

## کاربرد تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه در بهبود دقت مدل‌های پیش‌بینی فنولوژی ذرت

مهدی قمقامی<sup>۱</sup>، نوذر قهرمان<sup>۲\*</sup>، پرویز ایران نژاد<sup>۳</sup>، خلیل قربانی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکترای هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۳. دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

۴. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۳/۲۵)

### چکیده

متداول‌ترین شیوه پیش‌بینی مراحل فنولوژیکی گیاهان، استفاده از کمیت درجه-روز رشد تجمعی (AGDD) می‌باشد. در تحقیق حاضر، مدلی برای تدقیق این روش با تلفیق دو نمایه NDVI و AGDD برای تخمین تاریخ شروع ۸ مرحله فنولوژیکی گیاه ذرت رقم K407، با استفاده از داده‌های یک دوره ۹ ساله در منطقه کرج ارائه شده است. روش هموارسازی نوفه‌ها در کاربست نمایه NDVI، ترکیبی از دو روش لجستیک دوگانه و رگرسیون وزنی (WLS-DL) می‌باشد. نتایج مدل تلفیقی با دو مدل مبتنی بر درجه-روز رشد و تاریخ کاشت مقایسه شد. یافته‌های پژوهش نشان داد، مدل تلفیقی به طور متوسط، مقدار RMSE تاریخ‌های شروع ۷ مرحله ابتدایی فنولوژیکی (ظهور تا شیری شدن) را به ترتیب ۱/۷، ۱/۴، ۰/۸، ۱/۳، ۲/۴، ۲/۴ و ۳/۳ روز نسبت به مدل مبتنی بر تاریخ‌های کاشت و ۲/۹، ۱/۷، ۱/۴، ۲/۹، ۴/۶، ۲/۹ روز نسبت به مدل درجه-روز رشد، کمتر برآورد می‌نماید.

**واژه‌های کلیدی:** نمایه پوشش گیاهی، لجستیک دوگانه، رگرسیون وزنی، فنولوژی، ذرت

### مقدمه

مراحل فنولوژی گیاه بازتاب‌دهنده زمان‌بندی رخداد‌های بیولوژیکی در یک محدوده زمانی معین هستند و نقش مهمی در مدیریت، برنامه‌ریزی و تصمیم‌سازی تولیدات زراعی ایفا می‌کنند (Shen et al., 2013 و Wu et al., 2014). با توجه به پیچیدگی فرآیندهای دخیل در وقوع رخداد‌های فنولوژیکی، مدل‌سازی این زمان‌بندی‌ها با روش‌های قطعی<sup>۱</sup>، عمدتاً بر هزینه و زمان‌بر بوده و به‌علاوه، نیازمند داده‌های ورودی زیاد از نوع خاکشناسی، گیاه و عوامل محیطی می‌باشد. گزینه دیگر، استفاده از مدل‌های غیرقطعی<sup>۲</sup> برای تعیین زمان‌بندی رخداد‌های فنولوژی گیاهی می‌باشد. مدل‌های غیرقطعی عمدتاً مبتنی بر داده‌های ورودی محدودتری بوده و ساختار ساده‌تری دارند و در بسیاری از مدل‌های زراعی استفاده می‌شوند.

متداول‌ترین مدل غیرقطعی پیش‌بینی رخداد‌های فنولوژی، مبتنی بر محاسبه شاخص دمایی درجه-روز رشد تجمعی (AGDD)<sup>۳</sup> یا واحدهای حرارتی است. جزئیات این روش

نخستین بار توسط Baskerville and Emin (1969) توصیف شده است و بعداً توسط محققین زیادی استفاده شده است مانند McMaster and Smika (1988). همچنین در انواع مدل‌های زراعی مانند CropSyst (Stöckle et al., 2003)، WOFOST (Diepen et al., 1989)، DSSAT (Jones et al., 1998)، SPAW (Saxton et al., 1992) و SWAP (Kroes et al., 2008) از شاخص مذکور برای برآورد مراحل مختلف فنولوژیکی و کمی‌سازی نرخ نمو استفاده شده است. در برخی از مدل‌ها نیز مانند WOFOST، آهنگ نمو برای هر رقم گیاه به‌عنوان تابعی از دمای هوا با عامل فتوپریود تعدیل شده است (Diepen et al., 1989).

با توجه به اینکه در روش درجه-روز رشد بسیاری از عوامل محدودکننده نمو در نظر گرفته نمی‌شوند، انتظار می‌رود که این روش در برآورد پیشرفت فنولوژیکی گیاه و برآورد تاریخ-های فنولوژی از دقت کافی برخوردار نباشد. در تحقیقی، Roth and Yocum (1997) بیان داشتند که واحدهای گرمایی برای مرحله بلوغ ذرت براساس روش درجه-روز رشد چند صد واحد گرمایی بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده است. بیش‌برآوردی در محاسبه درجه-روز رشد منجر به پیش‌بینی زودتر از موعد مراحل فنولوژیکی می‌شود. مشابه چنین نتیجه‌ای در مطالعات

\* نویسنده مسئول: nghahreman@ut.ac.ir

1. Deterministic Models  
2. Non-Deterministic Models  
3. Accumulated Growth Degree Day or Thermal Units

فصل رشد دیده می‌شود. روش‌های هموارسازی مانند روش برازش منحنی (Van Dijk *et al* 1985)، روش لجستیک<sup>۳</sup> (Wu *et al.*, 2014 و Zhang *et al.*, 2003) و BISE<sup>۴</sup> (Viovy *et al.*, 1992) به منظور درونیابی و برونیابی زمانی نمایه‌ها و کاهش اثرات نوفه‌های<sup>۵</sup> شدید در تصاویر (که به علل مختلف نظیر ابرناکی بودن هوا ایجاد می‌شود) توسعه یافته‌اند (Curnel and Oger 2007).

هدف از تحقیق حاضر، بهبود روش درجه-روز رشد با حفظ سادگی ساختار آن برای مدل‌سازی تاریخ شروع مراحل فنولوژی گیاه ذرت است. این مهم با تلفیق نمایه پوشش گیاهی و شاخص درجه روز رشد و تولید یک شاخص جدید محقق می‌شود. شاخص تولید شده که به عنوان مدل تلفیقی در ادامه از آن نام برده خواهد شد، توسط (Teal *et al.* 2006) برای پیش-بینی درون فصلی عملکرد نهایی ذرت و توسط (Lofton *et al.* 2012) به طور مشابه برای نیشکر استفاده شده است. برای بهبود کیفیت نمایه‌های پوشش گیاهی و هموارسازی سری زمانی آن‌ها، از یک روش ترکیبی تابع لجستیک دوگانه<sup>۶</sup> (Wu *et al.*, 2014) و رگرسیون وزنی<sup>۷</sup> (Swets *et al* 1999) که به اختصار با WLS-DL بیان خواهد شد، استفاده شده است. برای بررسی کارایی مدل تلفیقی، نتایج حاصل از اجرای این مدل با نتایج مدل درجه-روز رشد (مبتنی بر واحدهای حرارتی) و مدل رگرسیون ساده (مبتنی بر تاریخ‌های کاشت) مقایسه شده است. در مورد مدل مبتنی بر تاریخ‌های کاشت (Ahmadi *et al.* 2010) تشریح کردند که تاریخ کاشت اولیه تاثیر معنی‌داری بر طول مراحل مختلف فنولوژی و عملکرد دانه دارد. از این رو در تحقیق حاضر به بررسی نتایج مدل مبتنی بر تاریخ کاشت نیز پرداخته می‌شود.

### مواد و روش

منطقه مورد مطالعه، مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تهران در کرج با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۵۰ درجه و ۵۶ دقیقه و ۵۸ ثانیه شرقی و ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه و ۱۹ ثانیه شمالی و ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا است. متوسط بارندگی ثبت شده در آن حدود ۲۵۰/۱ میلی‌متر با ضریب تغییرات ۱/۲۴ درصد است. در این مزرعه گندم با ذرت به صورت تناوبی کشت می‌شوند و عموماً ماه‌های تیر و مرداد زمان‌های کاشت ذرت و ماه‌های مهر و آبان زمان‌های برداشت آن هستند. مساحت مزرعه بیش از ۲۰

(Dwyer *et al.* 1999a and 1999b) مشاهده شد که نشان داد برآورد واحد گرمایی در مراحل رشد زایشی ذرت (پرشدن دانه) در ایالت تگزاس آمریکا بیش از حد واقعی بوده است. استفاده از متغیرهای هواشناسی دمایی کمینه، دمایی بیشینه، دمایی میانگین، مجموع بارندگی و رطوبت نسبی در همبستگی با تاریخ‌های شروع مراحل فنولوژی نیز توسط (Ziaei *et al.* 2009) برای تخمین تاریخ مراحل فنولوژی گندم در سه نمونه اقلیمی ایران به عنوان روش‌شناسی دیگری انجام شده است. نتایج کار این محققین حکایت از عدم کارایی مدل‌های خطی و غیرخطی مبتنی بر داده‌های خام هواشناسی دارد که به دلیل پیچیدگی سیستم‌های کشاورزی و تغییرپذیری سالانه متغیرهای هواشناسی و اثرات متقابل آن‌ها در محیط‌های مختلف است.

با توجه به سادگی روش واحدهای حرارتی، تعدیل آن می‌تواند تا حد زیادی به افزایش دقت آن کمک نماید. چنانچه گفته شد این تعدیل می‌تواند با کمک لحاظ کردن متغیر فتوپریود و یا به کمک برخی نمایه‌های پوشش گیاهی<sup>۱</sup> انجام شود. نمایه‌های پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌شوند و سری چندزمانه<sup>۲</sup> این تصاویر می‌تواند پویایی تغییرات پوشش گیاهی را طی فصل رشد پایش نماید (Davidson and Csillag, 2003). این امر با تغییر در شدت طول موج‌های بازتابی از زمین میسر است. بطوریکه هنگام اوج رشد گیاه (رشد رویشی)، طیف مادون قرمز و هنگام بلوغ و پیری گیاه (رشد زایشی)، طیف مرئی بازتاب بیشتری دارد.

طی سالهای اخیر کاربرد نمایه‌های پوشش گیاهی در پایش فنولوژی گیاهی جنگل‌ها مورد توجه بوده است (Wu *et al.* 2014, Hufkens *et al.*, 2012, Hmimina *et al.*, 2013). در مورد پایش پوشش گیاهی گیاهان زراعی با فناوری سنجنش از دور می‌توان به تحقیقات (Kamble and Kilic 2013) و Shen *et al.* (2013) اشاره کرد. مزایای استفاده از این روش‌ها عبارت است از: سهل‌الوصول بودن داده‌های ورودی مدل‌ها، سادگی فنون حاکم و امکان شبیه‌سازی پویایی فنولوژی. با این وجود، این روش‌ها معمولاً قادر به مدل‌سازی پارامترهای اندکی از فنولوژی مانند شروع، انتها و طول فصل رشد هستند. ترکیب سری چندزمانه نمایه‌های پوشش گیاهی با شاخص‌های زمینی مانند درجه-روز رشد می‌تواند منجر به مدل‌سازی بهتر ویژگی‌های گیاهی شود (Teal *et al.*, 2006).

در کار با نمایه‌های پوشش گیاهی به دلیل محدودیت تعداد تصاویر، ضرورت استفاده از روش‌های هموارسازی در طول

3. Logistic Model  
4. Best Index Slope Extraction  
5. Noises  
6. Double Logistic Model (DL)  
7. Weighted Least Square (WLS)

1. Vegetation Indices  
2. Multi-temporal

۲۰۰۲ ارائه شده است (بولتن ذرت، اداره کل هواشناسی البرز، ۱۳۸۱).

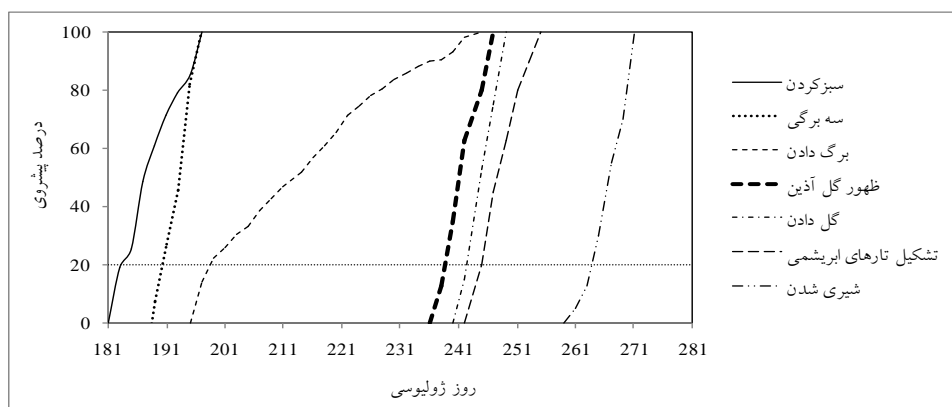
تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه سنجنده لندست ۷ (ETM+) پوشش مزرعه مورد مطالعه که قابل دریافت از سایت <http://reverb.echo.nasa.gov> به صورت رایگان هستند (شکل ۲). با توجه به قرارگیری مزرعه در محل هم‌پوشانی دو تصویر با مشخصه‌های LE7164035# و LE7165035#، تعداد تصاویر موجود افزایش یافت. باندهای مورد استفاده از تصاویر، باندهای ۳ و ۴ (سرخ و فرسرخ نزدیک) هستند که برای استخراج نمایه‌های پوشش گیاهی استفاده شده‌اند. در جدول (۱) تعداد تصاویر موجود هر سال به همراه روزهای دارای تصویر به ژولیوسی آورده شده است.

- داده‌های میانگین دمای هوای روزانه مربوط به مزرعه تحقیقاتی به همراه دماهای کاردینال گیاه ذرت برای محاسبه واحدهای حرارتی.

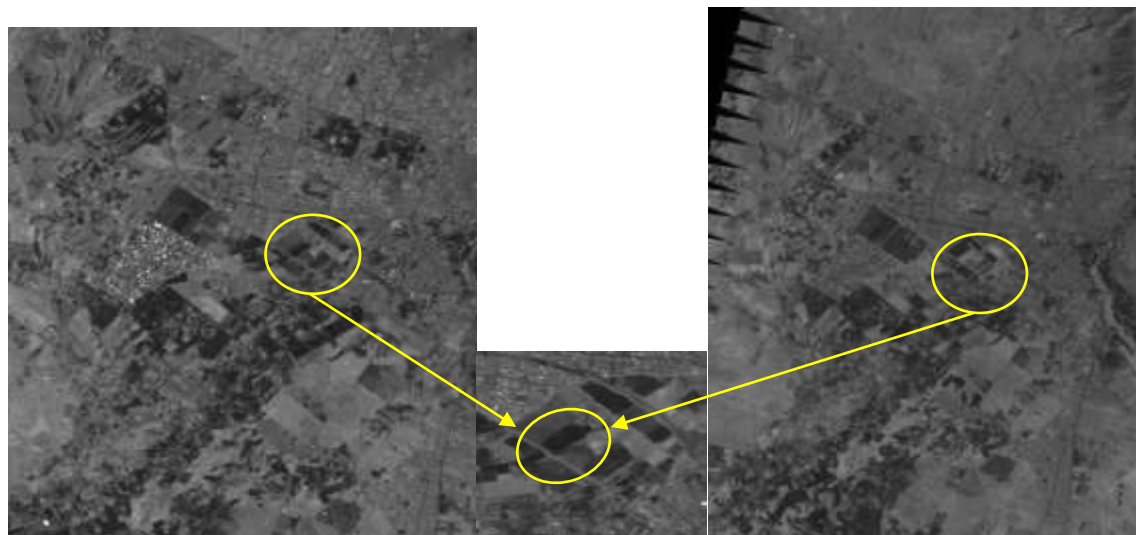
هکتار بوده و ذرت رقم K704 در آن کشت می‌شود.

## داده‌ها

در تحقیق حاضر از گروه داده به شرح ذیل استفاده شد  
توالی زمانی رخدادهای فنولوژی گیاه ذرت به همراه درصد پیشروی هر مرحله که در قالب داده‌های دیدبانی فنولوژی توسط بخش تحقیقات اداره کل هواشناسی البرز در دوره آماری ۹ سال (۲۰۰۲-۲۰۱۰) ثبت شده است. این توالی شامل زمان کاشت و برداشت و درصد پیشروی ۸ مرحله *جوانه‌زنی*، سبز شدن، سه برگی، برگ‌دهی، ظهور گل آذین، گل‌دهی و شیرینی شدن می‌باشد که هر دو روز یکبار ثبت شده‌اند. پارامترهای مهم مورد مطالعه تاریخ شروع هر مرحله فنولوژی (به استثنای *جوانه‌زنی*) و تاریخ برداشت است. ملاک شروع هر مرحله، وقوع حداقل ۲۰ درصد آن مرحله در تاریخ دیدبانی می‌باشد. بر این اساس ۸ تاریخ برای هر سال از این داده‌ها استخراج شده است. در شکل (۱)، درصد پیشروی مراحل مختلف فنولوژی مربوط به سال



شکل ۱- درصد پیشروی مراحل مختلف فنولوژی ذرت از سبز شدن تا شیرینی شدن متعلق به سال ۲۰۰۲. تاریخ متناظر تقاطع نقطه چین افقی با خط منحنی درصد پیشروی هر مرحله فنولوژی به عنوان تاریخ شروع آن مرحله در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲- موقعیت مزرعه در تصاویر ماهواره‌ای. تصویر سمت راست مربوط به روز ۱۰ ماه سپتامبر سال ۲۰۰۲ (با کد LE71640352002253SGS00\_B3)، تصویر سمت چپ مربوط به روز ۲۸ ماه می ۲۰۰۲ (با کد LE71650352002148SGS00\_B3) و تصویر وسط بزرگ‌نمایی شده از مزرعه است.

جدول ۱- فهرست تصاویر موجود ماهواره لندست در سالهای مختلف مطالعه

سال	تعداد تصاویر	روز ژولیوسی تصویر موجود
۲۰۰۲	۸	۲۹۲، ۲۸۵، ۲۶۰، ۲۵۳، ۲۲۱، ۲۱۲، ۱۵۷، ۱۴۸
۲۰۰۳	۸	۳۲۰، ۲۷۹، ۲۲۴، ۲۰۸، ۱۹۹، ۱۴۴، ۱۳۵، ۱۱۹
۲۰۰۴	۱۷	۲۹۱، ۲۸۲، ۲۷۵، ۲۶۶، ۲۵۹، ۲۴۳، ۲۳۴، ۲۲۷، ۲۱۸، ۲۱۱، ۲۰۲، ۱۹۵، ۱۸۶، ۱۷۹، ۱۶۳، ۱۵۴، ۱۳۸
۲۰۰۵	۲۳	۲۹۳، ۲۸۴، ۲۷۷، ۲۶۸، ۲۶۱، ۲۵۲، ۲۴۵، ۲۳۶، ۲۲۹، ۲۲۰، ۲۱۳، ۲۰۴، ۱۹۷، ۱۸۸، ۱۸۱، ۱۷۲، ۱۶۵، ۱۵۶، ۱۲۴، ۳۳۲، ۳۲۵، ۳۱۶، ۳۰۰
۲۰۰۶	۱۸	۲۹۶، ۲۸۰، ۲۶۴، ۲۵۵، ۲۴۸، ۲۳۹، ۲۳۲، ۲۲۳، ۲۱۶، ۲۰۷، ۲۰۰، ۱۹۱، ۱۸۴، ۱۷۵، ۱۶۸، ۱۵۹، ۱۵۲، ۱۳۶
۲۰۰۷	۱۲	۲۹۰، ۲۸۳، ۲۷۴، ۲۶۷، ۲۴۲، ۲۲۶، ۲۱۹، ۲۰۳، ۱۹۴، ۱۸۷، ۱۶۲، ۱۵۵
۲۰۰۸	۱۶	۲۹۳، ۲۷۷، ۲۷۰، ۲۶۱، ۲۳۸، ۲۲۹، ۲۲۲، ۲۱۳، ۲۰۶، ۱۹۷، ۱۸۱، ۱۷۴، ۱۵۸، ۱۴۲، ۱۳۳، ۱۱۷
۲۰۰۹	۱۶	۲۹۵، ۲۸۸، ۲۷۹، ۲۷۲، ۲۶۳، ۲۵۶، ۲۴۷، ۲۴۰، ۲۳۱، ۲۲۴، ۲۱۵، ۲۰۸، ۱۹۹، ۱۸۳، ۱۶۷، ۱۶۰
۲۰۱۰	۱۴	۲۹۸، ۲۹۱، ۲۵۹، ۲۴۳، ۲۳۴، ۲۲۷، ۲۱۸، ۲۱۱، ۲۰۲، ۱۹۵، ۱۸۶، ۱۷۹، ۱۷۰، ۱۶۳

### استخراج نمایه های پوشش گیاهی

جهت استخراج نمایه های پوشش گیاهی انجام سه نوع تصحیح زمین مرجع نمودن، هندسی و رادیومتریک ضروری است. پس از انجام تصحیحات لازم اقدام به استخراج نمایه های پوشش گیاهی شده است. سه نوع نمایه در این تحقیق استفاده شده که جزئیات آن در جدول (۲) آورده شده است. در مورد نمایه EVI2 باید گفت که (Jiang et al. (2008 با حذف باند آبی از نمایه EVI به توسعه آن بدون نیاز به باند آبی و تنها با دو باند سرخ و فرسرخ نزدیک به نام EVI2 ولی با همان کیفیت EVI پرداختند. باند آبی در نمایه EVI با هدف کاهش اثرات نوفه های ناشی از خاک و زمینه پوشش گیاهی (کانوپی) جای گرفت. با این وجود طبق استدلال محققین اولاً تصحیح جوی باند آبی مشکل تر است و ثانیاً توسعه روبه عقب نمایه EVI عملی نیست

چرا که اولین سنجنده تولید آن تنها از سال ۲۰۰۰ اطلاعات دارد. بر این اساس با کاهش تعداد باندهای نمایه EVI می توان با استفاده از باندهای سرخ و فرسرخ تا ۱۹۸۲ نمایه EVI را محاسبه نمود. عمل تولید نمایه EVI2 با ورود فاکتور بتا به معادله نمایه SAVI انجام شد. نتایج محققین نشان داد که عملکرد EVI2 در کاهش نوفه های جوی و زمینه خاک بسیار به EVI مشابهت دارد، با این تفاوت که نمایه جدید تنها دارای دو باند بازتابی است. در تحقیقی، (Rocha and Shaver (2009 برتری این نمایه را نسبت به NDVI در پایش فنولوژی گیاه ثابت کردند. نمایه EVI2 به تازگی توسط (Bolton and Friedl (2013 برای پایش بینی عملکرد ذرت براساس معیارهای فنولوژی و نمایه OSAVI توسط (Wu et al. (2014 برای پایش فنولوژی جنگل استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات نمایه های پوشش گیاهی مورد استفاده

اختصار	نام نمایه	مرجع	باندها	فرمولاسیون
NDVI	شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی <sup>۱</sup>	Deering (1978)	۳ و ۴	$(R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$
EVI2	شاخص بهبود یافته پوشش گیاهی <sup>۲</sup>	Jiang et al. (2008)	۳ و ۴	$2.5 \times \frac{(R_{NIR} - R_{RED})}{(R_{NIR} + 2.4 \times R_{RED}) + 1}$
OSAVI	شاخص پوشش گیاهی بهینه تعدیل شده نسبت به خاک <sup>۳</sup>	Rondeaux et al. (1996)	۳ و ۴	$1.16 \times \frac{(R_{NIR} - R_{RED})}{(R_{NIR} + R_{RED}) + 0.16}$

1. Normalized Difference Vegetation Index  
 2. Enhanced Vegetation Index 2  
 3. Optimized Soil Adjusted Vegetation Index

منجر به کاهش مقادیر نمایه‌ها می‌شود. بنابراین باید اثر مقادیر بزرگتر بیشتر دیده شود. روش وزن‌دهی در این مقاله مبتنی بر روش Chen *et al.* (2004) است. برای استفاده از این روش، ابتدا یک رگرسیون محلی معمولی (وزن همه نقاط معادل ۱ است) بر داده‌های موجود در پنجره متحرک برازش می‌یابد. سپس اختلاف بین داده خام و خروجی مدل که با  $d_i$  (برای  $i$  امین داده خام) نمایش داده می‌شود و همچنین بزرگترین اختلاف ( $d_{max}$ ) محاسبه می‌شود. در اینجا سه وضعیت می‌تواند برای سه نقطه در مجاورت هم تعیین شود: (۱) اوج محلی<sup>۴</sup>، که نقطه وسطی دارای مقداری بزرگتر از دو نقطه کناری است، (۲) شیب‌دار<sup>۵</sup>، که نقطه وسطی از نظر مقداری بین دو نقطه کناری است و (۳) دره محلی<sup>۶</sup>، که نقطه وسطی دارای مقداری کوچکتر از دو نقطه کناری است. برای وضعیت اول و دوم می‌توان وزنی معادل ۱ قرار داد. ولی وضعیت سوم می‌تواند گویای یک نوفه ناشی از ابرناکی باشد. از این رو وزن این نقطه از رابطه  $w_i = 1 - d_i / d_{max}$  به دست می‌آید. بعد از تعیین اوزان، مدل رگرسیون وزنی بر داده‌های محلی پنجره متحرک برازش می‌یابد.

همچنین عرض پنجره متحرک طبق پیشنهاد Swets *et al.* (1999) و Arvor *et al.* (2008) معمولا بین ۳ تا ۶ واحد زمانی در نظر گرفته می‌شود که در اینجا به دلیل محدودیت در تعداد تصاویر موجود و بالتبع تعداد داده‌هایی که قرار است مدل بر آنها برازش یابد، معادل ۳ روز در نظر گرفته شده است. مدل رجستیک دوگانه در ادامه بر داده‌های پالایش شده به روش رگرسیون وزنی برازش می‌یابند که به اختصار WLS-DL نامیده می‌شود.

#### انتخاب نمایه پوشش گیاهی

معیار ارزیابی برای انتخاب نمایه مناسب از میان سه نمایه محاسبه شده، نسبت سیگنال به نوفه (SNR) (Dash *et al.*, 2008) است. فرض می‌شود که داده‌های منحنی هموار شده "سیگنال" و اختلاف بین آن با داده‌های خام "نوفه" هستند. بر این اساس، SNR به روش زیر به دست می‌آید:

$$SNR = \frac{Max_{Signal} - Min_{Signal}}{StDev_{Noise}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $Max_{Signal}$  و  $Min_{Signal}$  به ترتیب بزرگترین و

#### هموارسازی و کاهش نوفه‌ها

به منظور تولید سری‌های زمانی با کیفیت از نمایه‌های پوشش گیاهی، از تابع رجستیک دوگانه (Wu *et al.*, 2014) یکبار به تنهایی و بار دیگر در ترکیب با مدل رگرسیون وزنی استفاده شده است. تابع رجستیک دوگانه دارای ۴ پارامتر بوده و دارای فرمولاسیون زیر است:

$$f(t, x_1, x_2, x_3, x_4) = \frac{1}{1 + \exp(\frac{x_1 - t}{x_2})} - \frac{1}{1 + \exp(\frac{x_3 - t}{x_4})} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $x_1, x_3$  نقاط عطف منحنی و  $x_2, x_4$  شیب این نقاط به ترتیب در سمت راست و چپ منحنی،  $t$  معادل زمان یا همان روز ژولیبوسی و  $f$  مقدار نمایه پوشش گیاهی به عنوان تابعی از ۴ پارامتر و متغیر زمان است. تابع رجستیک دوگانه ذکر شده براحتی می‌تواند تغییرات صعودی و نزولی نمایه‌های پوشش گیاهی را مدل نموده و یک سری هموار شده تولید نماید. با وجود نوفه‌های فراوان که بیشتر به علت وجود ابرناکی و آلودگی هوا می‌باشد، روش رجستیک دوگانه معمولا با محدودیت در مدل‌سازی روبرو می‌شود. چرا که هدف اصلی استفاده از مدل‌های هموارسازی، تولید نمایه‌های با کیفیت است که بتواند برای مدل‌سازی استفاده شود و منجر به نتایج قابل قبول گردد.

برای کاهش میزان اثر نوفه‌ها از روش پالایش<sup>۱</sup> مبتنی بر رگرسیون وزنی استفاده شده است که این روش توسط Swets *et al.* (1999) و Arvor *et al.* (2008) روی نمایه‌های پوشش گیاهی استفاده شده است. اساس این روش بر به حداقل رساندن مربعات خطای مدل رگرسیون خطی در یک پنجره متحرک تعریف شده استوار است. دو حالت برای برازش مدل رگرسیون محلی<sup>۲</sup> در پنجره متحرک وجود دارد: پنجره متحرک با هم-پوشانی و بدون هم‌پوشانی<sup>۳</sup>. در حالت هم‌پوشانی، حرکت پنجره متحرک رو به جلو گام به گام خواهد بود و غیر از مشاهدات اول و آخر، سایر مشاهدات بیش از یکبار در برازش مدل شرکت می‌کنند. مقدار نهایی هر مشاهده می‌تواند معادل میانگین همه مدل‌ها باشد (Swets *et al.*, 1999).

اگر یک رگرسیون ساده بر داده‌های موجود در پنجره برازش یابد، همه نقاط با سهم یکسان در شکل‌گیری مدل مشارکت دارند، اما از آنجاکه هدف کاهش و حذف نوفه‌ها است از طریق روش وزن‌دهی اقدام به کاهش تاثیر آن‌ها می‌شود. وزن‌دهی بر این اصل استوار است که اثرات ابرناکی و آلودگی

4. Local peak  
5. Local sloping  
6. Local valley  
7. Signal to Noise Ratio

1. Filtering  
2. Local  
3. Overlapping and Non-Overlapping

تلفیقی دارای یک روند نزولی باشد. همانند مدل درجه-روز رشد، متوسط مقدار شاخص تلفیقی در شروع یک مرحله فنولوژی معین طی سالهای تعلیم مدل محاسبه می‌شود. سپس این مقدار به عنوان مقدار مورد انتظار برای استخراج تاریخ شروع مرحله در سال آزمون استفاده می‌شود. تاریخ به دست آمده برای محاسبه معیار کمترین مربعات خطا یا  $RMSE^1$  به کار می‌رود. هر سه مدل، ۹ بار اجرا که در هر بار ۸ سال برای تعلیم و یک سال برای آزمون در نظر گرفته شده است.

### نتایج و بحث

نتایج تحقیق در دو بخش انتخاب نمایه و مقایسه مدل‌های فنولوژی ارائه می‌شود. انجام تصحیحات زمین‌مرجع نمودن، هندسی و رادیومتریک بر روی ۱۳۲ عدد تصویر، آن‌ها را برای استخراج نمایه‌های پوشش گیاهی آماده ساخت. از آنجاکه ایجاد شرایط آیش منجر به تفاوت در منطقه کشت ذرت شده است، براساس بررسی‌های میدانی و استعلام از مسئولین، حدود مزرعه در هر سال مشخص شد و بعد از تهیه نقشه آن محدوده، در نرم‌افزار ENVI، محدوده مورد نظر یا ROI<sup>2</sup> از مزرعه ساخته و اطلاعات پیکسل‌ها به فرمت متنی استخراج شد. مرز ROI‌ها در تصاویر هر سال ثابت و بین تصاویر سال‌های مختلف متفاوت بود.

براساس سطح زیر کشت ذرت در هر سال، تعداد پیکسل‌های ROI در سال‌های مختلف بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ پیکسل متغیر بود. در هر تصویر مقادیر ۳ نمایه پوشش گیاهی NDVI، EVI2 و OSAVI براساس باندهای ۳ و ۴ محاسبه شدند. با توجه به اختلاف در تعداد پیکسل‌ها در هر سال، برای ایجاد شرایط یکسان و دستیابی به یک الگوی مشخص در هر سال، اقدام به میانگین‌گیری از مقادیر نمایه پوشش گیاهی در هر ROI شد. طبق شکل (۳) (نمودار ۱)، این الگو دارای یک روند صعودی از ابتدا تا اواسط فصل رشد و یک روند نزولی تا انتهای فصل رشد می‌باشد. در برخی از تصاویر به علت شرایط ابرناکی شدید مقدار نمایه پوشش گیاهی خارج از الگو دارای یک افت شدید می‌باشد و حتی به مقادیر منفی رسیده است که یک نوفه به نظر می‌رسد (مثل سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۹). در نگاه اول شاید بتوان این نوفه‌ها را به عنوان داده‌های پرت حذف نمود، اما دو اشکال باقی می‌ماند: اولاً در برخی سال‌ها تعداد تصاویر موجود که فصل رشد ذرت را پوشش دهد اندک

کوچکترین مقدار داده‌های هموارشده و  $StDev_{Noise}$  انحراف معیار نوفه‌ها است. این نسبت روی داده‌های هر سه نمایه پوشش گیاهی NDVI، EVI2 و OSAVI اعمال می‌شود. هر چه این نسبت بزرگتر باشد، نشان‌دهنده برآزش بهتر مدل و کیفیت بالاتر داده‌های سنجش از دوری است. در اینجا برای مقایسه دو نمایه یا دو مدل با هم می‌توان از آزمون‌های آماری استفاده نمود.

### مدل‌سازی فنولوژی

کارایی سه مدل در این تحقیق مقایسه شده است: مدل مبتنی بر درجه روز رشد، مدل مبتنی بر تاریخ‌های کاشت و مدل تلفیقی. اساس مدل مبتنی بر درجه روز رشد بر محاسبه واحدهای حرارتی در طول فصل رشد استوار است. طبق تعریف (2008) Streck *et al.* سه دمای کاردینال دمای کمینه موثر ( $T_{min}$ ) یا همان دمای پایه، دمای بیشینه موثر ( $T_{max}$ ) و دمای بهینه ( $T_{opt}$ ) در محاسبه واحدهای حرارتی نقش ایفا می‌کنند. با لحاظ این سه دما، سه وضعیت برای محاسبه واحد حرارتی وجود دارد، وضعیت اول هنگامی است که دمای میانگین روزانه ( $T$ ) پایین‌تر از دمای کمینه موثر و بالاتر از دمای بیشینه موثر باشد که واحد حرارتی معادل صفر در نظر گرفته می‌شود و به عبارت دیگر، آن روز نقشی در پیشروی فنولوژیکی ندارد. میزان واحد حرارتی در دو وضعیت دیگر طبق روابط زیر به دست می‌آید:

(رابطه ۳)

$$TT = T - T_{min}, \text{ if } (T_{min} \leq T \leq T_{opt})$$

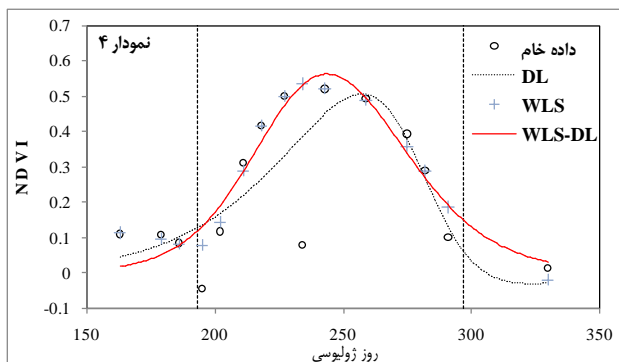
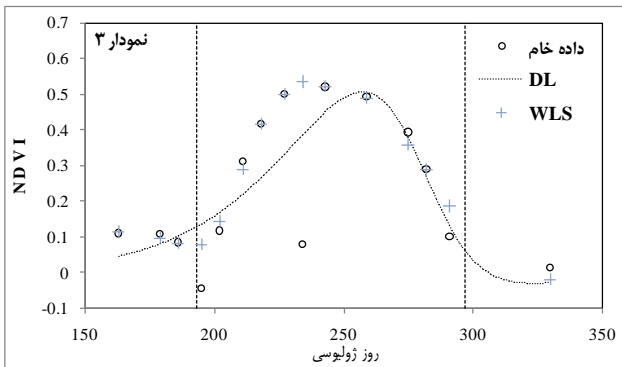
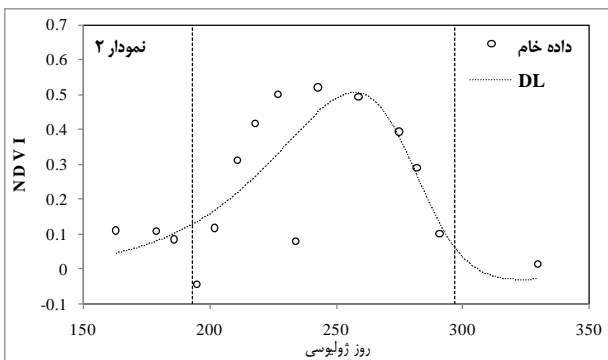
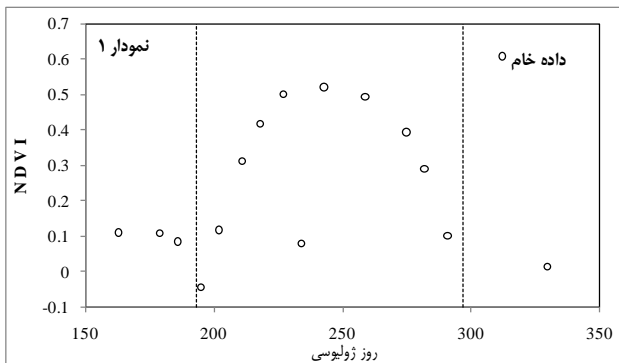
$$TT = (T_{max} - T)(T_{opt} - T_{min}) / (T_{max} - T_{opt}), \text{ if } (T_{opt} < T \leq T_{max})$$

پس از محاسبه واحد حرارتی در هر روز، اقدام به محاسبه تجمعی واحدهای حرارتی کرده و میانگین مقدار تجمعی در زمان شروع هر مرحله فنولوژی طی سالهای تعلیم مدل برآورد می‌شود. این مقدار در سال مورد آزمون مدل، مبنای تعیین تاریخ شروع مرحله معین است. لازم به ذکر است که مبنای اولیه محاسبه مقدار تجمعی واحدهای حرارتی، شروع مرحله سبزشدن در نظر گرفته شده است و نه زمان کاشت.

روش مبتنی بر تاریخ‌های کاشت برخلاف روش درجه روز رشد صرفاً دارای ساختار آماری است. در این روش یک مدل رگرسیون ساده بین تاریخ کاشت و تاریخ شروع همه مراحل فنولوژی ساخته می‌شود. با توجه به تعداد مراحل فنولوژی، ۸ مدل رگرسیون تولید می‌شود. در مدل تلفیقی، مقدار نمایه پوشش گیاهی در هر روز بر میزان درجه روز رشد تجمعی آن روز تقسیم می‌شود ( $Vis/AGDD$ ). برخلاف شاخص درجه روز رشد که به صورت تجمعی است، انتظار می‌رود که شاخص مدل

1. Root Mean Square Error  
2. Region Of Interest

نمونه از جامعه آماری استفاده شده است. در جدول (۴) مقادیر P این آزمون آمده است.



شکل ۳- مراحل هموارسازی نمایه‌های پوشش گیاهی سال ۲۰۰۴، به ترتیب از بالا: نمودار ۱، داده‌های خام مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای، نمودار ۲، برازش لجستیک دوگانه (DL) بر داده‌های خام، نمودار ۳، اعمال فرآیند پالایش WLS و نمودار ۴، برازش لجستیک دوگانه بر داده‌های پالایش شده (WLS-DL). خطوط عمودی معرف شروع و اتمام فصل رشد است.

است و ثانیاً، در پایش زمان واقعی فنولوژی، داده‌های نمایه پوشش گیاهی ورودی محسوب می‌شوند و اگر به هر دلیل حذف شوند، اجرای مدل دچار وقفه خواهد شد. بر این اساس می‌توان نیاز به یک روش پالایش که منجر به تصحیح داده‌های خام گردد را توجیه نمود.

براساس نتایج به دست آمده، برازش لجستیک دوگانه بر داده‌های خام نتایج خوبی به همراه نداشته است و حتی در برخی سال‌ها مانند سال ۲۰۰۴ نتوانسته الگوی مورد انتظار نمایه را تولید کند (شکل ۳، نمودار ۲). در برخی سال‌ها نیز الگو را درست ساخته ولی دچار کم‌برآوردی در ساخت نمایه‌های بزرگ (اواسط فصل رشد) شده است (مانند سال ۲۰۰۹). این در حالی است که اعمال فرآیند پالایش مبتنی بر رگرسیون وزنی بر داده‌های خام منجر به تصحیح نوفه‌ها با حفظ مقادیر خام صحیح می‌گردد. طبق نمودار (۳) در شکل (۳)، نوفه‌ها به خوبی بازسازی شده‌اند. به عنوان مثال، میزان NDVI در روز ژولیوسی ۲۳۴ که اوج فصل رشد محسوب می‌شود، معادل ۰/۰۷۷ از تصویر برآورد شد. این در حالی است که مقدار نمایه در تصاویر قبل و بعد (روزهای ژولیوسی به ترتیب ۲۲۷ و ۲۴۳) به ترتیب معادل ۰/۵ و ۰/۵۲ است. در فرآیند پالایش مقدار NDVI معادل ۰/۵۳ ساخته شد. پس از انجام پالایش مدل لجستیک دوگانه بر داده‌های پالایش شده برازش یافت که نمونه آن منحنی قرمز رنگ در نمودار (۴) شکل (۳) (WLS-DL) می‌باشد.

هرچند که تفاوت در عملکرد دو مدل هموارسازی DL و WLS-DL به صورت چشمی واضح است، ولی جهت کمی‌سازی این تفاوت‌ها، بررسی میزان معنی‌داری آن‌ها، مقایسه عملکرد نمایه‌ها و ارائه مهارت کلی مدل‌ها، نسبت سیگنال به نوفه (SNR) برای سه نمایه و دو مدل محاسبه شده است. این مقادیر در جدول (۳) آورده شده است. این نسبت در حقیقت کیفیت داده‌های خام و یا میزان هم‌خوانی داده‌های خام را با داده‌های هموارشده بیان می‌کند. تفاوت چشمگیر بین مقادیر SNR دو مدل DL و WLS-DL در جدول (۳) مشخص می‌باشد. به عبارت دیگر در هر سه نمایه، داده‌های خام با داده‌های مدل WLS-DL انطباق بیشتری دارند. این تطابق در برخی سال‌ها بیشتر و در برخی کمتر می‌باشد.

در بررسی وجود یا عدم وجود تفاوت بین نمایه‌ها مشخص شد که نمایه EVI2 دارای نتایج بهتری از نظر کیفیت اولیه داده‌های خام نسبت به دو نمایه دیگر دارد. با این وجود برای بررسی معنی‌داری و یا عدم معنی‌داری تفاوت‌ها باید از آزمون‌های آماری استفاده نمود. در اینجا با فرض تبعیت داده‌های SNR از توزیع نرمال، از آزمون t-student برای مقایسه جفتی دو

جدول ۳- مقادیر نسبت سیگنال به نوفه برای دو مدل و سه نمایه.

OSAVI		EVI2		NDVI		سال
WLS-DL	DL	WLS-DL	DL	WLS-DL	DL	
۱۷/۷۳۳	۵/۷۶۹	۱۷/۶۹۸	۵/۶۱۶	۱۷/۱۹۷	۵/۹۴۸	۲۰۰۲
۱۴/۶۹۹	۷/۷۲۸	۱۵/۹۰۵	۸/۴۷۲	۱۴/۰۸۴	۷/۳۰۳	۲۰۰۳
۱۳/۶	۴/۲۷۷	۱۴/۱	۴/۲۱۶	۱۳/۲۳۹	۴/۴۴۶	۲۰۰۴
۱۲/۶۴۳	۹/۳۴۳	۱۲/۹۹۶	۱۰/۱۲۴	۱۲/۴۴۵	۸/۹۶۴	۲۰۰۵
۱۶/۶۸۳	۷/۰۲۵	۱۶/۰۰۵	۷/۰۳	۱۷/۲۱۴	۶/۹۴۸	۲۰۰۶
۲۶/۶۴۸	۸/۳۱۱	۲۰/۶۹۱	۸/۵۸۶	۳۰/۰۳۸	۷/۹۳۹	۲۰۰۷
۱۲/۰۱۶	۱۱/۰۰۷	۱۱/۸۹	۱۰/۹۹۲	۱۲/۳۱۷	۱۱/۲۲۹	۲۰۰۸
۲۵/۹۴۵	۱/۷۰۵	۴۸/۱۳۶	۱/۸۱۷	۱۴/۷۵۸	۱/۶۴۸	۲۰۰۹
۱۷/۶۸۸	۶/۳۷۲	۱۶/۶۷۷	۶/۹۰۹	۱۸/۴۵۱	۶/۲۲۵	۲۰۱۰
۱۷/۵۱۷	۶/۸۳۸	۱۹/۳۴۴	۷/۰۸۵	۱۶/۶۳۸	۶/۷۳۹	میانگین

جدول ۴- مقادیر P آزمون آماری روی نسبت‌های سیگنال به نوفه

WLS-DL			DL			مدل	مدل
OSAVI	EVI2	NDVI	OSAVI	EVI2	NDVI	نمایه	
۰/۴۸۶	۰/۴۶۷	-	-	-	**	NDVI	WLS-DL
۰/۴۵۹	-	-	-	*.۰۱۳	-	EVI2	
-	-	-	**./۰۰۱	-	-	OSAVI	

\*\* معنی داری در سطح اطمینان ۹۹٪  
\* معنی داری در سطح اطمینان ۹۵٪

رشد نیازمند برون‌یابی است. همچنین به علت برداشت اطلاعات هر دو روز یکبار، برای دستیابی به تاریخ وقوع میزان ۲۰ درصد هر مرحله فنولوژیکی نیاز به درون‌یابی وجود دارد. در صورت اعشاری شدن تاریخ ژولیوسی شروع فصل رشد، به سمت پایین یا بالا گرد شد. ضریب تبیین در این رگرسیون‌ها، به هر حال، بالای ۰/۹ بود که نشان از تناسب مدل‌های رگرسیونی با درصدهای پیشروی دارد. با محاسبه واحدهای حرارتی برای هر روز هر سال طی فصل رشد ذرت، براساس شروع سبز شدن (روز ژولیوسی که مرحله سبز شدن دارای ۲۰ درصد پیشروی است) واحدهای حرارتی تجمیع و برای هر روز AGDD محاسبه گردید. با توجه به درونیابی NDVI برای هر روز یک مقدار AGDD و یک مقدار NDVI وجود دارد. در شکل (۴) روند تغییرات شاخص مدل AGDD و شاخص مدل تلفیقی در طول فصل رشد برای سال ۲۰۰۷ مشاهده می‌شود. در حالی که شاخص AGDD (منحنی آبی رنگ) دارای یک روند صعودی با افزایش روز ژولیوسی است، شاخص مدل تلفیقی (منحنی قرمز رنگ) دارای یک روند نزولی است.

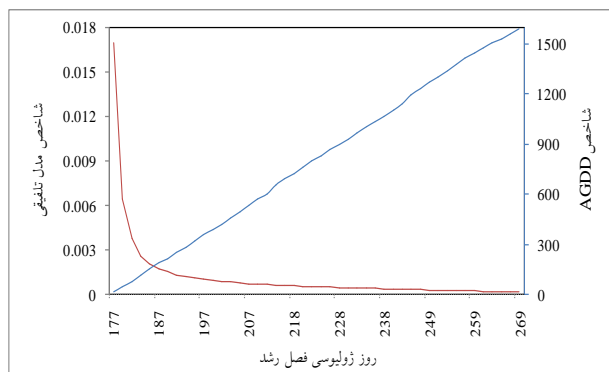
از آنجا که اختلاف بین دو مدل در هر سه نمایه معنی‌دار است (دو نمایه NDVI و OSAVI در سطح عدم اطمینان ۱ درصد، و نمایه EVI2 در سطح عدم اطمینان ۵ درصد)، نتایج مدل WLS-DL به عنوان مدل هموارساز برتر انتخاب شده است. همچنین طبق نتایج این جدول، بین سه نمایه اختلاف معنی‌داری از نظر کیفیت اولیه داده‌ها وجود ندارد، چنانچه مقادیر P در مقایسه بین سه نمایه دارای مقداری بزرگتر از ۰/۰۵ می‌باشد. با توجه به عدم معنی‌داری تفاوت بین سه نمایه و سادگی بیشتر محاسباتی نمایه NDVI، این نمایه به عنوان یک نمایه پوشش گیاهی برای مدل‌سازی فنولوژی انتخاب شد. با هموارسازی نمایه پوشش گیاهی، یکی از ورودی‌های مدل تلفیقی پیشنهادی تحقیق فراهم می‌شود. به علت کمبود داده‌های فنولوژی ناشی از عدم داده برداری مستمر در اثر آبیاری یا بارندگی، از رگرسیون خطی و چند جمله‌ای برای درونیابی و برون‌یابی داده‌های درصد پیشروی فنولوژی استفاده شد. چراکه در برخی سال‌ها شروع برخی مراحل از بالای ۲۰ درصد بوده است و برای تخمین شروع فصل



عمودی تاریخ شروع مراحل مختلف فنولوژی است. با توجه به ۸ مرحله‌ای در نظر گرفتن فنولوژی ذرت، ۸ منحنی خطی مشاهده می‌شود که از پایین به بالا (همچنین فرمول‌ها) به ترتیب مربوط به مراحل سبزشدن تا برداشت است. چنانچه مشخص است، در مراحل میانی فنولوژی، مقادیر ضریب تبیین کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده انطباق ضعیف‌تر داده‌های واقعی با داده‌های مدل-شده در این مراحل است. براین اساس می‌توان انتظار داشت که در این مراحل عملکرد مدل مبتنی بر تاریخ‌های کاشت (و هم چنین دو مدل دیگر) ضعیف‌تر باشد.

جدول ۵- حدود تغییرات دو شاخص AGDD و تلفیقی به ازای مراحل مختلف فنولوژی

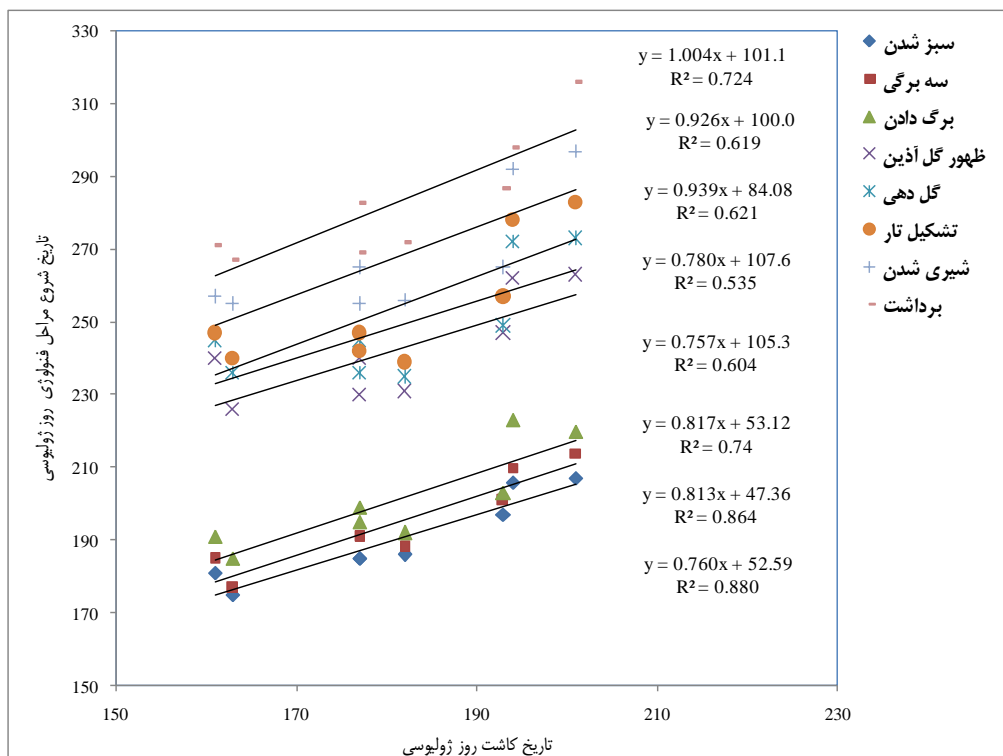
AGDD شاخص	شاخص تلفیقی	مرحله فنولوژی
۰ - ۲۶۰	۰/۰۰۲ - ۰/۰۳	سبزشدن
۱۶۰ - ۳۰۰	۰/۰۰۱۸ - ۰/۰۰۲۹	سه برگی
۲۰۰ - ۱۰۵۰	۰/۰۰۰۵ - ۰/۰۰۲	برگ‌دهی
۹۰۰ - ۱۱۴۰	۰/۰۰۰۴۶ - ۰/۰۰۰۵۴	ظهور گل‌آذین
۱۰۰۰ - ۱۲۰۰	۰/۰۰۰۴۴ - ۰/۰۰۰۵	گل‌دهی
۱۱۰۰ - ۱۳۰۰	۰/۰۰۰۳۸ - ۰/۰۰۰۴۸	تشکیل تارهای ابریشمی
۱۳۵۰ - ۱۵۵۰	۰/۰۰۰۲۵ - ۰/۰۰۰۳۱	شیری شدن



شکل ۴- روند تغییرات شاخص مدل تلفیقی (منحنی قرمز رنگ) و شاخص AGDD (منحنی آبی رنگ) در سال ۲۰۰۷.

همچنین در جدول (۵) حدود تغییرات دو شاخص برای مراحل مختلف فنولوژی و طی سال‌های مختلف آمده است. تغییرات کاهش شاخص تلفیقی و تغییرات افزایشی شاخص درجه-روز رشد بیان شده در شکل (۴) طی همه سال‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود.

برای نمایش کاربرد مدل مبتنی بر تاریخ کاشت، نتایج حاصل از اجرای این مدل به ازای سال آزمون ۲۰۱۰ (تعلیم مدل براساس سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹) در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل منحنی افقی تاریخ کاشت و منحنی



شکل ۵- مدل رگرسیونی مبتنی بر تاریخ کاشت. سال آزمون مدل ۲۰۱۰.

آورده شده است. این نتایج به ازای متوسط خطای آزمون مدل تعلیم‌یافته طی ۹ سال می‌باشد. به عنوان یک ارزیابی کلی، مدل تلفیقی دارای خطای کمتری نسبت به هر دو مدل مبتنی بر

نتایج عملکرد سه مدل به دو صورت جدول (۵) و شکل (۶) نشان داده شده است. در جدول (۵) معیار RMSE برآورد شده توسط سه مدل بر حسب روز برای مراحل مختلف فنولوژی

برداشت ثبت شده در بولتن‌های مربوطه و تاریخ رسیدگی فیزیولوژیکی بر می‌گردد. با توجه به علوفه‌ای بودن گیاه ذرت، عمل برداشت برای حفظ کیفیت علوفه زودتر انجام می‌شود و این به معنی کامل نشدن فیزیولوژیکی مرحله برداشت است. عدم مشاهده مرحله خمیری شدن در بسیاری از اطلاعات فنولوژی، گواه دیگر بر این امر می‌باشد. از طرف دیگر مدل مبتنی بر تاریخ‌های کاشت دارای دقت بیشتری در تخمین تاریخ برداشت می‌باشد. هر چند که مدل مبتنی بر تاریخ‌های کاشت، تاریخ برداشت را ۲/۲ روز بهتر از مدل تلفیقی تخمین زده است، اما براساس دلیل ذکر شده در چند سطر قبل در این مورد به طور قطع نمی‌توان اظهار نظر نمود. چرا که مدل مبتنی بر تاریخ کاشت صرفاً یک مدل آماری است و مانند مدل مبتنی بر AGDD منشا فیزیولوژیکی گیاهی ندارد.

در بیان علل عملکرد بهتر مدل تلفیقی نسبت به مدل مبتنی بر AGDD می‌توان گفت، که مدل تلفیقی یک الگوی مشخص فصلی را که همان الگوی نمایه پوشش گیاهی NDVI است، در مدل‌سازی لحاظ می‌کند. این الگو معرف میزان فعالیت فرآیند زیستی فتوسنتز است. به طوری که در ابتدای فصل رشد با تشدید فتوسنتز، الگو با یک روند صعودی روبرو است و این روند تا انتهای مرحله برگ‌دهی ادامه دارد. با شروع مراحل گلدهی و افزایش نسبت رشد زایشی به رویشی، این الگو یک روند نزولی پیدا کرده و این روند تا بلوغ فیزیولوژیکی ادامه دارد. هرگونه تنش می‌تواند در این الگو خلل وارد نماید. ورود نمایه‌ای مانند NDVI باعث می‌شود که برخی از نواقص واحدهای حرارتی در تخمین تاریخ مراحل مختلف فنولوژی برطرف شود. به عنوان مثال، اگر در اثر تنش رطوبتی (تاخیر در فواصل آبیاری و یا کاهش نزولات جوی)، مرحله‌ای به تاخیر افتد، مدل مبتنی بر AGDD، صرفاً براساس واحدهای حرارتی و بدون لحاظ کردن تنش، اقدام به تخمین تاریخ آن مرحله می‌کند. اما اثر تنش رطوبتی خود را در ارزش پیکسل‌ها در باندهای مختلف به خصوص دو باند ۳ و ۴ نشان می‌دهد و به این ترتیب تا حد قابل توجهی نقص شاخص AGDD تعدیل می‌گردد. مقایسه اجمالی یافته‌های این تحقیق با مطالعات پیشین موید توانمندی این رهیافت است. نتایج کاربست روش پالایش WLS همخوانی قابل قبولی با مقالات Swets et al. (1999) و Arvor et al. (2008) دارد. همچنین WLS می‌تواند به عنوان روش هموارساز مناسبی در برآوردهای زمان واقعی فنولوژی و عملکرد گیاهی استفاده شود و نیز قابلیت به‌روز شدن دارد. در مورد اختلاف بین نمایه‌های پوشش گیاهی با وجود ذکر تفاوت بین این نمایه‌ها توسط محققین مختلفی از جمله White et al. (2014)، به هر حال،

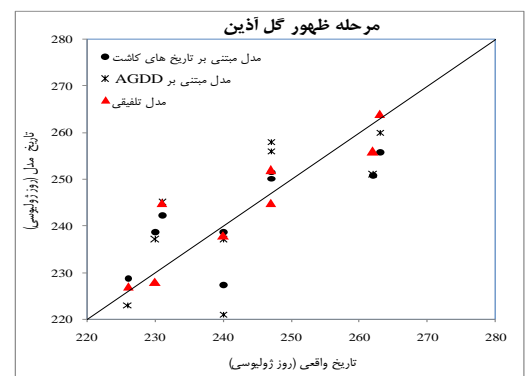
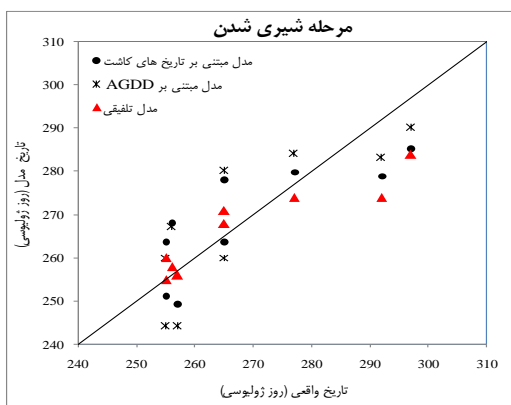
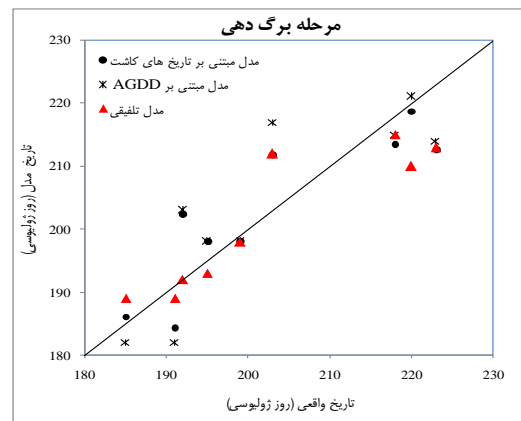
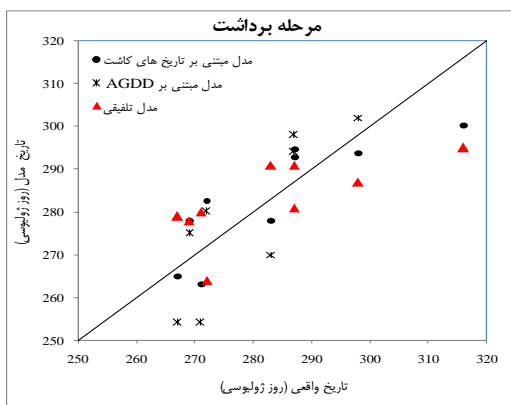
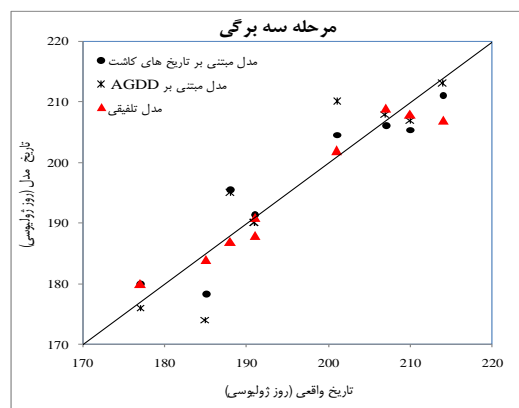
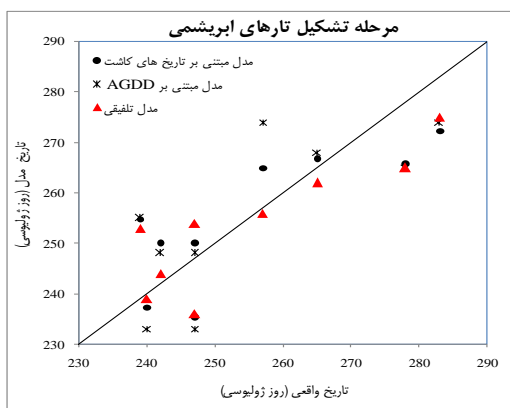
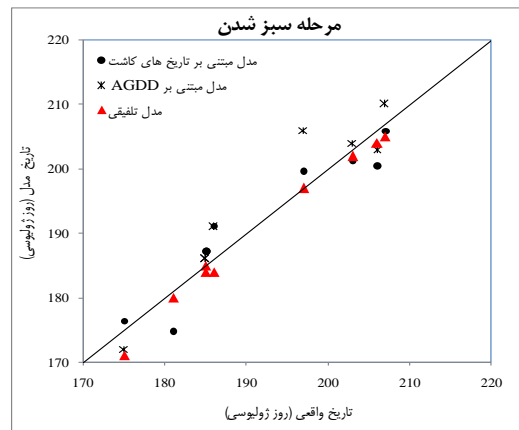
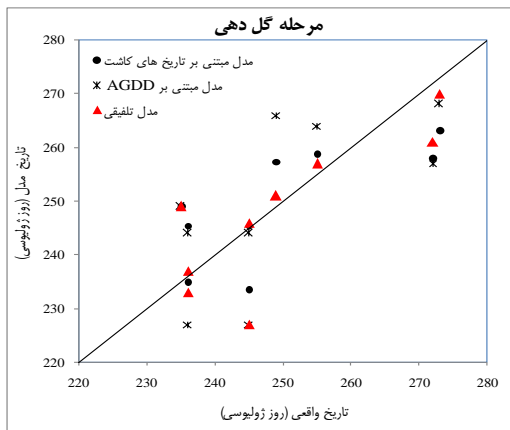
AGDD و مبتنی بر تاریخ کاشت است. در اینجا نیز آزمون t- student مقادیر P برای مقایسه نتایج مدل تلفیقی با دو مدل دیگر و بررسی معنی‌داری اختلافات استفاده شد. طبق این آزمون، تفاوت بین دو مدل مبتنی بر AGDD و تلفیقی در سطح ۱ درصد عدم اطمینان آزمون، معنی‌دار است که این تفاوت به صورت میانگین بیش از ۱ گام زمانی برداشت میدانی است. با وجود کسب نتایج بهتر مدل تلفیقی نسبت به مدل مبتنی بر تاریخ‌های کاشت، اما اختلاف موجود معنی‌دار نبود. بنابراین می‌توان رهیافت مدل تلفیقی را به عنوان روشی برای کاهش خطاهای بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی مدل مبتنی بر AGDD دانست. همچنین در مزارعی که دسترسی به داده‌های هواشناسی و سنجش از دوری مستلزم صرف هزینه و زمان است، با داشتن تاریخ کاشت تاریخ‌های شروع فصل رشد را تخمین زد. اما به هر حال برای پایش زمان واقعی این روش کاربردی ندارد.

جدول ۶- مقادیر RMSE سه مدل بر حسب روز. چنانچه مشخص است تفاوت بین دو مدل مبتنی بر AGDD و تلفیقی معنی‌دار است.

مرحله فنولوژی	مدل مبتنی بر تاریخ کاشت	مدل مبتنی بر AGDD	مدل تلفیقی
سبز شدن	۳/۱	۴/۳	۱/۴
سه برگی	۳/۶	۳/۹	۲/۲
برگ‌دهی	۵/۳	۶	۴/۶
ظهور گل‌آذین	۷/۳	۸/۹	۶
گل‌دهی	۸/۶	۱۰/۷	۶/۱
تشکیل تارهای ابریشمی	۹	۹/۶	۶/۷
شیری شدن	۹	۹/۲	۵/۷
برداشت	۷/۵	۹/۳	۹/۸
میانگین	۶/۷	**۷/۷	۵/۳

\*\* معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹٪

در نمودارهای شکل (۶) نتایج تعلیم‌های متعدد سه مدل تجمیع شده است. هشت نمودار این شکل متعلق به ۸ مرحله فنولوژی است و تعداد نقاط برای هر مدل به تعداد سال‌های آموزش است. برای هفت مرحله ابتدایی مشاهده می‌شود مدل تلفیقی انطباق بهتری با واقعیت دارد. بدترین نتیجه مدل تلفیقی مربوط به مرحله برداشت است که در جدول (۵) هم مشخص است. نتایج مدل تلفیقی و مدل مبتنی بر درجه روز رشد در تخمین تاریخ برداشت مشابه است و عموماً تاریخ را دیرتر تخمین زده‌اند. علت اصلی این امر به عدم انطباق تاریخ



شکل ۶- نمودار خط ۱:۱ تاریخ‌های شروع مراحل فنولوژیکی، مقایسه سه مدل.

باشند. کاهش خطاهای دیدبانی فنولوژی نیازمند بکارگیری پرسنل متخصص در این زمینه است، همچنین می‌توان با بکارگیری روش‌های برآورد درصد پیشروی فنولوژی به صورت زمان واقعی تا میزان قابل توجهی خطاهای ناشی از دقت انسانی را مدیریت نمود. کیفیت داده‌های NDVI نیز تا میزان قابل توجهی وابسته به تصحیحات مختلف از جمله تصحیحات اتمسفری هستند. از آنجایی که به علت ضعف در دسترسی به داده‌های لازم برای انجام تصحیح اتمسفری مانند میزان بخار آب در لایه‌های مختلف اتمسفر، غالباً انجام این تصحیح امکان‌پذیر نیست، کیفیت داده‌های NDVI بسیار تحت تاثیر قرار می‌گیرد. الگوی یکسان تغییرات آن در دامنه‌ای مشخص کمک بسزایی در بهبود نتایج می‌کند. مدل‌های فنولوژی مبتنی بر دما دارای ساختار متفاوتی در محاسبه درجه-روز رشد و آستانه‌های دماهای کاردینال می‌باشند. در تحقیق حاضر تنها به یک روش اکتفا شد. بکارگیری روش‌ها و مقادیر آستانه‌ای دیگر می‌تواند در کاهش خطا موثر باشد. به عنوان مثال مدل فنولوژی در مدل زراعی APSIM مبتنی بر داده‌های سه ساعته دمایی و آستانه پایینی صفر درجه سانتی‌گراد و آستانه بالایی ۴۴ درجه سانتی‌گراد است. همچنین برای سه سطح دمایی صفر تا ۱۸، ۱۸ تا ۳۴ و ۳۴ تا ۴۴ درجه سانتی‌گراد، روش متفاوت محاسبه درجه-روز رشد دارد (Kumudini et al., 2014). براین اساس توصیه می‌شود که دقت مدل تلفیقی به ازای روش‌های مختلف برآورد درجه-روز رشد مقایسه شود.

### سپاسگزاری

داده‌های فنولوژی مورد استفاده در این پژوهش توسط اداره کل هواشناسی استان البرز تامین شده است. مولفین بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

طبق معیار نسبت سیگنال به نوفه، سه نمایه NDVI، EVI2 و OSAVI تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند. در مطالعه حاضر، نمایه‌های EVI2 و OSAVI با ضرایب از پیش تعیین شده به کار گرفته شدند. بر این اساس، واسنجی ضرایب منطقه‌ای برای این دو نمایه ممکن است در بهبود آن‌ها نقش بسزایی داشته باشد. همچنین، ضعف مدل مبتنی بر AGDD به خصوص در مراحل میانی و انتهایی، توسط محققین مختلفی نظیر De Beurs and Henebry (2010) بیان شده است که در این مقاله علاوه بر تایید ضعف به خصوص در مراحل میانی و انتهایی، با بهره‌گیری از مزیت NDVI اقدام به بهبود آن شد.

### نتیجه‌گیری

بکارگیری و توسعه مدل‌های ساده برای تخمین فنولوژی گیاهی و تاریخ‌های شروع مراحل مختلف، از اهمیت بسزایی برخوردار است. داده‌های ورودی اندک منجر به کاهش هزینه و زمان توسعه مدل‌ها می‌گردد. مدل مبتنی بر واحدهای حرارتی دارای یک ساختار محاسباتی ساده است، ضمن اینکه ریشه در نیاز فیزیولوژیکی گیاهی دارد. با وجود ساختار ساده، این مدل دارای خطاهای بزرگی در مراحل مختلف از جمله گل‌دهی می‌باشد. خطای بیش از یک هفته در تخمین شروع مرحله فنولوژی که دوره زمانی آن شاید کمتر از یک هفته باشد قابل قبول نیست. در اینجا می‌توان از دانش و ابزار سنجش از دور بهره گرفت و اقدام به تدقیق این روش نمود. در تحقیق حاضر مدلی مبتنی بر واحدهای حرارتی و نمایه NDVI برای تخمین تاریخ‌های فنولوژی ارائه شده است. یافته‌های تحقیق نشان از افزایش دقت مدل مبتنی بر واحدهای حرارتی با دخالت NDVI دارد. به هر حال، خطاهای دیدبانی فنولوژی، کیفیت داده‌های NDVI، ضعف مدل واحدهای حرارتی در بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی نیاز حرارتی و غیره می‌توانند به عنوان منابع خطای مدل تلفیقی

### REFERENCES

- Ahmadi, M., Kamkar, B., Soltani, A., Zeinali, A. and Arabameri, R., (2010). Effect of planting date on length of phenologic spells for Wheat variety and its relation with yield. *Researches of crop yields*, 7(2), 109-122 (in Farsi).
- Arvor, D., Jonathan, M., Meirelles, M.S.P., Dubreuil, V., Lecerf, R., (2008). Comparison of Multitemporal MODIS-EVI Smoothing Algorithms and its Contribution to Crop Monitoring. in Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2008. *IEEE International*, vol.2, no., pp.II-958-II-961, 7-11 July doi: 10.1109/IGARSS.2008.4779155
- Baskerville, G.L. and P. Emin., (1969). Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. *Ecology*, 50, 514-517.
- Bolton, D.B. and Friedl, M.A., (2013). Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics, *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, 74-84.
- Chen, J., Jonsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B., and Eklundh, L., (2004). A simple method for reconstructing a high quality NDVI time series data set based on the Savitzky-Golay filter, *Remote Sens. Environ.*, 91, 332-344, 2004.
- Curnel, Y. and Oger, R. (2007). Agrophenology indicators from remote sensing: state of the art. In: ISPRS Archives XXXVI-8/W48 Workshop

- proceedings: Remote sensing support to crop yield forecast and area estimates.
- Dash, J., Lankester, T., Hubbard, S. and Curran, P. J. (2008). Signal to noise ratio for MTCI & NDVI time series data. Proceedings of the 2nd MERIS/(A)ATSR User Workshop, Frascati, Italy, 22–26 September 2008.
- Davidson, A. and Csillag F., (2003). A comparison of three approaches for predicting C4 species cover of northern mixed grass prairie, *Remote Sensing of Environment*. 86, 70–82.
- De Beurs, K.M. and Henebry, G.M. (2010). Spatio-Temporal Statistical Methods for Modelling Land Surface Phenology. In Phenological Research: Methods for Environmental and Climate Change Analysis; Hudson, I.L., Keatley, M.R., Eds.; Springer-Verlag: New York, NY, USA.
- Deering, D.W. (1978). Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors. Ph.D. Dissertation, Texas A & M University, College Station, TX, 338 pp.
- Diepen, C.A.; Wolf, J.; van Keulen, H. (1989). WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil Use Manage.* 1989, 5, 16–24.
- Dwyer, L.M., Stewart, D.W., Carrigan, L., Neave, B.L. Ma, P., and Balchin, D. (1999a). A general thermal index for maize. *Agronomy Journal*. 91, 946-949.
- Dwyer, L.M., Stewart, D.W., Carrigan, L., Neave, B.L. Ma, P. and Balchin, D. (1999b). Guidelines for comparisons among different maize maturity rating systems. *Agronomy Journal*, 91, 946-949.
- Hmimina, G., Dufrêne, E., Pontailleur, J. Y., Delpierre, N., Aubinet, M., Caquet, B. (2013). Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sensing of Environment*, 132, 145–158
- Hufkens, K., Friedl, M., Sonnentag, O., Braswell, B. H., Milliman, T. and Richardson, A. D. (2012). Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology. *Remote Sensing of Environment*, 117, 307–321.
- Jiang, Z., Huete, A.R., Didan, K. and Miura, T., (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sens. Environ.* 112, 3833–3845.
- Jones, J.W., Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., Thornton, P.K., Wilkens, P.W., Imamura, D.T., Bowen, W.T. and Singh, U. (1998). Decision Support System for Agrotechnology Transfer: DSSAT V3. In Understanding Options for Agricultural Production; Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P., Eds.; Kluwer Academic Publishers: Boston, MA, USA, pp. 157–177
- Kamble, B. and Kilic, A., (2013). Hubbard, K. Estimating Crop Coefficients Using Remote Sensing-Based Vegetation Index. *Remote Sens.* 5, 1588-1602.
- Kroes, J.G., Dam, J.C.V., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A. and Jacobs, C.M.J. (2008). SWAP Version 3.2: Theory Description and User Manual; Alterra Report; Alterra: Wageningen, The Netherlands.
- Kumudini S, Andrade F, Boote K, Brown G, Dzotsi K, Edmeades G, Gocken T, Goodwin M, Halter A, Hammer G. (2014). Predicting Maize Phenology: Intercomparison of Functions for Developmental Response to Temperature. *Agronomy Journal*, 106(6), 2087-2097.
- Lofton, J., Tubana, B.S., Kanke, Y., Teboh, J., Viator, H. and Dalen, M. (2012). Estimating Sugarcane Yield Potential Using an In-Season Determination of Normalized Difference Vegetative Index. *Sensors*, 12, 7529-7547.
- McMaster, G.S. and Smika, D.E., (1988). Estimation and evaluation of winter wheat phenology in the central Great Plains. *Agric. For. Meteorol.*, 43, 1-18.
- Saxton, K.E.; Porterand, M.A.; McMahan, T.A. (1992). Climatic impacts on dryland winter wheat by daily soil water and crop stress simulations. *Agr. For. Meteorol.*, 58, 177–192.
- Shen, Y., Di, L., Wu, L., Yu, G., Tang, H., Yu, G. and Shao, Y. (2013). Real-time estimation of corn progress stages using hidden markov models with multisource features. *Remote Sens., in review.*
- Stöckle, C.O., Donatelli, M. and Nelson, R. (2003). Cropsyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.*, 18, 289–307.
- Streck, N. A., LAGO, I., GABRIEL, L.F. and SAMBORANHA, F.K. (2008). Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a nonlinear model. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43, 449–455.
- Rocha, V.A. and Shaver, G.R., (2009). Advantages of a two band EVI calculated from solar and photosynthetically active radiation fluxes, *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1560–1563.
- Rondeaux, G., Steven, M., and Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55, 95–107.
- Roth, G.W., and Yocum, J.O. (1997). Use of hybrid growing degree day ratings for corn in the northeastern USA. *Journal of Production Agriculture*, 10: 283-288.
- Swets D.L., Reed B.C., Rowland J.D. and Marko S.E., (1999). A Weighted Least-squares Approach to Temporal NDVI Smoothing. In: Proceedings Amr. Soc. Photogram. Rem. Sens. 17-21 May, Portland OR., ASPRS, Washington, D.C., pp. 526-536.
- Teal R.K., Tubana B.S., Girma K., Freeman K.W., Arnall D.B., Walsh O. and Raun W.R. (2006). In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. *Agron. J.* 98:1488–1494.
- Van Dijk A., Callis S.L., Sakamoto C.M. and Decker W.L. (1985). Smoothing vegetation index profiles: an alternative method for reducing

- radiometric disturbance in NOAA/AVHRR data. *Photogram. Engin. Rem. Sens.*, 53, pp. 1059-1067.
- Viovy N., Arino O. and Belward A.S. (1992). The best index slope extraction (BISE): a method for reducing noise in NDVI time series. *International Journal of remote sensing*, 13(8), 1585-1590.
- White, K., Pontius, J. and Schaberg, P. (2014). Remote sensing of spring phenology in northeastern forests: A comparison of methods, field metrics and sources of uncertainty. *Remote Sensing of Environment*, 148, 97-107.
- Wu C., Gonsamo A., Gough C.M., Chen J.M. and Xu S. (2014). Modeling growing season phenology in North American forests using seasonal mean vegetation indices from MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 147, 79-88.
- Zhang, X., Friedl, M., Schaaf, M., Strahler, A.H., Hodges, J.C.F., Gao, F., Reed, B.C. and Huete, A.R. (2003). A Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sens. Environ.*, 84, 471-475.
- Ziaei, S.F., Khalili, A. and Ghahreman, N. (2009). Prediction of autumn Wheat phenology based on weather data in three climates of Iran. *Agriculture*, 11(1), 71-86 (in Farsi).