

## افزایش دقت برآورد منطقه‌ای عملکرد برنج با ارتقای قدرت تفکیک مکانی داده‌های ماهواره‌ای شاخص سطح برگ در مدل گیاهی VSM

شیدا مختاری<sup>۱</sup>، نادر پیرمردیان<sup>۲\*</sup>، مجید وظیفه دوست<sup>۲</sup> و ناصر دواتگر<sup>۳</sup>

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی و استادیاران گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی  
دانشگاه گیلان، ۳- استادیار پژوهش موسسه تحقیقات برنج کشور

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۲۵ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۳۰)

### چکیده

مدل VSM یک مدل گیاهی ساده است که با وجود نیاز به اطلاعات ورودی اندک از دقت قابل قبولی در برآورد عملکرد مزرعه‌ای برنج برخوردار است، اما به دلیل عدم قطعیت در داده‌های ورودی، کاربرد مدل در مطالعات منطقه‌ای با محدودیت روبرو است. این محدودیت با تلفیق مدل با داده‌های ماهواره‌ای قابل رفع شدن است. در این پژوهش، پس از تلفیق مدل VSM با داده‌های ماهواره‌ای تابش طول موج کوتاه و شاخص سطح برگ، تأثیر ارتقای قدرت تفکیک مکانی داده‌های ماهواره‌ای شاخص سطح برگ بر برآورد منطقه‌ای عملکرد برنج مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر شاخص سطح برگ پس از استخراج از تصاویر سنجنده مادیس با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر با استفاده از تکنیک‌های ریزمقیاس و کاربرد تصاویر سنجنده لندست TM5 تا قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر ارتقا یافت و سپس تأثیر آن بر دقت واسنجی‌ها در برآوردهای منطقه‌ای عملکرد برنج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مقایسه شاخص سطح برگ مشاهده‌ای و برآورد شده، بیانگر افزایش دو برابری دقت برآورد شاخص سطح برگ پس از ارتقای قدرت تفکیک مکانی داده‌های ماهواره‌ای شاخص سطح برگ (از ضریب تبیین ۰/۴۴ به ۰/۸۷) بود. نتایج تلفیق مدل با داده‌های ماهواره‌ای نیز نشان داد که دقت مدل در برآورد عملکرد منطقه‌ای برنج با کاربرد داده‌های ریزمقیاس شده شاخص سطح برگ (قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر) به طور چشمگیری افزایش یافت (ضریب تبیین از ۰/۶۴ به ۰/۹۱ افزایش یافت).

واژه‌های کلیدی: ریزمقیاس کردن، سنجش از دور، شاخص سطح برگ، مدل VSM، واسنجی مدل

## مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت جهان و نیاز روز افزون به تولیدات کشاورزی و نقش اصلی عوامل مدیریتی مانند آب و کود در بهره‌وری تولید، مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه به عنوان یک ابزار مدیریتی می‌توانند در بررسی نقش عوامل مؤثر در تولید و ارائه راهکارهای مدیریتی راهگشا باشد. یک مدل گیاهی با استفاده از مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی وابسته و خصوصیات ژنتیکی می‌تواند رشد، توسعه و عملکرد یک گیاه را شبیه‌سازی کرده و نتایج آزمایشات و تحقیقات کشاورزی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد (Steduto *et al.*, 2009). اما مشکل اصلی اکثر مدل‌های شبیه‌سازی پیچیدگی روابط درونی مدل و عدم دسترسی به اطلاعات ورودی آن‌ها است. در این میان، مدل VSM (Very Simple Model) یک مدل ساده جهت شبیه‌سازی رشد گیاه و تخمین عملکرد محصول است که در عین نیاز به اطلاعات ورودی کم، از دقت قابل قبولی برخوردار است (Kobayashi, 1994). هر چند که پیرمردیان و سپاسخواه (Pirmoradian and Sepaskhah, 2006) پس از توسعه و واسنجی مدل از آن به عنوان یک ابزار مدیریت در کاربرد نیتروژن و آب در صورت دسترسی به اطلاعات صحیح و به روز در رابطه با وضعیت خاک-گیاه و در مقیاس مزرعه یاد نمودند، اما کاربرد مدل در مقیاس محلی و منطقه‌ای به دلیل عدم قطعیت در پارامترهای ورودی به شدت با محدودیت روبرو است. در صورت کاربرد مدل در مقیاس منطقه‌ای، به دلیل در دسترس نبودن داده‌های ورودی و یا وجود داده‌هایی با درجه وضوح نامناسب، دقت نتایج خروجی به شدت کاهش می‌یابد (Faiver *et al.*, 2004). این کاهش دقت در مطالعات منطقه‌ای با بروزسانی متغیرهای درونی مدل با داده‌های مشاهداتی صحیح و تلفیق مدل شبیه‌سازی با داده‌های حاصل از ماهواره‌های محیطی قابل رفع شدن است.

استفاده همزمان از تکنیک سنجش از دور و مدل‌های شبیه‌ساز دینامیکی نقش مهم اما متفاوتی را در تولید اطلاعات لازم در مدیریت و تصمیم‌سازی فراهم می‌کند (Prevot *et al.*, 2003). در میان ماهواره‌های محیطی، لندست با در اختیار داشتن اسکنرهای چند طیفی و ارائه تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی کمتر از ۳۰ متر

به طور گسترده‌ای جهت بررسی پارامترهای بیوفیزیکی پوشش گیاهی استفاده می‌شود (Masek *et al.*, 2006). همچنین، تصاویر این سنجنده به دلیل دوره بازدید ۱۶ روزه در بررسی وضعیت پوشش گیاهی (Wulder *et al.*, 2004) و پایش رشد و نمو گیاهی (Masek *et al.*, 2008) مناسب است. هر چند که گاهی به دلیل حضور ابرها در منطقه مورد نظر اختلاف زمانی بین دو تصویر متوالی اخذ شده به بیشتر از این مقدار نیز افزایش می‌یابد که این موضوع می‌تواند در بررسی روند رشد محصول اختلال ایجاد نماید (Pape and Franklin, 2008). این موضوع یکی از نگرانی‌های عمده به ویژه در مناطق مرطوب محسوب می‌شود (Ranson *et al.*, 2003). در این گونه مناطق احتمال کسب تصاویر بدون ابر لندست در سال مورد نظر می‌تواند کمتر از ۱۰٪ باشد (Leckie, 1990). یک روش به منظور کاهش دوره بازدید مشاهدات ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا، تلفیق داده‌های سنجنده‌ها با مشخصات زمانی و مکانی مکمل است که با هدف ایجاد مشاهدات مصنوعی با قدرت تفکیک مکانی بالا و کاهش دوره بازدید صورت می‌گیرد (Lunetta *et al.*, 1998). در اکثر مدل‌های تلفیق از تصاویر با دقت مکانی بالا به منظور دسترسی به جزئیات مکانی بیشتر و تصاویر با دوره بازدید کوتاه بالا جهت توصیف تغییرات پدیده‌های مورد نظر در طی زمان استفاده می‌شود.

در میان تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در مدل‌های تلفیق، تصاویر لندست به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا و تصاویر سنجنده مادیس به دلیل دوره بازدید روزانه از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشند که می‌توان به کاربرد همزمان این تصاویر در مدل ترکیبی گائو و همکاران (Gao *et al.*, 2006)، مدل رگرسیونی هانسن و همکاران (Hansen *et al.*, 2008) و پوتاپو و همکاران (Potapov *et al.*, 2008) و مدل تلفیقی هیلکر و همکاران (Hilker *et al.*, 2009)، روش اصلاح توپوگرافی وانگ و همکاران (Hwang *et al.*, 2011) اشاره نمود. هدف از این تحقیق نیز افزایش قدرت تفکیک مکانی نقشه شاخص سطح برگ استخراج شده از تصاویر مادیس با استفاده از تصاویر لندست TM و بررسی تأثیر ارتقای قدرت تفکیک مکانی نقشه‌های شاخص سطح برگ در دقت برآورد منطقه‌ای عملکرد برنج با استفاده از مدل گیاهی VSM می‌باشد

## مواد و روش‌ها

## منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از اراضی شالیزاری استان گیلان (شهرستان‌های فومن و شفت) واقع در عرض جغرافیایی  $۳۶^{\circ} ۵۶'$  تا  $۳۷^{\circ} ۱۸'$  شمالی و طول جغرافیایی  $۴۹^{\circ} ۱۰'$  تا  $۴۹^{\circ} ۳۱'$  درجه شرقی با ارتفاع متوسط ۳ متر پایین‌تر از سطح دریای آزاد است. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و مزارع منتخب جهت نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است.

$$\text{for } 0 < t \leq T_0 \quad (۱)$$

$$\text{for } T_0 < t \leq T_f \quad (۲)$$

$$\text{for } T_f < t \leq T_h \quad (۳)$$

که در آن‌ها  $L$  شاخص سطح برگ،  $t$  دوره زمانی بعد از جوانه زدن برحسب روز،  $\alpha$  افزایش روزانه شاخص سطح برگ ( $d^{-1}$ )،  $T_0$  دوره جوانه زدن تا افزایش خطی شاخص سطح برگ ( $d$ )،  $T_f$  زمان گل‌دهی ( $d$ )،  $L_f$  حداکثر شاخص سطح برگ در زمان گل‌دهی،  $\beta$  کاهش روزانه شاخص سطح برگ ( $d^{-1}$ ) و  $T_h$  دوره زمانی از جوانه‌زدن تا زمان برداشت ( $d$ ) است.

(۲) تجمع ماده خشک متناسب با برخورد تابش خورشید است.

$$\frac{dW}{dt} = \epsilon S [1 - \exp(-KL)] \quad (۴)$$

## توصیف مدل VSM

مدل VSM با فرض الگوی مثلثی برای تغییرات سطح برگ، تجمع ماده خشک را متناسب با برخورد تابش خورشیدی به گیاه می‌داند. اساس این مدل بر پیروی از سه فرضیه در زمینه فرایند رشد گیاه قرار دارد (Kobayashi, 1994).

(۱) شاخص سطح برگ، تحت تأثیر دما بر اساس یک الگوی مثلثی تغییر می‌کند.

$$L = 0$$

$$L = \alpha (t - T_0) = L_f (t - T_0) / (T_f - T_0),$$

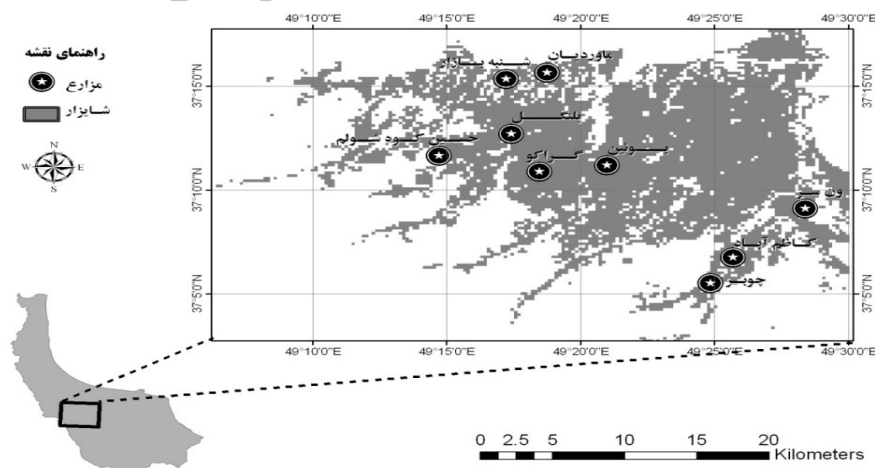
$$L = L_f - \beta (t - T_f) = L_f [1 - (t - T_f) / (T_h - T_f)],$$

که در آن  $dw/dt$  تجمع روزانه ماده خشک ( $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ )،  $\epsilon$  راندمان استفاده نور ( $g \cdot MJ^{-1}$ )،  $S$  تابش موج کوتاه برخورد کرده ( $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ) و  $K$  ضریب خاموشی نور است.

(۳) عملکرد با حاصل ضرب ماده خشک کل (در زمان برداشت) و شاخص برداشت مشخص می‌شود.

$$Y = W_h I_h \quad (۵)$$

که در آن  $Y$  عملکرد دانه ( $g \cdot m^{-2}$ )،  $W_h$  وزن کل ماده خشک در زمان برداشت ( $g \cdot m^{-2}$ ) و  $I_h$  شاخص برداشت است. کل ماده خشک با تلفیق تجمع ماده خشک روزانه محاسبه می‌شود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و مزارع منتخب در شهرستان فومنات، گیلان.

Figure 1. Geographic location of study area and selected fields in Fooman city, Gilan.

شدند. از این مقادیر برای محاسبه ماده خشک و عملکرد در مزارع منتخب استفاده شد.

### دریافت و آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای

در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های لندست TM5 با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و تولیدات بازتابش سطحی سنجنده مادیس با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر استفاده شد. به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر سنجنده لندست TM5 و دوره بازدید روزانه سنجنده مادیس در تخمین تغییرات شاخص سطح برگ از تصاویر هر دو سنجنده به صورت همزمان استفاده شد. از میان ماهواره‌های لندست در حال حاضر تنها ماهواره لندست 4-5 (سنجنده TM) و لندست 7 (سنجنده ETM) فعال می‌باشد. تصاویر لندست ۵ که در صد ابرناکی آنها صفر و یا نزدیک صفر بود از آرشیو Glovis سفارش داده شدند و سپس از طریق FTTP دریافت شد. خصوصیات مکانی و طیفی تصاویر مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به وجود محدودیت زمانی در سفارش تصاویر سنجنده لندست TM5 و مشکل ابری بودن منطقه، تنها یک تصویر از تصاویر این سنجنده در این تحقیق استفاده شد.

### استخراج شاخص سطح برگ از داده‌های ماهواره‌ای

شاخص پوشش گیاهی بهنجار شده یا NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) و شاخص گیاهی اصلاح شده نسبت به بازتابش خاک یا SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) به طور وسیعی به منظور تخمین شاخص سطح برگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص‌ها از نسبت تفاضل و تجمع بازتابش نرمال شده از باندهای مادون قرمز و قرمز حاصل می‌شود (Huete, 1988). شاخص سطح برگ نیز که با نسبت سطح کل برگ‌های یک گیاه به کل مساحت زمینی که گیاه اشغال کرده است تعریف می‌شود، با استفاده از یک تابع نمایی به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$LAI = -\frac{\ln\left(\frac{C_1 - SAVI}{C_2}\right)}{C_3} \quad (7)$$

با در نظر گرفتن فرضیات پیشین، عملکرد در مرحله برداشت می‌تواند به صورت زیر بیان شود (Pirmoradian and Sepaskhah, 2006).

$$Y = 0.85[1 - \exp(-kL_f)](vT_v\varepsilon_v + rT_r\varepsilon_r)I_h \quad (6)$$

که در آن  $T_v$  تعداد روزها از آغاز افزایش خطی شاخص سطح برگ تا مرحله گل‌دهی و  $T_r$  تعداد روزها از مرحله گل‌دهی تا مرحله برداشت است که از طریق روابط  $T_r = T_h - T_f$  و  $T_v = T_f - T_0$  مشخص می‌شوند.  $v$  و  $r$  به ترتیب میانگین روزانه تابش موج کوتاه ( $MJ \cdot d^{-1} \cdot m^{-2}$ ) در قبل و بعد از گل‌دهی است.  $\varepsilon_r$  و  $\varepsilon_v$  به ترتیب راندمان استفاده نور ( $g \cdot MJ^{-1}$ ) برای  $T_r$  و  $T_v$  است.

### اندازه‌گیری‌های میدانی

اطلاعات میدانی مورد نیاز جهت واسنجی مدل، از تعدادی از مزارع شالیزاری در منطقه در سال زراعی ۱۳۸۹ (۲۰۱۰) برداشت شد (شکل ۱). ابتدا مزارع منتخب با لحاظ توزیع جغرافیایی مناسب، نوع بافت خاک و موقعیت قرارگیری آنها در منطقه مورد مطالعه مشخص شد و اندازه‌گیری شاخص سطح برگ در این مزارع به صورت هر دو هفته یک بار انجام شد. برداشت گیاه از مزارع منتخب با استفاده از کادرهایی به مساحت یک متر مربع انجام شد. تمام بوته‌هایی که در این کادر قرار داشتند همراه با ریشه از زمین برداشت شد و برای جلوگیری از تغییر شکل برگ‌ها، بوته‌ها تا انتقال به آزمایشگاه در آب قرار داده شد. در آنجا پس از جداسازی برگ‌ها با استفاده از دستگاه [MODEL: LI-3100 AREA SENC] سطح برگ سنج [METER] اندازه‌گیری سطح برگ انجام گرفت و با توجه به سطح برداشت، شاخص سطح برگ محاسبه شد.

جهت اندازه‌گیری عملکرد، در هنگام برداشت محصول از مزارع منتخب نمونه‌گیری به عمل آمد. در زمان برداشت محصول از ۸ مزرعه در ناحیه مورد مطالعه قطعه‌ای به ابعاد یک متر مربع از بقیه مزرعه جدا و بوته‌ها به آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات برنج کشور در رشت منتقل شد. پس از جدا کردن دانه‌ها از کاه و کلش، این اجزاء به مدت ۴۸ ساعت در دمای  $70^\circ C$  قرار گرفتند، سپس توزین

جدول ۱- خصوصیات داده‌های ماهواره‌های مورد استفاده

Table 1. Characteristic of MODIS and LANDSAT satellite data

سال Year	باندهای مورد نیاز Needed Bands	سطح تولیدات Product level	دقت زمانی (روز) Temporal resolution (m)	دقت مکانی (متر) Spatial resolution (m)	سنجنده Sensor	ماهواره Satellite
2010	1, 2, 3, 4, 5	DN	16	30	TM5	Landsat
2010	1, 2	Mod09GQ	1	250	MODIS	Terra

تشعشع بر حسب  $(W/m^2/s/\mu m)$  است (Markham and Barker, 1997).

پس از تبدیل مقادیر عددی DN به تشعشع، مقدار قابلیت انعکاس یا بازتاب پذیری برای هر باند  $(\rho_\lambda)$  محاسبه شد. این مقدار به عنوان نسبت شار تشعشع منعکس شده به شار تشعشع جاری برای یک سطح تعریف می شود و از طریق فرمول زیر برای تصویر سنجنده لندست TM5 محاسبه شد.

$$\rho_\lambda = \frac{\Pi \cdot L_\lambda}{ESUN_\lambda \cdot \cos\theta_{co_r}} \quad (9)$$

که در رابطه فوق،  $ESUN_\lambda$  (Markham and Barker, 1997) میانگین تابش فرودی خورشید در بالای اتمسفر برای هر باند  $(W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1})$ ،  $\theta$  زاویه تابش خورشیدی و  $dr$  عکس مجذور فاصله نسبی زمین تا خورشید است.

ریز مقیاس کردن نقشه های LAI حاصل از سنجنده

مادیس با استفاده از تصاویر سنجنده لندست TM5 به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی نقشه های شاخص سطح برگ از روش نسبتها (Vazifedoust, 2007) بهره گرفته شد:

$$LAI_{L,d} = GM(LAI_{M,d}) \times \left( \frac{LAI_{L,June2}}{GM(LAI_{M,June2})} \right) \quad (10)$$

که در آن،  $LAI_{L,d}$  نقشه شاخص سطح برگ ریز مقیاس شده از ۲۵۰ متر به ۳۰ متر برای هر روز دلخواه،  $GM(LAI_{M,d})$  مقدار میانگین شاخص سطح برگ کل پیکسل‌های تصاویر سنجنده مادیس با دقت مکانی ۲۵۰ متر،  $LAI_{L,June2}$  نقشه شاخص سطح برگ برای تصویر سنجنده لندست TM5 هم زمان است (۲ ژوئن). پس از ریز مقیاس کردن تصاویر مادیس بر اساس تصویر لندست مقدار شاخص سطح برگ در هر پیکسل برآورد شد.

در این رابطه،  $C_1$  و  $C_2$  و  $C_3$  ضرایب ثابتی هستند که مقدارشان بستگی به نوع محصول دارد. این ضرایب بطور کلی، برای برنج به ترتیب برابر ۰/۶۹، ۰/۵۹ و ۰/۹۱ در نظر گرفته می‌شود (Choudhury et al., 1994).

استخراج شاخص سطح برگ از تصاویر سنجنده مادیس

اعداد رقومی ثبت شده در تصاویر مادیس بصورت اعداد صحیح (Scaled Integer, SI) و به فرمت HDF ذخیره می‌شوند (MCST, 2006). بازتاب پذیری و تابش  $(\rho_\lambda)$  برای هر یک از باندها با کسر ضرایب offset و ضرب نتیجه حاصل در ضریب scale مربوط به هر یک استخراج می‌شود. در این مطالعه پس از تبدیل اعداد رقومی به بازتابش عملیات مربوط به تصحیحات هندسی و جدا کردن منطقه مورد مطالعه صورت گرفت و در نهایت اقدام به محاسبه SAVI و LAI شد.

استخراج شاخص سطح برگ از تصاویر سنجنده لندست TM5

از آنجا که تصاویر خام سنجنده لندست به صورت اعداد رقومی DN هستند، ابتدا آنها را به تابش و سپس به بازتاب پذیری تبدیل کرده و پس از این مراحل اقدام به محاسبه SAVI و LAI شد. تشعشع طیفی  $(L_\lambda)$  هر باند نشان دهنده انرژی تابشی خروجی از لایه واقع در بالای اتمسفر است که توسط ماهواره سنجنش می‌شود. برای سنجنده لندست TM5 این مقدار از رابطه زیر محاسبه شد:

$$L_\lambda = \left( \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \right) \times DN + L_{MIN} \quad (8)$$

که در رابطه فوق، DN مقدار عددی هر پیکسل،  $L_{MIN}$  و  $L_{MAX}$  مقادیر بیشینه و کمینه تشعشع و  $L_\lambda$

### نتایج و بحث

تاریخ تصاویر مادیس اخذ شده برای سال زراعی ۲۰۱۰ در جدول ۲ آمده است. تاریخ‌های مذکور پس از بررسی اولیه تصاویر به منظور انتخاب روزهایی با کمترین پوشش ابر در منطقه مورد مطالعه تعیین شد. تنها تصویر لندست اخذ شده نیز متعلق به ۲ ژوئن ۲۰۱۰ بود.

مقادیر معیارهای ارزیابی برآورد شاخص سطح برگ با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای در دو حالت استفاده از تصاویر ریز مقیاس شده و تصاویر سنجنده مادیس در مزارع منتخب، در جدول ۳ نشان داده شده است. طبق این جدول دامنه تغییرات معیار ME در تصاویر ریز مقیاس شده بین ۰/۴ تا ۰/۹۰۳ و در تصاویر سنجنده مادیس بین ۰/۳۱۱- تا ۰/۸۸۶ است. دامنه تغییرات RMSE برای تصاویر ریز مقیاس شده بین ۰/۱۷۴ و ۰/۴۸۸ و برای تصاویر مادیس بین ۰/۱۷۴ تا ۱/۰۶۸ است. طبق این جدول میانگین مقادیر RMSE در تصاویر ریز مقیاس شده و مادیس به ترتیب برابر ۰/۲۹۸ و ۰/۵۷۷ بدست آمد. یی و همکاران (2008, Yi et al.) نیز در تحقیق مشابه، مقدار RMSE بین LAI اندازه‌گیری شده و استخراج شده از تصاویر سنجنده مادیس را ۰/۷۶ و گزارش کردند. مایر و همکاران (2011, Maire et al.) مقدار RMSE برابر با ۰/۵۲ را در تعیین شاخص سطح برگ از تصاویر ماهواره‌ای گزارش نمودند. با توجه به میانگین مقادیر معیارهای ارزیابی مشخص شد که تصاویر ریز مقیاس شده جهت برآورد شاخص سطح برگ از دقت بیشتری نسبت به تصاویر سنجنده مادیس برخوردارند. مقدار متوسط خطای نسبی در تصاویر ریز مقیاس شده و مادیس به ترتیب برابر ۰/۲۳ و ۰/۴۴ بدست آمد. در ۷۵٪ از مزارع منتخب پس از ریز مقیاس کردن تصاویر، نتیجه بهتری حاصل شد.

مقایسه خط روند مقادیر مشاهده شده و برآورد شده شاخص سطح برگ با خط یک به یک در شکل ۲ نشان داده شده است. بر این اساس شیب خط مقایسه مربوط به تصاویر مادیس و ریز مقیاس شده به ترتیب برابر ۰/۴۹۶ و ۰/۸۱۴ و نیز ضریب تبیین مربوطه به ترتیب برابر ۰/۴۴۱ و ۰/۸۷۲ بدست آمد. بر این اساس بهره‌گیری از اطلاعات ماهواره‌ای در برآورد تغییرات مکانی و زمانی شاخص سطح برگ علاوه بر صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌تواند

### برآورد عملکرد با استفاده از مدل VSM و فرآیند

#### واسنجی مدل

پس از آماده کردن نقشه‌های شاخص سطح برگ از تصاویر مادیس و همچنین از تلفیق تصاویر مادیس و لندست در کنار داده‌های تابش موج کوتاه جذب شده از سایت نوا بصورت NCEP/NCAR و سایر ورودی‌های مورد نیاز، مقدار عملکرد برای دو حالت ریز مقیاس و بدون ریز مقیاس نقشه‌های سطح برگ در سال زراعی ۲۰۱۰ در محیط نرم افزار MATLAB شبیه سازی شد.

#### معیارهای ارزیابی

برای سنجش صحت مدل در برآورد شاخص سطح برگ و عملکرد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، از معیار-های خطای نسبی ( $E_r$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، بازده مدل (ME)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب مقدار باقیمانده ( $C_{RM}$ ) استفاده شد.

$$E_r = \frac{O_i - S_i}{O_i} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (12)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_o)^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - M_o)^2} \quad (13)$$

$$NRMSE = 100 \times \frac{RMSE}{M_o} \quad (14)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \right) \quad (15)$$

$$C_{RM} = \frac{[\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i]}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (16)$$

در این روابط،  $n$  تعداد مشاهدات،  $S_i$  مقدار شبیه سازی شده و  $O_i$  مقدار مشاهده شده و  $M_o$  میانگین مقادیر مشاهده شده است.

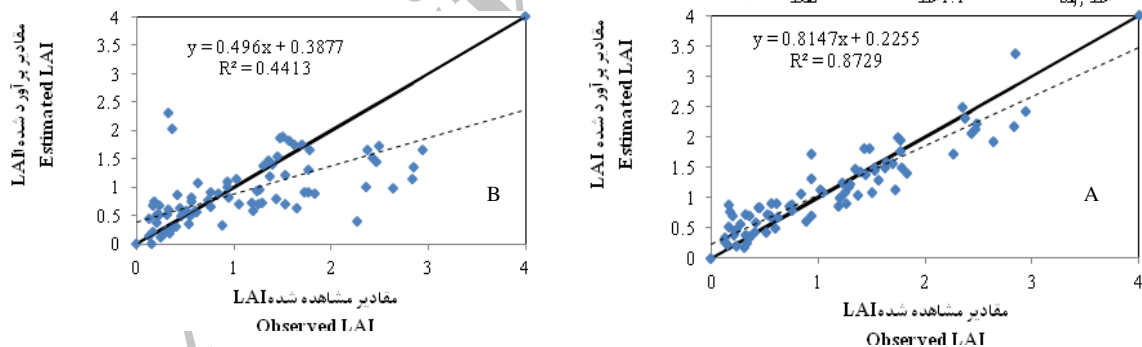
جدول ۲- تاریخ تصاویر مادیس اخذ شده برای سال زراعی ۲۰۱۰  
Table 2. Acquisition dates of MODIS satellite data in 2010

تصویر Image	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
تاریخ Date	23 May	28 May	2 June	8 June	12 June	21 June	30 June	7 July	13 July	21 July	29 July

جدول ۳- مقادیر معیارهای ارزیابی برآورد LAI از تصاویر ریز مقیاس شده و تصاویر سنجنده مادیس در مزارع منتخب

Table 3. Statistical evaluation of estimated LAI maps by two methods in the selected fields: 1. Combining MODIS and LANDSAT images and 2. MODIS images

تصاویر ریز مقیاس شده MODIS & LANDSAT images				تصاویر سنجنده مادیس MODIS images				نام مزرعه Field name
NRMSE(%)	RMSE	ME	MAE	NRMSE(%)	RMSE	ME	MAE	
22.87	0.35	0.834	0.28	51.9	0.794	0.189	0.59	پلنگل
38.88	0.355	0.578	0.25	38.7	0.355	0.58	0.31	گراکو
25.2	0.189	0.866	0.15	23.2	0.174	0.886	0.14	بوئین
18.88	0.257	0.903	0.18	69.2	0.948	-0.311	0.74	ماوردیان
16.8	0.174	0.895	0.13	42.1	0.435	0.4	0.29	شنبه بازار
41.2	0.348	0.755	0.3	47.9	0.403	0.71	0.28	ون سر
31.5	0.488	0.773	0.43	76.3	1.068	-0.103	0.83	کاظم آباد
24.6	0.225	0.4	0.18	54.6	0.445	-0.114	0.36	چوبر
27.49	0.298	0.75	0.23	50.48	0.577	0.279	0.44	میانگین



شکل ۲- مقایسه مقادیر مشاهده شده و برآورد شده شاخص سطح برگ (LAI) با استفاده از تصاویر ریز مقیاس شده (A) و تصاویر مادیس (B).  
Figure 2. Comparison of observed LAI with estimated LAI maps using two methods in the selected fields: A. Combining MODIS and LANDSAT images and B. MODIS images.

حاکی از آن بود که بیشینه مقدار این شاخص بین تاریخ-های ۳۰ ژوئن تا ۲۹ جولای صورت گرفته است. واسنجی مدل بر اساس اطلاعات مشاهده شده سال زراعی ۲۰۱۰ صورت گرفت. مقدار پارامترهای مدل VSM حاصل از فرآیند واسنجی مدل در جدول ۴ نشان داده

دقت مورد انتظار را نیز برآورده سازد. از آنجا که یکی از پارامترهای ورودی مدل VSM بیشینه شاخص سطح برگ در زمان گل‌دهی است، بیشینه مقدار این شاخص از مقایسه هیستوگرام‌های مربوط به نقشه‌های شاخص سطح برگ حاصل از تصاویر ماهواره‌ای مشخص شد که نتایج

جدول ۴- مقدار پارامترهای مدل VSM حاصل از فرآیند واسنجی

Table 4. The amounts of VSM parameters derived from model calibration

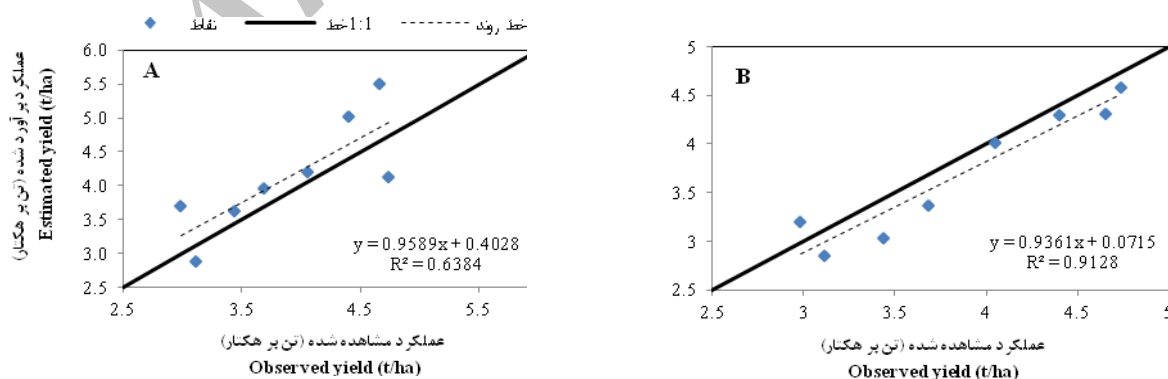
$r$ ( $Mj d^{-1} m^{-2}$ )	$v$ ( $Mj d^{-1} m^{-2}$ )	$\epsilon_r$ ( $g MJ^{-1}$ )	$\epsilon_v$ ( $g MJ^{-1}$ )	$I_h$	K
28.9	28.8	1.11	1.11	0.4	0.5

درصد در حالت برآورد عملکرد توسط تصاویر سنجنده مادیس به ۶/۶۷ درصد در حالت برآورد عملکرد با استفاده از تصاویر ریز مقیاس شده کاهش یافته است. همچنین مقادیر MAE و  $C_{RM}$  به ترتیب، از ۰/۶۱۱ به ۰/۲۳ و از ۰/۰۶۲- به ۰/۰۴۵۴ تغییر یافته است. علاوه بر این، مقدار ضریب تبیین از ۰/۶۳۸ در حالت اول به ۰/۹۱۳ در حالت دوم افزایش یافته است. مقادیر فوق و مقایسه آن‌ها نشان دهنده این نکته است که در فرآیند واسنجی مدل، تصاویر ریز مقیاس شده برآورد بهتری از عملکرد برنج در منطقه را نشان داده است. مقادیر عملکرد مشاهده شده و برآورد شده (پس از واسنجی مدل) و نیز مقدار درصد خطای نسبی در مزارع منتخب در جدول ۶ نشان داده شده است. این مقادیر در شرایط استفاده از تصاویر سنجنده مادیس و همچنین تصاویر ریز مقیاس شده به صورت جداگانه مشخص شده است.

بر اساس جدول ۶، دامنه تغییرات درصد خطای نسبی در شرایط استفاده از تصاویر سنجنده مادیس در فرآیند واسنجی مدل از ۰/۳ تا ۲۴/۰۳ درصد و در شرایط استفاده از تصاویر ریز مقیاس شده از ۷/۲۷۵ تا ۱۱/۸۱۶ درصد است. مقادیر مثبت درصد خطای نسبی نشان‌دهنده این نکته است که مقدار عملکرد مشاهده شده بزرگ‌تر از

شده است. محدوده ضریب خاموشی (K)، بین ۰/۴ تا ۰/۷ است (Hay and Walker, 1989)، که بر اساس واسنجی اعمال شده در هر دو حالت این مقدار برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد. میانگین شاخص ( $I_h$ ) پس از واسنجی برابر ۰/۴ در نظر گرفته شد.

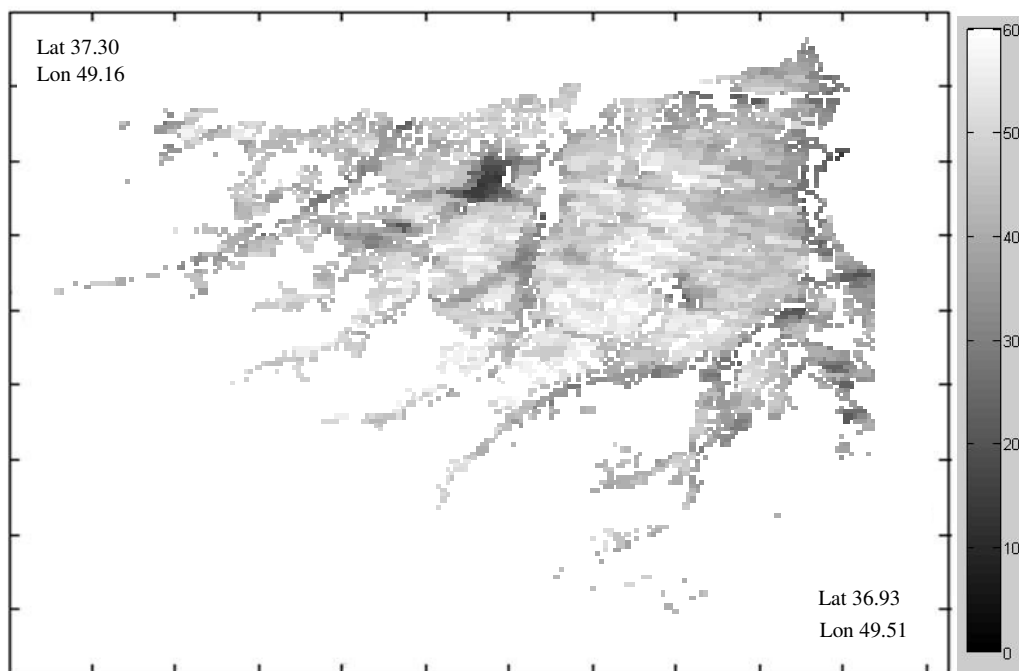
مقایسه مقادیر عملکرد مشاهده شده و برآورد شده حاصل از فرآیند واسنجی مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقدار ضریب تبیین عملکرد مشاهده شده و برآورد شده حاصل از تصاویر مادیس برابر ۰/۶۳۸ و برای تصاویر ریز مقیاس شده برابر ۰/۹۱۲ بدست آمد. مقایسه شیب و عرض از مبدأ روند مقادیر مشاهده شده و مقادیر حاصل از سنجنش از دور با خط یک به یک با استفاده از آزمون F انجام گرفت. بر این اساس اختلاف معنی‌دار بین شیب و عرض از مبدأ خط روند با خط یک به یک مشاهده نشد. نقشه‌های عملکرد برنج حاصل از تلفیق مدل VSM و تصاویر مادیس و تصاویر ریز مقیاس شده در فرآیند واسنجی مدل به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. معیارهای آماری در برآورد عملکرد توسط مدل در فرآیند واسنجی مدل برای تصاویر مادیس و ریز مقیاس شده در جدول ۵ نشان داده شده است. مطابق این جدول، مقدار NRMSE از ۱۳/۴۵



شکل ۳- مقایسه مقادیر عملکرد مشاهده شده و برآورد شده حاصل از فرآیند واسنجی مدل در استفاده از تصاویر مادیس (A) و ترکیب تصاویر مادیس و لندسات (B).

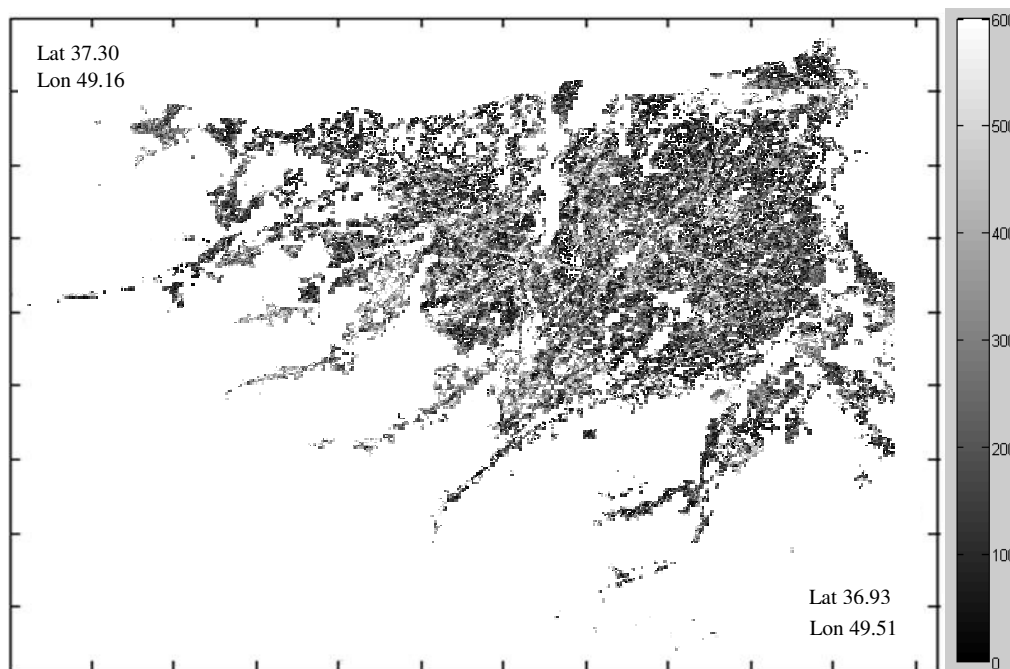
Figure 3. Comparison of observed yield with estimated yield maps using two methods in the selected fields: A) MODIS images and B) Combining MODIS and LANDSAT images.





شکل ۴- نقشه عملکرد برنج ( $\text{gm}^{-2}$ ) در سال ۲۰۱۰ حاصل از تلفیق مدل VSM و تصاویر مادیس.

Figure 4. Estimated rice yield ( $\text{gm}^{-2}$ ) in 2010 as result of combining VSM model and MODIS images.



شکل ۵- نقشه عملکرد برنج ( $\text{gm}^{-2}$ ) در سال ۲۰۱۰ حاصل از تلفیق مدل VSM و تصاویر ریز مقیاس شده.

Figure 5. Estimated rice yield ( $\text{gm}^{-2}$ ) in 2010 as result of combining VSM model and LANDSAT and MODIS images.

جدول ۵- معیارهای ارزیابی برآورد عملکرد در فرآیند واسنجی در تصاویر سنجنده مادیس و تصاویر ریز مقیاس شده

Table 5. Evaluation criteria of yield estimation in calibration process using MODIS images and Modis & Landsat images

R <sup>2</sup>	ME	MAE	C <sub>RM</sub>	RMSE	NRMSE (%)	تصویر Image
0.638	0.332	0.611	-0.062	0.52	13.45	مادیس
0.913	0.835	0.23	0.0454	0.258	6.67	مادیس و لندست Modis & Landsat

جدول ۶- مقادیر عملکرد مشاهده و برآورد شده در فرآیند واسنجی مدل و مقدار درصد خطای نسبی (Er) در مزارع منتخب  
Table 6. Statistical evaluation of estimated yield maps by two methods in the selected fields: 1) Combining MODIS and LANDSAT images and 2) MODIS images

استفاده از تصاویر سنجنده مادیس MODIS images			استفاده از تصاویر ریز مقیاس شده LANDSAT & MODIS images			نام مزرعه Field name
Er	عملکرد برآورد شده Simulated yield	عملکرد مشاهده شده Observed yield	Er	عملکرد برآورد شده Simulated yield	عملکرد مشاهده شده Observed yield	
-14.01	5.02	4.403	2.339	4.3	4.403	پلنگل
-18.15	5.5	4.655	7.411	4.31	4.655	گراکو
-3.6	4.2	4.052	1.036	4.01	4.052	بوئین
-24.03	3.7	2.983	-7.275	3.2	2.983	ماوردیان
-5.6	3.63	3.436	11.816	3.03	3.436	شنبه بازار
-7.4	3.96	3.684	8.523	3.37	3.684	ون سر
13	4.12	4.736	3.294	4.58	4.736	کاظم آباد
7.5	2.88	3.114	8.477	2.85	3.114	چوپر
11.66	4.126	3.882	6.271	3.706	3.882	میانگین

ماهواره QuickBird و مدل راندمان تولید تخمین عملکرد گیاه را در منطقه‌ای نیمه خشک در چین بهبود بخشیدند. عملکرد برآورد شده همبستگی خوبی با مقادیر مشاهده شده نشان داد ( $R^2 = 0.86$ ). لیو و همکاران (Liu et al., 2010)، ماده خشک روی سطح زمین و عملکرد گیاه ذرت را با استفاده از داده Multi-temporal ترکیب شده با مدل راندمان استفاده از تابش تخمین زدند. بر این اساس، مقدار ماده خشک مشاهده شده با APAR حاصل از داده‌های ماهواره‌ای رابطه خطی داشت ( $RMSE = 1.33 \text{ t.ha}^{-1}$ ) و  $R^2 = 0.96$  و نیز ضریب همبستگی بین عملکرد ذرت و APAR تجمعی برای سال ۲۰۰۱، ۰/۶۷ و برای سال ۲۰۰۶، ۰/۱۵ و برای هر دو سال ۰/۷۲ به دست آمد.  $R^2 = 0.48$  را نتیجه داد و عملکرد حاصل از ترکیب یک مدل کشاورزی- هواشناسی و سنجش از دور مقادیر  $RMSE$  برابر ۱/۲۱ تن بر هکتار و  $R^2 = 0.42$  را نتیجه داد. روجاس (Rojas, 2007)، توسعه یک مدل کاربردی تخمین عملکرد و ارزیابی آن توسط اطلاعات سنجش از

عملکرد شبیه سازی شده است و برعکس. میانگین مقادیر درصد خطای نسبی در تصاویر مادیس برابر ۱۱/۶۶ درصد و در حالت استفاده از تصاویر ریز مقیاس شده برابر ۶/۲۷ درصد بدست آمده است. رن و همکاران (Ren et al., 2008)، عملکرد منطقه‌ای را برای گندم زمستانه با استفاده از داده‌های MODIS-NDVI با دقت ۲۵۰ متر در شاندانگ چین تخمین زدند. مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر عملکرد مشاهده شده و برآورد شده برابر ۰/۸۷۶ و  $RMSE$  کل آن برابر ۰/۲۱۴ تن بر هکتار بدست آمد که این مقدار کمتر از مقدار  $RMSE$  بدست آمده از مدل‌های Agro-climate (۰/۲۳۳ تن بر هکتار) بود. پن و همکاران (Pan et al., 2009)، با استفاده از عکس‌های باخ (Bach, 1998) نیز عملکرد ذرت را با استفاده از تصاویر LANDSAT- TM که به عنوان ورودی در یک مدل Agro-climate به کار رفتند، محاسبه کرد. عملکرد حاصل از مقادیر LAI بدست آمده از سنجش از دور و یک رگرسیون تجربی مقدار  $RMSE$  برابر ۱/۹۶ تن بر هکتار و

مدل واسنجی شده VSM بر اساس تصاویر ریز مقیاس شده در تخمین عملکرد برنج در مقیاس منطقه‌ای موفق بوده و با دقت قابل قبولی توانسته است عملکرد را تخمین بزند.

دور و داده های کشاورزی- هواشناسی در کنیا انجام داد. در این تحقیق مقادیر RMSE و  $R^2$  به ترتیب برابر ۰/۳۵۹ تن بر هکتار و ۰/۸۱ بدست آمد. مقایسه نتایج مطالعات مذکور و پژوهش حاضر مؤید این نکته است که

## References

- Bach, H. 1998.** Yield estimation of corn based on multitemporal LANDSAT- TM data as agrometeorological model. **Pure Appl. Op.** 7: 809-825.
- Busetto, L., Meroni, M. and Colombo, R. 2008.** Combining medium and coarse spatial resolution satellite data to improve the estimation of sub-pixel NDVI time series. **Remote Sensing of Environment** 112: 118-131.
- 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 (1): 1-17.
- Duffie, J. A., Klein, S. A., Mitchell, J. W. and Beckman, W. A. 1979.** Computers in the design of solar energy systems. **Energy** 4: 483-501.
- Faiver, R., Leenhard, D., Voltz, M., Benoit, M., Papy, F., Dedieu, G. and Wallach, D. 2004.** Spatialising crop models. **Agronomie** 24: 205-217.
- Gao, F., Masek, J., Schwaller, M. and Hall, F. 2006.** On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** 44: 2207-2218.
- Hansen, M. C., Roy, D. P., Lindquist, E., Adusei, B., Justice, C. O. and Altstatt, A. 2008.** A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin. **Remote Sensing of Environment** 112: 2495-2513.
- Hay, R. K. M. and Walker, A. J. 1989.** An Introduction to the Physiology of crop yield. Longman Scientific and Technical, New York. P 292.
- Hilker, T., Wulder, M. A., Coops, N. C., Linke, J., McDermid, G., Masek, J. G., Gao, F. and White, J. C. 2009.** A new data fusion model for high spatial- and temporal- resolution mapping of forest disturbance based on Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment** 113: 1613-1627.
- Huete, A. R. 1988.** A soil- adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment** 25: 295-309.
- Hwang T., Song, C., Bolstad, P. V. and Band, L. E. 2011.** Downscaling real- time vegetation dynamics by fusing multi- temporal MODIS and Landsat NDVI in topographically complex terrain. **Remote Sensing of Environment** 115: 2499-2512.
- Kobayashi, K. 1994.** A very simple model of crop growth: derivation and application. **International Rice Research Notes** 19 (3): 50-51.
- Leckie, D. 1990.** Advances in remote sensing technologies for forest survey and management. **Canadian Journal of Forest Research** 21: 464-483.
- Liu, J., Pattey, E., Miller, J. R., McNaim, H., Smith, A. and Hu, B. 2010.** Estimating crop stresses, aboveground dry biomass and yield of corn using multi-temporal optical data combined with a radiation use efficiency model. **Remote Sensing of Environment** 114: 1167-1177.
- Lunetta, R. S., Lyon, J. G., Guindon, B. and Elvidge, C. D. 1998.** North Americal landscape characterization dataset development and fusion issues. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 64: 821-829.

- Maire, G. L., Marsden, C., Verhoef, W., Ponzoni, F., Lo Seen, D., Begue, A., Stape, J. L. 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: 586-599.
- Markham, B. L. and Barker, J. L. 1997.** Radiometric properties of U.S. processed Landsat MSS data. **Remote Sensing of Environment** 71: 22-39.
- Masek, J. G., Huang, C. Q., Wolfe, R., Cohen, W., Hall, F. and Kutler, J. 2008.** North American forest disturbance mapped from a decadal Landsat record. **Remote Sensing of Environment** 112: 2914-2926.
- Masek, J. G., Vermote, E. F., Saleous, N. E., Wolfe, R., Hall, F. G. and Huemmrich, K. F. 2006.** A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters** 3: 68-72.
- MCST. 2006.** MODIS Level 1B Product User's Guide. NASA/Goddard Space Flight Center Greenbelt, MD 20771, 62 pp.
- Pan, G., Sun, G. J. and Li, F. M. 2009.** Using QuickBird imagery and a production efficiency model to improve crop yield estimation in the semi-arid hilly Loess Plateau, China. **Environmental Modelling and Software** 24: 510-516.
- Pape, A. D. and Franklin, S. E. 2008.** MODIS- based change detection for Grizzly Bear habitat mapping in Alberta. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 74: 973-985.
- Pirmoradian, N. and Sepaskhah, A. R. 2006.** A simple model for yield prediction of rice under different water and nitrogen application. **Biosystems Engineering** 93 (1): 25-34.
- Potapov, P., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Loveland, T. R. and Pittman, K. 2008.** Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss. **Remote Sensing of Environment** 112: 3708-3719.
- Prevot, L., Chauki, H., Troufleau, D., Weiss, M., Baret, F. and Brisson, N. 2003.** Assimilating optical and radar data in to the STICS crop model for wheat. **Agronomie** 23: 294-303.
- Quazi, K. H. and Bourque, P. A. 2010.** Spatial Enhancement of MODIS- based images of Leaf Area Index: Application to the boreal forest region of northern Alberta, Canada. **Remote Sensing of Environment** 2: 278-289.
- Ranson, K. J., Kovacs, K., Sun, G. and Kharuk, V. I. 2003.** Disturbance recognition in the boreal forest using radar and Landsat- 7. **Canadian Journal of Remote Sensing** 29: 271-285.
- Ren, J., Chen, Z., Zhou, Q. and Tang, H. 2008.** Regional yield estimation for winter wheat with MODIS- NDVI data in Shandong, China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** JAG- 191: 11P.
- Rojas, O., 2007.** Operational maize yield model development and validation based on remote sensing and agro- meteorological data in kenya. Joint Research Centre (JRC), MARS-FOOD-IPSC, EC, TP 266, 21020 Ispra (VA), Italy.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Rase, D. and Fereres, E. 2009.** AquaCrop- The FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. **Agronomy Journal** 101: 426-437.
- Vazifedoust, M. 2007.** Development of an agricultural drought assessment system: Integration of agrohydrological modelling, remote sensing and geographical information. Ph.D. Dissertation, University of Wageningen, The Netherlands.
- Yi, Y., Yang, D., Huang, J. and Chen, D. 2008.** Evaluation of MODIS surface reflectance products for wheat leaf area index (LAI) retrieval. **Remote Sensing of Environment** 63: 661-677.

## Increasing accuracy of regional rice yield estimation by improvement of spatial resolution of leaf area index maps in VSM vegetative model

Sheida Mokhtari<sup>1</sup>, Nader Pirmoradian<sup>2\*</sup>, Majid Vazifehdoost<sup>2</sup>, Naser Davatgar<sup>3</sup>

1 and 2. Graduate Student and Assist. Profs., respectively, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, 3. Research Assist. Prof., Rice Research Institute of Iran

(Received: October 16, 2012- Accepted: February 18, 2013)

### Abstract

VSM is a simple vegetative simulation model which in spite of needs to a few input data, its accuracy in field scale is acceptable. However due to high uncertainty in input data, its application in regional studies is very limited. In this study, the regional rice estimation was improved by combining VSM model with satellite data of short wave solar radiation and leaf area index. The spatial resolution of remotely sensed leaf area index from MODIS was improved using downscaling technique and high spatial satellite data of Landsat TM. Later its impact was investigated on validation process of regional rice estimation. Comparison of observed and estimated LAI with (or without) downscaling indicated that in case of applying down scaling technique accuracy of LAI maps will increase up to two times (from  $R^2= 0.44$  to  $R^2= 0.87$ ). The results indicated also in case of using downscaled LAI data in VSM model, the overall accuracy of regional rice yield estimation will increase dramatically (from  $R^2= 0.64$  to  $R^2= 0.91$ ).

**Keywords:** Downscaling, Leaf area index, Satellite data, VSM model

\*Corresponding author: npirmoradian@guilan.ac.ir ; npirmorad@yahoo.com