رسد (Von Hoyningen-Hüne, 1983; Braden, 1985).

Badiyehneshtin و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از داده‌های میدانی  $LAI$ ، معادلات تجربی برآورد  $LAI$  را از شاخص‌های گیاهی حاصل از تصاویر MODIS برای گیاهان ذرت علوفه‌ای و چغندرقد در فصل زراعی ۲۰۱۲ دشت قزوین ارائه کردند. از این رو در این مطالعه، مقادیر  $LAI$  مربوط به کل دوره رشد گیاهان مربوطه با استفاده از

### برآورد $K_c$ و $K_{cb}$ با استفاده از روش نسبت‌ها

در این روش، ضریب  $K_c$  مستقیماً از تقسیم  $E_{T_p}$  به  $E_{T_0}$  (رابطه ۱) محاسبه گردید و ضریب  $K_{cb}$  از نسبت  $T_p$  به  $E_{T_0}$  (رابطه ۳) به دست آمد. مقادیر روزانه  $E_{T_0}$  با استفاده از داده‌های بلند مدت هواشناسی ایستگاه کليما تولوژی مگسال با روش پنمن-مانتیت محاسبه شد. روش نسبت‌ها به دو صورت مورد استفاده قرار گرفت: (۱) شبیه سازی  $T_p$  و  $E_{T_p}$  با استفاده از مدل اگرهیدرولوژیکی SWAP پس از عملیات داده‌گذاری داده‌های  $LAI$  ماهواره‌ای و تقسیم این دو پارامتر به  $E_{T_0}$  (۲) استخراج  $E_{T_p}$  از مدل پرستلی-تیلور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در برآورد تابش خالص و تقسیم آن به  $E_{T_0}$

**تعرق پتانسیل ( $T_p$ ) و تبخیر-تعرق پتانسیل ( $E_{T_p}$ ) با استفاده از مدل SWAP**

در مدل SWAP مقادیر روزانه  $T_p$  و  $E_{T_p}$  از معادله پنمن-مانتیت طبق رابطه ۴ محاسبه می‌گردد (مانتیت، ۱۹۶۵، ۱۹۸۱):

$$E_{T_p} = \frac{\frac{\Delta}{\lambda_w} (R_n \text{ day} - G) + \frac{P_1 \rho_{air} C_{air} e_{sat} - e_a}{\lambda_w} \frac{1}{r_{air}}}{\Delta + \gamma (1 + \frac{\Gamma_{crop}}{r_{air}})} \quad (4)$$

در این رابطه  $R_n \text{ day}$  = تابش خالص روزانه ( $\text{J.m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )؛  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار اشباع-دما ( $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$ )؛  $\lambda_w$  = گرمای نهان تبخیر ( $\text{J.kg}^{-1}$ )؛  $G$  = شار گرمای خاک ( $\text{J.m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )؛  $p_1$  = ضریب تبدیل واحد ( $\text{s.d}^{-1}$ )؛  $\rho_{air}$  = چگالی هوا ( $\text{kg.m}^{-3}$ )؛  $C_{air}$  = ظرفیت گرمایی هوای مرطوب ( $\text{J.Kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ )؛  $e_{sat}$  = فشار بخار اشباع ( $\text{kPa}$ )؛  $e_a$  = فشار بخار واقعی ( $\text{kPa}$ )؛  $\gamma$  = ضریب سایکرومتری ( $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$ )؛  $\Gamma_{crop}$  = مقاومت سطحی گیاه ( $\text{s.m}^{-1}$ )؛  $r_{air}$  = مقاومت آئروپنمیک ( $\text{s.m}^{-1}$ ).

بدین منظور، در مدل SWAP ابتدا تبخیر-تعرق پتانسیل مربوط به پوشش گیاهی خیس  $E_{T_{w0}}$  و خشک  $E_{T_{p0}}$  با پوشش کامل سطح خاک و همچنین نرخ تبخیر

واحد) با استفاده از رابطه آن با کسر پوشش گیاهی (FVC) با عنوان روش NDVI ساده شده به دست آمد (Sobrino *et al.*, 2008).

تمام پارامترهای معادله ۸ به صورت روزانه محاسبه شدند. اما جهت محاسبه  $ET_p$  روزانه با استفاده از روش پرستلی-تیلور به مقادیر روزانه  $R_L \uparrow$  نیاز است. از این رو در این مطالعه، محصول LST سنجنده MODIS از ماهواره‌های Terra و Aqua که حاوی دمای روز و شب سطح زمین هستند استفاده گردید (جدول ۳) تا میانگین آن‌ها به عنوان LST روزانه مورد استفاده قرار گیرد. ماهواره Terra در ساعات ۱۰:۳۰ ظهر و ۱۰:۳۰ شب و ماهواره Aqua در ساعات ۱:۳۰ بعد از ظهر و ۱:۳۰ بامداد به وقت محلی تصویربرداری می‌کنند. تصاویر MODIS به دلیل بزرگی پیکسل (۱۰۰۰ متر در ۱۰۰۰ متر) قابل استفاده در زمین‌های کشاورزی نیستند. از این رو، قدرت تفکیک مکانی میانگین روزانه LST حاصل از تصاویر MODIS با فرض ثابت بودن NDVI در طول روز و به دلیل وجود همبستگی بالا میان این شاخص با میانگین روزانه LST (Sun and Kafatos, 2007) با به کارگیری الگوریتم TsHARP (Kustas *et al.*, 2003; Agam *et al.*, 2007) افزایش داده شد. این الگوریتم با استفاده از یک رابطه خطی تجربی میان شاخص گیاهی NDVI و مقادیر LST اقدام به افزایش قدرت تفکیک مکانی می‌نماید.

برای استخراج منحنی روزانه  $K_c$  مربوط به هر گیاه، ابتدا سنتریوت‌هایی که تحت کشت محصولات ذرت علوفه‌ای و چغندر قند بودند، انتخاب شدند (به عنوان نمونه مرز سنتریوت شماره ۲ با دایره سیاه‌رنگ در شکل ۲ نشان داده شده است). ۵ تا ۶ پلی‌گن (نقطه‌چین‌های سفید رنگ) از نقاط مختلف هر مزرعه جدا گردید (شکل ۲) و  $ET_p$  برای هر کدام از آن‌ها محاسبه شد. سپس  $K_c$  با تقسیم  $ET_p$  مستخرج از مناسب‌ترین پلی‌گن، به  $ET_0$  پنمن-مانتیت به دست آمد. در آخر با استفاده از روش درونیابی خطی  $K_c$  روزانه استخراج گردید.

روابط ارائه شده برای هر مزرعه در خالص‌ترین پیکسل MODIS مربوط به هر محصول به صورت روزانه محاسبه گردید و با استفاده از روش به‌روزرسانی در مدل کالیبره شده SWAP داده‌گوازی (Assimilate) شد (Vazifedoust *et al.*, 2009). با این کار، مقادیر  $LAI$  که در محاسبات فوق استفاده می‌گردد، مقادیر واقعی تری نسبت به محاسبات مدل SWAP هستند، از این رو، مدل خروجی‌ای با دقت بالاتر ارائه می‌کند. در آخر پس از اجرای شبیه‌سازی‌های مدل برای خالص‌ترین پیکسل‌های MODIS و محاسبه دو پارامتر  $T_p$  و  $ET_p$ ، ضرایب  $K_{cb}$  و  $K_c$  به ترتیب با استفاده از روابط ۳ و ۱ محاسبه شدند.

#### تبخیر-تعرق پتانسیل ( $ET_p$ ) با استفاده از معادله

##### پرستلی-تیلور

استخراج  $ET_p$  از معادله پرستلی-تیلور برگرفته از دستور العمل ارائه شده توسط Gabriel و Parodi (۲۰۰۲) و با استفاده از سری زمانی تصاویر ماهواره‌های لندست و MODIS و داده‌های هواشناسی، محاسبه گردید:

$$ET_p = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{n \text{ daily}} \quad (7)$$

در این رابطه  $R_{n \text{ daily}}$  تابش خالص ( $\text{Watt.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ) از فرمول ارائه شده از موازنه تابش‌های ورودی و خروجی در سطح زمین طبق رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$R_{n \text{ daily}} = (1 - \alpha)R_s + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (8)$$

در این رابطه  $\alpha$  = ضریب آلبیدوی سطحی (بدون واحد) است که در این مطالعه با استفاده از بازتابش سطحی حاصل از تصاویر اپتیکی ماهواره لندست محاسبه گردید (Waters *et al.*, 2002)؛  $R_s$  = تابش خورشیدی سطح زمین ( $\text{Watt.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ )؛  $R_{L\downarrow}$  = تابش ورودی به سطح زمین با طول موج بلند ( $\text{Watt.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ )؛  $R_{L\uparrow}$  = تابش خروجی از سطح زمین با طول موج بلند ( $\text{Watt.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ )؛  $\epsilon_0$  = ضریب گسیلندگی سطحی<sup>۴</sup> (بدون

<sup>۴</sup> Surface Emissivity



از طرفی، با فرض اینکه فاصله میان بارندگی‌ها یا آبیاری‌ها زیاد باشد  $K_{cb}$  رابطه‌ای خطی با  $f_c$  خواهد داشت (Allen *et al.*, 2005b; Paço *et al.*, 2012). در ازای  $f_c=0$  مقدار  $K_{cb}$  حداقل است و در ازای  $f_c$  برابر با عددی کمی کوچک‌تر از ۱ مقدار آن حداکثر می‌باشد (Allen and Pereira, 2009). با در نظر گرفتن این فرضیه و واقعیتی که  $K_{cb}$  قبل از پوشش کامل زمین ( $f_{c,max}$ ) توسط گیاه به نقطه حداکثر خود می‌رسد رابطه ۱۴ درست خواهد بود (González-Dugo and Mateos, 2008):

$$K_{cb} = \min \left[ K_{cb,max}, \frac{K_{cb,max}}{f_{c,max}} (f_c) \right] \quad (10)$$

در این رابطه  $K_{cb,max}$  = مقدار ضریب گیاهی پایه حداکثر و  $f_{c,max}$  = حداکثر درصد پوشش زمین توسط گیاه است.  $f_{c,max}$  به ترتیب برای گیاهان ذرت علوفه‌ای و چغندرقد برابر با ۰/۸ و ۰/۸۵ در نظر گرفته شد (Andrieu *et al.*, 1997; Steduto *et al.*, 2012).

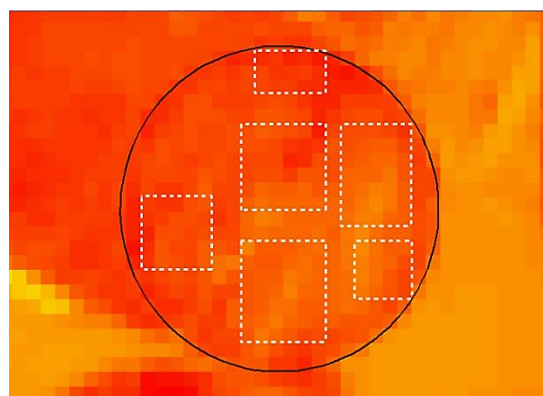
Mateos و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از مدل بیلان روزانه آبی منطقه توسعه ریشه ارائه شده در تحقیق González-Dugo و همکاران (۲۰۰۹) رابطه میان  $K_{cb}$  و  $K_c$  را به صورت روابط ۱۱ الف و ب بیان کردند:

$$K_c = K_{c,bare\ soil} + (1 - K_{c,bare\ soil}) K_{cb} \quad \text{if } K_{cb} < (11\text{الف})$$

$$K_c = 1 + \frac{K_{c,max} - 1}{K_{cb,max} - 1} (K_{cb} - 1) \quad \text{if } K_{cb} = 1 \quad (11\text{ب})$$

برای اینکه معادله در  $K_{cb}$  بزرگ‌تر از ۱ ادامه پیدا کند، یک خط مستقیم در نمودار  $K_{cb} - K_c$  از نقطه (۱،۱) تا نقطه ( $K_{cb,max}, K_{c,max}$ ) نشانگر رابطه میان این دو پارامتر خواهد بود. Allen و همکاران (۲۰۰۵a) در تحقیق خود بیان داشتند که مقدار  $K_{c,ini}$  در شرایطی تعیین می‌گردد که گیاه در ابتدای رشد است و خاک بدون پوشش گیاهی و یا با پوشش گیاهی بسیار کم است، بنابراین می‌توان  $K_{c,bare\ soil}$  را برابر با  $K_{c,ini}$  مستخرج از جدول ۱۲ نشریه فائو ۵۶ در نظر گرفت.

در محاسبه  $K_{cb}$  و  $K_c$  از شاخص گیاهی SAVI، از تصاویر سنجنده ETM+ لندست ۷ و سنجنده OLI لندست ۸ بهره گرفته شد و نحوه پلی‌گن‌بندی همانند



شکل ۲. نحوه پلی‌گن‌بندی در تصاویر لندست. این تصویر مربوط به لندست ۸ که مرز مزرعه با دایره سیاه‌رنگ مشخص شده است و پلی‌گن‌های تصادفی با خط‌چین سفیدرنگ

### برآورد $K_{cb}$ و $K_c$ با استفاده از شاخص‌های گیاهی

شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای، تعیین‌کننده میزان سلامت و رشد گیاه هستند. این شاخص‌ها اغلب با ترکیب دو باند قرمز و مادون قرمز نزدیک محاسبه می‌شوند. شاخص گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI) (Huete, 1988) یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها در تعیین پارامترهای گیاهی است. این شاخص در طی دوره رشد گیاه وابستگی شدیدی به تغییرات LAI (Moran *et al.*, 1995) و نسبت پوشش زمین توسط گیاه  $f_c$  (Heilman, 1991) دارد. از این رو، سری زمانی این شاخص را می‌توان به خودی خود یک منحنی رشد گیاه در نظر گرفت و بنابراین استخراج مقادیر  $K_{cb}$  از آن امکان‌پذیر خواهد بود (Neale *et al.*, 1987; Bausch and Neale, 1990). این شاخص رابطه خطی با تغییرات  $f_c$  در بازه بدون پوشش گیاهی تا پوشش کامل زمین توسط گیاه دارد (Huete *et al.*, 1985; Choudhury *et al.*, 1994; González-Dugo and Mateos, 2008). از این رو، در این تحقیق رابطه ۹ جهت تخمین  $f_c$  مورد استفاده قرار گرفت.

$$f_c = \frac{SAVI - SAVI_{min}}{SAVI_{max} - SAVI_{min}} \quad (9)$$

در این رابطه مقادیر  $SAVI_{min}$  و  $SAVI_{max}$  به ترتیب میزان SAVI برای  $f_c=0$  و  $f_c=1$  هستند.

### 5 Ground Cover Fraction

استخراج  $K_c$  و  $K_{cb}$  مورد استفاده قرار گرفتند که بهترین روند را برای تغییرات رشد گیاه نشان می‌دادند و کمترین ناخالصی را داشتند

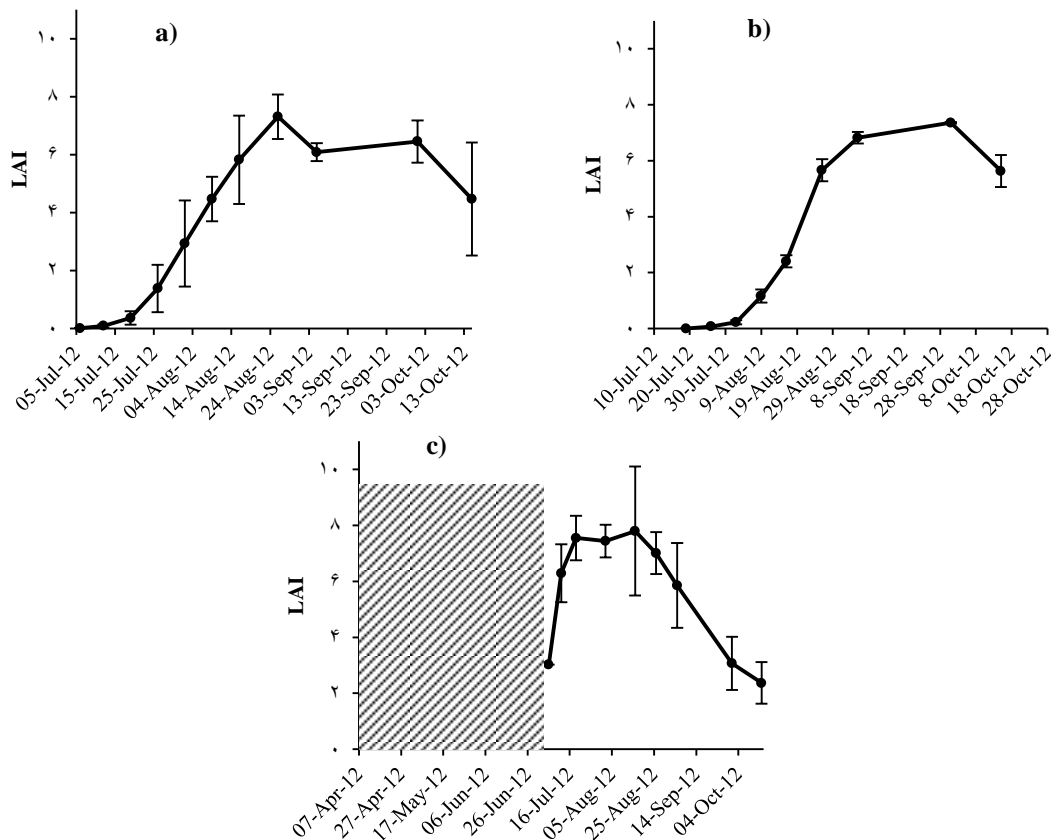
### نتایج و بحث

#### اندازه‌گیری‌های میدانی

#### شاخص سطح برگ (LAI)

نمودارهای تغییرات LAI هر یک از گیاهان مورد مطالعه در طی دوره رشد، در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.

بخش ۲-۵-۲ انجام گرفت (شکل ۲)، در این روش جهت مطالعه تغییرات رشد محصولات به صورت روزانه و پر نمودن گپ‌های حاصل از عدم دسترسی به پیکسل‌های سالم لندست، محصول روزانه بازتابش سطح زمین سنجنده MODIS، ماهواره Terra، MOD09GQ، (جدول ۳) نیز مورد استفاده قرار گرفت. پیکسل‌هایی که بخش اعظم آن‌ها داخل مزارع مورد مطالعه قرار داشتند، جهت استخراج شاخص SAVI استفاده شدند (شکل ۱). لازم به ذکر است که پیکسل‌هایی از MODIS برای



شکل ۳. نتایج برداشت‌های میدانی LAI در طول دوره رشد گیاهان (a) ذرت علوفه‌ای CP5 (دیر کاشت) (b) ذرت علوفه‌ای CP2 (زود کاشت) (c) چغندر قند CP4 مربوط به سال زراعی ۲۰۱۲. مناطق هاشور خورده نشان‌دهنده کمبود داده و نامعلوم بودن تغییرات شاخص سطح برگ (LAI) است.

ذرت علوفه‌ای CP2 کاشت شد که البته تاریخ برداشت هر دو در یک روز بود. همین اختلاف ۱۶ روزه در کاشت ذرت علوفه‌ای تفاوت قابل توجهی را در مرحله میانی و انتهای رشد گیاه ایجاد کرده است. در ذرت علوفه‌ای

ذرت علوفه‌ای دیر کاشت مربوط به مزرعه CP5 در فصل گرما (بهار) کشت شده است، از این رو دوره ابتدایی رشد آن حدود ۱۵ روز بیشتر به طول نیانجامید. ذرت علوفه‌ای CP5 (شکل ۳c) با فاصله ۱۶ روز دیرتر از

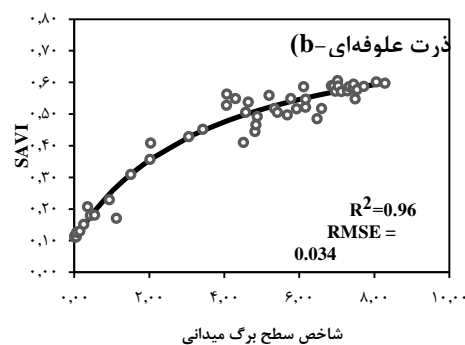
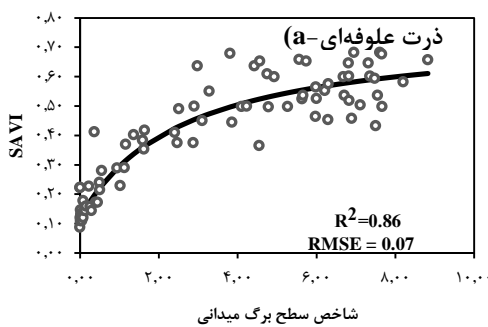
را مورد مطالعه قرار داد. در این تحقیق به دلیل ناخالصی پیکسل‌های MODIS، طبیعتاً ضریب تبیین پایین‌تری حاصل شد ( $R^2$  در ذرت علوفه‌ای برابر با ۰/۸۶ و ۰/۹۶ به ترتیب برای تصاویر MODIS و لندست). خالص بودن پیکسل‌های لندست مربوط به مزارع مورد مطالعه باعث شد که بازه تغییرات SAVI در طول فصل زراعی افزایش پیدا کند. اما در اکثر مواقع، روز نمونه‌برداری از سطح برگ گیاهان با روز تصویربرداری ماهواره‌های لندست یکسان نبود. بنابراین برای به دست آوردن LAI مربوط به روز عبور ماهواره‌های لندست از فراز منطقه مورد مطالعه، LAI میدانی به صورت خطی-وزنی در طول دوره رشد گیاهان مورد مطالعه درون‌یابی شد (Viña et al., 2011). همین عامل باعث شد تا LAI‌های میدانی، دچار خطاهای نسبی گردند و پراکندگی نقاط در مقابل شاخص SAVI مستخرج از تصاویر لندست بیشتر شود.

شاخص SAVI مستخرج از تصاویر لندست خصوصاً در LAI‌های بالا نسبت به SAVI مستخرج از تصاویر MODIS حالت خطی‌تری داشت. یعنی اینکه SAVI به دست آمده از MODIS در مقایسه با لندست در مقدار LAI پایین‌تری (حدود ۲/۵ مترمربع در مترمربع) اشباع می‌شود (زودتر اشباع می‌شود). بنابراین، با وجود قدرت تفکیک زمانی بالاتر تصاویر MODIS نسبت به لندست، کارایی لندست در تشخیص پوشش سبز گیاهی در طول دوره رشد گیاه نسبتاً بالاتر بود.

زودکاشت LAI آن به مدت ده روز پس از مقدار پیک در تاریخ ۵ سپتامبر ۲۰۱۲ به مقدار حدود ۱/۳ مترمربع بر مترمربع افت داشته است و در دوره انتهایی رشد در هر دو ذرت علوفه‌ای زودکاشت و دیرکاشت نیز به دلیل قطع آبیاری از دو تا سه هفته قبل از برداشت جهت آماده‌سازی زمین برای ورود ماشین آلات کشاورزی، میزان LAI کمی رو به کاهش می‌گذارد. دوره ابتدایی رشد چغندر قند نیز در دسترس نیست (شکل ۳e). مقدار حداکثر LAI چغندر قند حدود یک ماه از ۱۹ جولای تا ۱۶ آگوست به طول می‌انجامد و پس از آن سطح برگ گیاه کاهش می‌یابد و برداشت صورت می‌گیرد.

#### ارزیابی رابطه میان LAI و شاخص SAVI

رابطه میان LAI و SAVI در گیاه ذرت علوفه‌ای مربوط به سنجنده MODIS و ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ نشان داده شده است (شکل ۴). این رابطه به صورت تقریباً خطی است و این مفهوم را می‌رساند که تغییرات LAI در طول دوره رشد با تغییرات ضریب گیاهی پایه رابطه تقریباً خطی دارد. زیرا  $K_{cb}$  مستخرج از شاخص SAVI با استفاده از یک رابطه خطی به دست آمده است (روابط ۹ و ۱۰)، بنابراین روند تقریباً مشابهی با LAI خواهد داشت. مزیت تصاویر لندست نسبت به تصاویر MODIS بالاتر بودن قدرت تفکیک مکانی آن است. پیکسل‌های خالص در MODIS به ندرت یافت می‌شوند و می‌توان با استفاده از تصاویر لندست مزارع کوچک‌تری



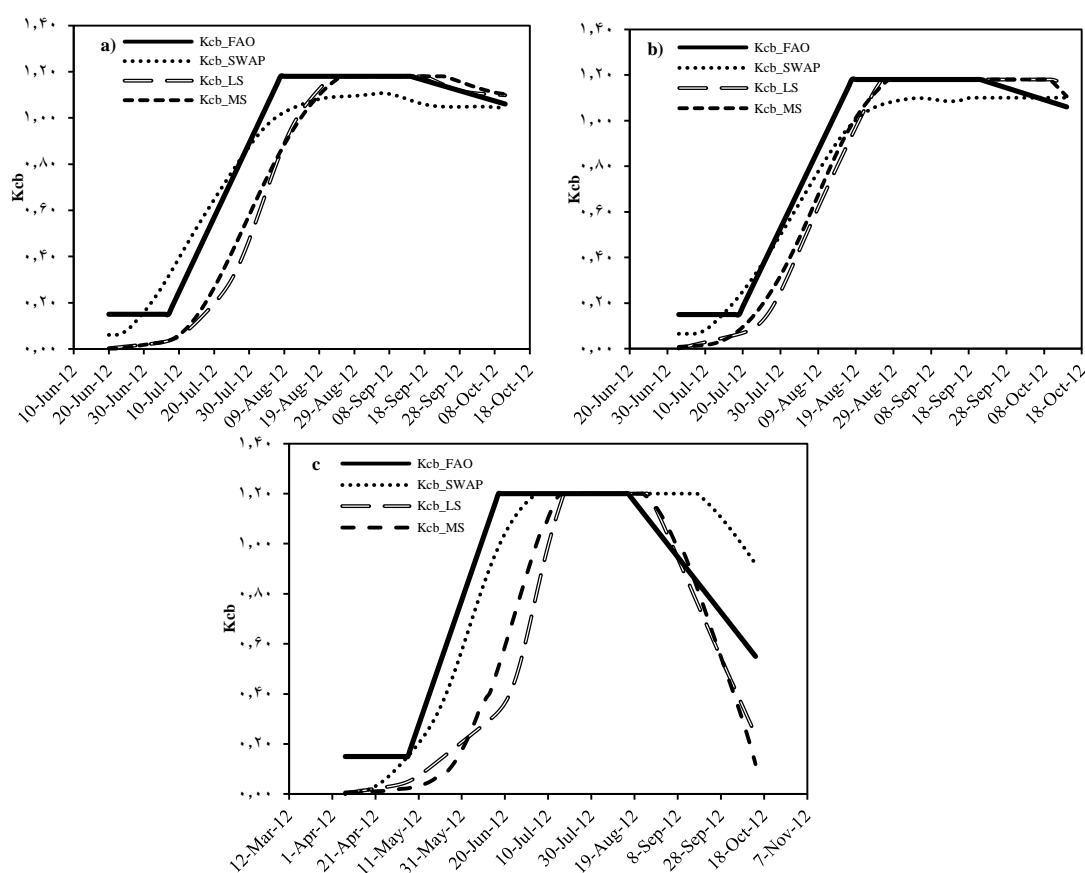
شکل ۴. رابطه میان LAI و SAVI برای تصاویر (a) MODIS و (b) لندست مربوط به ذرت علوفه‌ای در سال زراعی ۲۰۱۲ در کشت و صنعت

هزارجلفا دشت قزوین

ارزیابی منحنی‌های  $K_{cb}$ 

نتایج محاسبه  $K_{cb}$  گیاهان ذرت علوفه‌ای زودکاشت و دیرکاشت و چغندرقد از روش‌های پیشنهادی فائو، مشاهدات ماهواره‌ای (تصاویر لندست و MODIS) و نیز مدل SWAP در طول دوره رشد آن‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

نتایج تحقیق Mateos و González-Dugo (۲۰۰۸) نشان داد که نسبت  $fc$  به  $LAI$  رابطه خطی تری با شاخص  $SAVI$  دارد. پس در شرایط محاسباتی تحقیق حاضر،  $K_{cb}$  به صورت خطی از  $fc$  تبعیت می‌کند.



شکل ۵. منحنی‌های  $K_{cb}$  به دست آمده از روش‌های پیشنهادی فائو، مشاهدات ماهواره‌ای و مدل SWAP برای گیاهان (a) ذرت علوفه‌ای زودکاشت (b) ذرت علوفه‌ای دیرکاشت و (c) چغندرقد در سال زراعی ۲۰۱۲ مربوط به کشت و صنعت هزارجلفا در دشت قزوین

شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای از صفر ( $T_p=0$ ) شروع شد و به صورت تدریجی تا مرحله توسعه افزایش یافت و پس از ورود به مرحله توسعه شیب تغییرات  $K_{cb}$  افزایش یافت. در شکل‌های c5 و d5 شروع مرحله میانی رشد ذرت علوفه‌ای زودکاشت و دیرکاشت به ترتیب در روش پیشنهادی فائو در تاریخ ۸ آگوست و ۱۸ آگوست بود، جایی که مقدار  $LAI$  به ترتیب برابر است با ۴/۴۷ و ۲/۲۵ مترمربع در مترمربع، بنابراین با توجه به مقادیر  $LAI$

دوره ابتدایی رشد ذرت علوفه‌ای زود کاشت و دیر کاشت با توجه به شکل c3 و d3 به ترتیب تا حدود ۱۹ جولای و ۲ آگوست ادامه دارد و پس از آن وارد دوره توسعه می‌گردد. روش‌های پیشنهادی فائو و شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای این دوره را کمی کوتاه‌تر از واقعیت برآورد نمودند و روش SWAP دوره ابتدایی رشد را بسیار دور از واقعیت و کوتاه شبیه‌سازی کرد. روند تغییرات  $K_{cb}$  در مرحله ابتدایی رشد مربوط به روش

زود کاشت، میان‌کاشت و دیرکاشت ارائه شود تا باتوجه به تاریخ کاشت گیاه مربوطه، نمودار مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

داده میدانی LAI برای چغندر قند قبل از تاریخ ۶ جولای موجود نیست و در نمودار  $e^3$  به صورت هاشور خورده نشان داده شده است. مرحله میانی در روش پیشنهادی فائو از تاریخ ۱۷ جون تا ۱۶ آگوست بود که مقادیر LAI از حدود ۳ مترمربع در مترمربع تا  $7/8$  مترمربع در مترمربع تغییر می‌کند. این مقادیر نشان می‌دهد که تاریخ ۱۷ جون مربوط به نیمه‌های مرحله توسعه بوده است. از طرف دیگر مرحله میانی رشد مربوط به روش شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای از ۱۷ جولای تا ۲۵ آگوست بود که مقادیر LAI در این دو تاریخ  $6/5$  مترمربع در مترمربع بود. از این رو روش شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای عملکرد بهتری در برآورد مرحله میانی و توسعه رشد داشت. برداشت چغندر قند زمانی صورت می‌گیرد که هنوز مقداری از پوشش گیاهی سبز است، بنابراین مقدار  $K_{cb, end}$  برابر با صفر نخواهد بود. با توجه به شکل  $e^3$  مقدار نهایی LAI پایین‌تر از مقدار LAI در تاریخ ۶ جولای بود. بنابراین روش شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای در برآورد منحنی  $K_{cb}$  در طول فصل رشد چغندر قند تطابق بیشتری با واقعیت داشت.

در کل، منحنی‌های فائو تغییرات ناگهانی از یک مرحله رشد به مرحله دیگر را نشان دادند، در حالیکه در واقعیت روند رشد گیاه به صورت تدریجی صورت می‌گیرد که بسته به مرحله رشد شیب آن تغییر می‌نماید. به دلیل ماهیت داده‌های تصاویر ماهواره‌ای که به صورت مستمر روند رشد گیاه را مورد بررسی قرار می‌دهند و رابطه تقریباً خطی LAI با SAVI (شکل ۴)، منحنی‌های رشد حاصل از تصاویر ماهواره‌ای ماهواره‌ای به خوبی قادر به شبیه‌سازی مراحل رشد گیاه هستند. از طرف دیگر، مدل SWAP برخلاف روش شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای در برآورد  $K_{cb}$  دقت مناسبی ندارد، که مهمترین

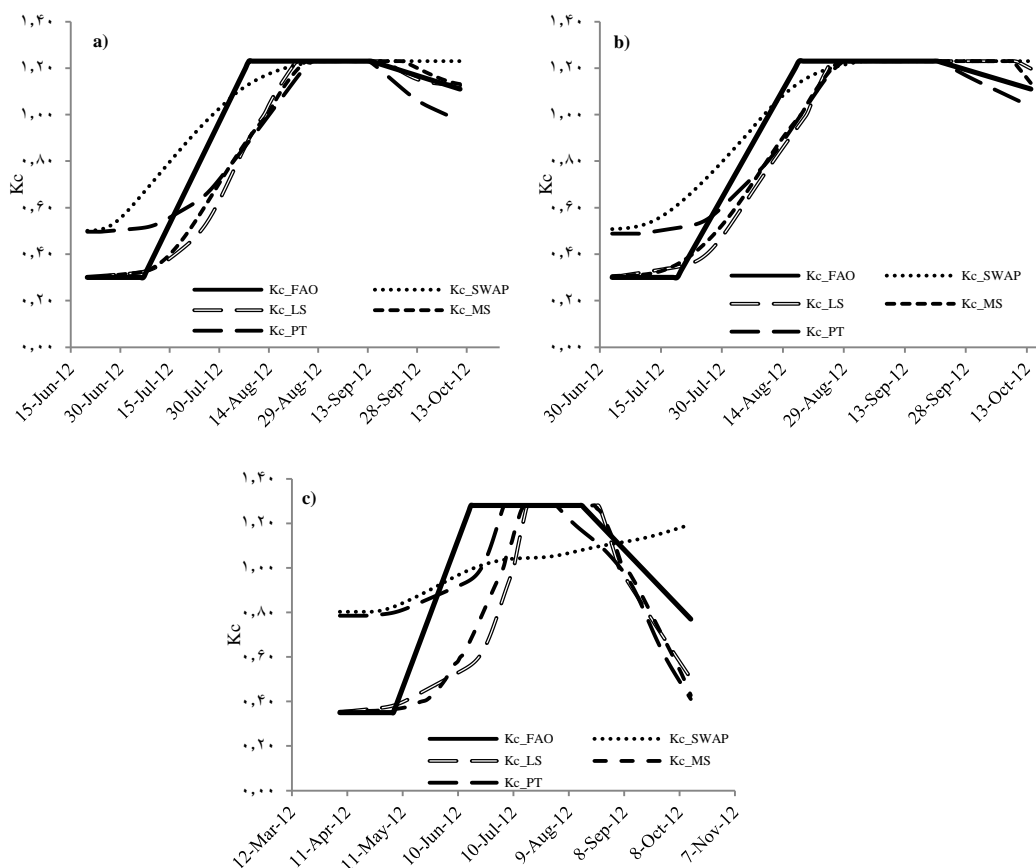
انتهایی (به ترتیب  $4/47$  و  $6/82$  مترمربع در مترمربع برای ذرت علوفه‌ای زودکاشت و دیرکاشت)، بنابراین سطح سبز گیاه به آن اندازه کاهش نمی‌یابد که باعث شود نمودار  $K_{cb}$  مربوط به روش پیشنهادی فائو در آخر فصل افت داشته باشد که شکل  $c5$  و  $d5$  خلاف آن را نشان می‌دهد. در حالی که روش شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای ابتدای مرحله میانی رشد را اواخر آگوست منظور کردند که LAI برای هر دو حدوداً برابر با  $5/7$  مترمربع در مترمربع بوده است. در نتیجه با توجه به مقادیر انتهایی LAI در شکل‌های  $c^3$  و  $d^3$ ، ذرت علوفه‌ای زودکاشت در دهه سوم سپتامبر نسبت به مقادیر ابتدایی LAI افت نمودار داشت و ذرت علوفه‌ای دیرکاشت نیز به میزان کمی در اواخر فصل رشد افت کرد. این افت در نمودار  $K_{cb}$  به دلیل قطع آبیاری و کاهش سطح سبز گیاه اتفاق افتاد که در روش شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای به خوبی شبیه‌سازی شده است. مدل SWAP در ذرت علوفه‌ای، همچنان میزان  $K_{cb, mid}$  را پایین‌تر از مقدار حداکثر برآورد نموده است. ذرت علوفه‌ای زمانی برداشت می‌شود که گیاه کاملاً سبز است، پس مقادیر  $K_{cb, end}$  به خوبی برآورد شده‌اند. در کل، روش شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای در برآورد منحنی  $K_{cb}$  ذرت علوفه‌ای بسیار بهتر از دیگر روش‌ها عمل کرد.

Allen و همکاران (۱۹۹۸) در نشریه ۵۶ فائو اذعان داشته‌اند که مدت زمانی که از کاشت تا پوشش کامل زمین به طول می‌انجامد بستگی به اقلیم منطقه، عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، رقم گیاه و تاریخ کاشت دارد. در این تحقیق ذرت علوفه‌ای مورد مطالعه، رقم گیاهان مختلف، شرایط اقلیمی، عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا یکسان است، پس با توجه به تفاوت عمده در نمودارهای ذرت علوفه‌ای زودکاشت و دیر کاشت می‌توان نتیجه گرفت که زمان کاشت گیاه یکی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل در روند رشد گیاه است. از این رو برای هر گیاه در هر منطقه بهتر است که سه منحنی رشد،

منحنی  $K_c$  به دست آمده برای گیاهان ذرت علوفه ای زودکاشت و دیرکاشت و چغندرقد از روشهای پیشنهادی فائو، مشاهدات ماهواره‌ای، مدل SWAP و روش پرستلی-تیلور در شکل ۶ نشان داده شده است.

دلیل آن وجود معادلات ریاضی است که به دلیل عدم شناخت کافی ما با واقعیت موجود در فرآیند تبخیر-تعرق، پیچیدگی آن و استفاده از ضرایب و معادلاتی که بسته به هر منطقه باید تغییر نماید، بسط داده شده‌اند.

### ارزیابی منحنی‌های $K_c$



شکل ۶. منحنی‌های  $K_c$  به دست آمده از روش‌های پیشنهادی فائو، شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای، مدل SWAP و معادله پرستلی-تیلور برای گیاهان (a) ذرت علوفه‌ای زودکاشت (b) ذرت علوفه‌ای دیرکاشت و (c) چغندرقد در سال زراعی ۲۰۱۲ مربوط به کشت و صنعت هزارجلفا در دشت قزوین.

MODIS روند یکسانی را در منحنی‌های رشد گیاهان مختلف نشان دادند و دقت تقریباً یکسانی را داشتند. همانند برآورد منحنی  $K_{cb}$ ، تغییرات  $K_c$  مستخرج از روش شاخص‌های گیاهی نیز نسبت به روش پیشنهادی فائو منطقی‌تر است و مراحل رشد گیاه با واقعیت انطباق بیشتری دارد. در مرحله ابتدایی رشد گیاهان که زمین خالی از سطح پوشش گیاهی است، بخش عمده  $ET_p$  را  $E_p$  تشکیل می‌دهد. Allen و همکاران (۱۹۹۸) در نشریه

منحنی‌های مستخرج از مدل SWAP به خوبی قادر به ترسیم دوره انتهایی رشد گیاه نیستند. برای مثال منحنی  $K_c$  به دست آمده از مدل SWAP مربوط به گیاه چغندرقد دیرکاشت، تنها روند افزایشی دارند و کاهش پوشش گیاهی سبز آن‌ها که منجر به کاهش  $ET_p$  می‌شود در نظر گرفته نشده است. این عامل به بالا بودن میزان  $T_p$  در اواخر دوره رشد گیاهان برمی‌گردد. در روش استفاده از شاخص‌های گیاهی، در اکثر موارد تصاویر لندست و

۵۶ فائو بیان کردند که مقدار  $K_{c, ini}$  تابعی از قدرت تبخیر اتمسفر، تناوب آبیاری و عمق آبیاری است. بنابراین محاسبه  $K_{c, ini}$  نیازمند داده‌های آبیاری و رطوبت خاک است، که به دست آوردن این داده‌ها در یک سطح وسیع و برای یک دوره رشد غیر قابل انجام خواهد بود. از این رو، به ناچار  $K_{c, ini}$  و به تبع آن  $K_{c, end}$  در روش شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای برای برآورد منحنی  $K_c$  شدیداً محدود به مقادیر تعیین شده توسط فائو ۵۶ هستند و از شرایط آب و هوایی و آبیاری و بارندگی منطقه تأثیر نمی‌پذیرد. برای رفع این مشکل برای محاسبه  $ET_p$  از معادله پرستلی-تیلور استفاده گردید. در روش پرستلی-تیلور علاوه بر باندهای متأثر از تغییرات سطح سبز گیاه، باندهای حرارتی، باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه (SWIR) و دمای هوا نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند (روابط ۱۱ و ۱۲). رطوبت خاک جاذب طیف‌های الکترومغناطیس در محدوده SWIR و محدوده مادون قرمز حرارتی است. بنابراین قدرت تبخیر اتمسفر با استفاده از دمای هوا و زمان و میزان آبیاری یا بارندگی با استفاده از باندهای SWIR و حرارتی وارد مدل شدند. بالاتر بودن  $K_{c, ini}$  محاسبه شده از روش پرستلی-تیلور نسبت به روش پیشنهادی فائو و روش شاخص‌های گیاهی در گیاهان ذرت علوفه‌ای و چغندر قند مربوط به آبیاری اول و همچنین کوددهی قبل از کاشت است. همانطور که جدول ۱ نشان می‌دهد، آبیاری اول ذرت علوفه‌ای و چغندر قند سنگین بود. پس میزان آلبیدو افت کرد و دمای خاک کاهش یافت، از این رو به ترتیب میزان جذب تابش خورشیدی سطح زمین افزایش و تابش با طول موج بلند خروجی از زمین کاهش یافت. نتیجتاً میزان  $ET_p$  محاسبه شده از معادله پرستلی-تیلور نسبتاً بیشتر گردید. آبیاری اولیه در فصل گرما، جایی که دما بالاتر است، انجام شده، بنابراین میزان تبخیر از خاک بالاتر بود، از این رو بخش تبخیر از مولفه  $ET_p$  نسبتاً بالاتر رفت و تأثیر آن بر روی  $K_{c, ini}$  بیشتر بود. در تمام گیاهان، بالا رفتن  $K_{c, ini}$

تا حدودی می‌تواند ناشی از اضافه نمودن ماده آلی (کود) به خاک و حتی تأثیرات تغییر در ساختمان آن به دلیل شخم زدن قبل از کاشت نیز باشد. مقدار و زمان آبیاری در مدل SWAP نیز منظور گردید، به همین دلیل  $K_{c, ini}$  مستخرج از آن نیز مقدار بالایی را نشان داد، اما به دلیل اینکه پارامتر LST در این مدل وارد نمی‌گردد (شکل ۶).

استفاده از تمامی باندهای اپتیکی سنجنده‌های OLI و ETM+ و همچنین به کارگیری طیف‌های الکترومغناطیس محدوده حرارتی روند تغییرات  $K_c$  را منطقی‌تر نمود و با شرایط منطقه منطبق‌تر کرد. مزیت عمده این روش در به کارگیری باندهای حرارتی بود که میزان تأثیر دما را در رشد گیاه به خوبی نشان داد.

باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه (SWIR) که در برآورد آلبیدو مورد استفاده قرار می‌گیرند تأثیر زیادی را از میزان آب در گیاهان و خاک می‌پذیرند و با هر آبیاری مقادیر آن کاهش پیدا می‌کند و تا حدی نیز بر میزان LST تأثیر گذار است. در نتیجه نوساناتی را در برآورد منحنی  $ET_p$  ایجاد می‌نماید. به همین دلیل، استخراج منحنی  $K_c$  با روش پرستلی-تیلور نیاز به آشنایی نسبتاً بالایی با رشد گیاهان مختلف و مدیریت مزارع در منطقه دارد. از سوی دیگر، روش پرستلی-تیلور این قابلیت را دارد که به دلیل وارد شدن پارامترهای محیطی بیشتر و محدود نشدن به مقادیر ارائه شده در فائو ۵۶ با حالت منطقی‌تری منحنی  $K_c$  را استخراج نماید.

در کل، منحنی‌های رشد حاصل از تصاویر ماهواره‌ای (شاخص‌های گیاهی و روش پرستلی-تیلور)، با وجود ضعف‌ها و محدودیت‌هایی که دارند می‌توانند جایگزین بهتری برای منحنی‌های رشد فائو باشند و به دلیل مشاهده مستمر تغییرات رشد گیاه و عوامل محیطی مؤثر بر آن، منحنی منطبق‌تری با واقعیت ارائه دهند. زیرا این منحنی‌ها با وجود اینکه به اندازه روش‌های لایسیمیتری دقت ندارند اما بدون نیاز به صرف هزینه‌های مالی کلان و وقت بسیار

همچنین نتایج نشان داد که زمان کاشت گیاه، تأثیر عمده‌ای بر روند تغییرات منحنی رشد آن دارد. تحلیل منحنی‌های  $K_e$  حاصل از روش‌های سنجش از دوری نشان داد که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (روش شاخص‌های گیاهی و روش پرستلی-تیلور) نسبت به دیگر روش‌ها، منحنی منطقی‌تر و منطبق با شرایط واقعی رشد گیاه ارائه می‌دهد. با واقعی‌تر نمودن تغییرات  $K_e$ ، علاوه بر بهینه نمودن نیاز خالص آبیاری در کل فصل رشد گیاهان، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در استخراج منحنی‌های رشد این امکان را می‌دهد که نیاز خالص آبیاری در هر کدام از دوره‌های رشد گیاه به‌میزان دقیق‌تری نسبت به روش فائو برآورد گردد و برنامه‌ریزی آبیاری با دقت بالاتری صورت پذیرد.

زیاد با روند معقول‌تری نسبت به منحنی‌های فائو به دست می‌آیند.

### نتیجه‌گیری

منحنی‌های  $K_e$  مربوط به گیاهان ذرت علوفه‌ای و چغندرقد با استفاده از روش پیشنهادی فائو، روش  $K_e$  تک جزئی و روش  $K_{cb}$  به دست آمد. منحنی‌های  $K_{cb}$  به دست آمده با استفاده از منحنی‌های LAI مزرعه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج ارزیابی‌ها حاکی از این بود که  $K_{cb}$  مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای روند مشابه‌تری با منحنی‌های LAI مزرعه‌ای دارند. نتایج حاصل از تصاویر لندست و مادیس تفاوت معنی‌داری نداشتند، از این رو، استفاده از تصاویر لندست به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالاتر و قدرت تفکیک زمانی مناسب پیشنهاد شد.

### منابع مورد استفاده

- Agam, N., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Li, F., and Neale, C. M. 2007. A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. *Remote Sensing of Environment*, 107(4), 545-558.
- Agron. J., 81, 650-662.
- Allen, R. G. 1995. Evaluation of procedures for estimating mean monthly solar radiation from air temperature.
- Allen, R. G., and Pruitt, W. O. 1986. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(2), 139-155.
- Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L., and Burman, R. D. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy journal*, 81(4), 650-662.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., and Wright, J. L. 2005. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 2-13.
- Allen, R. G., Walter, I. A., Elliott, R. L., Howell, T. A., Itenfisu, D., Jensen, M. E., and Snyder, R. L., eds. 2005b. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation, American Society of Civil Engineers, Reston, Va.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L., and Verma, S. B. 1983. *Microclimate: the biological environment*. John Wiley and Sons.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Raes, D., Smith, M., and Pereira, L. S. 2005a. Estimating evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soils information. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 14-23.
- Allen, R. G., and Pereira, L. S. 2009. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science*, 28(1), 17-34.
- Andrieu, B., Allirand, J. M., and Jaggard, K. 1997. Ground cover and leaf area index of maize and sugar beet crops. *Agronomie*, 17(6-7), 315-321.
- Bastiaanssen, W. G., Ahmad, M. U. D., and Chemin, Y. 2002. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resources Research*, 38(12).
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., and Holtslag, A. A. M. 1998. "A remote sensing surface energy balance algorithm for land SEBAL: 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213, 198-212
- Bausch, W.C., Neale, C.M.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Transactions of the ASAE* 30, 703-709. *Beständen. Schriftenreihe des DVWK* 57, 1-53.
- Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465
- Braden, H., 1985. Ein Energiehaushalts- und Verdunstungsmodell for Wasser und



- Choudhury, B. J., Ahmed, N. U., Idso, S. B., Reginato, R. J., and Daughtry, C. S. 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote sensing of environment*, 50(1), 1-17.
- Buckman, H. O., and Brady, N. C. 1960. The nature and properties of soils. *Soil Science*, 90(3), 212.
- Clevers, J. G. P. W. 1988. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 25(1), 53-69.
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 42, 294-299.
- Doherty, J. 2002. *PEST: Model-Independent Parameter Estimation*, 4 ed, Watermark Numerical Computing, Brisbane, Queensland.
- González-Dugo, M. P., and Mateos, L. 2008. Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops. *Agricultural water management*, 95(1), 48-58.
- González-Dugo, M. P., Escuin, S., Cano, F., Cifuentes, V., Padilla, F. L. M., Tirado, J. L., and Mateos, L. 2013. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. II. Application on basin scale. *Agricultural water management*, 125, 92-104.
- Gonzalez-Dugo, M. P., Neale, C. M. U., Mateos, L., Kustas, W. P., Prueger, J. H., Anderson, M. C., and Li, F. 2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(11), 1843-1853.
- Heilman, J. L., Heilman, W. E., and Moore, D. G. 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal*, 74(6), 967-971.
- Huete, A. R., Jackson, R. D., and Post, D. F. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote sensing of environment*, 17(1), 37-53.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.
- Iqbal M., (1983). "An Introduction to Solar Radiation". Iqbal, M. Editorial: Academic Press, Toronto, Canada.
- Irmak, S., Djaman, K., and Sharma, V. 2015. Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Evapotranspiration and Single (Normal) and Basal Crop Coefficients. *Transactions of the ASABE*, 58(4), 1047-1066.
- Jackson, R. D., and Huete, A. R. 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive veterinary medicine*, 11(3-4), 185-200.
- Jackson, R. D., Idao, S. B., Reginato, R. J., and Pinter, P. J. (1980). Remotely sensed crop temperatures and reflectances as inputs to irrigation scheduling.
- Jensen, M. E., and Haise, H. R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89, 15-41.
- Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G. 1990 *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., and Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and forest meteorology*, 121(1), 19-35.
- Kamble, B., Kilic, A., and Hubbard, K. 2013. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sensing*, 5(4), 1588-1602.
- Kroes, J. G., Van Dam, J. C., Groenendijk, P., Hendriks, R. F. A., and Jacobs, C. M. J. 2008. SWAP version 3.2. Theory description and user manual. *Alterra report*, 1649.
- Kustas, W. P., Norman, J. M., Anderson, M. C., and French, A. N. 2003. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. *Remote sensing of Environment*, 85(4), 429-440.
- Martínez-Ferri, E., Muriel-Fernández, J. L., and Díaz, J. A. 2013. Soil water balance modelling using SWAP: an application for irrigation water management and climate change adaptation in citrus. *Outlook on AGRICULTURE*, 42(2), 93-102.
- Mateos, L., González-Dugo, M. P., Testi, L., and Villalobos, F. J. 2013. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. *Agricultural water management*, 125, 81-91.
- McMahon, T. A., Peel, M. C., Lowe, L., Srikanthan, R., and McVicar, T. R. 2013. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4), 1331-1363.
- Melton, F. S., Johnson, L. F., Lund, C. P., Pierce, L. L., Michaelis, A. R., Hiatt, S. H., ... and Votava, P. 2012. Satellite irrigation management support with the terrestrial observation and prediction system: a framework for integration of satellite and surface observations to support improvements in agricultural water resource management. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(6), 1709-1721.
- Monteith, J. L. 1965. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Annals of Botany*, 29(1), 17-37.

- Monteith, J. L. 1981. Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107(451), 1-27.
- Moran, M. S., Maas, S. J., and Pinter Jr, P. J. 1995. Combining remote sensing and modeling for estimating surface evaporation and biomass production. *Remote Sensing Reviews*, 12(3-4), 335-353.
- Neale, C. M., Bausch, W. C., and Heermann, D. F. 1990. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Transactions of the ASAE*, 32(6), 1891-1900.
- Paço, T. A., Ferreira, M. I., Rosa, R. D., Paredes, P., Rodrigues, G. C., Conceição, N., and Pereira, L. S. 2012. The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model versus eddy covariance measurements. *Irrigation Science*, 30(2), 115-126.
- Parodi, N., and Gabriel, Ir. 2002. *AHVRR Hydrological Analysis System Algorithms and theory - Version 1.3*. John Wiley and Sons, NewYork.
- Priestley, C. H. B., and Taylor R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. In *Mon. Weather Rev.*
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Jr., Schell, J. A., and Deering, D. W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS-1 Symposium* (pp. 309-317). Washington, DC: NASA.
- Samani, Z. 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 265-267.
- Shao, L. W., Zhang, X. Y., Sun, H. Y., Chen, S. Y., and Wang, Y. M. 2011. Yield and water use response of winter wheat to winter irrigation in the North China Plain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 66(2), 104-113.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Soria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., and Martínez, P. 2008. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), 316-327.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., and Raes, D. 2012. *Crop yield response to water*. Roma: FAO.
- Sun, D., and Kafatos, M. 2007. Note on the NDVI- LST relationship and the use of temperature- related drought indices over North America. *Geophysical Research Letters*, 34(24).
- Vazifedoust, M., Van Dam, J. C., Bastiaanssen, W. G. M., 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.
- Viña, A., Gitelson, A. A., Nguy-Robertson, A. L., and Peng, Y. 2011. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3468-3478.
- Von Hoyningen-Hüne, J., 1983. *Die Interception des Niederschlags in landwirtschaftlichen*
- Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., and Bastiaanssen, W. G. M. 2002. *SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land): advanced training and user's manual*. Department of Water Resources, University of Idaho, Kimberly, 98p.
- Zhang, X., Pei, D., and Chen, S. 2004. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain. *Hydrol. Proc.*, 18(12), 2275-2287. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.5533>.



## Estimating water requirement of forage maize and sugar beet using remote sensing (case study: Qazvin plain)

Hamideh Noory<sup>1\*</sup>, Ali Mokhtari<sup>2</sup>, and Alireza Badiyeshin<sup>3</sup>

1) Assistance professor, Department of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, P. O. Box 4111, Karaj 31587-77871, Iran

\* Corresponding author: [hnoory@ut.ac.ir](mailto:hnoory@ut.ac.ir)

2) Master science's student of irrigation and drainage, Department of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, P. O. Box 4111, Karaj 31587-77871, Iran.

3) PhD science's student of irrigation and drainage, Department of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, P. O. Box 4111, Karaj 31587-77871, Iran.

Received: 29-04-2018

Accepted: 29-04-2019

### Abstract

Evapotranspiration (ET) is one of the key parameters in water and energy balance equation. According to FAO 56, crop evapotranspiration ( $ET_c$ ) is calculated from multiplying reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) by crop coefficient ( $K_c$ ). But, due to excessive simplification of  $K_c$  curve in the FAO approach, potential evapotranspiration ( $ET_p$ ) would be miscalculated. Therefore, accurate estimates of  $ET_p$  entail improving  $K_c$  estimates. In this study,  $K_c$  curves of early- and late-planted fodder maize and sugar beet were obtained based on two main satellite-based methods: (1) ratio approach (2) vegetation indices (VIs) approach. In the ratio approach, basal crop coefficient ( $K_{cb}$ ) and single crop coefficient ( $K_c$ ) was directly calculated from the ratio of potential transpiration ( $T_p$ ) to  $ET_0$  (using SWAP) and  $ET_p$  to  $ET_0$  (using SWAP and the Priestly-Taylor equation), respectively. The VI approach makes use of Landsat 7 (ETM+) and 8 (OLI) and also MODIS imagery in order to extract soil adjusted vegetation index (SAVI). The  $K_{cb}$  curves were evaluated against field measured leaf area index (LAI) in 2012 growing season. After each  $K_c$  curve was modeled, net irrigation requirement (NIR) was calculated on daily and season basis. Results showed that the SWAP approach was weak in estimating the  $K_{cb}$  and  $K_c$  curves especially at late-season stage. The VI approach could properly detect changes in vegetation cover during an entire growing season. But, when it came to  $K_c$  curve modelling, the VI approach was limited to the values given in FAO 56. However, the Priestly-Taylor approach compensated for the aforesaid limitation; therefore, yielded more sensible trends in  $K_c$  curves. Therefore satellite-based approaches derived from more realistic  $K_c$  curves during the entire growing season. Overall, making use of the satellite-based approaches could improve water management on regional scales.

**Keywords:** Crop coefficient; potential evapotranspiration; Priestly-Taylor; SWAP; vegetation indices