نشریه پژوهش‌های اقلیم شناسی
سال دهم | شماره سی و نهم | پاییز۱۳۹۸
وصول: ۱۳۹۸/۴/۲۳ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۲۴
صص ۷۴-۶۱

معرفی و ارزیابی مدلی پایدار برای تخمین شاخص سطح برگ گندم بوسیله تصاویر ماهواره‌ای در شرایط اقلیمی متفاوت

حسین زارع[۱]، محمد بنایان اول[۲*]، مهدی نصیری محلاتی[۳]، حسین ثنائی نژاد[۴]، تیلو اشترک[۵]
۱. دانشجوی دکتری گروه زراعت، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
۲ و ۳. استاد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
۴. استاد، گروه علوم و مهندسی آب ، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
۵. استاد گروه بیوژئوفیزیک، انستیتو علوم خاک، دانشگاه هونهایم آلمان

چکیده:

تخمین دقیق شاخص سطح برگ به عنوان یکی از متغیرهای کلیدی اکوسیستم دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. هدف از این تحقیق معرفی مدلی مناسب جهت برآورد شاخص سطح برگ گندم بوسیله NDVI محاسبه شده از تصاویر لندست و مقایسه دقت آن با مدل‌های رایج آماری می‌باشد. در این راستا، داده‌های چندساله در دو منطقه در جنوب غرب آلمان برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های تجربی، نیمه تجربی و مدل معرفی شده در این مقاله با نام NPLE مورد استفاده قرار گرفت. سپس مقادیر بهینه پارامترهای هر مدل برای ارزیابی در مزارع آستان قدس مشهد استفاده شد. مدل‌های مورد ارزیابی عبارتند از: ۱- وینا (مدل تجربی سه پارامتری). ۲- لیو (مدل نیمه‌تجربی با دو پارامتر تجربی و یک پارامتر مربوط به ضریب خاموشی). ۳- چادوری (مدل نیمه تجربی با پارامتر ضریب خاموشی) و ۴- NPLE (مدل تجربی بدون پارامتر) و ۵- نسخه اصلاح شده‌ی NPLE که در آن بجای NDVI از درصد پوشش گیاهی استفاده شده است. نتایج نشان داد که مدل‌های NPLE و وینا دارای خطای بیشتری نسبت به بقیه مدل‌ها بودند. مدل لیو، چادوری و NPLE اصلاح شده دارای خطای قابل قبولی در واسنجی و اعتبارسنجی بودند (RMSE~0.30). در مرحله ارزیابی مدل‌ها در مشهد، مدل NPLE اصلاح شده و چادوری بهترین نتیجه را داشتند، در حالی که مدل‌های دیگر دارای خطای سیستماتیک بالایی بودند، این مطلب نشان می‌دهد که مقادیر بهینه بدست آمده برای پارامترهای مدل‌های لیو و وینا با تغییر مکان آزمایش (مشهد) معتبر نمی‌باشند. بدلیل کمتر بودن و همچنین غیر سیستماتیک بودن خطای پیش بینی در مدل NPLE اصلاح شده، پیشنهاد می‌شود که خروجی این مدل در مطالعات واسنجی مدل‌های زراعی مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: تخمین سطح برگ، مدل آماری، سنجش از دور، شاخص گیاهی

* نویسنده مسئول: ۰۵۱۳۸۸۰۵۷۹۸
Email: mobannayan@yahoo.com

مقدمه

شاخص سطح برگ (LAI[1]) یکی از مهمترین متغیرهای بیوفیزیکی در فرآیندهای اکوسیستم می‌باشد. بنحوی که این شاخص یک پارامتر تعیین‌کننده در بسیاری از فرآیندهای فیزیکی و بیولوژیکی اکوسیستم‌ها از جمله فتوسنتز، چرخه آب، کربن و نیتروژن، و همچنین موازنه انرژی در سطح زمین می‌باشد (Ingwersen et al., 2018). در مطالعات کشاورزی این شاخص در تعیین زمان و میزان آبیاری، نیاز کودی و همچنین عملکرد گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرد (McPherson, 2007). با توجه به اهمیت وافر سطح برگ، این شاخص همواره یکی از مهمترین متغیرهای مدل‌های سطح زمین، موازنه انرژی و آب، و مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی و همچنین مدل‌های اقلیمی بزرگ مقیاس بوده است (Ingwersen et al., 2018). اهمیت این شاخص در رشد گیاه از یکسو و مشکل بودن اندازه‌گیری آن (به دلیل پویایی زمانی و مکانی شاخص سطح برگ در طول فصل رشد) از سوی دیگر سبب شده است که کاربران مدل‌های گیاهان زراعی با مشکلات بسیاری در واسنجی مدل‌های زراعی در مقیاس بزرگ داشته باشد، از این رو روش‌های متعددی توسط محققین برای یافتن ارتباط مناسب بین LAI و تصاویر سنجش از دور ارائه شده است (Bréda, 2003; Jonckheere et al., 2004; Weiss et al., 2004). علی‌رغم تلاش زیاد در زمینه ارائه مدل‌های آماری تخمین سطح برگ بوسیله تصاویر ماهواره‌ای، این مدل‌ها هنوز دارای عدم قطعیت نسبتا زیادی می‌باشند. عدم قطعیت خروجی این مدل‌ها به منحنی رفتار بازتابندگی پوشش‌های گیاهی، خصوصیات بیوفیزیکی گیاه و همچنین به نوع شاخص تولید شده از تصاویر ماهواره‌ای بر می‌گردد. منحنی رفتار بازتابندگی پوشش گیاهی به طول موج‌های مختلف، نشان از واکنش زیاد پوشش گیاهی به محدوده طول موج قرمز و مادون قرمز می‌دهد. این ناحیه به لبه قرمز[2] معروف می‌باشد. با توجه به این مطلب، اکثر شاخص‌های گیاهی از روابط ریاضی بین باندهای موجود در محدوده لبه قرمز بدست آمده‌اند. در واقع هدف اصلی این شاخص‌ها ایجاد بارزنمایی در پوشش گیاهی و کم کردن اثرات تخریبی اتمسفر و خاک پس زمینه می‌باشد. از مهمترین این شاخص‌ها می‌توان به NDVI و SAVI اشاره نمود. نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که این شاخص‌ها در برآورد مقادیر کم سطح برگ (کمتر از ۳) توانایی خوبی دارند (Hatfield et al., 2008; Gitelson, 2014). زمانی که سطح برگ به مقادیر بالاتر از ۳ می‌رسد، با عدم کفایت شاخص‌های گیاهی روبرو می‌شویم که به آن اشباع شدگی شاخص گیاهی می‌گویند (Baret and Guyot, 1991). به عبارت دیگر در مقادیر بالای سطح برگ، میزان حساسیت شاخص‌های گیاهی بطور سیستماتیک کاهش می‌یابد. شدت و زمان اشباع شدگی در گیاهان مختلف، متفاوت است و شکل فضایی کنوپی گیاه و مقدار نیتروژن برگ و همپوشانی برگ‌ها تاثیر مستقیمی بر در بروز اشباع شدگی دارد. در واقع همپوشانی برگ‌ها که مستقیما تابعی از زاویه برگ می‌باشد، علت اشباع شدگی است. اگر چه شاخص‌های گیاهی متعددی به‌منظور بهبود رابطه بین تصاویر ماهواره‌ای و شاخص سطح برگ تولید شده است، اما همچنان پدیده اشباع شدگی بزرگترین مانع جهت استفاده از شاخص‌های گیاهی در تحقیقات مختلف مطرح بوده است.

جهت مقابله با پدیده اشباع شدگی و افزایش میزان حساسیت شاخص‌های گیاهی، مدل‌های مختلفی ارائه شده است. بطور کلی تمامی الگوریتم‌های برآورد سطح برگ بوسیله روش‌های سنجش از دور را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم‌بندی کرد: مدل‌های آماری و مدل‌های فیزیکی. مدل‌های آماری مبتنی بر روابط آماری بین شاخص‌های گیاهی محاسبه شده همچون NDVI از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص سطح برگ می‌باشند. مدل‌های فیزیکی بر اساس روابط معکوس بازتابندگی پوشش گیاهی کار می‌کنند (Thorp et al., 2012). استفاده از مدل‌های فیزیکی بدلیل نیاز به تعداد زیاد پارامتر برای حل معادلات تابشی بسیار مشکل بوده، لذا برای اجرای این مدل‌ها به داده‌های ورودی زیادی نیاز می‌باشد (Duveiller et al., 2011). در طرف مقابل، مدل‌های آماری از تعداد پارامتر کمتری برخوردار بوده و علی‌رغم خطای بیشتر، استفاده از آن‌ها در سطوح

1. Leaf Area Index
2. Red Edge

وسیع رایج‌تر می‌باشد. در مدل‌های آماری معمولا از روابط تجربی جهت تخمین سطح برگ استفاده می‌شود (Viña et al., 2011). از رایج‌ترین الگوریتم‌های مورد استفاده می‌توان به معادلات نمایی و لگاریتمی اشاره کرد. غیر خطی بودن خروجی این مدل‌ها نسبت به ورودی‌های آنها (شاخص‌های گیاهی) تا حدودی مشکل اشباع‌شدگی را بر طرف کرده‌اند، اما کماکان در مقادیر بالای سطح برگ ناتوان بوده‌اند. استفاده از پارامترهای مربوط به زاویه برگ و ضریب خاموشی نور در کنوپی در مدل‌های تجربی نیز از دیگر راهکارهای مقابله با پدیده اشباع شدگی می‌باشد که در برخی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Thorp et al., 2012; Liu et al., 2012).

از دیگر روش‌های ایجاد حساسیت در شاخص‌های گیاهی نسبت به مقادیر بالای سطح برگ، تبدیل شاخص‌های گیاهی به درصد پوشش سطح زمین بوده است. بدین منظور، بالاترین مقدار شاخص در طول دوره رشد گیاه (VI_{max}) در منطقه مورد مطالعه به معنی پوشش کامل گیاهی و مقدار شاخص برای خاک بدون پوشش (VI_{min})، حداقل پوشش گیاهی تعریف می‌شود (Choudhury et al., 1994).

$$CC = \frac{VI - VI_{min}}{VI_{max} - VI_{min}} \qquad \text{معادله (۱)}$$

در معادله بالا VI به معنای شاخص گیاهی[1] و CC نشان دهنده درصد پوشش زمین توسط سطح سبز گیاهی[2] می‌باشد.

چادوری و همکاران (Choudhury et al., 1994) با استفاده از این مفهوم و همچنین اضافه کردن یک پارامتر برای تصحیح زاویه برگ، مدل مناسبی برای تخمین شاخص سطح برگ در پوشش‌های مختلف گیاهی طراحی کرد. تورپ و همکاران (Thorp et al., 2012) در آزمایشی مزرعه‌ای نشان دادند که مدل چادوری در تخمین سطح برگ گندم از مدل فیزیکی PROSAIL که نیاز به ۱۴ پارامتر ورودی دارد، نتیجه بهتری دارد.

افزایش تعداد پارامترهای مدل‌های تجربی از یک‌سو باعث بهبود نتایج اعتبارسنجی مدل می‌شود، ولی از سوی دیگر اضافه کردن هر پارامتر همراه با افزایش عدم قطعیت خروجی مدل نسبت به پارامتر جدید می‌باشد[3]. علاوه بر این در صورتی که پارامترهای مدل تجربی فاقد تفاسیر بیوفیزیکی و یا فیزیولوژی در گیاه باشند، تعیین محدوده تغییرات آن و همچنین مقدار بهینه آنها بسیار دشوار خواهد بود و نیاز به جمع آوری داده‌های زیادی جهت اعتبارسنجی آن‌ها می‌باشد.

هدف از این مطالعه معرفی یک مدل آماری پایدار (از نظر زمانی و مکانی) برای تخمین شاخص سطح برگ گندم بوسیله شاخص گیاهی NDVI و مقایسه آن با مدل‌های رایج آماری می‌باشد. در این راستا داده‌های بلند مدت (۲۰۱۰-۲۰۱۶) از ۶ مزرعه در دو منطقه آلمان و تصاویر لندست جهت واسجی و اعتبارسنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سپس مدل‌های مورد بررسی در ۱۶ مزرعه آستان قدس در مشهد ارزیابی شدند.

مواد و روش‌ها

۱- داده های مورد استفاده و مناطق مورد مطالعه

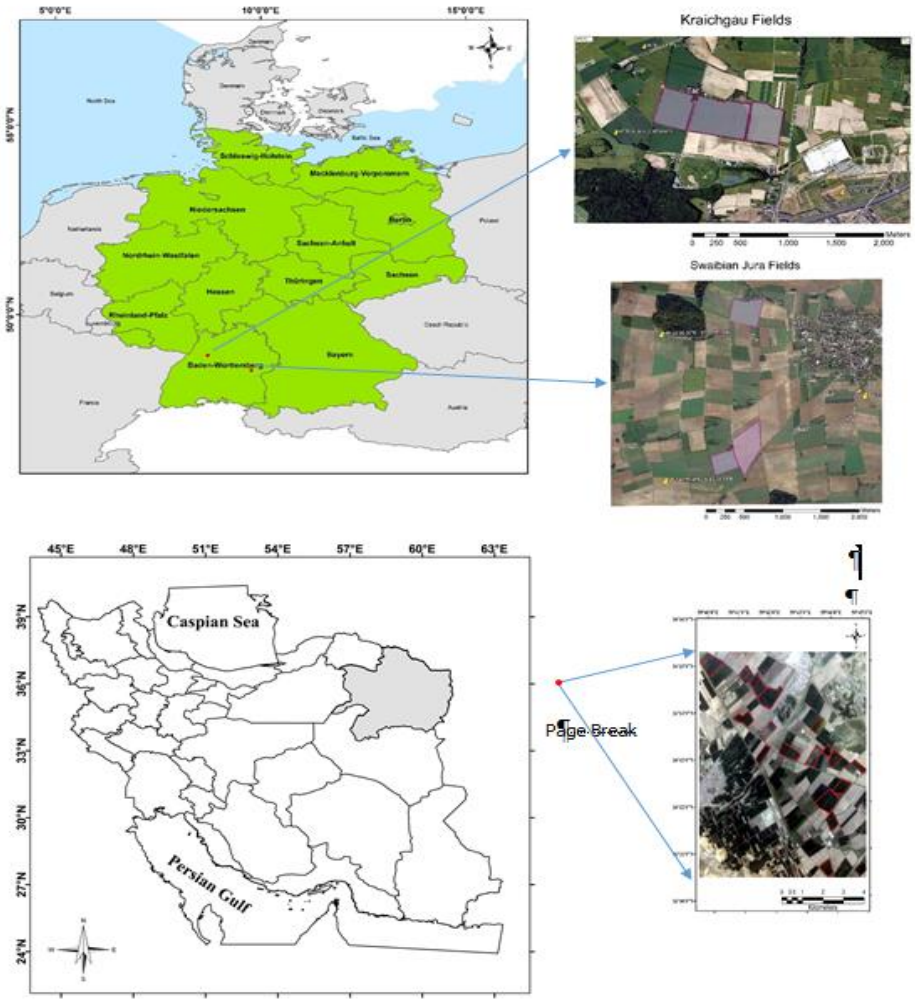
داده های مزرعه ای مورد استفاده در این مطالعه، از دو پروژه مستقل بدست آمده اند. پروژه اول[4] در دانشگاه هوهنهایم آلمان اجرا شده است. این پروژه ی چند منظوره با هدف بررسی و مطالعه فرایندهای اراضی کشاورزی در مواجه با تغییر اقلیم اجرا شده است. در پروژه مذکور شش مزرعه در دو منطقه واقع در جنوب غرب آلمان با نام‌های کراشگاو و سویبین یورا در مدت هشت سال مورد مطالعه قرار گرفتند (Ingwersen et al., 2018). تعداد مزارع و سال هایی که کشت گندم در آن ها صورت گرفته در جدول یک نمایش داده شده است. اندازه گیری سطح برگ مزارع گندم از اواخر ماه مارس، زمانی که تقریبا گندم در حال گذار از مرحله پنجه‌زنی می‌باشد، با فاصله زمانی هر دو هفته به روش غیر تخریبی و با دستگاه LAI-2000 انجام شد.

مشخصات اقلیمی مناطق مورد مطالعه در آلمان:

1. Vegetation index
2. Canopy Cover
3. Over parametrization
4. https://klimawandel.uni-hohenheim.de

کراشگاو: این منطقه با ارتفاع بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ متر از سطح دریا در شمال غرب ایالت بادن–ورتمبرگ قرار دارد (شکل ۱). اقلیم این منطقه معتدل بوده و میانگین دمای سالیانه در حدود ۱۰–۹ درجه سانتی گراد می‌باشد و به عنوان گرمترین منطقه آلمان معرفی شده است. مجموع بارش سالیانه در حدود ۷۵۰ میلیمتر بوده که در تمامی ماه‌های سال پراکنده بوده و همچنین دارای بارندگی‌های شدید در تابستان می‌باشد. سهم اراضی کشاورزی در منطقه در حدود ۵۳ درصد است. به دلیل حاصلخیز بودن خاک منطقه گیاهان زراعی دارای عملکرد بالایی می‌باشند. گیاهان زراعی رایج منطقه شامل گندم زمستانه، کلزای زمستانه، جو بهاره ذرت و چغندرقند می‌باشد (Ingwersen et al., 2018).

سوبین یورا: این منطقه در ناحیه مرکزی ایالت بادن–ورتمبرگ قرار داشته و دارای ارتفاعی بین ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ متر است (شکل ۱). بدلیل ارتفاع بیشتر از کراشگاو، دمای این منطقه سردتر و همچنین دارای زمستان‌های سردتری می‌باشد. میانگین دمای سالیانه در حدود ۶–۷ درجه سانتی گراد و مجموع بارندگی سالیانه در حدود ۹۰۰ میلیمتر است. با توجه به کوهستانی بودن این منطقه، اراضی کشاورزی سهم کمتری در مقایسه با کراشگاو دارند. عمق خاک زراعی و همچنین حاصلخیزی خاک کمتر از منطقه کراشگاو بوده و لذا کشاورزی از فشردگی کمتری برخوردار می‌باشد. با این وجود تنوع گیاهان زراعی منطقه بیشتر است، بطوریکه گیاهان عمده این منطقه شامل تریتیکاله، شبدر، ذرت، گندم زمستانه، جو بهاره، ذرت علوفه‌ای می‌باشد (Ingwersen et al., 2018).



شکل ۱– موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه. الف: آلمان، ب: ایران

با توجه به بارندگی بالای هر دو منطقه و همچنین توزیع بارش‌ها، هچگونه آبیاری در طول دوره رشد گیاهان صورت نمی‌گیرد. البته با توجه به نامنظمی بارش‌ها در برخی سال‌ها، گیاهان تابستانه مقداری با تنش خشکی روبرو خواهند شد.

پروژه دوم در دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. در این پروژه ۱۷ مزرعه گندم از مزرعه نمونه آستان قدس رضوی در سال ۱۳۹۳-۱۳۹۴ انتخاب و در طول دوره رشد پایش شدند. وسعت مزارع مورد مطالعه در حدود ۸-۱۵ هکتار بودند. اندازه‌گیری سطح برگ در مشهد نیز بر اساس مراحل فنولوژیکی، شبیه به اندازه‌گیری‌های آلمان صورت گرفت. با توجه به اقلیم متفاوت مشهد، اندازه‌گیری‌ها از اواخر اسفند ماه شروع و تا مرحله خمیری شدن دانه ادامه داشت. اندازه‌گیری‌ها بوسیله دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ مدل LI-COR صورت گرفت.

مشهد: شهرستان مشهد دارای اقلیم خشک و نیمه خشک سرد می‌باشد. میانگین دمای حداکثر و حداقل این منطقه در دوره بلند مدت ۶۰ ساله (از سال ۱۳۲۹ تا ۱۳۸۹) به ترتیب حدود ۲۱/۲ و ۷/۳ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش سالانه این شهر حدود ۲۵۱ میلی‌متر می‌باشد (Salehnia et al., 2017). اراضی مزرعه نمونه آستان قدس رضوی با ۱۴ هزار هکتار وسعت و ۹۱ حلقه چاه، واقع در جنوب شرقی مشهد در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۹ دقیقه عرض شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ دقیقه و ۳ درجه تا ۶۰ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است. بر اساس آمار مزرعه نمونه آستان قدس ۹۴۶ هکتار از این ارضی در سال ۹۴-۹۳ تحت کشت گندم قرار گرفت. آب مورد نیاز این اراضی از ۳۳ حلقه چاه تأمین می‌شود که مزارع به اسم چاه‌ها نامگذاری شده است (Asadi et al., 2018).

تصاویر مورد استفاده

با توجه به مساحت اراضی مورد استفاده و بررسی قدرت تفکیک زمانی و مکانی تصاویر ماهواره‌ای موجود، ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ انتخاب و تمامی تصاویر در طول دوره رشد گندم از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ از سایت https://earthexplorer.usgs.gov/ دانلود گردید. تصاویر ماهواره لندست دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و در بازه ۱۶ روزه قابل دسترس می‌باشند. بدلیل ابرناکی بودن آسمان بسیاری از تصاویر حذف شدند. بطوریکه در هر سال بین ۲-۶ تصویر قابلیت استفاده را داشتند. خوشبختانه تصاویر لندست موجود در سایت دارای کیفیت سطح یک بوده و لذا نیازی به انجام تصحیح هندسی نداشتند. تصحیح رادیومتریک تصاویر که بیشتر بدلیل وجود بخار آب در اتمسفر و دیگر آلاینده‌هایی که باعث کاهش بازتابش نور در سطح سنسور ماهواره می‌باشند، بوسیله مدل ATCOR 2 در نرم افزار اردس انجام شد. مدل ATCOR یکی از روش های متداول و موثر جهت از بین بردن اثر اتمسفر در تصاویر لندست می‌باشد (Xu and Guo, 2014; Janzen et al., 2006). بعد از انجام مراحل پیش پردازش تصاویر (تصحیحات اتمسفریک) تصاویر از محل مزارع مورد مطالعه برش داده شدند. به منظور جلوگیری از حضور پیکسل‌های مختلط در حاشیه مزارع و همچنین با توجه به وسعت کافی مزارع و قدرت تفکیک مکانی تصاویر لندست (۳۰ متر)، تصاویر با فاصله‌ی ۳۰ متری از حاشیه مزارع برش داده شدند.

جدول ۱- تعداد سال و تصاویر مورد استفاده در مناطق مورد مطالعه

Location	year	Number of images	Number of fields
Kraichgau	2010	4	1
	2011	4	2
	2012	2	1
	2013	5	3
	2014	6	1
	2015	7	2
	2016	6	1
Swabian Jura	2010	5	1
	2011	4	2
	2012	-	-
	2013	-	-
	2014	3	2
	2015	5	1
	2010	-	-
Mashhad	2015	4	17

پس از انجام پیش پردازش تصاویر، اطلاعات موجود در باندهای مختلف که بصورت اعداد رقومی[1] ذخیره شده‌اند، باید به شاخص گیاهی تبدیل شوند. شاخص‌های گیاهی از روابط ساده ریاضی بین باندهای مختلف بدست می‌آید و هدف آن بارزسازی پوشش‌های گیاهی می‌باشد. از آنجایی که انعکاس گیاه در طول موج‌های قرمز و مادون قرمز نزدیک در سلامت و میزان کلروفیل پوشش‌های گیاهی نقش بسزایی دارند، اکثر شاخص‌های گیاهی بر پایه این دو باند استوار شده‌اند (Gray et al., 2012; Gao et al., 2014). در واقع در شرایطی که گیاه سالم است و میزان کلروفیل به اندازه کافی وجود دارد، باند مادون قرمز نزدیک از بیشترین بازتاب برخوردار است. هرچقدر که میزان کلروفیل گیاه کاهش پیدا کند نسبت بازتاب باند مادون قرمز نزدیک بصورت قابل توجهی کاسته می‌شود.

در این مطالعه از شاخص گیاهی NDVI بعنوان پرکاربردترین شاخص گیاهی استفاده شده است. NDVI شاخصی است که به منظور توصیف پوشش گیاهی توسعه یافته و با استفاده از تفاوت بین طول موج مادون قرمز نزدیک و قرمز می‌تواند نقاط دارای پوشش گیاهی را نمایان سازد (Gray et al., 2012; Gao et al., 2014).

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red}$$ معادله (۲)

در معادله بالا، NIR بیانگر بازتاب در محدوده مادوق قرمز نزدیک و Red بازتاب در محدوده طول موج قرمز را نشان می‌دهد. با توجه به معادله مذکور، دامنه تغییرات این شاخص بین ۱- و ۱+ می‌باشد. نتایج مطالعات متعددی که در رابطه با NDVI و پوشش‌های گیاهی انجام شده، نشان داده که مقادیر کمتر از ۰/۲ بازتاب از خاک بدون پوشش را نشان می‌دهد. همچنین، مقادیر نزدیک به یک در پوشش‌های با تراکم بالا بدست می‌آید. بعد از اعمال پیش پردازش‌های مورد نیاز، شاخص NDVI برای تمامی پیکسل‌های هر مزرعه محاسبه شد. سپس میانگین مقدار تمامی پیکسل‌ها به عنوان NDVI کل مزرعه استفاده شد.

۲- روش تحقیق

به منظور بررسی روابط آماری بین NDVI و شاخص سطح برگ، سه مدل آماری با درجه‌های مختلف از نظر پارامترهای مورد استفاده، انتخاب گردید. مدل نمایی، مدل چادوری و NPLE (در ادامه توضیح داده شده است) مورد بررسی قرار گرفتند.

۱- مدل نمایی با پارامترهای تجربی: در این نوع مدل‌ها از رابطه نمایی و لگاریتم طبیعی برای برقراری ارتباط بین NDVI و شاخص سطح برگ استفاده می‌شود. پارامترهای مورد استفاده در این مدل که بوسیله وینا و همکاران (Viña et al., 2012) ارائه شد کاملا آماری می‌باشند. انتخاب این پارامترها صرفا بر اساس حداکثر میزان نزدیکی خروجی مدل به سطح برگ اندازه‌گیری شده بوده است. انتخاب این پارامترها در جهت تعیین شکل تابع می‌باشد، به نحوی که حداکثر شباهت با تغیرات زمانی شاخص سطح برگ را داشته باشد.

$$LAI = \frac{\ln\left(\frac{1}{1-\left(\frac{NDVI-b}{a}\right)}\right)}{c}$$ معادله (۳)

هر سه پارامتر a، b و c در معادله بالا بوسیله کالیبراسیون مدل بدست می‌آیند. در واقع می‌توان روش وینا را روشی تجربی قلمداد کرد که پارامترهای آن تفسیر بیوفیزیکی ندارند. با این وجود نتایج خوبی در برآورد شاخص سطح برگ در ذرت و سویا داشته است (Viña et al., 2012).

۲- مدل نمایی نیمه تجربی: در این مدل از رابطه نمایی و لگاریتم طبیعی برای برقراری ارتباط بین NDVI و شاخص سطح برگ استفاده می‌شود. این مدل که مورد استفاده توسط بارت و گویت (Baret and Guyot, 1991) ارائه و بوسیله لیو و همکاران (Liu et al., 2012) بهبود بخشیده شد، دارای سه پارامتر می‌باشد:

$$LAI = -\left(\frac{1}{k}\right)\ln(a(-b \times NDVI))$$ معادله (۴)

پارامتر kنشان‌دهنده ضریب خاموشی نور در گیاه می‌باشد. مقدار این پارامتر به شکل کنوپی، زاویه برگ‌ها و همچنین زاویه تابش نور به کنوپی بستگی دارد، که برای گیاهان عمودی برگ مانند گندم در حدود ۰/۶ تا ۰/۷ می‌باشد. پارامترهای a و b ضرایب تجربی مدل می‌باشند که بوسیله واسنجی مدل بهینه می‌شوند. با توجه به ماهیت پارامترهای

1 - Digital Number

مورد استفاده، این الگوریتم‌ها در گروه مدل‌های نیمه تجربی قرار می‌گیرند.

۳- مدل چادوری: این مدل که توسط چادوری (Choudhury et al., 1994) ارائه شد نیز بر مبنای رابطه لگاریتم طبیعی بین NDVI و سطح برگ شکل گرفته است. با این تفاوت که در مدل چادوری بجای استفاده از NDVI از تبدیل غیرخطی آن استفاده شده است. بدین صورت که ابتدا مقادیر NDVI و یا هر شاخص گیاهی دیگر، بوسیله معادله (۱) به درصد پوشش زمین تبدیل می‌شود و مقدار درصد پوشش برای محاسبه سطح برگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس مقدار سطح برگ گیاه از معادله ۵ بدست می‌آید:

$$LAI = \frac{\ln(1-CC)}{-\beta}$$ معادله (۵)

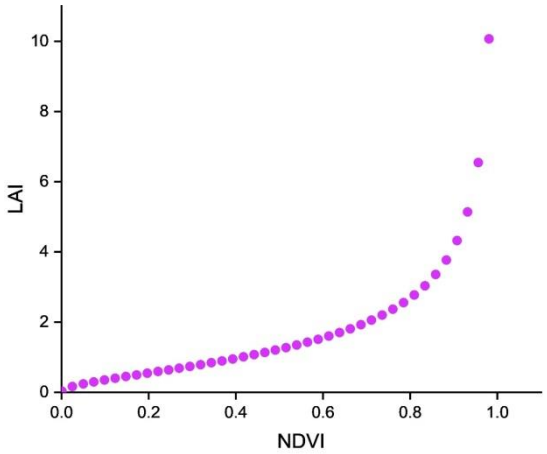
پارامتر β تابعی از توزیع زاویه‌ای برگ گیاه می‌باشد. این پارامتر نیز به نوعی توصیف‌کننده‌ی ضریب خاموشی نور در نفوذ به درون کنوپی می‌باشد. مقدار β در محدوده بین ۰/۴ تا ۰/۷ گزارش شده است.

۴- مدل بدون پارامتر برآورد کننده سطح برگ (NPLE): مدل بدون پارامتری که در این مطالعه ارزیابی و معرفی می‌شود، مدل بدون پارامتر برآورد کننده سطح برگ نام‌گذاری شده است. NPLE از یک الگوریتم بدون پارامتر بدست آمده است.

$$LAI = \sqrt{\frac{1+NDVI}{1-NDVI} \times NDVI}$$ معادله (۶)

با توجه به مقادیر NDVI در پوشش‌های گیاهی، مقادیر خروجی توسط NPLE بین صفر تا ۱۰ تغییر می‌کند. با توجه به ساختار این الگوریتم، تغییرات سطح برگ در مقادیر بالای NDVI دارای حساسیت زیادی می‌باشد (شکل ۲). بنظر می‌رسد که این الگوریتم در جهت بارزسازی تغییرات سطح برگ در پوشش‌های متراکم موثر باشد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، شیب تغییرات سطح برگ با افزایش مقدار NDVI از ۰/۸ افزایش چشم‌گیری نسبت به مقادیر NDVI کمتر از ۰/۸ دارد.

علاوه بر ارزیابی مدل NPLE، نسخه اصلاح شده‌ای از این الگوریتم مورد آزمایش قرار گرفت، بدین صورت که بجای استفاده از NDVI جهت ورودی مدل، از درصد پوشش استفاده می‌شود. بدلیل اینکه بازه تغییرات درصد پوشش بین صفر و یک می باشد، از نظر تئوری، این تغییرات قابل قبول می‌باشد.



شکل ۲- رابطه بین NDVI و سطح برگ تمین زده شده توسط مدل NPLE. فاصله نقاط روی محور افقی برابر ۰/۰۲۵ می باشد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها

تمامی مدل‌هایی که در آنها از یک یا چند پارامتر استفاده می‌شود، نیاز به واسنجی و اعتبارسنجی جهت تعیین مقدار بهینه پارامترها دارند، بنحوی که خطای برآورد شده و اندازه‌گیری شده به حداقل برسد. با توجه به نوع پارامتر و تفسیر آن در مدل مورد نظر، دو رهیافت جهت برآورد مقدار بهینه پارامترها وجود دارد: ۱- برای پارامترهایی که تفسیر بیوفیزیکی و یا فیزیولوژیکی دارند، مقدار بهینه یا بازه تغییرات آن با توجه به مفهوم و تعریف آن و از طریق آزمایشات دقیق انجام می‌شود. ۲- واسنجی مدل بوسیله تکنیک‌های آماری بهینه‌سازی (Wang et al., 2011). البته بازه تغییرات هر پارامتر باید در محدوده معقول بنحوی بهینه شود که در شرایط مشابه یا سال‌های آینده نیز بهینه باشد (Sinclair and Seligman, 2000). مدل‌های آماری بسیاری برای تعیین مقدار بهینه هر پارامتر و یا تعیین خصوصیت آماری مقدار بهینه پارامتر مانند میانگین و واریانس وجود دارند که با توجه به سادگی و پیچیدگی و همچنین بسته به پوشش کامل فضای پارامتری قابل دسته‌بندی می‌باشند. خروجی مدل‌های بهینه‌سازی بر اساس

پوشش کامل فضای پارامتری به دو دسته محلی[1] و جهانی[2] تقسیم می‌شوند. مدل‌های محلی دارای سرعت بالاتر و ساده‌تر می‌باشند، اما قادر به پوشش تمامی فضای پارامتری بمنظور پیدا کردن مقادیر حداقل (و یا حداکثر) تابع بهینه‌سازی در برهمکنش تمامی پارامترهای نمی‌باشند. مدل‌های جهانی همچون الگوریتم زنجیره مارکوف-مونته کارلو[3] (MCMC) قادر به جستجو و اکتشاف تمامی فضای پارامتری در تمامی حالت‌های برهمکنشی پارامترها می‌باشند و می‌توانند مقدار حداقل واقعی تابع بهینه‌سازی را پیدا کنند (Siedel, et al., 2018; Wallach, et al., 2012). در این مطالعه جذر میانگین مربعات خطا برای تمامی زوج‌های بدست آمده (سطح برگ اندازه‌گیری شده و برآورد شده) در چهار سال اول آزمایش (۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳) در هر دو منطقه آلمان محاسبه شد و سپس مقدار حداقل آن بوسیله الگوریتم MCMC بدست آمد. در این مقاله از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) جهت استفاده در تابع بهینه‌سازی استفاده شد. کدهای مربوط به محاسبات آماری در نرم افزار R نوشته شد.

پس از تخمین بهینه ضرایب مدل‌ها، مقدار عددی آنها تثبیت شده و در مرحله اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. اعتبارسنجی مدل‌ها با داده‌های سه سال دیگر آزمایش در آلمان انجام شد. در نهایت پارامترهای بدست آمده در مشهد مورد ارزیابی قرار گرفتند.

از آنجایی که مدل NPLE و نسخه اصلاح شده آن دارای پارامتر نمی‌باشند، لذا واسنجی و اعتبارسنجی در مورد آنها صورت نگرفت. با این حال برای مقایسه آنها با دیگر مدل‌ها، هر دو مدل برای داده‌های اعتبارسنجی، واسنجی و تست بصورت مجزا اجرا شدند.

نتایج و بحث

واسنجی مقدار بهینه پارامترهای مدل‌ها

با توجه به مقادیر گزارش شده در منابع علمی، محدوده‌ی هر پارامتر برای واسنجی تعیین شد. برای مثال، برای پارامترهای مربوط به ضریب خاموشی، محدوده بین ۰/۵ تا ۰/۸ مورد استفاده قرار گرفت (Kiniry et al., 1998; Samadiyan, et al., 2013; Soleymani, 2016). در مورد پارامترهای دیگر که تفسیر بیوفیزیکی نداشتند، بازه‌ی ۵۰ درصدی مقدار گزارش شده آنها به عنوان محدوده تغییرات آن در نظر گرفته شد. پارامترهای بدست آمده از واسنجی مدل‌ها و مقادیر گزارش شده در منابع علمی در جدول (۲) ارائه شده است. مقدار برآورد شده پرامتر بتا در مدل چادوری (۰/۶)، بسیار نزدیک به مقدار مورد استفاده برای گندم توسط تورپ و همکاران (Thorp et al., 2012) بود و این مقدار مشابه ضریب خاموشی نور در گندم می‌باشد (Soleymani, 2016). همچنین پارامتر k در مدل لیو نیز که تابعی از ضریب خاموشی نور در کنوپی می‌باشد، بسیار نزدیک به ضریب خاموشی نور بدست آمد (k=0.62). همانطور که انتظار می‌رفت مقدار این پارامتر نزدیک به پارامتر β در مدل چادوری برآورد شد. مقادیر بدست آمده برای پارامترهای a و b در مدل لیو بترتیب برابر با ۰/۹۷ و ۰/۳ بودند (جدول ۲). اگرچه مقدار پارامترهای k و a در مدل لیو نزدیک به مقدار گزارش شده بودند، اما پارامتر b بدست آمده در واسنجی، اختلاف زیادی با مقدار گزارش شده داشت (Liu et al., 2012). دو پارامتر a و b برآورد شده در مدل وینا و همکاران (Viña et al., 2011) نیز بسیار مشابه مقادیر گزارش شده بودند. پارامتر c در واسنجی مدل ۰/۳۳ بدست آمد، در حالی که مقدار این پارامتر ۰/۶۱ گزارش شده است.

با توجه به منطقه، نوع پوشش‌های مختلف گیاهی، مقدار کلروفیل و سبزینگی گیاهان مختلف، زاویه برگ و معماری اندام‌های مختلف گیاه و همچنین مدیریت زراعی (تراکم و کوددهی) (زاهد و همکاران، ۲۰۱۳، Samadiyan, et al., 2013; Kiniry et al., 1998) انتظار می‌رود که پارامترهای β و k در مدل‌های چادوری و لیو منطبق بر مقادیر اندازه‌گیری شده در منابع علمی باشد. این مقدار برای گندم در حدود ۰/۸-۰/۵ برآورد شده است (Gallager et al., 1978). بنابراین مقادیر بدست آمده در واسنجی قابل قبول

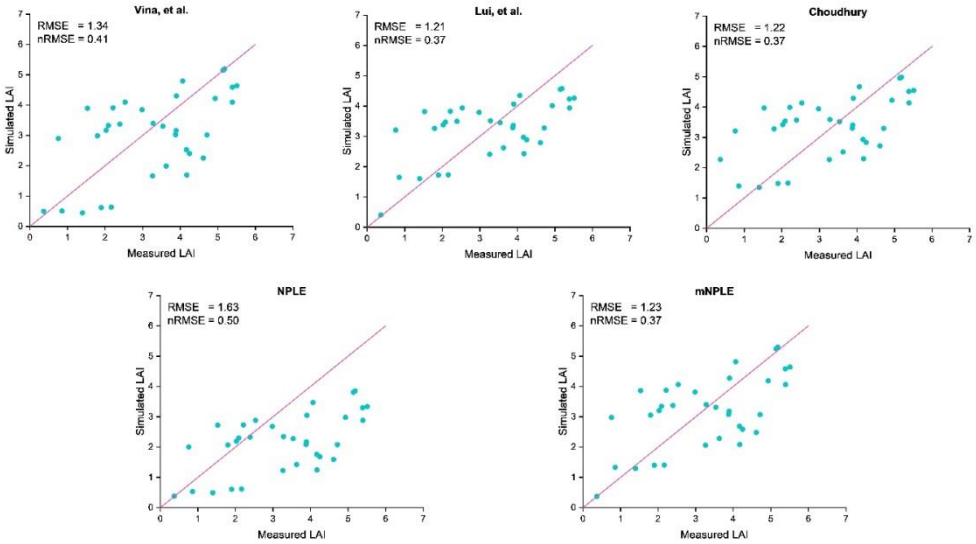
1. Local optimization
2. Global optimization
3. Markov chain Monte Carlo

می‌باشند. از آنجایی که محدوده تغییرات پارامترهای دیگر مدل‌ها تعیین نشده و یا تفسیر فیزیولوژیک و بیوفیزیکی در مورد آنها گزارش نشده است، مقادیر بدست آمده قابل تحلیل نمی‌باشند..

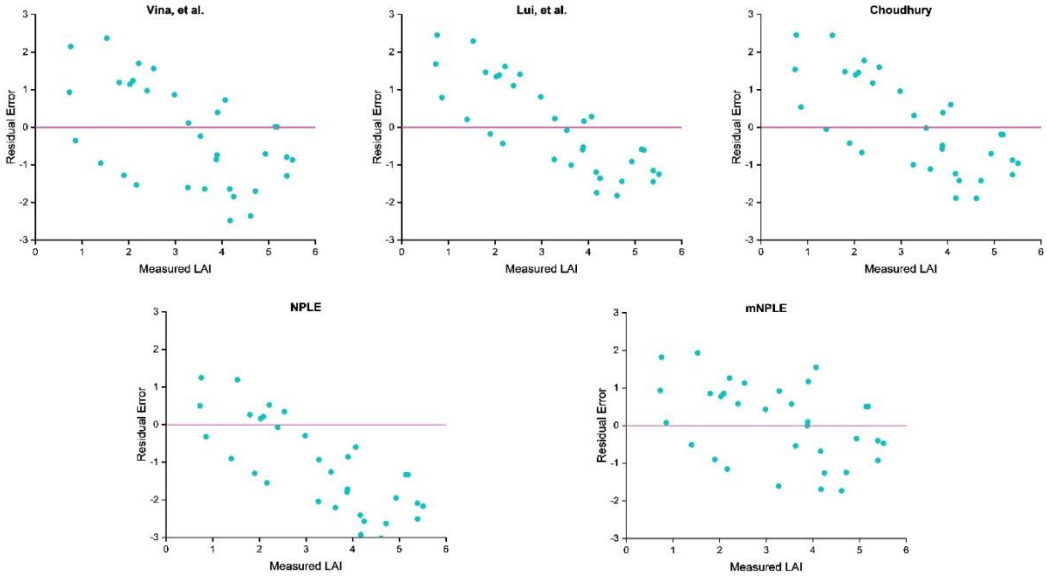
جدول ۲- مقادیر بهینه ی پارامترهای مدلهای مختلف و مقادیر گزارش شده آنها

Model	Parameter	Estimated	Reported	Reference
Choudhury	β	0.60	0.66	Thorp, et al. (2013)
Lui, et al.	k	0.62	0.64	Liu, et al. (2012)
	a	0.97	1.00	
	b	0.30	0.08	
Vina, et al.	a	0.20	0.20	Vina. et al. (2011)
	b	0.80	0.72	
	c	0.33	0.61	

کمترین خطای بدست آمده در مرحله واسنجی مربوط به مدل لیو و همکاران (Liu et al., 2012) بود (RMSE=1.21) و بیشترین خطای برآورد در مدل NPLE مشاهده شد (RMSE=1.63) (شکل ۳). خطای نرمال شده نشان می‌دهد که اختلافی بین دقت مدل‌های لوی، چادوری و NPLE اصلاح شده وجود ندارد و تمامی آنها خطای ۳۷ درصدی نسبت به میانگین سطح برگ اندازه‌گیری شده داشتند.



شکل ۳- نتایج واسنجی مدلها، خط مورب نشان دهنده خط یک به یک می باشد.



شکل ۴- آنالیز خطای مدلها

تحلیل خطای مدل‌ها در مرحله واسنجی نشان می‌دهد که مدل‌های چادوری و لیو اگرچه خطای کمتری داشتند، اما دارای خطای سیستماتیک بودند (شکل ۴). این دو مدل در مقادیر پایین سطح برگ دارای خطای مثبت و در مقادیر بالاتر (LAI>3) خطای منفی داشتند. این موضوع بیانگر این است که این مدل‌ها در اکثر مواقع تخمین بیش از حد سطح برگ در مقادیر پایین و تخمین کمتر از حد در مقادیر بالا دارند. لیو و همکاران (Liu et al., 2012) نیز بیان داشتند که در مقادیر پایین سطح برگ، تخمین بیش از حد وجود دارد. بازتاب خاک پس زمینه در مقادیر پایین سطح برگ اثر بیشتری در بازتاب کلی ایفا می‌کند و همین امر باعث بوجود آمدن خطا می‌شود. لویی و همکاران بوسیله آنالیز حساسیت مدل نشان دادند که در مقادیر سطح برگ کمتر از ۳ همبستگی منفی بین بازتابندگی خاک و NDVI وجود دارد. مدل NPLE اصلاح شده تنها مدلی بود که خطای مدل در طول مقادیر مختلف سطح برگ دارای پراکنش نسبتا ثابتی بود، این موضوع بیان کننده این مطلب است که با توجه به میزان دقت مدل NPLE اصلاح شده، تخمین سطح برگ دارای اعتماد[1] بیشتری می باشد.

اعتبارسنجی مدل‌ها

پس از برآورد و واسنجی پارامترهای مدل‌ها، مدل‌ها برای سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ اجرا شدند. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها همانند نتایج واسنجی نشان داد که مدل لیو، چادوری و NPLE اصلاح شده نسبت به بقیه مدل‌ها دارای خطای کمتری در پیش‌بینی سطح برگ می‌باشد (RMSE=1.09) (شکل ۵). مدل NPLE نیز دارای بیشترین خطا بود. تحلیل خطای تخمین سطح برگ برای اعتبارسنجی نیز کاملا مشابه واسنجی بود، به همین جهت داده‌ها ارائه نشد.

ارزیابی مدل‌ها در مشهد

مقایسه خطای محاسبه شده برای هر یک از مدل‌ها در مشهد نشان داد که کمترین خطای پیش بینی سطح برگ متعلق به مدل NPLE اصلاح شده می‌باشد (RMSE=0.77) (شکل ۶). این در حالیست که بیشترین خطا در مدل NPLE مشاهده شد (RMSE=1.98). پس از مدل NPLE اصلاح شده، کمترین خطا در مدل چادوری بدست آمد (RMSE=0.85). درصد خطای بدست آمده در مرحله ارزیابی نیز مشابه مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در حدود ۲۹ تا ۳۷ درصد بودند. مدل‌های وینا، لیو و NPLE در اکثر

1 Model reliability

مواقع دارای تخمین کمتر از حد بودند (شکل ۶) و با افزایش مقدار عددی سطح برگ انحراف خروجی این مدل‌ها بشدت افزایش پیدا کرد. در کل می‌توان گفت مدل NPLE در هیچ شرایطی تخمین قابل قبولی نداشت. نتایج ارزیابی مدل‌های لیو و وینا در مشهد بیانگر این است که پارامترهای بدست آمده از داده‌های آلمان، نیاز به تنظیم مجدد دارند. این موضع نشان دهنده منطقه‌ای بودن پارامترهای مدل‌ها می‌باشد (پارامترها وابسته به مکان هستند). بنابراین استفاده از مدل‌های مذکور نیازمند بهینه‌سازی مجدد پارامترها است. در این شرایط مدل‌های با پارامتر کمتر، بیشتر مورد اعتماد هستند. همچنین مدل‌هایی که دارای پارامترهای فیزیولوژی و یا بیوفیزیکی می‌باشند، مانند ضریب خاموشی نور در کنوپی، بوسیله اندازه‌گیری و یا استفاده از مقادیر استفاده شده در منابع قابل استفاده خواهند بود. در حالی که پارامترهای تجربی استفاده شده در مدل‌ها نیازمند واسنجی دوباره می‌باشند. مدل چادوری که تنها از یک پارامتر بیوفویزیکی (مرتبط با ضریب خاموشی نور) می باشد، دارای ثبات خطای بیشتری بود. این مدل بدون واسنجی مجدد پارامتر، دارای خطای کمتری نسبت به بقیه مدل‌های دارای پارامتر بود.

اگرچه بدلیل سادگی، مدل‌های تجربی برای استفاده در مقیاس وسیع (زمانی که داده های ورودی کم در دسترس باش) قابل استفاده می‌باشند (Chen and Cihlar, 1996; Myneni et al., 1997) اما نتایج بدست آمده از مدل‌های تجربی به سادگی قابل تعمیم به سال‌ها و مکان‌های دیگر نمی‌باشند. لذا این نوع مدل‌ها کاربرد محدودی دارند. در مقابل مدل‌های نیمه تجربی و مدل‌های مبتنی بر مکانیسم‌های بیوفیزیکی و فیزولوژی گیاهی، قابلیت کاربرد وسیع‌تری دارند. در صورتی که داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل‌های مبتنی بر مکانیسم موجود نباشد، استفاده از مدل‌هایی با پارامتر کمتر و یا مدل‌های ساده‌ای مانند NPLE اصلاح شده که هیچگونه پارامتری ندارند، توصیه می‌شود. همانگونه که نتایج شکل‌های ۳، ۵ و ۶ نشان می‌دهد، مدل NPLE اصلاح شده بدون در نظر گرفتن سال و مکان مورد استفاده دارای خطای یکسان و قابل قبولی می‌باشد. همچنین نقص بزرگ مدل‌های دیگر که سیستماتیک بودن خطا می‌باشد، در این مدل دیده نمی‌شود. در واقع با توجه به الگوریتم این مدل و همچنین بهره‌گیری از درصد پوشش گیاهی بجای NDVI این امکان را به مدل NPLE اصلاح شده می‌دهد که دارای تخمین خوبی در مقادیر بالای شاخص سطح برگ باشد.

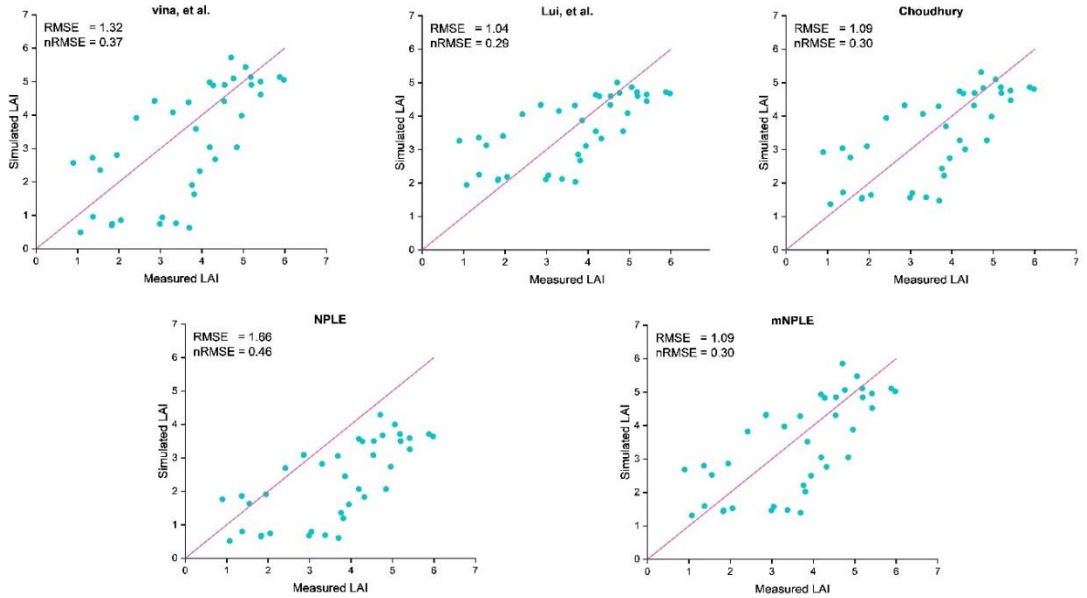
علی‌رغم نتایج بدست آمده از مدل NPLE در مناطق کراشگاو و سویبین یورا، این مدل نتایج بسیار ضعیفی در مشهد داشت. مدل NPLE از هیچگونه پارامتری برای تخمین سطح برگ استفاده نمی‌کند و همانگونه که از معادله آن مشخص است، این مدل در واقع تبدیل غیر خطی از NDVI انجام می‌دهد و خروجی آن بین صفر و ده می‌باشد. از آنجایی که مقادیر NDVI در مزارع گندم مشهد کمتر از مناطق آلمان بود (داده‌ها ارائه نشده)، سطح برگ تخمین زده شده بوسیله مدل NPLE در مشهد کمتر از دو منطقه آلمان بود (مقایسه شکل‌های ۳، ۵ و۶). با اصلاح مدل NPLE و استفاده از درصد پوشش بجای NDVI این مشکل برطرف می‌شود و نتایج تصدیق کننده این استدلال می‌باشد. لازم به ذکر است که هر چند نتایج مدل NPLE اصلاح شده در تخمین سطح برگ گندم دارای خطای کمی بوده است، اما نبود پارامتر برای این مدل، قدرت تطابق پذیری این مدل برای گیاهان مختلف را کم می‌کند. به عبارتی، این مدل شاخص سطح برگ را بدون در نظر گرفتن زاویه برگ و مقدار سبزینگی برگ، صرفا با توجه به درصد پوشش زمین توسط سطح سبز گیاه محاسبه می‌کند. گیاهانی که دارای زاویه برگ متفاوتی می‌باشند، با درصد زمین پوشی یکسان، شاخص سطح برگ متفاوتی خواهند داشت و این نکته در مدل NPLE اصلاح شده قابل اندازه‌گیری نیست. در صورتی که این مدل قابلیت ترکیب با ضریب خاموشی نور را داشته باشد، می‌توان از آن برای گیاهان دیگر نیز استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

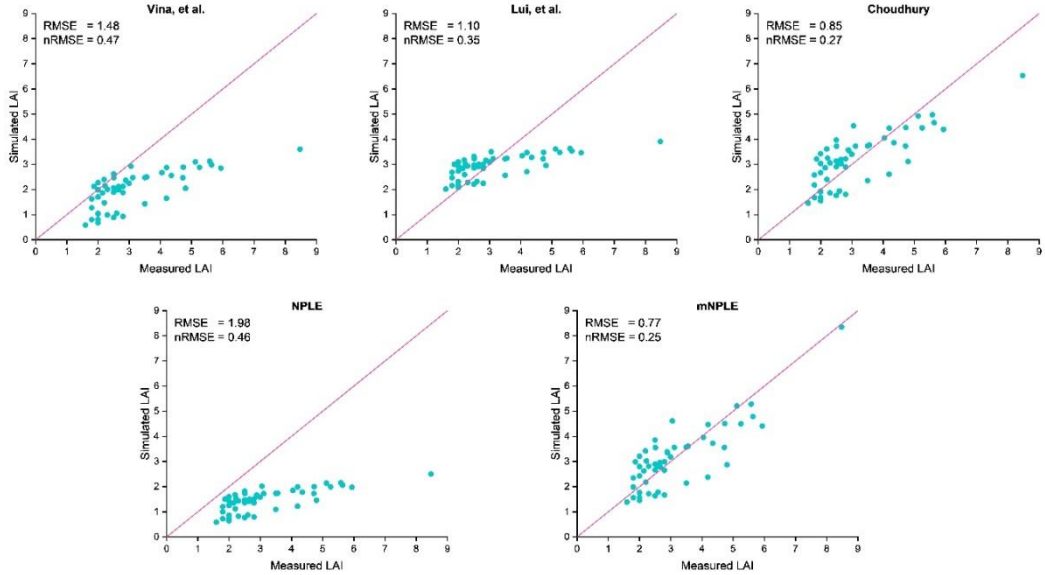
در این تحقیق پنج مدل تجربی و نیمه تجربی آماری تخمین شاخص سطح برگ گندم بوسیله شاخص NDVI تحلیل و در سه منطقه متفاوت اقلیمی و در چندین سال مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها

نشان داد که مدل تجربی وینا دارای حداکثر خطا و مدل نیمه تجربی لیو حداقل خطای برآورد را در این مرحله داشتند. همچنین نشان داده شد که پارامترهای بهینه بدست آمده در دو منطقه آلمان قابلیت استفاده برای داده‌های مشهد را ندارد. مدل NPLE که در آن هیچ پارامتری استفاده نمی‌شود و از NDVI به عنوان متغیر برآورد کننده استفاده می‌کند، دارای بیشترین خطا نسبت به دیگر مدل‌ها بوده و مقدار شاخص سطح برگ را همواره کمتر از میزان اندازه‌گیری شده تخمین می‌زند. در این مطالعه همچنین با اعمال تغییرات اندکی در مدل NPLE (تبدیل NDVI به درصد پوشش و استفاده از آن در مدل) مقدار خطای تخمین سطح برگ به حداقل رسید. از مزیت دیگر این مدل این است که هیچ گونه پارامتری در این مدل بکار برده نمی‌شود و قابل استفاده در مکان‌های مختلف می‌باشد. این نکته قابل ذکر است که اگرچه خطای تخمین سطح برگ در مدل NPLE اصلاح شده در مقایسه با مدلهای رگرسیونی بکاربرده شده در منابع تفاوت چندانی ندارد، اما مزیت آن در مستقل بودن نسبت به پارامتر می‌باشد. برای مثال در مطالعه مشابهی که توسط اسدی و همکاران (۲۰۱۸) در مشهد صورت گرفت، مدل‌های رگرسیون خطی که در آنها NDVI به عنوان متغیر مستقل جهت برآورد شاخص سطح برگ استفاده شده بودند، دارای خطای مشابهی با مدل NPLE اصلاح شده بودند. با این تفاوت که از تعداد پارامتر زیادی در محاسبات آنها استفاده شده بود.

با توجه به هزینه‌ی مالی و زمانی برای جمع‌آوری داده‌های اندازه‌گیری شده سطح برگ برای کالیبره کردن مدل‌های مختلف، بنظر می‌رسد مدل NPLE اصلاح شده از کارایی بالایی برخوردار باشد. شاخص سطح برگ برآورد شده توسط این مدل می‌تواند به عنوان داده مشاهده شده برای واسنجی مدل‌های مبتنی بر فرآیند گیاهان زراعی مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات بیشتری بر روی مدل NPLE اصلاح شده جهت امکان ترکیب آن با ضریب خاموشی نور پیشنهاد می‌شود. در صورت ترکیب مدل NPLE اصلاح شده با ضریب خاموشی نور، امکان استفاده از آن برای گیاهان دیگر نیز فراهم می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سطح برگ تخمین زده شده توسط مدل اصلاح شده NPLE گزینه مناسبی برای واسنجی مدل‌های زراعی می باشند. با توجه به عدم داده کافی برای واسنجی و اعتبار سنجی مدل‌های زراعی در مقیاس وسیع، مدل اصلاح شده NPLE کمک شایانی به محققان مدلسازی گیاهی می‌کند.



شکل ۵- نتایج اعتبار سنجی مدلها، خط مورب نشان دهنده خط یک به یک می باشد.



شکل ۶- نتایج ارزیابی مدلها، خط مورب نشان دهنده خط یک به یک می‌باشد.

References

1. Asadi, S., M. Bannayan, M. Jahan, and A. Faridhosseini, 2018, Comparison of different spectral vegetation indices for the remote assessment of winter wheat leaf area index in Mashhad. Journal of Agroecology. 10(3): 913-934.
2. Baret, F., and G. Guyot, 1991, Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment. REMOTE SENS. ENVIRON. 35:161.
3. Bréda, N.J.J., 2003, Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. Journal of Experimental Botany. 54:(392). 2403 −2417.
4. Chen, J. M., and J. Cihlar, 1996, Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. Remote Sensing of Environment, 55, 153–162.
5. Choudhury, B.J., N.U. Ahmed, S.B. Idso, R.J. Reginato, and C.S.T. Daughtry, 1994, Relations between evaporation coefficients and vegetation indexes studied by model simulations. Remote Sensing of Environment, 50(1), 1–17.
6. Duveiller, G., F. Baret, and P. Defourny, 2011, Crop specific green area index retrieval from MODIS data at regional scale by controlling pixel-target adequacy. Remote Sensing of Environment (115) 2686–2701.
7. Gallager, L.W., K.M. Soliman, D.W. Rains, C.O. Qualset, and R.C. Huffaker, 1978, Nitrogen assimilation in common wheats differing in potential nitrate reductase activity and tissue nitrate concentrations. Crop Sci. 23: 913–919
8. Gao, F., M.C. Anderson, W.P. Kustas, and R. Houborg, 2014, Retrieving Leaf Area Index from Landsat Using MODIS LAI Products and Field Measurements. IEEE Geosci. Remote Sensing Letters 11: 773–777.
9. Gitelson, A.A., Y. Peng, T.J. Arkebauer, and J. Schepers, 2014, Relationships between gross primary production, green LAI, and canopy chlorophyll content in maize: Implications for remote sensing of primary production. Remote Sensing of Environment, 144, 65–72.
10. Gray, J., and C. Song, 2012, Mapping leaf area index using spatial, spectral, and temporal information from multiple sensors. Remote Sensing of Environment 119: 173–183.
11. Hatfield, J.L., A.A. Gitelson, J.S. Schepers, and C.L. Walthall, 2008, Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. Agronomy Journal, 100: S-117–S-131.
12. Ingwersen J., P. Högy, H.D. Wizemann, K. Warrach-Sagi and T. Streck, 2018, Coupling the land surface model Noah-MP with the generic crop growth model Gecros: Model description, calibration and validation. Agricultural and Forest

Meteorology Volume 262, 15 November 2018, Pages 322-339.
13. Janzen, DT., AL. Fredeen, and RD. Wheate, 2006, Radiometric correction techniques and accuracy assessment for Landsat TM data in remote forested regions. Canadian Journal of Remote Sensing, 32(5): 330–340.
14. Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss, and F. Baret, 2004, Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. Agricultural and Forest Meteorology. 121: (1-2), 19 − 35.
15. Kiniry, J.R., J.A. Landivar, M. Witt, T.J. Gerik, J. Cavero, L.J. Wade, 1998, Radiation use efficiency response to vapor pressure deficit for maize and sorghum. Field Crops Res. 56, 265-270.
16. Liu, J., E. Pattey, G. Jégo, 2012, Assessment of vegetation indices for regional crop green LAI estimation from Landsat images over multiple growing seasons. Remote Sensing of Environment 123: 347–358.
17. McPherson, R.A., 2007, A review of vegetation-atmosphere interactions and their influences on mesoscale phenomena. Prog. Phys. Geog. 31, 261–285.
18. Myneni, R.B., R.R. Nemani, and S.W. Running, 1997, Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35, 1380–1393.
19. Salehnia, N., A. Alizadeh, H. Sanaeinejad, M. Bannayan, A. Zarrin, and G. Hoogenboom, 2017, Estimation of meteorological drought indices based on AgMERRA precipitation data and station-observed precipitation data. Journal of Arid Land. 9(6): 797–809.
20. Samadiyan, F., A. Soleymani, F. Yeganehpoor, V. Beyginiy, 2013, Evaluation of maximum light absorption and light extinction coefficient in different levels of nitrogen and wheat cultivars. International journal of Advanced Biological and Biomedical Research Volume 1, Issue 11, 2013: 1377-1386
21. Seidel, S.J., T. Palosuo, P. Thorburn, D. Wallach, 2018, Towards improved calibration of crop models – Where are we now and where should we go?. European Journal of Agronomy Volume 94, March 2018, Pages 25-35.
22. Soleymani, A. 2016. Light extinction of wheat as affected by N fertilization and plant parameters. Crop & Pasture Science, 67, 1075–1086
23. Thorp, K.R., G. Wang, A.L. West, M.S. Moran, K.F. Bronson, J.W. White, and J. Mon, 2012, Estimating crop biophysical properties from remote sensing data by inverting linked radiative transfer and ecophysiological models. Remote Sensing of Environment (124) 224–233.
24. Viña A., A. Anatoly, B. Gitelson, L. Anthony, B. Nguy-Robertson, B. Yi Peng, 2011, Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. Remote Sensing of Environment 115: 3468–3478
25. Wallach, D., N. Keussayan, F. Brun, B. Lacroix, J.E. Bergez, 2012, Assessing the uncertainty when using a model to compare irrigation strategies. Agron. J. 104, 1274–1283.
26. Weiss, M., F. Baret, G.J. Smith, I. Jonckheere, and P. Coppin, 2004, Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. Agricultural and Forest Meteorology. 121: (1-2), 37 − 53.
27. Xu, D. and X.Guo, 2014, Compare NDVI Extracted from Landsat 8 Imagery with that from Landsat 7 Imagery. American Journal of Remote Sensing. 2(2): 10-14.
28. Zahed, M., S. Galeshi, N. Latifi, A. Soltani, M. Calate and R. Hosseini, 2013, The Effect of Plant Density on Extinction Coefficient and Radiation Use Efficiency in Modern and Old Wheat (Triticum aestivum L.) Genotypes. Iranian Journal of Field Crops Research, 11(3): 506-514.