

واسنجی معادلات برآورد شاخص سطح برگ محصولات ذرت و چغندر قند با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجندۀ مودیس (شبکه‌آبیاری قزوین)

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

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

۲. استادیار پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱/۲۶)

چکیده

یکی از رایج‌ترین روش‌های تعیین تغییرات مکانی و زمانی شاخص سطح برگ (*LAI*) در مقیاس منطقه‌ای استفاده از معادلات تجربی مبتنی بر تفاضل نرمال‌شده بازتابش سطحی است. این تحقیق با هدف ارزیابی و واسنجی معادلات موجود در مراجع و بهینه‌سازی ضرایب این معادلات ریاضی برای برآورد *LAI* انجام گرفت. بدین منظور مقادیر *LAI* در طول دوره رشد سه محصول اصلی کشت تابستانه در شبکه‌آبیاری قزوین اندازه‌گیری و مقادیر *LAI* ماهواره‌ای با استفاده از شاخص گیاهی تعدیل‌شده خاک، حاصل از تصاویر سنجندۀ مودیس ماهواره تراه، تعیین شد. نتایج حاکی از خطای نسبی بالای معادلات موجود در مراجع در برآورد *LAI* در همه گیاهان مطالعه‌شده (مجدور میانگین مربعات خطا (*RMSE*) ۳-۴۷ متر مربع بر متر مربع) بود. در مجموع از میان معادلات اصلاحی به‌دست‌آمده در این تحقیق بهترین معادله، با داشتن مقدار *RMSE* برابر با ۱/۵۷ و ضریب تبیین برابر با ۰/۷۲، به عنوان برآوردکنندۀ *LAI* از تصاویر مودیس برای ترکیب سه گیاه به‌دست آمد.

کلیدواژگان: بهینه‌سازی، سنجش از دور، شاخص سطح برگ، شاخص گیاهی

مقدمه

پایش رشد و نمو گیاهی به منظور ارزیابی و مدیریت آبیاری و عملیات زراعی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، با هدف افزایش تولید، اهمیت زیادی دارد. در این میان، کارشناسان به شاخص‌های گیاهی، از قبیل شاخص سطح برگ، که بیانگر مقدار سطح فتوسنتزکننده گیاه و مصرف آب توسط گیاه (تبخیر و تعرق) و عملکرد محصول است، بسیار توجه می‌کنند (Wang *et al*, 2005). مقدار سطح برگ در یک متر مربع پوشش گیاهی با استفاده از شاخص سطح برگ^۱ (*LAI*) بیان می‌شود. در واقع، شاخص سطح برگ نسبت مساحت سطح فوقانی برگ‌های گیاه به مساحت سطح زمینی است که زیر برگ‌ها واقع است. این شاخص بُعد ندارد. بازۀ تغییرات آن در گیاهان مختلف متفاوت و حداقل و حداکثر مقدار آن به ترتیب در مرحله‌چندبرگی و پایان مرحله‌توسعه رشد است. این شاخص یکی از پارامترهای بسیار مهم هیدرولوژیکی و آگروهیدرولوژیکی است که برای کمی

ساختن پوشش گیاهی، تولید محصول، تبخیر و تعرق، نیاز آبیاری، و بسیاری از اجزای بیلان آب مورد نیاز است. از این رو تعیین آن بسیار اهمیت دارد.

روش‌های تعیین سطح برگ شامل دو گروه روش‌های مستقیم و غیر مستقیم است. مقدار سطح برگ در روش‌های مستقیم با جداسازی برگ از گیاه یا بدون جداسازی برگ از گیاه و با استفاده از دستگاه‌های سنجش سطح برگ تعیین می‌شود (Jonckheere *et al*, 2004). این دستگاه‌ها با استفاده از امواج فرسرخ برای تشخیص کلروفیل برگ یا با عکس‌برداری از برگ سطح برگ را تعیین می‌کنند. اندازه‌گیری مستقیم *LAI* زمان‌بر و پرهزینه و خسته‌کننده و در بسیاری از موارد مستلزم تخریب قسمتی از مزرعه است (Yang *et al*, 2006; Le Maire *et al*, 2011). این موارد در شرایطی که اندازه‌گیری *LAI* در مکانی بزرگ، مانند شبکه‌آبیاری، و در فواصل زمانی مختلف در مراحل رشد و توسعه گیاه انجام شود بسیار مهم است. روش‌های غیر مستقیم تعیین سطح برگ بر استخراج ارتباط سطح برگ و دیگر پارامترهای گیاهی استوار است که از آن جمله می‌توان به

* نویسنده مسئول: hnoory@ut.ac.ir

مدیریت‌های زراعی و آبی از آن استفاده می‌شود. دامنه تغییرات *NDVI* به صورت +۱ و -۱ است و با افزایش پوشش گیاهی مقدار آن افزایش می‌یابد. کاهش اثر اتمسفری و توپوگرافی و همچنین تصحیح تغییرات تابش ورودی خورشید از قابلیت‌های این شاخص است. شاخص *NDVI* تداخل بین خاک و گیاه در محدوده فرسوخ را برطرف نمی‌کند. برای رفع این مشکل از شاخص‌های دیگر استفاده شد (Huete, 1988; Fu-min et al, 2007; Yi et al, 2008; Le Maire et al, 2011; Nagler et al, 2011). شاخص *SAVI* برای بازیابی پوشش گیاهی و رفع معایب شاخص *NDVI* ارائه شد (Huete, 1988). مبنای نظری این شاخص بر پایه انتقال ساده تابش از زمین به ماهواره است و شاخص *SAVI* از نظر تئوری یکی از شاخص‌های بسیار خوب پوشش گیاهی است (Huete, 1988; Parodi and Gabriel, 2002).

اولین بار معادله برآورد *LAI* برای سه گیاه پنبه و ذرت و سویا ارائه شد (Choudhury et al, 1994). در این معادله شاخص *SAVI* محاسبه شده با تصویر سنجنده TM ماهواره لندست به کار رفت (رابطه ۱).

$$LAI = -\frac{\ln\left(\frac{a - SAVI}{b}\right)}{c} \quad (\text{رابطه ۱})$$

a و *b* و *c* ضرایب ثابت‌اند و مقادیر آن‌ها برای همه محصولات به ترتیب برابر ۰٫۶۹، ۰٫۵۹ و ۰٫۹۱ پیشنهاد شد (Choudhury et al, 1994). این معادله با مقادیر ضرایب پیشنهادی به عنوان معادله برآورد *LAI* تمام محصولات از تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (Gabriel and Parodi, 2002). این در حالی است که در تحقیقاتی دیگر مقادیر ضرایب این معادله برای گیاه ذرت در ایتالیا به ترتیب ۰٫۲۷، ۰٫۱۰ و ۰٫۲۰ (D'Urso and Santini, 1996) و در آمریکا ۰٫۶۸، ۰٫۵۰ و ۰٫۵۵ (Daughtry et al, 1992) به دست آمد. برخی محققان، به منظور بهبود برآورد *LAI*، به بررسی داده‌ها و محصولات سنجنده‌ها و شاخص‌های گیاهی مختلف پرداخته‌اند. آن‌ها، علاوه بر اصلاح ضرایب این معادله، معادلاتی متفاوت برای برآورد *LAI* از تصاویر ماهواره‌ای ارائه داده‌اند. محققان در اسپانیا، با استفاده از دو شاخص نسبت باند فرسوخ بر سرخ^۵ (*SR*) و *NDVI* به برآورد *LAI* گندم پرداختند (Aparicio et al, 2002). آن‌ها در تحقیق خود از بازتابش سنج دستی برای اندازه‌گیری

روش‌های تابش فعال فتوسنتزی^۱ (*PAR*)، روش وزنی، و روش سنجش از دور اشاره کرد (Jonckheere et al, 2004). در روش *PAR* با اندازه‌گیری مقدار تابش بالا و پایین گیاه مقدار تابش جذب شده گیاه تعیین و با استفاده از روش‌های محاسباتی سطح برگ برآورد می‌شود. در این روش سنسورهای ویژه و فناوری‌های خاصی نیاز است (Jensen, 2007; Zarate et al, 2012). در روش وزنی با اندازه‌گیری مقدار وزن خشک برگ مقدار سطح برگ تعیین می‌شود (Jonckheere et al, 2004). استفاده از این روش دشوار و در سطح وسیع بسیار وقت‌گیر است. سنجش از دور فناوری بسیار مفیدی است که با داشتن خصوصیتی نظیر دید وسیع و یکپارچه از یک منطقه، قابلیت تکرارپذیری، سهولت دسترسی به داده، دقت بالا، و صرفه‌جویی در زمان بر سایر روش‌ها ارجحیت دارد (Aparicio et al, 2002; Yang et al, 2006). در روش سنجش از دور با تعیین رابطه بین شاخص سطح برگ و شاخص‌های گیاهی^۲ (*VI*s)، که نتیجه ترکیب ریاضی باندهای الکترومغناطیسی هستند، شاخص سطح برگ تعیین می‌شود. از شاخص‌های گیاهی برای استخراج ویژگی‌های گیاهی همراه کاهش اثر خاک و شرایط اتمسفری و کاهش اثر سنسور استفاده می‌شود (Moulin and Guerif, 1999; Yang et al, 2006; Viña et al, 2011).

بسیاری از پارامترها مانند کلروفیل، ذرات رنگی، آب موجود در گیاه، شکل، و ساختار فیزیکی گیاه در بازتاب طیفی گیاهان تأثیر دارند. اما طرح کلی انعکاس گیاهان یکسان است. برگ گیاهان در باند سرخ میزان جذب بالا و در باند فرسوخ بازتابش بالا دارد (Turner et al, 1999; Peng et al, 2007). از شاخص‌های گیاهی بسیار مهم استخراج شده از این دو باند طیفی می‌توان به شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده^۳ (*NDVI*) (Tucker, 1979) و شاخص گیاهی تعدیل شده خاک^۴ (*SAVI*) (Huete, 1988) اشاره کرد (Peng et al, 2007; Gitelson et al, 2008). شاخص گیاهی *NDVI* به خصوصیات انعکاسی گیاهان در باندهای سرخ و فرسوخ نزدیک است. این شاخص معرف سلامتی و شادابی و تراکم پوشش گیاهی است (Tucker, 1979; Gitelson et al, 2008; Viña et al, 2011). شاخص گیاهی *NDVI* برای نمایش توده زنده (بیوماس) پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ، تولیدات گیاهی و تفکیک پوشش گیاهی بسیار مناسب است و در مسائل مرتبط با پوشش گیاهی مانند

1. Photosynthetically active radiation
2. Vegetation Index
3. Normalized difference vegetation index
4. Soil adjusted vegetation index

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 شد. این کشت و صنعت در قسمت شرقی شبکه آبیاری قزوین و در شهرستان آبیگ 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 محمدیه منتهی می‌شود. کشت و صنعت هزارجلفا ۱۰۰۰ هکتار وسعت دارد و شامل ۵ سیستم آبیاری عقربه‌ای (CP1 تا CP5) و چند سیستم آبیاری کلاسیک و ثقلی است. اقلیم این منطقه نیمه خشک، متوسط بارندگی سالیانه ۲۵۰ میلی‌متر و متوسط تبخیر آن ۲۲۰۰ میلی‌متر است. بافت خاک منطقه به صورت غالب لوم شنی است. محصول‌های غالب این منطقه مشابه شبکه آبیاری قزوین است. در کشت پاییزه جو، گندم، کلزا و در کشت بهار چغندر قند و ذرت کاشته می‌شود. به دلیل کمبود آب در کشت تابستانه سال زراعی ۱۳۹۰-۱۳۹۱ دو دستگاه آبیاری عقربه‌ای CP1 و CP3 خاموش بودند و محصول کشت نشد. اطلاعات گیاهان بررسی شده در این تحقیق در جدول ۱ می‌آید. طی این تحقیق، تصویر مودیس و تصویر ماهواره‌ای از منطقه (ماهواره اسپات) در تاریخ ۱۴ فروردین ۱۳۹۱ دریافت شد. این دو تصویر در نرم‌افزار ARC GIS ژئو رفرنس و بر هم تطابق داده شد. سپس مکان پیکسل‌ها به صورت شیپ فایل^۴ روی تصویر قرار داده شد. هر سیستم آبیاری عقربه‌ای به پیکسل‌های ۲۵۰ متری (مشابه پیکسل‌های سنجنده مودیس) تقسیم شد (شکل ۱). هر سیستم آبیاری شامل چهار پیکسل کامل بود که برای نمونه برداری از آن‌ها استفاده شد. به عبارت دیگر، در مجموع در سه سیستم آبیاری عقربه‌ای ۱۲ پیکسل برای نمونه برداری انتخاب شد. در شکل ۱ موقعیت مکانی پیکسل‌های بررسی شده در کشت و صنعت هزارجلفا می‌آید.

اندازه‌گیری مزرعه‌ای شاخص سطح برگ

به منظور نمونه برداری دو محدوده یک متر مربع از داخل هر پیکسل به صورت تصادفی انتخاب و بوته‌های آن قطع گردید. سطوح برگ‌ها با دستگاه سنجش سطح برگ مدل DeltaT

بازتابش استفاده کردند و معادلاتی با ضریب تبیین (R^2) ^۱ برابر ۰/۷۵ و ۰/۸۱ توسعه دادند. در تحقیقی معادله برآورد LAI برای گیاه گندم در چین با استفاده از شاخص گیاهی تفاضل (DVI)^۲ و تصاویر لندست - TM با دقت مکانی ۳۰ متر با R^2 برابر ۰/۸۲ و شاخص مجذور میانگین مربع خطا (RMSE)^۳ برابر ۰/۷۷ توسعه داده شد (Peng et al, 2007). محققان در شمال چین به ارزیابی تولیدات سنجنده مودیس به منظور برآورد LAI گندم پرداختند (Yi et al, 2008). معادله برتر تحقیق آن‌ها دارای R^2 برابر ۰/۶۵ و RMSE برابر ۰/۸۷ است. طی دو تحقیق در امریکا معادلات برآورد LAI گیاه ذرت و سویا توسعه داده شد (Viña et al, 2011; Nguy-Robertson et al, 2012). در این مطالعات معادلاتی با R^2 برابر ۰/۶۳ تا ۰/۹ و RMSE برابر ۰/۴۸ تا ۱/۱۷۶ برای دو گیاه بررسی شده با استفاده از تصاویر مودیس ارائه شد. محققان در کانادا به برآورد LAI با استفاده از شاخص‌های گیاهی با پایه حساسیت بالا پرداختند و معادلات برآورد LAI را با استفاده از شاخص‌های طیفی متفاوت محاسبه شده از تصاویر اسپات با R^2 برابر ۰/۹ ارائه کردند (Gonsamo and Pellikka, 2012).

بررسی مطالعات انجام شده در بسیاری از کشورها نشان می‌دهد معادلات برآورد LAI از تصاویر ماهواره‌ای و سنجنده‌های مختلف در هر منطقه متفاوت است. بنابراین استفاده از معادلات پیشنهاد شده در مراجع مختلف مستلزم واسنجی و صحت‌سنجی این معادلات است. از سنجنده‌های استفاده شده، سنجنده مودیس به دلیل داشتن محصولات متعدد نسبت به سایر سنجنده‌ها در موقعیت برتری قرار دارد و دسترسی آسان و بدون هزینه به محصولات این سنجنده کاربرد آن را در تحقیقات علمی و عملیاتی بسیار گسترده کرده است (Alavi-Panah, 2006). داشتن قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰×۲۵۰ متر در باندهای سرخ (۶۲۰ - ۶۷۰ نانومتر) و فرورسرخ (۸۴۱ - ۸۶۷ نانومتر) و تفکیک زمانی روزانه و بدون تأخیر قابلیت استفاده از این سنجنده را در اراضی کشاورزی مهیا می‌سازد. از این رو هدف این تحقیق دو بخش است: ۱. ارزیابی کارایی معادلات موجود در مراجع برای برآورد LAI با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس؛ ۲. ارائه معادله کارآمدتر برآورد LAI. این تحقیق در شبکه آبیاری قزوین در طول فصل کشت تابستانه انجام شد.

1. coefficient of determination
2. difference vegetation index
3. Root mean square error

4. Shape file

ذرت دانه‌ای در مرحله اول رشد، به دلیل تأخیر در آماده‌سازی امکانات، نمونه‌برداری انجام نشد. در گیاه ذرت علوفه‌ای، به دلیل اینکه برداشت محصول زودتر از پایان دوره رشد صورت می‌گیرد، در مرحله پایانی رشد فقط یک نمونه‌برداری انجام شد.

Device, UK که سطح برگ را از طریق عکس‌برداری از برگ محاسبه می‌کند اندازه‌گیری شد (Jonckheere et al, 2004). تاریخ نمونه‌برداری سطح برگ مزرعه‌ای برای هر گیاه بر اساس مرحله رشد گیاه در جدول ۲ می‌آید. برای گیاه چغندر قند و

جدول ۱. گیاهان بررسی شده همراه اطلاعات کشت آن‌ها

نام گیاه	رقم گیاه	سیستم آبیاری	وسعت مزرعه (هکتار)	تعداد پیکسل	تاریخ کشت	طول دوره رشد (روز)
ذرت علوفه‌ای	سینگل گراس	CP2	۳۷	۴	۲۸ خرداد	۱۲۰
ذرت علوفه‌ای	هیدو	CP5	۴۵	۴	۱۳ تیر	۱۰۵
ذرت دانه‌ای	ان اس	CP4	۲۲	۲	۲۳ اردیبهشت	۱۵۵
چغندر قند	ماریو	CP4	۲۲	۲	۱۹ فروردین	۱۹۰



شکل ۱. شبکه‌بندی مزارع آبیاری عقربه‌ای در منطقه مطالعه شده

جدول ۲. تاریخ نمونه‌برداری از سطح برگ بر اساس نوع گیاه و مرحله رشد

نام گیاه	مکان کشت	مرحله رشد گیاه			تعداد کل نمونه‌ها	
		اولیه	توسعه	میانی		
ذرت علوفه‌ای	CP2	۱۶ تیر، ۲۲ تیر، ۲۹ تیر	۵، ۱۲، ۱۹، ۲۶ مرداد	۵ و ۱۵ شهریور، ۱۰ مهر	۴۴	
ذرت علوفه‌ای	CP5	۲۹ تیر، ۵ مرداد	۲۶، ۱۹، ۱۲ مرداد، ۵ شهریور	۱۵ شهریور، ۱۰ مهر	۳۶	
ذرت دانه‌ای	CP4	-	۱۶ و ۲۲ تیر	۲۹ تیر، ۱۲ و ۲۶ مرداد	۱۵ و ۵ شهریور، ۱۰ و ۲۴ مهر	۱۸
چغندر قند	CP4	-	۱۶ و ۲۲ تیر	۲۹ تیر، ۱۲ و ۲۶ مرداد، ۵ و ۱۵ شهریور	۱۰ و ۲۴ مهر	۱۸

$$SAVI = \frac{(1+L) \times (\rho_{NIR} - \rho_{Red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{Red} + L)} \quad (\text{رابطه ۳})$$

معرفی معادلات ریاضی استفاده شده در برآورد LAI به منظور استخراج معادله جدید برآورد LAI، نوع معادلات ریاضی استفاده شده در سایر تحقیقات بررسی (Aparicio et al, 2002; Viña et al, 2011; Nguy-Robertson et al, 2012) و هشت نوع معادله ریاضی برای بررسی انتخاب شد (جدول ۳). در این معادلات VIs شاخص گیاهی ماهواره‌ای است و در این تحقیق شاخص SAVI استفاده شد.

پس از محاسبه مقادیر LAI ماهواره‌ای بر اساس مقادیر شاخص SAVI محاسبه شده با استفاده از ۷۰ درصد از داده‌های مزرعه‌ای اندازه‌گیری شده (جدول ۲) معادلات مورد بررسی واسنجی و ضرایب بهینه این معادلات تعیین شد. لینگو نرم‌افزاری جامع و فراگیر برای حل بسیاری از مدل‌های بهینه‌سازی خطی و غیر خطی در برنامه‌ریزی مسائل است. از این رو، در این تحقیق برای استخراج ضرایب بهینه معادلات از این نرم‌افزار استفاده شد. در بهینه‌سازی ضرایب هر یک از معادلات بررسی شده، تابع هدف حداقل کردن شاخص RMSE بین مقادیر LAI برآوردی توسط معادله (جدول ۳) و مقادیر LAI اندازه‌گیری شده تعریف شد. پس از استخراج ضرایب بهینه و با استفاده از ۳۰ درصد باقی‌مانده داده‌های اندازه‌گیری شده، معادلات بررسی شده صحت‌سنجی شد. به منظور نشان دادن دقت برآورد معادلات از شاخص‌های آماری RMSE (متر مربع بر متر مربع) در مرحله واسنجی و از شاخص R^2 و دو شاخص قبلی در مرحله صحت‌سنجی استفاده شد (رابطه ۴ و ۵). بهترین معادله از معادلات بررسی شده بر اساس شاخص‌های آماری مذکور تعیین شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (P_j - O_j)^2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{j=1}^m (P_j - P)(O_j - O)]^2}{\sum_{j=1}^m (P_j - P)^2 \sum_{j=1}^m (O_j - O)^2} \quad (\text{رابطه ۵})$$

P_j مقدار سطح برگ برآورد شده توسط معادله (متر مربع بر متر مربع)، O_j مقدار سطح برگ واقعی اندازه‌گیری شده (متر مربع بر متر مربع)، O متوسط سطح برگ اندازه‌گیری شده (متر مربع بر متر مربع)، P مقدار متوسط سطح برگ برآورد شده با معادله (متر مربع بر متر مربع) و m تعداد نمونه است.

به طور کلی از سطح برگ ذرت علوفه‌ای CP2 یازده مرتبه، ذرت علوفه‌ای CP5 نه مرتبه، و چغندر CP4 نه مرتبه در کل مراحل رشد نمونه‌برداری شد. در مجموع ۱۱۶ نمونه از سطح برگ اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

استخراج شاخص سطح برگ از تصاویر ماهواره‌ای مودیس سنجنده مودیس یکی از سنجنده‌های اصلی ماهواره ترا است که تصویربرداری آن در مارس سال ۲۰۰۰ شروع شد. این سنجنده به دلیل داشتن محصولات متعدد نسبت به سایر سنجنده‌ها در موقعیت برتری قرار دارد و دسترسی آسان و بدون هزینه به محصولات این سنجنده کاربرد آن را در تحقیقات علمی و عملیاتی بسیار گسترده کرده است (Alavi-Panah, 2006). در این تحقیق محصول MOD09GQ سنجنده مودیس با قدرت تفکیک مکانی 250×250 متر در باندهای سرخ ($620 - 670$ نانومتر) و فرورسرخ ($841 - 867$ نانومتر) و تفکیک زمانی روزانه استفاده شد. این محصول به صورت رایگان روی تارنمای اینترنتی این سنجنده قرار دارد (<http://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/MOD09GQ.005>) و به صورت روزانه با اختلاف زمان ۴۸ ساعت از تصویربرداری قابل دانلود است.

در محصول MOD09GQ از سنجنده مودیس، به منظور کاهش حجم تصویر، تصاویر بازتابش سطحی به صورت اعداد صحیح یا Scaled Integer (SI) و با فرمت HDF ذخیره می‌شود. در زمان استفاده از این محصول در دو باند سرخ و فرورسرخ نزدیک با اعمال ضرایب offset و Scaled factor طبق رابطه ۲ اعداد صحیح قابل تبدیل شدن به مقدار بازتابش^۱ (بدون بعد) است (MCST, 2002).

$$\text{Reflectance} = SI \times (\text{Scalefactor}) + \text{Offset} \quad (\text{رابطه ۲})$$

ضرایب scale factor و offset (بدون بعد) برای هر باند در متا دیتا همراه تصویر قابل استخراج و مقادیر آن برای دو باند سرخ و فرورسرخ نزدیک به ترتیب ۰/۰۰۰۱ و ۰ است. به دلیل اینکه در مراحل تولید این داده‌ها عملیات تصحیح اتمسفری و هندسی انجام شد، در پردازش تصاویر به عملیات تبدیل سیستم هندسی و عملیات تبدیل SI به بازتابش سطحی و برش منطقه مطالعه شده اکتفا شد. با داشتن مقادیر بازتابش دو باند سرخ و فرورسرخ نزدیک، مقدار شاخص SAVI از رابطه ۳ به دست آمد که در آن ρ_{NIR} مقدار بازتابش باند فرورسرخ نزدیک، ρ_{Red} مقدار بازتابش باند سرخ، و L ثابت خاک برابر ۰/۵ است.

جدول ۳. معادلات ریاضی بررسی شده در استخراج معادله بین LAI و VI_s

شماره معادله	مرجع	فرم ریاضی معادله
۱	Viña et al, 2011 (فرم خطی)	$LAI = 0.468 + 3.799 \times (VI_s)$
۲	Aparicio et al, 2002 (فرم توانی)	$LAI = -0.89 - 0.94 \times (VI_s)^{0.57}$
۳	Viña et al, 2011 (فرم کسری)	$LAI = \frac{1 \times (VI_s) - 0.5761}{3.788}$
۴	Fu-min et al, 2007 (فرم نمایی)	$LAI = 0.1026 \times \text{Exp}[4.3892 \times (VI_s)]$
۵	Nguy-Robertson et al, 2012 (فرم لگاریتمی)	$LAI = -0.943 - 1.37 \times \text{Ln}(VI_s)$
۶	Aparicio et al, 2002	$LAI = 0.57 - \left(\frac{0.37}{\text{Ln}(VI_s)} \right)$
۷	Viña et al, 2011	$LAI = \frac{\text{Ln}\left(\frac{1}{1 - \frac{VI_s - 0.2064}{0.7298}}\right)}{0.6159}$
۸	Choudhury et al, 1994	$LAI = -\frac{\text{Ln}\left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59}\right)}{0.91}$

بهترین معادله برآوردکننده LAI با استفاده از شاخص $SAVI$ برای گیاه ذرت علوفه‌ای و ذرت دانه‌ای و چغندرقد تعیین شد. از آنجا که گیاهان کربن ۴ (C4) مانند ذرت و کربن ۳ (C3) مانند چغندرقد از نظر نوع کربن و ساختار کانوپی و ساختار و رنگ برگ کاملاً با یکدیگر متفاوت اند می‌توان معادله برآورد LAI به‌دست‌آمده از ترکیب دو گیاه C3 و C4 را در یک منطقه به همه محصولات زراعی آن منطقه تعمیم داد (Nguy-Robertson et al, 2012). معادله به‌دست‌آمده برای هر سه گیاه معادله برتر برای برآورد LAI همه گیاهان معرفی شد.

آنالیز حساسیت

معادله برتر باید در طول دوره رشد سه گیاه مورد بررسی دقت مناسب داشته باشد. بدین منظور آنالیز حساسیت انجام شد. آنالیز حساسیت با استفاده از شاخص نوسان‌سنج^۱ (NE) انجام شد؛ که طبق رابطه ۶ به‌دست می‌آید (Govaerts et al, 1999; Viña et al, 2011; Nguy-Robertson et al, 2012).

$$NE = \frac{RMSE(LAI)}{d(SAVI)/d(LAI)} \quad (\text{رابطه ۶})$$

1 Noise equivalent

d بیانگر دیفرانسیل معادله، واحد شاخص NE مشابه LAI و متر مربع بر متر مربع، و خطای مجاز این شاخص برابر خطای مجاز LAI است. هر چه مقدار این شاخص کمتر و در طول دوره رشد یکنواخت‌تر باشد، کارایی معادله به‌دست‌آمده بهتر است (Nguy-Robertson et al, 2012).

یافته‌ها و بحث

اندازه‌گیری مزرعه‌ای LAI

LAI مزرعه‌ای برای سه گیاه مطالعه‌شده (ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای، چغندرقد) اندازه‌گیری شد و بازه تغییرات آن برای ذرت علوفه‌ای CP2 ۷/۶-۲/۰۱، ذرت علوفه‌ای CP5 ۸/۸-۰/۰۱، ذرت دانه‌ای CP2 ۷/۶-۲/۳، و چغندرقد ۷/۸-۲/۲ متر مربع بر متر مربع به‌دست آمد.

بررسی کارایی معادلات موجود در مراجع

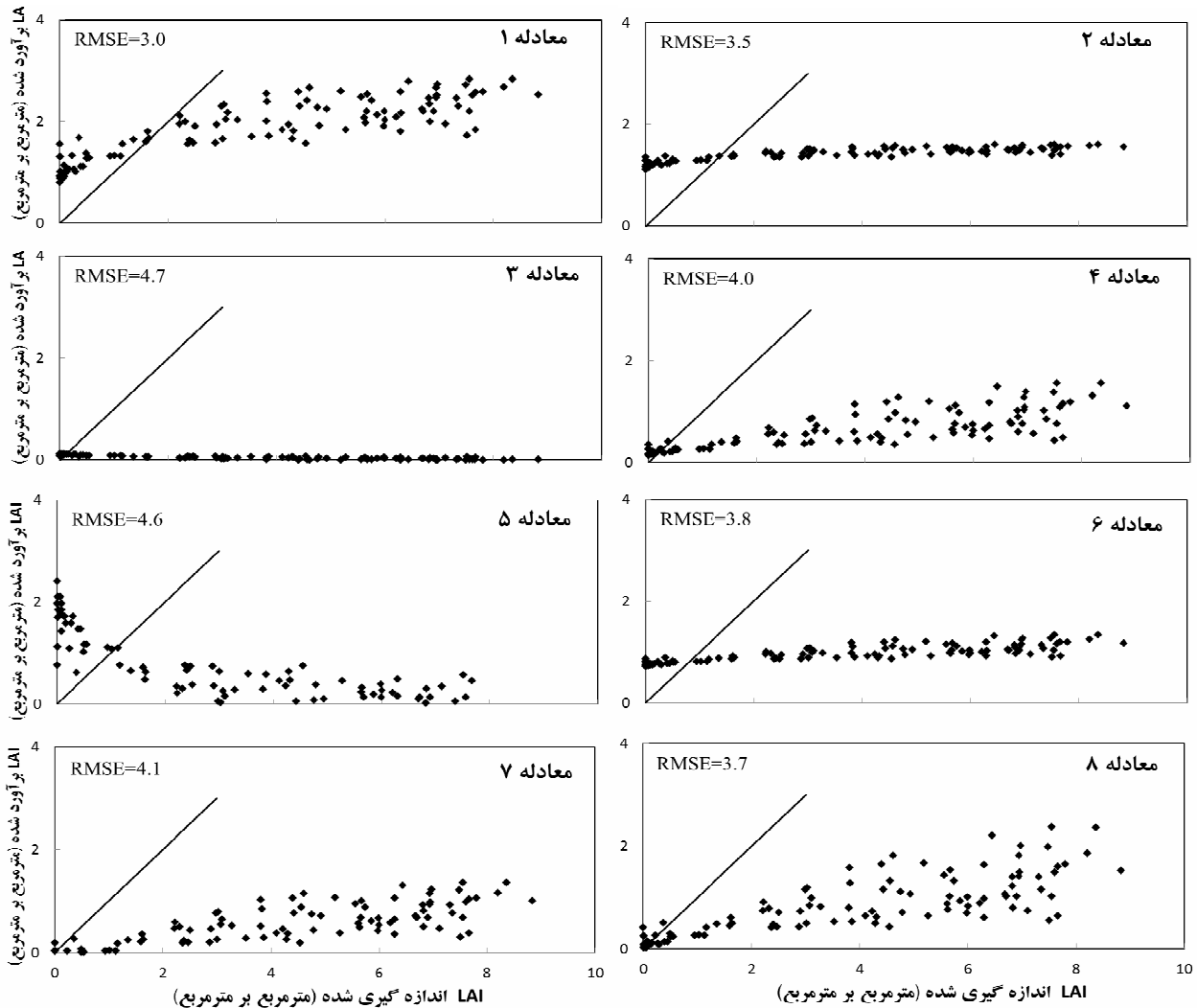
هشت معادله درج‌شده در جدول ۳ ارزیابی شد. برای این منظور LAI با استفاده از این معادلات و شاخص $SAVI$ محاسبه‌شده از تصاویر مودیس در این تحقیق برآورد و با LAI اندازه‌گیری‌شده مقایسه شد. دقت این معادلات با استفاده از شاخص آماری $RMSE$ تعیین شد. در شکل ۲ پراکنش داده‌های اندازه‌گیری‌شده (محور افقی) و برآوردشده LAI توسط هر معادله (محور عمودی) در مقابل خط ۱:۱ می‌آید. دامنه تغییرات LAI اندازه‌گیری‌شده در حدود ۰/۰۱ تا ۹ متر مربع بر متر مربع بود؛ در حالی که دامنه آن در این معادلات در حدود ۰ تا ۳ متر مربع بر متر مربع بود. در این معادلات آماره $RMSE$ بازه ۳ تا ۴/۷ داشت که کارایی ضعیف این معادلات و ضرورت واسنجی آن‌ها را در منطقه مطالعه‌شده نشان می‌دهد. شکل ۲ ثابت می‌کند همه معادلات LAI را بسیار کمتر از مقادیر واقعی برآورد می‌کنند و عدم انطباق خروجی معادلات با واقعیت تأکیدی بر کارایی ضعیف معادلات است. مهم‌ترین دلیل آن متفاوت بودن ویژگی‌های اقلیمی و محیطی منطقه مطالعه‌شده با مناطقی است که معادلات در آنجا استخراج شده‌اند.

بهینه‌سازی معادلات رگرسیونی در برآورد LAI

همان‌طور که بیان شد، به منظور استخراج معادله جدید برآورد LAI هشت معادله ریاضی درج‌شده در جدول ۳ به کار رفت و ضرایب ثابت بهینه آن‌ها به روش بهینه‌سازی تعیین شد. در شکل ۳ پراکنش داده‌های اندازه‌گیری‌شده (محور افقی) و برآوردشده LAI توسط معادلات واسنجی‌شده (محور عمودی) در مقابل خط ۱:۱ می‌آید. در جدول ۴ نیز نتایج تعیین بهترین

چغندر قند به ترتیب معادلات ۸ و ۵ و ۴ (جدول ۳) به دست آمد. معادله ریاضی همراه مقادیر ضرایب بهینه بهترین معادلات انتخاب شده در جدول ۴ می‌آید.

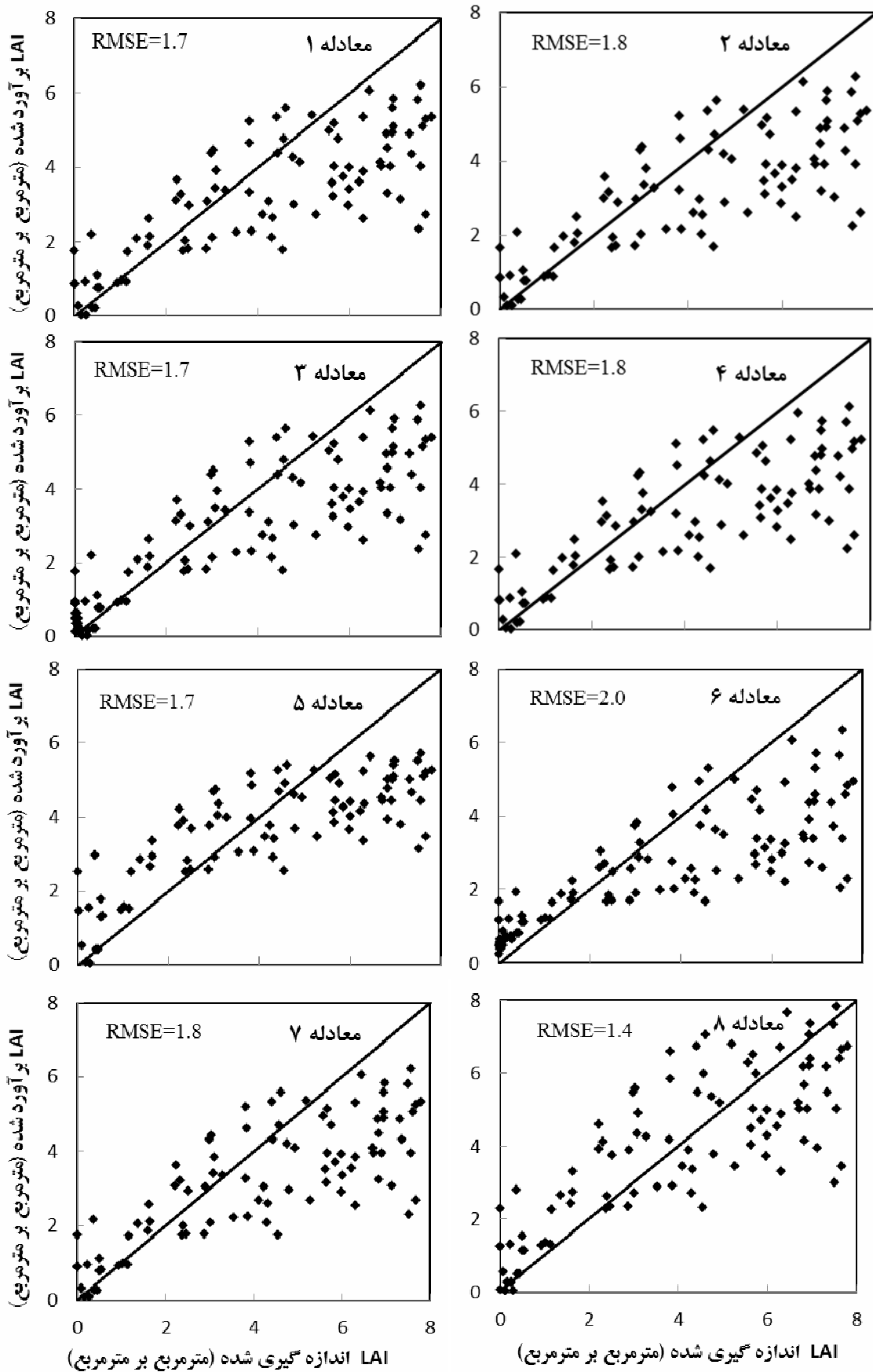
معادله برآوردکننده LAI با استفاده از شاخص $SAVI$ استخراج شده از تصاویر مودیس برای هر یک از گیاهان مطالعه شده می‌آید. بهترین معادله برآوردکننده LAI با استفاده از شاخص $SAVI$ برای سه گیاه ذرت علوفه‌ای و ذرت دانه‌ای و



شکل ۲. پراکنش همه داده‌های LAI اندازه‌گیری شده (محور افقی) و برآورد شده توسط معادلات اصلاح‌نشده مورد بررسی (محور عمودی) در مقابل خط ۱:۱

جدول ۴. معادلات برتر برآوردکننده LAI با استفاده از شاخص $SAVI$ استخراج شده از تصاویر مودیس و صحت‌سنجی آن‌ها

شماره معادله	گیاه	صحت‌سنجی		معادله برتر
		R2	RMSE (m ² /m ²)	
۸	ذرت علوفه‌ای	۰/۷۵	۱/۶۳	$LAI = -\frac{Ln(\frac{8.03 - SAVI}{7.89})}{0.01}$
۵	ذرت دانه‌ای	۰/۴۶	۱/۸۱	$LAI = 10.29 + 7.93 \times Ln(SAVI)$
۴	چغندر قند	۰/۵۰	۱/۱۱	$LAI = 0 + 0.619 \times Exp[3.672 \times (SAVI)]$
۸	هر سه گیاه	۰/۷۲	۱/۵۷	$LAI = -\frac{Ln(\frac{3.8 - SAVI}{3.66})}{0.018}$



شکل ۳. پراکنش همه داده‌های LAI اندازه‌گیری شده (محور افقی) و برآورد شده توسط معادلات واسنجی شده (محور عمودی) در مقابل خط ۱:۱

۰/۷۲ بود، می‌توان از این معادله برای محصولات دیگر در منطقه مطالعه شده استفاده کرد. پراکندگی داده‌ها در اطراف خط ۱:۱ در این معادله بهتر از بقیه معادلات بود (شکل ۳). در شکل ۴ تغییرات زمانی LAI مزرعه‌ای اندازه‌گیری و معادله برتر برآورد LAI برای سه گیاه (معادله ۸ اصلاح شده و معادله ۸ اصلاح نشده) ارائه شد. نتایج به دست آمده در شکل ۴ بیانگر تشابه روند تغییرات LAI مزرعه‌ای اندازه‌گیری شده با روند تغییرات LAI برآوردی توسط این معادله در هر سه گیاه مطالعه شده است؛ این در حالی است که میزان این تغییرات با یکدیگر برابر نیست. همان‌طور که نتایج ارائه شده در شکل ۲ نیز نشان داد این فرم معادله ۸ مقادیر LAI را کم برآورد می‌کند. با بهینه‌کردن و اصلاح ضرایب معادله ۸ مقادیر LAI برآورد شده توسط معادله برتر در هر سه گیاه مطالعه شده به مقادیر LAI مزرعه‌ای نزدیک‌تر شد (شکل ۴).

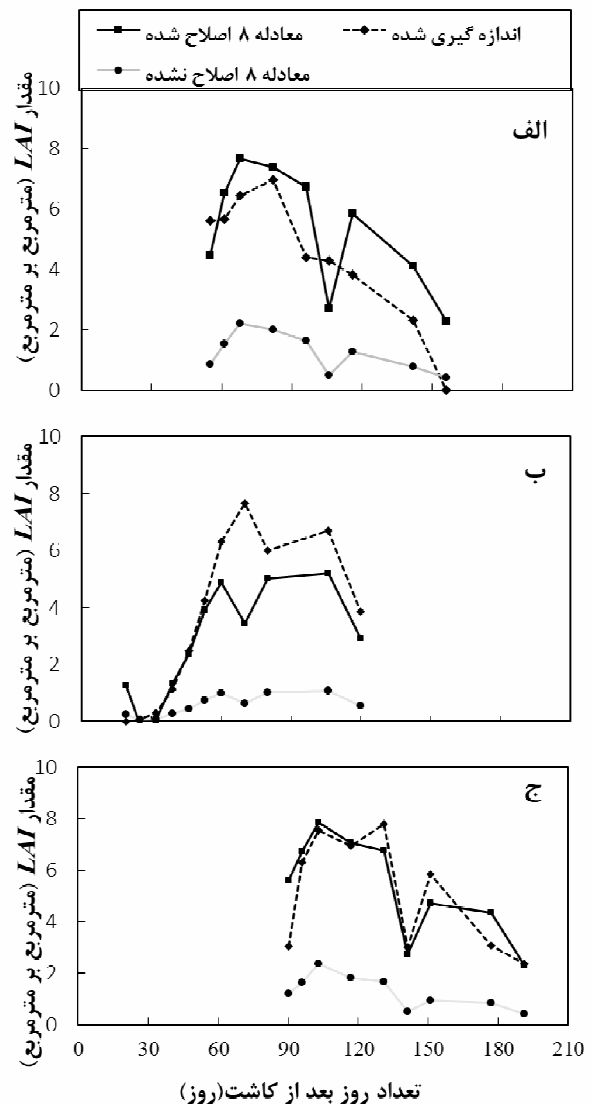
آنالیز حساسیت

مقدار شاخص NE برای معادله برتر به دست آمده برای همه گیاهان محاسبه شد. نتایج این محاسبه در جدول ۵ می‌آید.

جدول ۵. نتایج آنالیز حساسیت معادله برتر برآورد LAI ترکیب سه گیاه

رشد شاخص	NE (average)	NE (m2 m-2)		گیاه بررسی شده
		(LAI max)	(LAI min)	
افزایشی	۱/۴۱	۱/۴۹	۱/۳۶	چغندرقد
افزایشی	۱/۳۸	۱/۴۹	۱/۲۹	ذرت دانه‌ای
افزایشی	۱/۴۰	۱/۴۷	۱/۲۹	ذرت علوفه‌ای

مقدار متوسط شاخص NE در چغندرقد و ذرت دانه‌ای و ذرت علوفه‌ای به ترتیب ۱/۴۱ و ۱/۳۸ و ۱/۴۰ متر مربع بر متر مربع بود. مقدار شاخص NE در سه گیاه مطالعه شده به هم نزدیک است؛ که نشان‌دهنده عدم تفاوت دقت برآورد LAI برای هر سه گیاه مطالعه شده با معادله برتر برآورد LAI ترکیب سه گیاه به دست آمده در این تحقیق است. در هر سه گیاه مطالعه شده با افزایش LAI مقدار شاخص NE افزایش یافت؛ که نشان‌دهنده کاهش دقت معادله برتر با افزایش LAI است. مقدار افزایش شاخص NE در چغندرقد ۰/۱۳، در ذرت دانه‌ای ۰/۲، و در ذرت علوفه‌ای ۰/۱۸ متر مربع بر متر مربع بود. بر اساس مقدار افزایش شاخص NE در گیاهان بررسی شده می‌توان نتیجه گرفت در طول دوره رشد هر سه گیاه دقت معادله برآورد LAI ترکیب سه گیاه به دست آمده تغییر محسوسی نمی‌کند و تقریباً ثابت می‌ماند. مقدار NE در سایر تحقیقات برای شاخص $NDVI$



شکل ۴. تغییرات زمانی LAI اندازه‌گیری شده و برآورد شده از معادله ۸ اصلاح نشده و اصلاح شده (معادله برتر ترکیب گیاه) الف: ذرت دانه‌ای ب: ذرت علوفه‌ای ج: چغندرقد

بر اساس تحقیقات مشابه (Peng et al, 2007; Yi et al, 2008; Viña et al, 2011; Nguy-Robertson et al, 2012) مقادیر شاخص R^2 در بازه ۰/۶ - ۰/۹ و شاخص $RMSE$ در بازه ۰/۵ - ۱/۲ متر مربع بر متر مربع بود. معادلات برتر این تحقیق (جدول ۴) دارای $RMSE$ برابر ۱/۱۱ - ۱/۸۱ و R^2 برابر ۰/۴۶ - ۰/۷۵ است. بنابراین، پس از اصلاح معادلات، دقت معادلات در حد خوب و قابل قبول است. شکل ۳ نشان می‌دهد برازش معادلات پس از بهینه‌سازی به مقدار زیادی بهبود یافت؛ به گونه‌ای که پراکنش داده‌ها اغلب در اطراف خط ۱:۱ بود. از آنجا که معادله برتر برآورد LAI برای ترکیب سه گیاه به دست آمده در این تحقیق دارای دقت مناسب و $RMSE$ برابر ۱/۵۷ و R^2 برابر

مطالعه شده و تأییدی بر ضرورت بررسی و واسنجی معادلات است.

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

برآوردکننده LAI برای ترکیب سه گیاه شناخته شد. بهترین معادله برآوردکننده LAI به دست آمده برای ترکیب سه گیاه دارای $RMSE$ برابر ۱٫۵۷ و R^2 برابر ۰٫۷۲ است و در کل دوره رشد دقت قابل قبولی دارد. به دلیل بررسی گیاه C4 (ذرت) و گیاه C3 (چغندرقد) در این تحقیق، بهترین معادله برآوردکننده LAI به دست آمده برای همه محصولات زراعی در منطقه مطالعه شده قابل تعمیم است.

۰٫۱ تا ۲ و برای شاخص SR ۰٫۶ تا ۱٫۴۲ متر مربع بر متر مربع بود (Nguy-Robertson *et al*, 2012). این مقادیر نشان می دهد مقدار شاخص NE به دست آمده در این تحقیق در حد مطلوب است.

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان داد برآورد LAI بر اساس معادلات موجود در مراجع با استفاده از شاخص $SAVI$ و داده های سنجنده مودیس دارای مقدار بالای $RMSE$ (۳ تا ۴٫۷ متر مربع بر متر مربع) است. مقدار بالای خطا نشان دهنده دقت پایین این معادلات در برآورد LAI در همه گیاهان منطقه

REFERENCES

- Alavi-Panah, S. K. (2006). Fundamentals of remote sensing (6th ed.). Tehran: University of Tehran publication. (In Farsi)
- Aparicio, N., Villegas, D., Araus, J. L., Casadesus, J., and Roy, C. (2002). Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Science*. 42(2). 1547-1555.
- Choudhury, B. J., Ahmed, N. U., Idso, S. B., Reginato, R. J., and Daughtry, C. S. T. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*. 50(2), 1-17.
- D'urso, G. and Santini, A. (1996). A remote sensing and modeling integrated approach for the management of irrigation distribution systems. In *Proceedings of the international conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, San Antonio (USA)*, vol. 4, 6.
- Daughtry, C. S. T., Gallo, K. P., Kustas, W. P., Goward, S. N., and Prince, S. D. (1992). Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sensing of Environment*. 39(2), 141-152.
- ERDAS (1999). Erdas imagine v8.4 user's field guide (Atlanta: ERDAS Inc.).
- Fu-min, W., Jing-feng, H., Yan-lin, T., and Xiu-zhen, Z. (2007). New vegetation index and its application in estimating leaf area index of rice. *Rice Science*. 14(3), 195-203.
- Gabriel, IR. and Parodi, N. (2002). AHVRR hydrological analysis system Algorithms and theory - Version 1.3. WRES – ITC.
- Gitelson, A. A., Viña, A., Masek, J. G., Verma, S. B., and Suyker, A. E. (2008). Synoptic monitoring of gross primary productivity of maize using LANDSAT data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 5(2), 133-137.
- Gonsamo, A. and Pellikka, P. (2012). The sensitivity based estimation of leaf area index from spectral vegetation indices. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 70(1), 15-25.
- Govaerts, Y. M., Verstraete, M. M., Pinty, B., and Gobron, N. (1999). Designing optimal spectral indices: A feasibility and proof of concept study. *International journal of remote sensing*. 20(9), 1853-1873.
- Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25(3), 295-309.
- Jensen, J. R. (2007). An earth resource perspective prentice hall, upper saddle river, NJ. *Remote Sensing of Environment*, second edition.
- 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. I: Theories, sensors and hemispherical photography. *Agriculture and forest Meteorology*. 12(1-2), 19-35.
- Le Maire, G., Marsden, C., Verhoef, W., Ponzoni, F. J., Lo Seen, D., Bégué, A., Stape, Z., and Nouvellon, Y. (2011). Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. *Remote Sensing of Environment*. 115(2), 586-599.
- MCST (2002). MODIS level 1 1B product user's guide, for level 1B version 4. 0. 9(Terra) and version 4. 1. 1 (Aqua). MCST Document PUB-01- U- 0202- REV B, MCST Internal Memo. M1039, 61.
- Moulin, S. and Guerif, M. (1999). Impacts of model parameter uncertainties on crop reflectance estimates: A regional case study on wheat. *International Journal of Remote Sensing*. 20(1), 213-218.
- Nagler, P. L., Glenn, E. P., and Huete, A. R. (2001). Assessment of spectral vegetation indices for riparian vegetation in the Colorado river delta, Mexico. *Journal of Arid Environments*. 49(1), 91-110.

- Nguy-Robertson, A., Gitelson, A., Peng, Y., and Viña, A. (2012). Green leaf area index estimation in Maize and Soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity Timothy Arkebauer, and Donald Rundquist. *Agronomy Journal*. 104(5), 1336–1347.
- Parodi, N. and Gabriel, Ir. (2002). AHVRR hydrological analysis system algorithms and theory - Version 1.3. John Wiley & Sons, NewYork.
- Peng, Y., Wen-bin, W., Hua-junl, Y., Qing-bol, Z., Jin-qiul, Z., and Li, Z. (2007). Mapping spatial and temporal variations of leaf area index for winter Wheat in north China. *Agricultural Sciences in China*. 6(12), 1437-1443.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8(2), 127–150.
- Turner, D., Cohen, W., Kennedy, R., Fassnacht, K., and Briggs, J. (1999). Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote Sensing of Environment*. 70(1), 52-68.
- Viña, A., Gitelson, A. L., Nguy-Robertson, A., 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.
- Wang, Q., Tenhunen, J., Dinh, N. Q., Reichstein, M., Otieno, D., Granier, A., and Pilegarrrd, K. (2005). Evaluation of seasonal variation of MODIS derived leaf area index at two European deciduous broadleaf forest sites. *Remote Sensing of Environment*. 96(3), 475–484.
- Yang, P., Zhou, B., Chen, Z., Zha, Y., Wu, W., and Shibasaki, R. (2006). Estimation of regional crop yield by assimilating multitemporal TM images into crop growth model. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 10, 2259-2262.
- Yi, Y., Yanga, D., Huangb, J., and Chen, D. (2008). Evaluation of MODIS surface reflectance products for wheat leaf area index (LAI) retrieval. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 63(6), 661–677.
- Zarate-Valdez, J. L., Whiting, M. L., Lampinen, B. L., and Metcalf, S. (2012). Prediction of leaf area index in almonds by vegetation indexes. *Computers and Electronics in Agriculture*. 85(1), 24–32.