



سجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / Iranian Remote Sensing & GIS

سال نهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۶
Vol.9, No. 3, Autumn 2017

۷۱-۹۰

ترکیب تصاویر سنجنده‌های MODIS و OLI به منظور تهیه داده‌های بازتابندگی سطحی در مقیاس روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در مناطق دارای تنوع کاربری متفاوت

مرتضی رحیم‌پور^{۱*}، نعمت‌الله کریمی^۲، رضا روزبهانی^۳، عبدالعلی رضایی^۴

۱. دستیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو، تهران

۲. استادیار، مؤسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو، تهران

۳. استادیار، مؤسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو، تهران

۴. دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۹/۰۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۵/۰۷

چکیده

دسترسی هم‌زمان به تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا در بسیاری از مطالعات ضروری است. این در حالی است که، فقط با استفاده از تصاویر یک سنجنده، این نیاز تأمین نخواهد شد. اما می‌توان با استفاده از تلفیق تصاویر سنجنده‌های گوناگون، که قدرت تفکیک زمانی (مانند MODIS) و مکانی (همانند Landsat) بالا دارند، به این مهم دست یافت. بدین ترتیب، هدف اصلی تحقیق حاضر اجرا و ارزیابی میزان دقت یکی از جدیدترین و کارآمدترین مدل‌های ترکیب تصاویر ماهواره‌ای با عنوان ESTARFM است. برای اجرا و ارزیابی این مدل، دو دوره زمانی (مقطع نخست بین روزهای ۲۰۴ تا ۲۲۰ و مقطع دوم بین روزهای ۲۲۰ تا ۲۳۶ سال ۲۰۱۶) در نظر گرفته شد. برای اعتبارسنجی نتایج، از تصاویر سنجنده OLI در موزائیک کناری، در جایگاه داده مشاهداتی (تصویرمینا)، استفاده شد. نتایج ارزیابی این دو دوره نشان داد میانگین همبستگی باندهای آبی، سبز، قرمز و فروسرخ نزدیک تخمین زده شده با تصویر دریافتی از سنجنده OLI، به صورت میانگین در این دو دوره، به ترتیب برابر با ۰/۹۰، ۰/۹۱، ۰/۹۱ و ۰/۸۵ و میانگین میزان مجذور میانگین مربعات خطا و چهار باند مذکور به ترتیب برابر با ۰/۰۲۵، ۰/۰۳۰، ۰/۰۳۶ و ۰/۰۴۹ است که، به ترتیب، معادل ۱۵/۳، ۱۶/۲، ۱۶/۵ و ۱۳/۷ درصد خطا در باندهای مورد نظر است. افزون بر این، با توجه به میزان همبستگی بالا ($R^2=0/87$) و مجذور میانگین مربعات خطای ناچیز ($RMSE=0/056$) بین مقادیر NDVI پیش‌بینی شده و NDVI حاصل از باندهای مشاهداتی، می‌توان بیان کرد علاوه بر اینکه این مدل در برآورد مقادیر بازتابندگی سطحی دقت مطلوبی دارد؛ می‌توان از آن (مانند NDVI) برای پیش‌بینی میزان محصولات نیز استفاده کرد. براساس نتایج مدل ESTARFM، می‌توان عنوان کرد مقادیر پیش‌بینی شده باندهای گوناگون دقت مناسبی دارند و می‌توان از این مدل برای ترکیب تصاویر، به قصد افزایش قدرت تفکیک‌های مکانی و زمانی، استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: تلفیق تصاویر ماهواره‌ای، مدل ESTARFM، بازتابندگی سطحی، سنجنده OLI، سنجنده MODIS.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، حکیمیه، بلوار شهید عباسپور، مؤسسه تحقیقات آب

۱- مقدمه

در نتیجه، امکان استفاده از آن تصویر وجود ندارد. این موضوع برای تصاویر سنجنده دارای قدرت تفکیک مکانی بالاتر (مانند Landsat) محسوس‌تر است زیرا در صورت وجود ابر یا ریزگردها در تصاویر مبنای که برای پیش‌بینی استفاده می‌شوند، فاصله زمانی پیش‌بینی، با توجه به قدرت تفکیک زمانی آن ماهواره، افزایش می‌یابد. خود این موضوع می‌تواند منشأ خطاهای فراوانی در مقادیر بازتابندگی پیش‌بینی شده شمرده شود.

در سال‌های اخیر، روش‌های گوناگونی برای رفع این محدودیت‌ها ابداع و عرضه شده است که می‌توان قدرت تفکیک زمانی و یا مکانی را از طریق آنها ارتقا بخشید. به‌طور کلی، می‌توان راه‌حلی را که برای رفع این مشکل مطرح شده‌اند به سه گروه بزرگ مقیاس‌سازی^۱ (Hong et al., 2009)، ریزمقیاس‌سازی^۲ (Merlin et al., 2010; Bindhu et al., 2013) و تلفیق تصاویر^۳ (Roy et al., 2008; Walker et al., 2012) تقسیم‌بندی کرد. در بیشتر روش‌های دو دسته اول (ریزمقیاس‌سازی و بزرگ‌مقیاس‌سازی)، از یک فرایند مقیاس‌گذاری استفاده می‌شود که الگوریتم‌های مبتنی بر آمار (همانند روابط رگرسیونی یا روابط تصادفی میان پارامترها) بهره می‌برند. باید توجه داشت که در این روش‌ها، ویژگی‌های رادیومتر و طیفی تصویر تغییر نمی‌کند (Luo et al., 2008) و صرفاً قدرت تفکیکی داده‌ها، در همان روزی که تصاویر مورد نظر دریافت شده است، به صورت مکانی تغییر می‌یابد. اما روش‌های تلفیق تصاویر، به دلیل قابلیت استفاده هم‌زمان از تصاویر دو سنجنده با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا، افزون‌بر بهبود قدرت تفکیک مکانی در زمان دریافت تصاویر، با پیش‌بینی مقادیر بازتابندگی در روزهایی که سنجنده دارای قدرت تفکیک مکانی بالاتر اقدام به تصویربرداری

دستیابی هم‌زمان به تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک زمانی و مکانی یکی از چالش‌های اساسی پیش روی محققان سنجنش از دور بوده است. در علم سنجنش از دور، انتخاب سنجنده مناسب به‌ویژه سنجنده‌هایی با کاربردهای عمومی (مانند Landsat و MODIS)، به منظور ایجاد تعادل بین قدرت تفکیک مکانی و زمانی، کار دشواری است زیرا تصاویر ماهواره‌ای از نظر قدرت تفکیک زمانی، مکانی و طیفی دارای محدودیت‌هایی‌اند و با انتخاب یک سنجنده ممکن است، به اجبار، یکی از قدرت تفکیک‌های مکانی، طیفی و یا زمانی کاهش یابد (Woodcock and Strahler, 1987; Chen et al., 2009; Hilker et al., 1999). برای نمونه، تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی متوسط Landsat-8 (با اندازه پیکسل ۳۰ متری) قدرت تفکیک زمانی محدود (۱۶ روز) و تعداد نُه باند دارند. این در حالی است که تصاویر با قدرت تفکیک مکانی پایین MODIS (با اندازه پیکسل‌های ۲۵۰ متر برای محدوده قرمز و فرورسرخ، ۵۰۰ متر برای محدوده مرئی و ۱ کیلومتر برای محدوده حرارتی) به صورت روزانه در دسترس‌اند و هر تصویر محدوده بانندی به نسبت وسیعی را پوشش می‌دهد (شامل ۳۶ باند). در نتیجه، کارشناسان برای برآورد متغیرهای گوناگون در مقیاس روزانه، از تصاویر MODIS استفاده می‌کنند. اما اگر قدرت تفکیک مکانی بالا مورد نیاز باشد، از تصاویر Landsat بهره می‌گیرند. این در حالی است که استفاده هم‌زمان از این دو سنجنده با محدودیت مواجه است (Zhu et al., 2010). افزون‌بر این، محدودیت‌های دسترسی به هریک از این سنجنده‌ها، شامل وجود ابر و ریزگردها و فواصل فاقد هم‌پوشانی مکانی تصاویر، نیز عامل محدودکننده محسوب می‌شود زیرا هنگام رخداد هریک از این شرایط، مقادیر بازتابندگی تحت تأثیر آن عوامل تغییر خواهد کرد. برای نمونه، در شرایط گردوغبار، با توجه به غلظت و اندازه ذرات، تمامی و یا قسمتی از بازتابندگی از طریق فرایند جذب یا پخش تغییر خواهد کرد و

1. up-scaling or aggregation
2. down-scaling or disaggregation
3. image fusion

مقیاس روزانه در سطح ۳۰ متر پیش‌بینی می‌شود. اما اجرای مدل STARFM همواره با محدودیت‌هایی همراه است (Gao et al., 2006) که به‌تازگی، طی تحقیقات بسیاری، برای رفع این محدودیت‌ها تلاش شده است (Roy et al., 2008; Hilker et al., 2009; Zhu et al., 2010). اولین محدودیتی که در مدل STARFM وجود دارد این است که شرح واضحی از میزان وابستگی بازتابندگی با عوامل زاویه تابش خورشید، زاویه دید سنجنده و ژئومتری سطح زمین در آن مطرح نشده است. برای رفع این مشکل، روی و همکاران^۶ (۲۰۰۸) با استفاده از مدلی نیمه‌فیزیکی، مقادیر بازتابندگی سطحی از محصولات BRDF^۷ سنجنده MODIS برای حل این مشکل استفاده کرد. دومین محدودیت این مدل این است که اگر تغییرات به‌وجودآمده در بازه زمانی مورد نظر (در فاصله زمانی بین تصاویر متوالی Landsat، که برابر با ۱۶ روز است) در یکی از تصاویر به‌کاررفته Landsat ثبت نشده باشد، با این روش نمی‌توان چنین تغییراتی را ثبت و پیش‌بینی کرد. این محدودیت نیز با توسعه مدل STAARCH^۸ به‌دست هیلکر و همکاران^۹ (۲۰۰۹) برطرف شد. سومین و مهم‌ترین محدودیت این روش اختلاط طیفی کاربری‌های گوناگون است. روش STARFM برای پیکسل‌ها و محدوده‌های جغرافیایی همگن توسعه یافته است که کاربری‌های یکسانی در پیکسل‌های MODIS و Landsat دارند. بنابراین، استفاده از این روش در مناطق دارای کاربری‌های متعدد و نزدیک به یکدیگر، همواره با چالش و خطا روبه‌روست. برای حل این محدودیت، ژو و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۰) مدل ESTARFM^{۱۱} را توسعه دادند. در این

نکرده است، قدرت تفکیک زمانی را نیز افزایش می‌دهند (Aiazzi et al., 2002). این نکته شایان ذکر است که این روش‌ها نمی‌توانند قدرت طیفی را افزایش دهند.

از قدیمی‌ترین روش‌های مطرح‌شده برای ترکیب تصاویر، می‌توان به شدت-رنگ-اشباع (HIS)^۱ (Carper, 1990)، جایگذاری مؤلفه‌های اصلی (PCS)^۲ (Shettigara, 1992) و تجزیه موجک^۳ (Yocky, 1996) اشاره کرد. اما تمرکز محققان صرفاً بر ترکیب تصاویر به‌منظور افزایش دقت مکانی با استفاده از باندهای پانکروماتیک معطوف بوده است (Polh and Van Genderen, 1998; Zhang, 2004). به‌طور کلی، می‌توان یکی از اهداف اصلی تلفیق تصاویر را دستیابی به قدرت تفکیک مکانی بالا در یک زمان خاص، با استفاده از تصاویر یک یا دو سنجنده، بیان کرد (Genderen and Pohl, 1994; Roy et al., 2008; Hilker et al., 2009; Walker et al., 2012; Walker et al., 2014). به این مفهوم که در بیشتر روش‌های ترکیب تصاویر، فقط قدرت تفکیک مکانی افزایش می‌یابد زیرا معمولاً از دو باند تصویر یک سنجنده برای ادغام استفاده می‌شود. این موضوع مهم‌ترین محدودیت استفاده از روش‌های یادشده است. این محدودیت، در یکی از جدیدترین تحقیقات گائو و همکاران^۴ (۲۰۰۶)، با توسعه مدلی جدید (STARFM)^۵ به‌نسبت مدل‌های ترکیب تصاویر قبلی، با بهره‌گیری از تصاویر دو سنجنده ماهواره‌های Landsat و Terra قدرت تفکیک‌های مکانی و زمانی بازتابندگی را هم‌زمان افزایش می‌دهد. در این روش، با استفاده از ترکیب قدرت تفکیک زمانی بالای سنجنده MODIS و همچنین، قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر ماهواره Landsat، میزان بازتابندگی سطحی با

6. Roy et al.

7. bidirectional reflectance distribution function (BRDF)

8. spatial temporal adaptive algorithm for mapping reflectance change (STAARCH)

9. Hilker et al.

10. Zhu et al.

11. enhanced Starfm (ESTARFM)

1. intensity-hue-saturation (HIS)

2. principal component substitution (PCS)

3. wavelet decomposition

4. Gao et al.

5. spatial and temporal adaptive reflectance fusion model (STARFM)

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش بخشی از حوضه آبریز زاینده‌رود در استان اصفهان، با مختصات ("۳۵'۵۱" ۳۲° شمالی "۰۲'۲۸" ۵۲° شرقی) است

که سه ویژگی مهم دارد: ۱. این منطقه در محدوده‌ای انتخاب شده که تصاویر دو سنجنده OLI و MODIS، در مناطق نزدیک به نادیر، هم‌پوشانی مناسبی داشته باشند تا خطای سیستماتیک^۱ کمتری در نتایج حاصل از اجرای مدل تأثیر بگذارند. در اینجا منظور از خطای سیستماتیک، مقدار خطایی است که به علت مکان قرارگرفتن پدیده‌ها در تصویر ایجاد می‌شود که بیشتر ناشی از تأثیر مقیاس و اعوجاجات است. زیرا سنجنده‌های دارای قدرت تفکیک پایین، همانند MODIS، زاویه دید سنجنده^۲ وسیعی دارند. در تصاویر این سنجنده، اعوجاجاتی به‌ویژه در حاشیه تصاویر وجود دارد که دارای رابطه عکس با زاویه دید سنجنده است. در تحقیق حاضر، منطقه مطالعاتی به‌گونه‌ای انتخاب شده که زاویه دید سنجنده کمتر از ۲۰ درجه باشد (Tasumi et al., 2008). دومین ویژگی منطقه مورد مطالعه این است که تصویر ماهواره Landsat در دو گذر متوالی باید دارای هم‌پوشانی باشند زیرا می‌توان از داده‌های یک گذر برای مدل‌سازی و از داده‌های گذر دیگر (که در فاصله‌های زمانی هشت روز عبور می‌کند) به‌منزله داده مشاهداتی برای اعتبارسنجی مدل استفاده کرد. با توجه به اینکه یکی از اهداف تحقیق به‌کارگیری و ارزیابی این مدل در مناطق دارای تنوع کاربری بالاست، سعی شده شرایط تنوع کاربری اراضی نیز در انتخاب این منطقه لحاظ شود به‌گونه‌ای که، در این محدوده، انواع اراضی زراعی، آیش، مناطق شهری و اراضی مرتعی و بایر وجود دارد.

۱. با توجه به اینکه تصاویر MODIS دید وسیعی از مناطق گوناگون را ثبت می‌کند؛ اندازه پیکسل‌ها در تمام طول تصویر یکسان نیست. در نتیجه اندازه پیکسل‌هایی که به مرکز تصویر نزدیک‌تر هستند هنگام ریزمقیاس‌سازی در این مناطق خطای سیستماتیک کمتری ایجاد می‌نمایند.

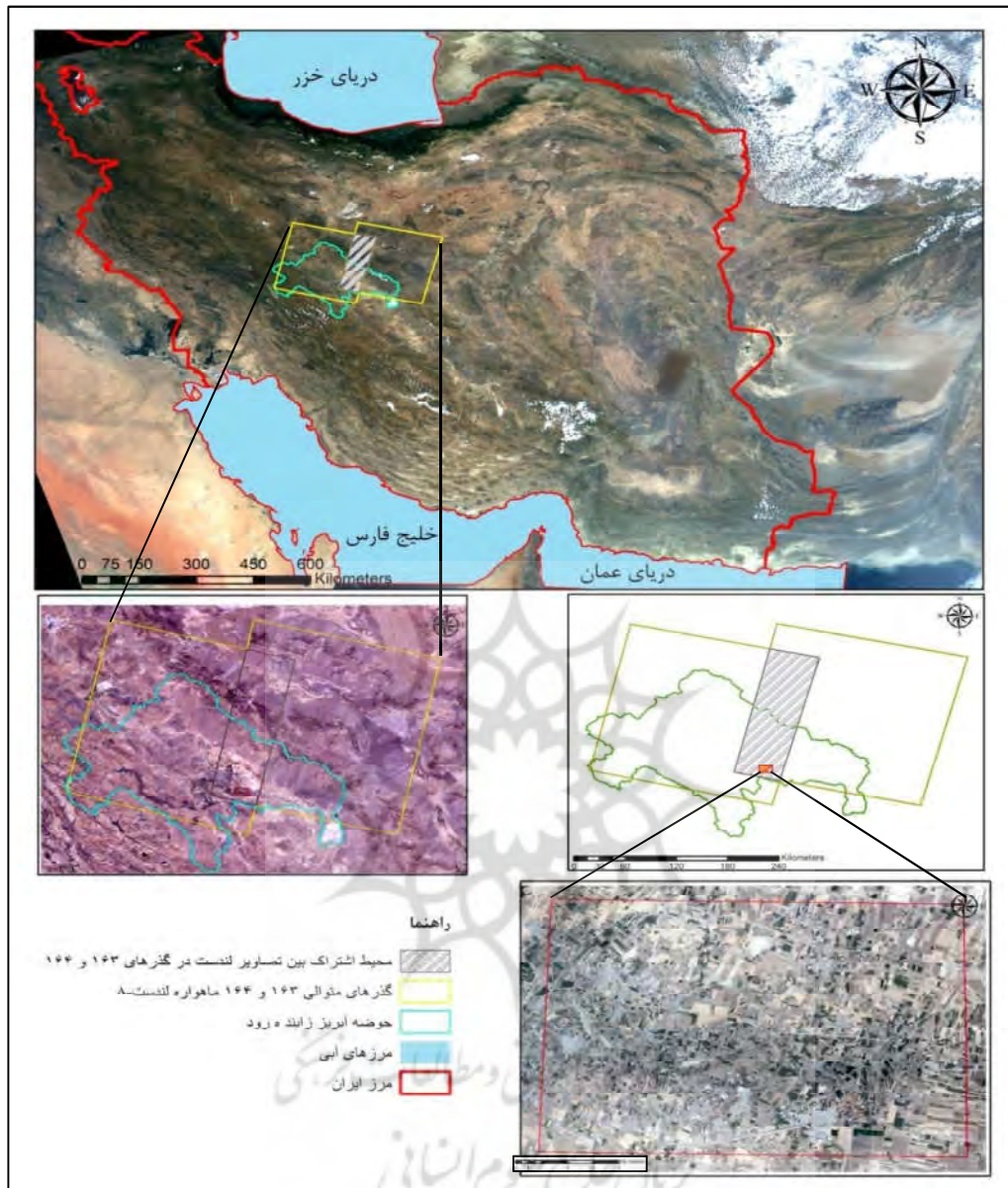
2. sensor view angles

تحقیق، نشان داده شده که در مناطق با تنوع کاربری بالا، می‌توان با استفاده از مدل ESTRFM میانگین مطلق خطا را به نسبت مدل STRFM در تمامی باندها کاهش داد. برای نمونه، در باند فرورسرخ، میزان میانگین مطلق خطا از ۰/۱۲۹ به ۰/۱۰۶ کاهش یافت. محققان گوناگونی نیز بر نتایج بهتر مدل ESTARFM، در مقایسه با دیگر روش‌ها، اذعان داشتند (Fu et al., 2014; Jarhani et al., 2013). در نتیجه، با توجه به عملکرد مناسب روش ESTARFM در پژوهش‌های گذشته، در تحقیق حاضر نیز از این روش استفاده شد. افزون بر آن، تصاویر سنجنده‌های OLI و MODIS نیز به‌کار گرفته شد تا میزان بازتابندگی سطحی در مقیاس روزانه و با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در اراضی دارای کاربری متفاوت، در محدوده مطالعاتی واقع در استان اصفهان، پیش‌بینی شود. همچنین، به‌منظور ارزیابی دقت این مدل، نتایج حاصل ارزیابی و با مقادیر انعکاسی و محصول NDVI استخراج‌شده از تصاویر Landsat-8 مقایسه شد. از مهم‌ترین جنبه‌های نوآورانه در این تحقیق، می‌توان به این موارد اشاره کرد:

الف) مدل حاضر پیش‌تر در کاربری‌های اراضی محدود و با تنوع بسیار اندک و معمولاً روی اراضی کشاورزی اجرا شده بود. این در حالی است که، در تحقیق حاضر، این مدل در مناطق دارای تنوع کشت بسیار بالا (حوضه آبریز زاینده‌رود)، با طیف بسیار زیادی از کاربری‌های اراضی و ناهمگن، اجرا و ارزیابی شده است.

ب) مدل حاضر پیش‌تر در مناطق با اقلیم مرطوب اجرا شده است اما، در تحقیق حاضر، در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دقت ارزیابی شده است.

ج) در کنار ارزیابی مقادیر بازتابندگی پیش‌بینی شده با استفاده از مدل ESTRFM به‌صورت تفکیکی برای هر باند، این مدل روی شاخص NDVI، به‌منزله یکی از کاربردی‌ترین شاخص‌های گیاهی ماهواره‌ای نیز، اجرا و ارزیابی شد.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه: محدوده‌های زرد رنگ نمایانگر گذرهای (path) ۱۶۳ و ۱۶۴ در عبور (row) ۳۷ و محدوده‌های قرمز رنگ قسمتی از تحقیق است که انواع گوناگون کاربری را نشان می‌دهد.

استفاده شده ۳۲ تاست اما، در جدول مذکور، تصاویری که در این تحقیق برای واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شده‌اند مطرح شده و از ذکر تصاویر روزهای بین دوره‌های ۲۰۴ تا ۲۳۶، به‌جز روزهای ۲۱۳ و ۲۲۹، صرف‌نظر شده است. داده‌های انتخاب‌شده در این مطالعه در دو مقطع زمانی (مقطع اول، بین روزهای

به‌سبب اینکه تصاویر سنجنده MODIS از دو ماهواره Terra و Aqua در دسترس قرار می‌گیرند، تصاویر مربوط به هر یک از این دو ماهواره بررسی شد و در نهایت، با توجه به منطقه مطالعاتی و گذر ماهواره Landsat-8، تصاویر مورد استفاده در شکل ۲ قابل مشاهده است. شایان ذکر است تعداد کل تصاویر

می‌شود زاویه تابش خورشید نیز تقریباً یکسان باشد و خطایی در محاسبات وارد نکند. شایان توجه است که، در مطالعات مشابه، این فاصله زمانی غالباً شانزده روز در نظر گرفته می‌شود (Gao et al., 2006; Gao and Long, 2008; Roy et al., 2008; Zhu et al., 2010).

پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

مفهوم و عملکرد پیش‌پردازش مربوط به سنجنده‌های OLI و MODIS متفاوت است. در تحقیق حاضر، منظور از پیش‌پردازش در رابطه با سنجنده OLI تبدیل مقادیر عددی هر پیکسل (DN) به مقادیر بازتابندگی است. اما در سنجنده MODIS، هدف زمین مرجع کردن و نیز یکسان‌سازی اندازه پیکسل‌هاست. تمامی این پیش‌پردازش‌ها و پردازش‌ها در محیط IDL ۸/۵ برنامه‌نویسی و تدوین شده است.

۲۰۴ تا ۲۲۰ و مقطع دوم، بین روزهای ۲۲۰ تا ۲۳۶) گردآوری شد تا بتوان نتایج حاصل از مدل ESTARFM را با داده‌های واقعی تهیه‌شده از طریق ماهواره Landsat مقایسه کرد.

باید اشاره کنیم که به دو دلیل می‌توان از تصویر کناری دارای هم‌پوشانی تصاویر Landsat، برای ارزیابی میزان کارایی و دقت مدل ESTARFM، استفاده کرد: الف) زاویه دید سنجنده OLI، در هر نقطه‌ای از تصویر، چندان متغیر نیست و معمولاً کمتر از ۲۰ درجه است. این در حالی است که، براساس تحقیقات، زاویه دید بیشتر از ۲۰ درجه منجر به بروز خطا می‌شود (Tasumi et al., 2008). بنابراین، از نظر زاویه دید سنجنده، خطای قابل توجهی وارد محاسبات نمی‌شود. ب) اختلاف زمانی بسیار اندک بین تصاویری که در کالیبراسیون و اعتبارسنجی استفاده شده (در حدود نُه روز) باعث



شکل ۲. مشخصات تصاویر سنجنده‌های MODIS و OLI، به کاررفته در پژوهش، برای واستجی و اجرا و اعتبارسنجی مدل ESTARFM

۲-۳- مدل تلفیق ESTARFM

ایده اصلی روش ESTARFM استفاده از همبستگی برای تلفیق داده‌های سنجنده‌های گوناگون و بهبود قدرت تفکیک مکانی و زمانی است و اصلی‌ترین مزیت این روش، در مقایسه با روش‌های دیگر از جمله STARFM، اختلاط طیفی پیکسل‌های دارای چند کاربری گوناگون به‌شمار می‌رود (Zhu et al., 2010). بنابراین در این بخش، برای توضیح بهتر روابط، روش‌شناسی با فرض پیکسل خالص آغاز و به پیکسل‌های ناهمگن می‌یابد. روابط نیز به‌صورت کامل بیان شده است.

۲-۳-۱- پیکسل خالص

در این بخش، فرض شده عبور و تصویربرداری سنجنده دارای قدرت تفکیک مکانی پایین (سنجنده MODIS)، به‌نسبت سنجنده دارای قدرت تفکیک مکانی بالاتر (سنجنده OLI)، در محدوده‌ای با کاربری اراضی یکسان و نیز با فواصل زمانی کوتاه صورت گرفته است. در نتیجه، اگر اندازه پیکسل‌ها یکسان شوند، اختلاف بازتابندگی بین این دو تصویر (با اندازه پیکسل یکسان و با قدرت تفکیک مکانی پایین و بالا) فقط ناشی از ویژگی این دو سنجنده و قدرت تفکیک طیفی گوناگون آنها خواهد بود که به‌سادگی می‌توان، با استفاده از رابطه خطی بین بازتابندگی این دو تصویر در هر پیکسل، اریبی مورد نظر را برطرف کرد (Gao et al., 2006).

$$F(x, y, t_k, B) = a \times \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$C(x, y, t_k, B) + b,$$

در اینجا F و C، به ترتیب، بر بازتابندگی تصویرهای دارای قدرت تفکیک بالا و پایین برای هر باند، مانند B، دلالت می‌کنند، (x,y) موقعیت یک پیکسل مشخص برای هر دو تصویر، t_k زمان گذر ماهواره و a و b ضرایب مدل رگرسیون خطی‌اند که می‌توان آنها را واسنجی کرد اما این ضرایب در شرایط اتمسفری، ارتفاعی، زاویه خورشیدی در مکان‌های متفاوت و نیز تصحیحات

(رادئومتریک، هندسی و اتمسفری) متغیرند. بنابراین، ضرایب a و b باید برای هر تصویر واسنجی شوند. اگر دو تصویر قدرت تفکیک پایین در دو زمان t_0 و t_p داشته باشیم، با فرض ثابت بودن کاربری اراضی و کالیبراسیون سنجنده بین این دو تاریخ، رابطه (۱) را می‌توان به دو رابطه (۲) در زمان t_0 و رابطه (۳) در زمان t_p تعمیم داد:

$$F(x, y, t_0, B) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$= a \times C(x, y, t_0, B) + b$$

$$F(x, y, t_p, B) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$= a \times C(x, y, t_p, B) + b$$

از این دو رابطه نیز می‌توان رابطه (۴) را به‌دست

آورد:

$$F(x, y, t_p, B) = F(x, y, t_0, B) + a \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\times (C(x, y, t_p, B)$$

$$- C(x, y, t_0, B))$$

رابطه (۴) نشان می‌دهد که بازتابندگی تصویر دارای قدرت تفکیک بالا، در زمان t_p ، با بازتابندگی تصویر دارای قدرت تفکیک بالا، در زمان t_0 ، و تغییر بازتابندگی از t_0 به t_p ، در تصاویر دارای قدرت تفکیک پایین مربوط به این دو تاریخ، برابر است. با توجه به مشخص بودن همه مقادیر $F(x, y, t_0, B)$ ، $C(x, y, t_0, B)$ ، $C(x, y, t_p, B)$ می‌توان بازتابندگی در قدرت تفکیک بالا را در زمان t_p محاسبه کرد.

۲-۳-۲- پیکسل‌های ناهمگن

با فرض همگنی پیکسل‌ها، رابطه‌ای خطی بین بازتابندگی تصاویر دارای قدرت تفکیک بالا و پایین وجود دارد. اما برای پیکسل‌های ناهمگن، رابطه (۴) صحت نخواهد داشت. در یک پیکسل، با وجود چند کاربری، می‌توان مقدار بازتابندگی را با توجه به مؤلفه‌های پوشش‌های گوناگون در آن وزن‌دهی و پیش‌بینی کرد (Adams et al., 1986). با فرض تغییر نکردن نسبت‌های کاربری‌ها در

در اینجا، h_k نرخ تغییر بازتابندگی K اُمین عضو است. با وارد کردن رابطه (۹) به رابطه (۸)، می‌توان آن را این گونه نوشت:

$$\frac{F_{kn} - F_{km}}{C_n - C_m} = \frac{h_k}{\sum_{i=1}^M \frac{f_i h_i}{a}} = \vartheta_k \quad (10)$$

بخش سمت راست رابطه (۱۰) مقدار ثابتی است و از سوی دیگر، با توجه به فرض پیشین، می‌توان این گونه بیان کرد که نرخ تغییر بازتابندگی هر عضو پایدار است. بنابراین، ϑ_k نرخ تغییر بازتابندگی برای k اُمین عضو به تغییر بازتابندگی پیکسل مخلوط با قدرت تفکیک پایین را نشان می‌دهد. هنگامی که عضو پایانی به منزله پیکسل‌های با قدرت تفکیک بالا (x, y) درون پیکسلی مخلوط با قدرت تفکیک پایین در نظر گرفته می‌شود، می‌توان ضریب تبدیل $v(x, y)$ را از طریق برآزش خطی تغییرات بازتابندگی پیکسل‌های دارای قدرت تفکیک بالای همان عضو و پیکسل دارای قدرت تفکیک پایین به دست آورد. به همین صورت، اگر یک جفت تصویر با قدرت تفکیک بالا و پایین در زمان t_0 و تصویر دارای قدرت تفکیک پایین دیگری در زمان t_p فراهم شود، بازتابندگی مجهول پیکسل دارای قدرت تفکیک بالا در t_p را می‌توان طبق رابطه (۱۱) پیش‌بینی کرد:

$$F(x, y, t_p, B) \quad (11)$$

$$= F(x, y, t_0, B) + \vartheta(x, y) \times (C(x, y, t_p, B) - C(x, y, t_0, B))$$

اگرچه رابطه‌های (۴) و (۱۱) فرم یکسانی دارند، معنایشان متفاوت است زیرا رابطه (۴) نرمال‌سازی نسبی پیکسل‌های خالص بین تصاویر دارای قدرت تفکیک متفاوت را ارائه می‌دهد و برای هر تاریخی معقول است. بنابراین، پیش‌بینی بازتابندگی پیکسل با قدرت تفکیک بالا دقیق‌تر است. این در حالی است که رابطه (۱۱) معادله تغییر بازتابندگی بین یک عضو پایانی (پیکسل دارای قدرت تفکیک بالا) و پیکسل مخلوط دارای قدرت تفکیک پایین را براساس مجموعه‌ای از فرضیات توصیف می‌کند. این فرضی معقول طی دوره زمانی نسبتاً کوتاهی است چون، در

پیکسل‌های گوناگون از تاریخ t_m تا t_n بازتابندگی یک پیکسل مخلوط با قدرت تفکیک پایین می‌تواند به صورت دنباله‌ای از مدل اختلاط خطی بیان شود (Chen et al., 2010):

$$C_m = \sum_{i=1}^M f_i \left(\frac{1}{a} F_{im} - \frac{b}{a} \right) + \varepsilon \quad (5)$$

$$C_n = \sum_{i=1}^M f_i \left(\frac{1}{a} F_{in} - \frac{b}{a} \right) + \varepsilon$$

در اینجا، C_n و C_m بازتابندگی پیکسل مخلوط با قدرت تفکیک پایین، به ترتیب، در تاریخ‌های t_n و t_m هستند، f کسر اُمین نوع پوشش (اُمین عضو پایانی)، F_{in} و F_{im} بازتابندگی اُمین عضو در تاریخ t_n و t_m به دست آمده در تصویر دارای قدرت تفکیک بالا، M تعداد کل اعضا، ε خطای باقی‌مانده و در نهایت، b و a ضرایب ثابت است. از تفریق دو رابطه بالا، می‌توان تغییرات بازتابندگی تصاویر دارای قدرت تفکیک پایین از تاریخ t_m تا t_n را، با توجه به رابطه زیر، برآورد کرد:

$$C_n - C_m = \sum_{i=1}^M \frac{f_i}{a} (F_{in} - F_{im}) \quad (6)$$

همچنین، با فرض خطی بودن تغییر بازتابندگی هر عضو از t_m به t_n ، بازتابندگی اُمین پیکسل در t_n می‌تواند از طریق بازتابندگی در t_m توصیف شود؛ به این صورت که:

$$F_{in} = (h_i \times \Delta t + F_{im}) \quad (7)$$

در اینجا، $\Delta t = t_n - t_m$ و h_i نرخ تغییرات است که ممکن است طی یک دوره زمانی ثابت فرض شود. این فرض (خطی بودن تغییر بازتابندگی از t_m به t_n)، در طول دوره زمانی کوتاه، معتبر است. مسلماً ممکن است تغییر بازتابندگی در برخی حالت‌ها، مانند تغییر فنولوژی پوشش گیاهی، خطی نباشد. بنابراین، با توجه به رابطه (۷)، رابطه (۶) را می‌توان دوباره بدین صورت نوشت:

$$C_n - C_m = \Delta t \sum_{i=1}^M \frac{f_i h_i}{a} \quad (8)$$

اگر بازتابندگی اُمین عضو در تاریخ t_m و t_n معلوم باشد، Δt را می‌توان از رابطه (۷) بدین شکل بیان کرد:

$$\Delta t = \frac{F_{kn} - F_{km}}{h_k} \quad (9)$$

$$R_i = \frac{E[(F_i - E(F_i))(C_i - E(C_i))]}{\sqrt{D(F_i)} \cdot \sqrt{D(C_i)}}$$

$$F_i = \{F(x_i, y_i, t_m, B_1), \dots, F(x_i, y_i, t_m, B_n), F(x_i, y_i, t_n, B_1), \dots, F(x_i, y_i, t_n, B_n)\}$$

$$C_i = \{C(x_i, y_i, t_m, B_1), \dots, C(x_i, y_i, t_m, B_n), C(x_i, y_i, t_n, B_1), \dots, C(x_i, y_i, t_n, B_n)\}$$

رابطه (۱۳)

R_i ضریب همبستگی طیفی بین پیکسل دارای قدرت تفکیک بالا و پایین برای آئمین پیکسل مشابه است. F_i و C_i بردار طیفی است که بازتابندگی در هر باند در t_m و t_n را، برای آئمین پیکسل مشابه دارای قدرت تفکیک بالا و پیکسل دارای قدرت تفکیک پایین منطبق با آن، شامل می‌شود. $E(\cdot)$ مقدار مورد انتظار^۱ و $D(F_i)$ و $D(C_i)$ ، به ترتیب، واریانس F_i و C_i به شمار می‌روند. همچنین، مقدار R از -1 تا 1 تغییر می‌کند و مقادیر بالاتر بیانگر شباهت طیفی بالاتر است. دلیل ترکیب طیف دو تاریخ متفاوت به منظور محاسبه شباهت طیفی این است که ویژگی‌های طیفی برخی پوشش‌های زمینی طی زمان تغییر می‌کند. ترکیب اطلاعات طیفی زمان‌های متفاوت می‌تواند مقدار دقیق‌تری از شباهت طیفی بین پیکسل دارای قدرت تفکیک بالا و پایین را نشان دهد. فاصله جغرافیایی d_i بین آئمین پیکسل مشابه و پیکسل مرکزی براساس معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$d_i = 1 + \sqrt{\left(\frac{x_w}{2} - x_i\right)^2 + \left(\frac{y_w}{2} - y_i\right)^2} / (w/2)$$

رابطه (۱۴)

w عرض پنجره جست‌وجو است که برای نرمال کردن فاصله به کار می‌رود و تضمین می‌کند که محدوده فاصله برای پیکسل‌های مشابه، در پنجره‌های جست‌وجوی گوناگون، از 1 تا $1+2^{0.5}$ بسط داده می‌شود. می‌توان با ترکیب فاصله و شباهت طیفی، یک شاخص مصنوعی D را محاسبه کرد که فاصله

آن تاریخ، نسبت K آئمین عضو به θ_k ثابت است. هنگامی که پیکسل دارای قدرت تفکیک پایین کلاً با یک عضو پایانی پوشانده شده باشد، می‌توان بیان کرد که رابطه (۴) یک مورد خاص از رابطه (۱۱) محسوب می‌شود. روابط (۴) و (۱۱) فقط از اطلاعات یک پیکسل برای پیش‌بینی بازتابندگی دارای قدرت تفکیک بالا استفاده می‌کنند. با در نظر گرفتن پیکسل‌های همسایه از یک کلاس یکسان با تغییرات بازتابندگی مشابه، برای اینکه از اطلاعات پیکسل‌های همسایه نیز استفاده شود، روش پنجره متحرکی به کار رفت که گائو و همکاران (۲۰۰۶) توصیف کرده بودند. اگر w اندازه پنجره جست‌وجو در نظر گرفته شود، بازتابندگی تصویر دارای قدرت تفکیک بالای پیکسل مرکزی $(x_{w/2}, y_{w/2})$ در تاریخ t_p را می‌توان براساس روابط (۴) و (۱۱)، بدین صورت محاسبه کرد:

$$F(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B)$$

$$= F(x_{w/2}, y_{w/2}, t_0, B) + \sum_{i=1}^N W_i$$

$$\times v_i \times (C(x_i, y_i, t_p, B) - C(x_i, y_i, t_0, B))$$

رابطه (۱۲)

N تعداد پیکسل‌های مشابه است که شامل پیکسل پیش‌بینی نیز می‌شود. (x_i, y_i) مکان آئمین پیکسل مشابه و W_i وزن آئمین پیکسل مشابه است. در اینجا، پیکسل‌های همسایه با پوشش یکسان همانند پیکسل مرکزی، پیکسل‌های مشابه نامیده می‌شوند؛ بنابراین ویژگی‌های طیفی مشابهی با پیکسل مرکزی تعیین شده از تصویر دارای قدرت تفکیک بالا دارند. وزن هر پیکسل مشابه براساس مکان آن و شباهت طیفی بین پیکسل دارای قدرت تفکیک بالا و پایین تعیین می‌شود. برای نمونه، هنگامی که شباهت بیشتر و فاصله کمتری با پیکسل مرکزی وجود دارد، وزن بالاتر داده می‌شود. در اینجا، شباهت طیفی از طریق ضریب همبستگی بین هر پیکسل مشابه و پیکسل دارای قدرت تفکیک پایین منطبق با آن، مانند رابطه زیر، محاسبه می‌شود.

1. expected value

جغرافیایی و طیفی را ترکیب می کند:

رابطه (۱۵)

$$D_i = (1 - R_i) \times d_i$$

همان طور که در بالا توصیف شد، پیکسلی مشابه با مقدار D بزرگ تر باید در محاسبه تغییر بازتابندگی پیکسل مرکزی سهم کمتری داشته باشد؛ بنابراین، از قرینه نرمال شده D به منزله وزن W_i استفاده می شود. دامنه W_i از ۰ تا ۱ و مجموع وزن تمامی پیکسل های مشابه برابر ۱ است.

رابطه (۱۶)

$$W_i = (1/D_i) / \sum_{i=1}^N (1/D_i)$$

پس از محاسبه وزن و ضریب تبدیل با استفاده از رابطه (۱۲)، بازتابندگی دارای قدرت تفکیک بالا در تاریخ t_p را می توان با استفاده از تصویر MODIS در آن تاریخ و جفت تصاویر دارای قدرت تفکیک های بالا (OLI) و پایین (MODIS)، در تاریخ های ابتدا (t_m) و انتها (t_n)، محاسبه کرد که، به ترتیب، به صورت $F_m(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B)$ و $F_n(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B)$ نشان داده می شوند. با توجه به جایگاه زمانی تاریخ t_p به نسبت t_m یا t_n ، می توان از طریق ترکیب وزنی این دو، نتایج پیش بینی شده را با استفاده از تصاویر دارای قدرت مکانی پایین (MODIS) تدقیق کرد. بنابراین، داریم:

$$F(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B) = T_m \times F_m(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B) + T_n \times F_n(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B)$$

رابطه (۱۷)

وزن های T_m و T_n ، نیز براساس تاریخ های ابتدا و انتها، از معادله زیر محاسبه می شوند:

$$T_k = \frac{1 \left| \sum_{j=1}^w \sum_{l=1}^w C(x_j, y_l, t_k, B) - \sum_{i=1}^w \sum_{l=1}^w C(x_j, y_l, t_p, B) \right|}{\sum_{k=m,n} (1 \left| \sum_{j=1}^w \sum_{l=1}^w C(x_j, y_l, t_k, B) - \sum_{i=1}^w \sum_{l=1}^w C(x_j, y_l, t_p, B) \right|)}$$

($k = m, n$)

رابطه (۱۸)

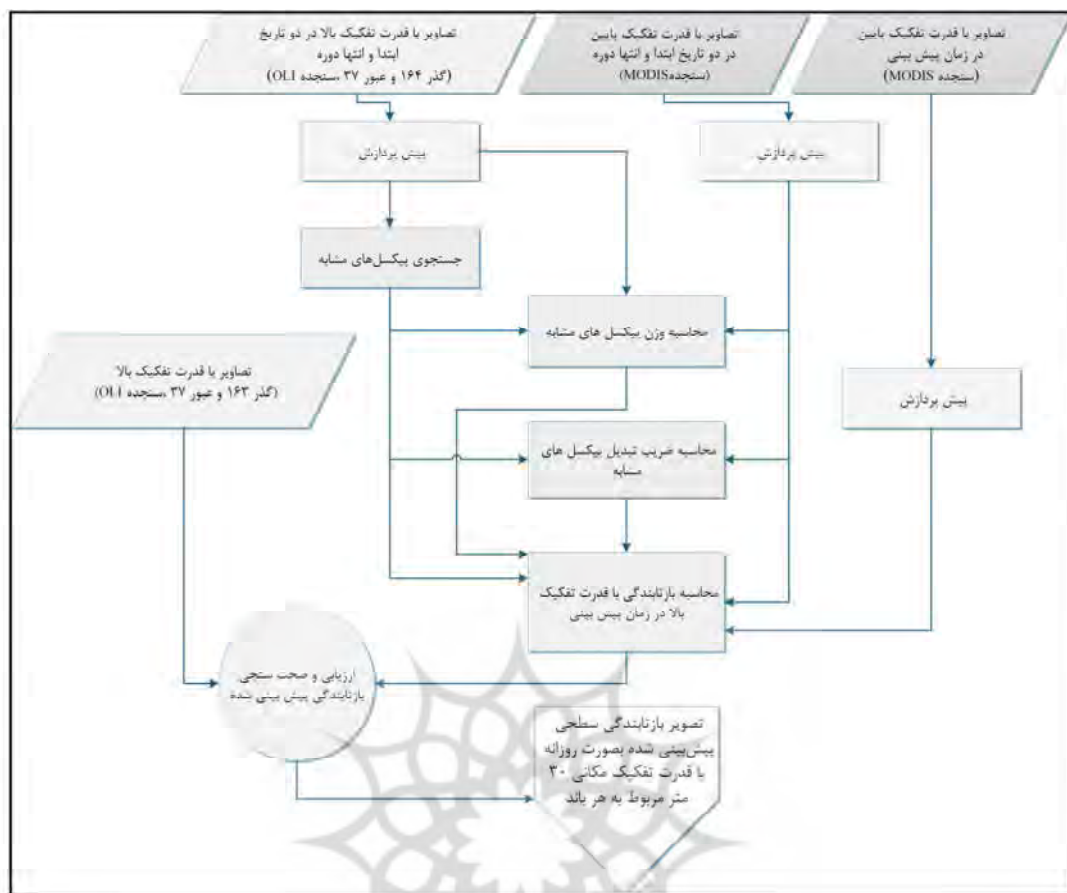
همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می شود، مراحل اجرای این روش، به طور کلی، هنگامی امکان پذیر است که دو مقطع زمانی از تصاویر Landsat و MODIS به صورت هم زمان موجود باشد؛ بدین صورت که در دو

زمان t_m و t_n ، یک تصویر Landsat و یک تصویر MODIS به منظور واسنجی مدل و یک مجموعه از تصاویر MODIS به صورت روزانه بین دو تاریخ مذکور، به منزله داده ورودی و به منظور پیش بینی بازتابندگی سطحی در آن (زمان t_p)، به کار می رود. اجرای این الگوریتم شامل چهار مرحله است. ابتدا، دو تصویر دارای قدرت تفکیک بالا برای جست و جوی پیکسل های مشابه با پیکسل مرکزی در پنجره محلی به کار گرفته می شوند. سپس وزن های تمامی پیکسل های مشابه (W_i) به دست می آید. در مرحله بعد، ضرایب تبدیل θ_k با رگرسیون خطی تعیین می شود و در نهایت، با استفاده از ضرایب W_i و θ_k ، میزان بازتابندگی سطحی به صورت روزانه با قدرت تفکیک بالا (۳۰ متر) برآورد می شود.

۳- نتایج

۳-۱- صحت سنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی مدل ESTARFM، از اطلاعات تصاویر OLI موزائیک کناری با فاصله زمانی هشت روزه (در محدوده هم پوشانی)، که در فرایند ریزمقیاس سازی دخالت نداشته اند، استفاده می شود. به این نحو که با استفاده از دو تصویر متوالی سنجنده OLI در یک موزائیک، میزان بازتابندگی برای ۱۶ روز با استفاده از تصاویر روزانه MODIS، با قدرت تفکیک ۳۰ متر پیش بینی گردیده است. سپس با استفاده از تصویر OLI در موزائیک کناری میزان بازتابندگی برآورده شده در منطقه ای که در این دو موزائیک دارای هم پوشانی هستند. شایان ذکر است، به منظور صحت سنجی بهتر مدل، دو مقطع زمانی مبنای ریزمقیاس سازی قرار داده شد؛ به طوری که در دوره زمانی نخست، با استفاده از چهار تصویر سنجنده های OLI و MODIS در روزهای جولایی یا روز ژولیوسی (Julian day number) ۲۰۴ (۱ مرداد ۱۳۹۵) و ۲۲۰ (۱۷ مرداد ۱۳۹۵)، مدل ESTARFM واسنجی و ضرایب برای پیش بینی شانزده روز این دوره زمانی محاسبه شد. سپس، با استفاده از این مدل و تصویر MODIS در هر روز از این دوره، میزان بازتابندگی امواج الکترومغناطیس در مقیاس ۳۰ متر پیش بینی شد.



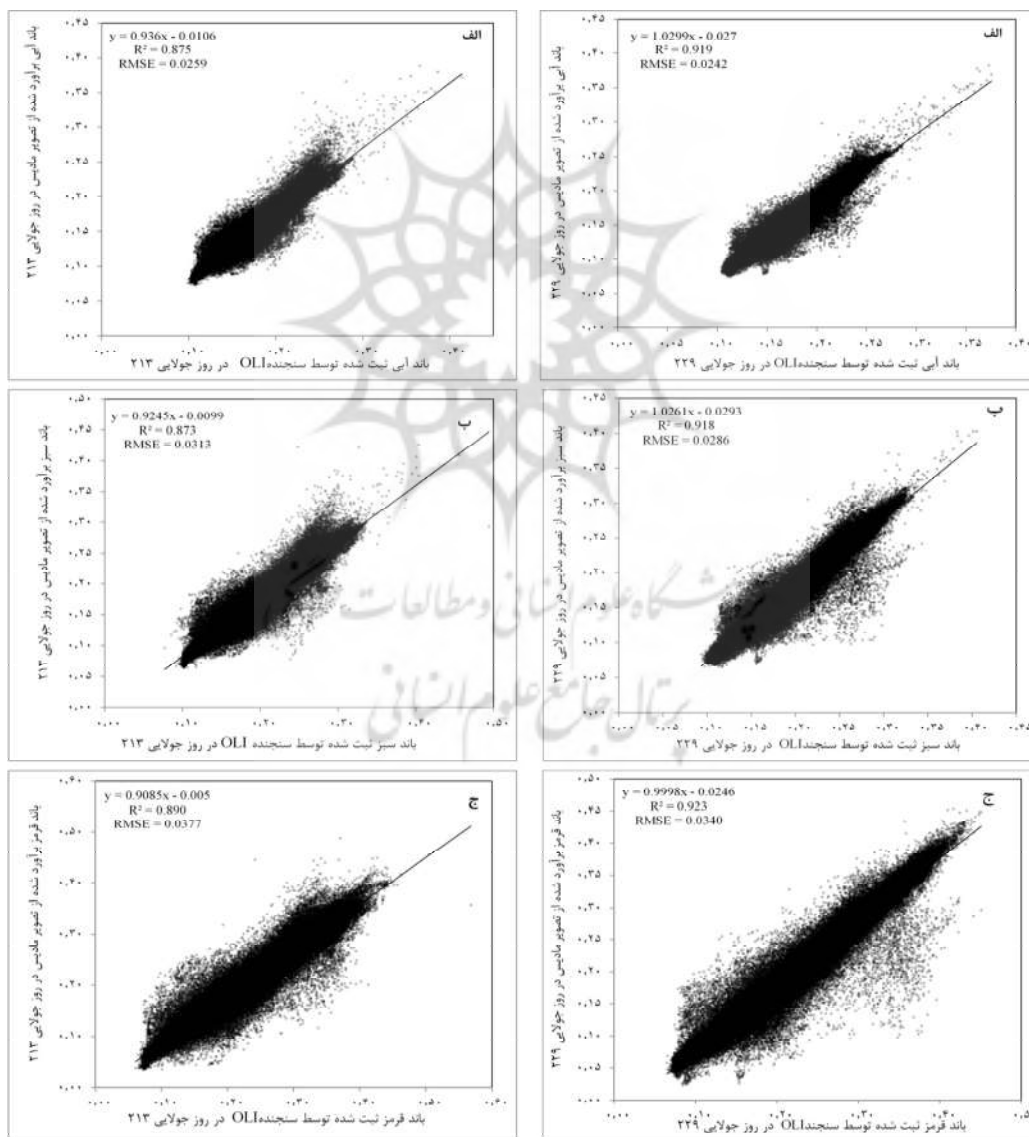
شکل ۳. فلوجارت اجرای مدل ESTARFM در هر دوره زمانی و هر باند

نتایج در شکل ۳ دیده می‌شود. باید بیان کنیم که برای محاسبه این پارامترها، مقایسه به صورت پیکسل به پیکسل انجام شد؛ به گونه‌ای که تمامی پیکسل‌های منطقه مورد مطالعه (شکل ۱) در محاسبه این پارامترهای آماری استفاده شد. میزان همبستگی در روز جولای ۲۱۳ برای باندهای آبی، سبز، قرمز و فرورسرخ نزدیک، به ترتیب، ۰/۸۸، ۰/۸۷، ۰/۸۹ و ۰/۷۸ برآورد شد و میزان مجذور میانگین مربعات خطا در این چهار باند نیز، به ترتیب، برابر با ۰/۲۶، ۰/۳۱، ۰/۳۸ و ۰/۵۴ است (شکل ۴. سمت چپ). همچنین، در روز جولای ۲۲۹ در باندهای آبی، سبز، قرمز و فرورسرخ نزدیک، به ترتیب، میزان همبستگی (۰/۹۲) برای همه باندها) و مجذور میانگین مربعات خطا (۰/۲۴، ۰/۲۹، ۰/۳۴ و ۰/۴۴) به دست آمد (شکل ۴ سمت راست). همچنین، درصد خطای

پس از آن، با استفاده از تصویر Landsat-8 در روز جولای ۲۱۳ (۱۰ مرداد ۱۳۹۵) از موزائیک کناری این بازتابدگی پیش‌بینی شده با استفاده از مدل ESTARFM ارزیابی و مقایسه شد. به همین ترتیب، در مرحله دوم نیز با استفاده از تصاویر روزهای جولای ۲۲۰ و ۲۳۶ (۲ شهریور ۱۳۹۵)، مدل ESTARFM واسنجی و تصاویر این دوره پیش‌بینی شد. در نتیجه، تصویر سنجنده OLI ثبت شده در روز جولای ۲۲۹ (۲۶ مرداد ۱۳۹۵) مبنای اعتبارسنجی در این دوره قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱ نیز مشاهده می‌کنید، برای ارزیابی دقیق‌تر این مدل سعی شد منطقه مطالعاتی از کاربری‌های متفاوت شامل اراضی کشاورزی، آیش، شهری و بایر انتخاب شود. در این تحقیق، دو پارامتر آماری همبستگی و مجذور میانگین مربعات خطا برای ارزیابی پیش‌بینی مدل ESTARFM به کار رفت که

در شکل ۴ مشاهده می‌شود، میزان همبستگی و مجذور میانگین مربعات خطا در روز جولایی ۲۲۹ برای تمامی باندها بهتر از روز جولایی ۲۱۳ است. طبق این شکل، میزان RMSE در این دو روز تغییر چندانی نکرده و تنها تغییرات در میزان ضریب تعیین (R^2) است. شاید بتوان دلیل این رخداد را برداشت محصولاتی مانند گندم و جو و کشت محصولات دوگانه بیان کرد زیرا، در منطقه مورد مطالعه، زمین‌های بسیاری دوبار در سال زیرکشت می‌روند که این موضوع، در بخش منابع خطا، بیان و تحلیل خواهد شد.

بازتابندگی برای این چهار باند در روز ۲۱۳ به ترتیب برابر با ۱۵/۷، ۱۶/۷، ۱۷/۱ و ۱۳/۹ و برای روز جولایی ۲۲۹، برابر با ۱۴/۹، ۱۵/۶، ۱۶/۰ و ۱۳/۵ محاسبه شد. برآیند مقایسه در این سه باند برای این روزها این مطلب را بیان می‌کند که مدل ESTARFM در پیش‌بینی این باندها عملکرد مناسبی داشته و دقت نتایج در آن، به ترتیب، به باندهای آبی، سبز، قرمز و فرورسخت اختصاص دارد. این موضوع در تحقیق ژو و همکاران (۲۰۱۰) نیز بیان شده است. اما همان‌گونه که



شکل ۴. مودار مقایسه بازتابندگی سطحی پیش‌بینی شده با مدل ESTARFM و داده‌های مشاهداتی ثبت‌شده از طریق ماهواره Landsat-8 در باندهای آبی (الف)، سبز (ب) و قرمز (ج)، در روزها جولایی ۲۲۹ (ستون سمت راست) و ۲۱۳ (ستون سمت چپ) (مقادیر بازتابندگی بی‌بعد است)

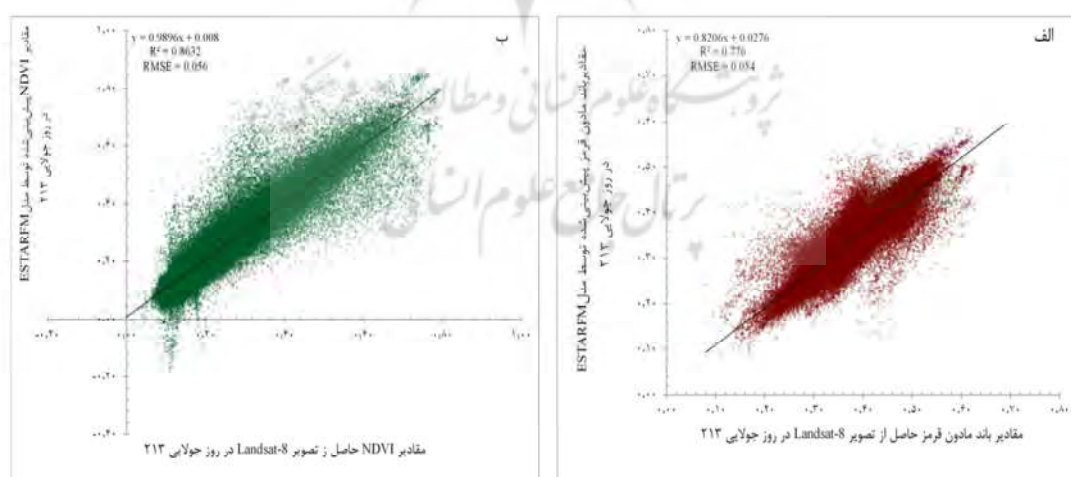
بالتر است ((شکل ۵. الف)). این در حالی است که میزان خطا عامل محدودکننده به شمار می‌رود و میزان آن در باند فرسرخ و شاخص NDVI تقریباً برابر است. مدل ESTARFM نه تنها در تخمین بازتابندگی سطحی عملکرد مناسبی دارد، که در تحقیق‌های دیگر نیز بدان اشاره شده است (Zhu et al., 2010)، بلکه می‌توان از این مدل برای برآورد محصولات سنجش از دوری (مانند شاخص NDVI) نیز بهره برد. این موضوع را از نتایج تحقیق جاریهانی و همکاران^۱ (۲۰۱۴) نیز می‌توان استنباط کرد.

۳-۲- تحلیل مکانی بازتابندگی پیش‌بینی شده با

مدل ESTARFM

همان‌طور که در بخش پیشین بیان شد، نتایج مقایسهٔ پیکسل‌به‌پیکسل بازتابندگی سطحی پیش‌بینی شده از طریق مدل ESTARFM و داده‌های مشاهداتی ثبت‌شده با ماهوارهٔ Landsat-8، در باندهای گوناگون و حتی محصول NDVI، حاکی از دقت قابل‌پذیرش نتایج پیش‌بینی شده با این مدل دارد. اما تحلیل مکانی دقت این مدل نیز برای پیش‌بینی بازتابندگی سطحی و

با توجه به اینکه هدف از ریزمقیاس‌کردن تصاویر و بهبود تفکیک مکانی و زمانی بازتابندگی امواج الکترومغناطیسی، تولید محصول‌های گوناگون سنجش از دور است. در این راستا شاخص NDVI به‌عنوان پرکاربردترین شاخص‌ها گیاهی مبنای مقایسه قرار گرفت. برای این منظور باندهای قرمز و مادون قرمز پیش‌بینی شده توسط مدل ESTARFM در روز جولایی ۲۱۳ انتخاب گردید. به این دلیل عملکرد این دو باند در این روز ضعیف‌تر از روز جولایی ۲۲۹ است در نتیجه ارزیابی نواقص احتمالی به موجب ریزمقیاس‌سازی با این روش در برآورد محصولاتی همچون NDVI بهتر ارزیابی می‌گردد. این روز برای مقایسهٔ NDVI انتخاب شد تا اعتبارسنجی صحت بیشتری داشته باشد. میزان همبستگی و مجذور میانگین مربعات برای شاخص NDVI برآوردشده از طریق استفاده از تصاویر حاصل از مدل ESTARFM و سنجندهٔ OLI در این روز محاسبه شد که مقادیر این دو پارامتر آماری، به‌ترتیب، برابر با ۰/۸۶ و ۰/۰۵۶ است (شکل ۵. ب). با وجود اینکه میزان همبستگی (۰/۷۸) باند فرسرخ پایین است (شکل ۵. الف)، میزان همبستگی (۰/۸۶) شاخص NDVI



شکل ۵. مدار مقایسهٔ مقادیر بازتابندگی سطحی باند فرسرخ انعکاسی پیش‌بینی‌شده با مدل ESTARFM و مشاهداتی سنجندهٔ OLI (الف)؛ مقایسهٔ مقادیر NDVI پیش‌بینی‌شده با مدل ESTARFM و محاسبه‌شده با استفاده از تصاویر Landsat 8 در روز جولایی ۲۱۳ (ب)

1. Jarihani et al.

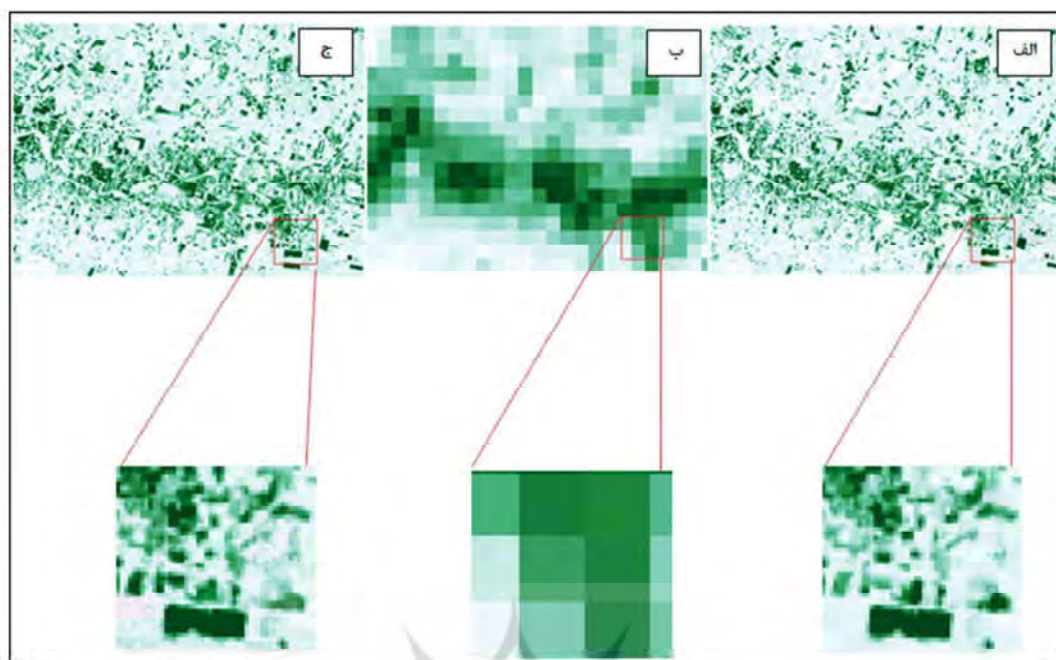
۲۱۳ و ۲۲۹ سال ۱۳۹۵ در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شوند. همچنین، مقادیر محصول NDVI در روز ۲۱۳ (که میزان همبستگی کمتر و مجذور مربعات خطایی بیشتر از روز جولایی ۲۲۹ داشت) در شکل ۶ نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۵ می‌بینید، مدل ESTARFM به خوبی توانسته تصویر بازتابندگی امواج الکترومغناطیس را، در کاربری‌های گوناگون، پیش‌بینی کند. حتی در مناطقی که یک یا چند کاربری در یک پیکسل MODIS ترکیب شدند، این مدل پیش‌بینی مناسبی داشته است. مطابق این شکل، این مدل می‌تواند داده‌های کشاورزی، بایر و شهری را در یک یا چند پیکسل مجاور، به‌درستی و با دقت نسبتاً مناسب، پیش‌بینی کند. این در حالی است که نقاط مرزی نیز به خوبی تفکیک شده و عارضه‌ها ترکیب نشده‌اند. با توجه به اینکه مرزها به‌درستی تشخیص داده شده‌اند، به‌نظر می‌رسد در برخی کاربری‌ها میزان

برآورد محصولات NDVI مهم است و باید مدنظر قرار گیرد. از یک‌سو، می‌دانیم شاید مهم‌ترین عامل، در ایجاد ناهمخوانی مکانی، اختلاط طیفی در پیکسل‌های MODIS باشد اما از سوی دیگر، مهم‌ترین مزیت مدل ESTARFM بر دیگر مدل‌های پیش‌بینی (مانند STARFM) کاربرد آن برای مناطق دارای کاربری‌های متفاوت است؛ بدین مفهوم که لازم نیست این مدل در مکان‌هایی که صرفاً دارای پیکسل‌های خالص‌اند اجرا شود. بنابراین، از این مدل می‌توان در مناطق با کاربری‌های متنوع استفاده کرد. در این تحقیق نیز، سعی بر این بوده است منطقه مطالعاتی انتخاب‌شده دارای کاربری‌های گوناگونی شامل انواع اراضی زراعی، آیش، مناطق شهری و مناطق مرتعی و بایر باشد تا بتوان مهم‌ترین مزیت این مدل را بر مدل‌های دیگر نیز ارزیابی کرد. مقادیر پیش‌بینی‌شده بازتابندگی باندهای قرمز، سبز و آبی به‌صورت ترکیب رنگی واقعی در دو دوره مورد نظر تحقیق، به‌ترتیب، در روزهای جولایی



شکل ۶. تصاویر در روز جولایی ۲۱۳ سال ۲۰۱۶: سنجنده OLI (الف)؛ سنجنده MODIS (ب)؛ تصویر پیش‌بینی‌شده با مدل ESTARFM (ج)



شکل ۷. NDVI در روز جولایی ۲۱۳ سال ۲۰۱۶: سنجنده OLI (الف)؛ سنجنده MODIS (ب)؛ تصویر پیش‌بینی‌شده با مدل ESTARFM (ج)

یا جلوگیری از رخداد آنها به‌منظور افزایش دقت و صحت پیش‌بینی بازتابندگی سطحی بسیار مهم است، در این بخش، خطاهای محتمل و شیوه رفع آنها مطرح می‌شود. به‌طور کلی، خطاهای اصلی که در پیش‌بینی‌های بازتابندگی روش ESTARFM مؤثرند شامل چهار منبع (سه خطای سیستماتیک و یک خطای متغیر) می‌شود. نخست اینکه می‌دانیم ماهیت واسنجی و برآورد پارامتر اولیه از اطلاعات سنجنش از دور خطاهایی ذاتی و غیرقابل پیشگیری دارد که در اینجا درزمره خطاهای ثابت طبقه‌بندی می‌شود. دومین خطای ثابت این است که گذر ماهواره‌های دارای قدرت تفکیک مکانی پایین (مانند Terra و Aqua) از هر نقطه مانند ماهواره‌های دارای قدرت تفکیک متوسط (Landsat) ثابت نیست. در هر عبور ماهواره‌های دارای قدرت تفکیک مکانی پایین، مکان منطقه مطالعاتی در نوار برداشت^۱ و نیز اندازه پیکسل تغییر می‌کند. با توجه

بازتابندگی پیش‌بینی‌شده تا حدودی بیشتر از تصویر مشاهداتی است. همان‌طور که در این تصویر نیز به‌خوبی دیده می‌شود، بازتابندگی کاربری شهری، در تصویر پیش‌بینی‌شده، بیشتر از تصویر مشاهداتی (سنجنده OLI) است. به‌منظور ارزیابی بیشتر دقت روش ESTARFM برای تلفیق تصاویر، با هدف برآورد محصولات سنجنش از دور، مقادیر NDVI نیز برای روز جولایی ۲۱۳ به‌دست آمد و با مقادیر NDVI محاسبه‌شده از تصویر Landsat مقایسه و ارزیابی شد. در شکل ۶، شاخص NDVI در روز جولایی ۲۱۳ سال ۲۰۱۶ با استفاده از باندهای قرمز و فروسرخ سنجنده OLI (الف)، سنجنده MODIS (ب) و تصویر پیش‌بینی‌شده با مدل ESTARFM (ج) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، این مدل توانسته است میزان شاخص NDVI را نیز به‌درستی پیش‌بینی کند.

۳-۳- منابع خطا

با توجه به اینکه آگاهی از منابع خطا و تلاش برای رفع

1. swath

زیادی را وارد محاسبات می‌کند. در نتیجه، تصاویر مورد استفاده باید با دقت ارزیابی شوند تا از وقوع این خطا جلوگیری شود. به‌طور کلی، پدیده‌هایی از این دست می‌توانند تخمین بازتابندگی را دچار خطای زیادی کنند و احتمال دارد دو ویژگی داشته باشند: نخست، وقوع آنها ناگهانی و گذراست (همانند عبور ابر یا طوفان‌های گردوغبار) زیرا تغییرات تدریجی، مانند رشد تدریجی گیاهان، را تا حدی می‌توان پیش‌بینی کرد و این‌گونه موارد خطای چندانی در محاسبات وارد نمی‌کنند (Gao et al., 2006). دومین شرط به وجود پیکسل‌های خالص مربوط است. اگرچه این مدل برای مناطق دارای کاربری‌های گوناگون طراحی شده، ارزیابی‌های صورت‌گرفته نشان داده است که در پیکسل‌های ناخالص (پیکسل‌هایی که دو تا چند پوشش متفاوت در آن قرار گرفته باشد)، مقدار خطای پیش‌بینی بیشتر از پیکسل‌های خالص است. بنابراین، در مناطقی با کاربری‌های وسیع و همگن، می‌توان انتظار داشت مقادیر بازتابندگی پیش‌بینی‌شده دقت بالاتری داشته باشد (Zhu et al., 2010).

با وجود خطاهای مورد اشاره و براساس پارامترهای آماری مطرح‌شده در بخش ۳-۱، نتایج حاصل از طریق مدل ESTARFM خوب ارزیابی شد. اما این پیش‌بینی خطاهای مکانی ناچیزی نیز دارد. حتی در روز جولای ۲۲۹ نیز، که نتیجه‌ای بهتر از روز جولای ۲۱۳ دربر داشت، نقاطی یافت شد که نتایج پیش‌بینی و بازتابندگی سطحی ثبت‌شده با سنجنده OLI هم‌خوانی کاملاً یکسانی با یکدیگر ندارند. دلیل این رخداد را می‌توان کشت محصولات دوگانه بیان کرد. در شکل ۷ مکان‌هایی که با مستطیل آبی‌رنگ و با خطوط ممتد و قرمز با خطوط مقطع نشان داده شده‌اند از این دست نقاط به‌شمار می‌روند. با توجه به اینکه در میانه تابستان تغییرات پوشش گیاهی محسوس‌تر است، دوره زمانی تحقیق اواخر خرداد و مرداد انتخاب شد تا بیشترین تغییر پوشش گیاهی مشاهده شود و مدل، از این نظر نیز، بهتر ارزیابی شود. در شکل ۷، مستطیل آبی با

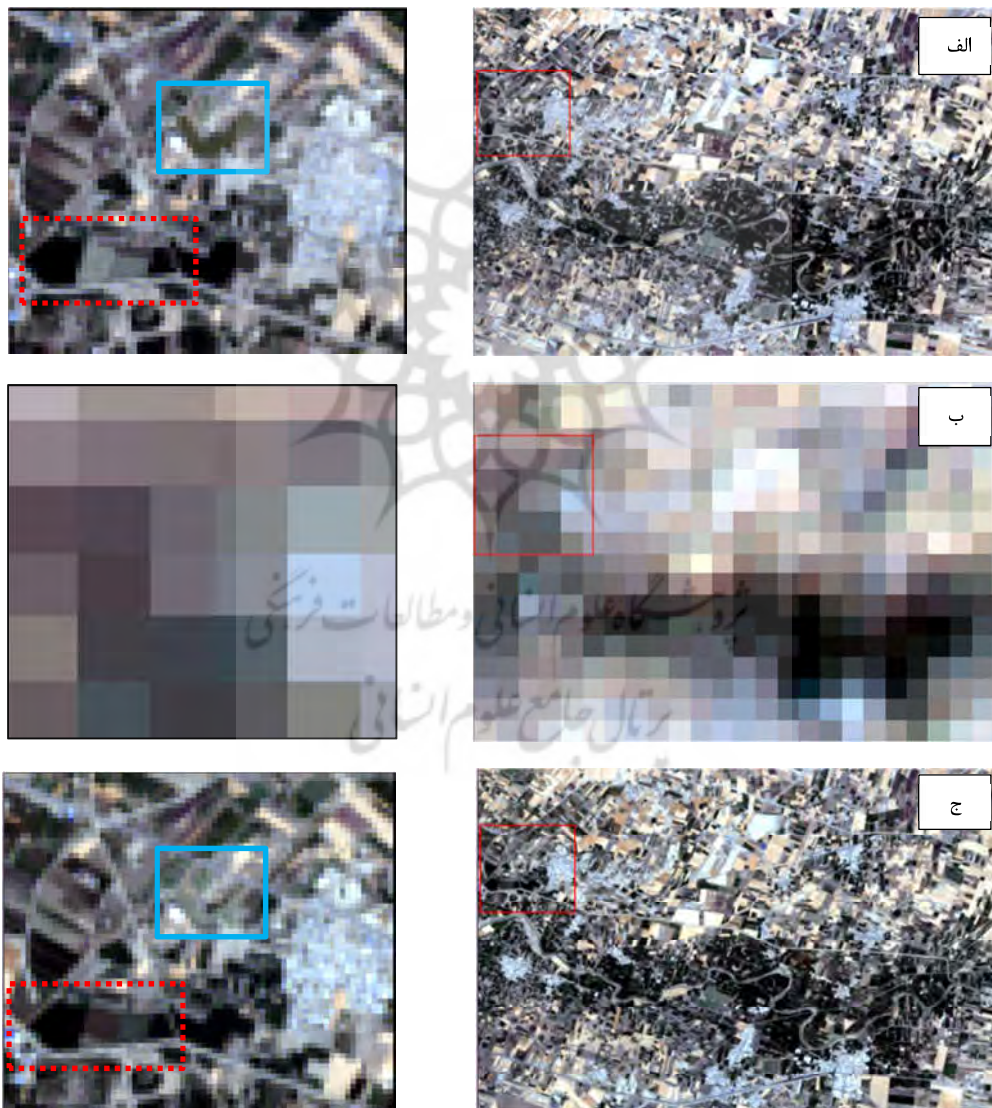
به فاصله منطقه مطالعاتی از مرکز عمودی سنجنده روی زمین (نادیر)، میزان این خطا در روزهای گوناگون متفاوت است که باید در هر روز جداگانه بررسی شود. خطای ثابت سوم فاصله زمانی ثبت‌شده بین دو سنجنده OLI و MODIS است. باید توجه داشت زمان گذر دو ماهواره Terra و Aqua حدوداً به فاصله زمانی ۳ ساعت ۱۵ دقیقه از یکدیگر از هر نقطه است که ابتدا، ماهواره Terra و سپس، Aqua عبور می‌کند. در روزهای گذر ماهواره Landsat، فاصله زمانی دو ماهواره Terra و Aqua در مقایسه با آن، به ترتیب، حدود ۳۲ دقیقه قبل و ۲ ساعت و ۴۳ دقیقه بعد است. در نتیجه، با انتخاب یکی از این دو ماهواره که حامل سنجنده MODIS هستند، بین دو سنجنده همواره تأخیری زمانی وجود خواهد داشت.

اما خطای قابل پیشگیری، که باید به آن توجه ویژه داشت، تغییر ناگهانی در یک تصویر مورد استفاده یا تعداد بیشتری (نه در همه موارد) از آنها (شامل Landsat یا MODIS) برای برآورد بازتابندگی سطحی با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالاست که سبب کاهش دقت و صحت در برآوردها می‌شود. از جمله عوامل این تغییرات، می‌توان به عوامل طبیعی یا انسانی اشاره کرد. با توجه به اینکه پدیده‌های انسانی در مدت کوتاهی (معمولاً شانزده روز)^۱ اتفاق نمی‌افتد، چنین وقایعی تأثیر ناچیزی در مقادیر بازتابندگی دارند. بنابراین، می‌توان پدیده‌های طبیعی (مانند ابر و طوفان‌های گردوغبار) را، به دلیل ماهیت وقوع زمانی و مکانیشان، اصلی‌ترین منابع خطا در استفاده از مدل ESTARFM در نظر گرفت؛ به این معنا که وقوع این پدیده‌ها به لحاظ زمانی ناگهانی و گذراست و سطح وسیعی را نیز دربر می‌گیرند. وقوع این دو پدیده به شدت بر بازتابندگی تأثیر می‌گذارد و بنابراین، تغییر ناگهانی بر اثر این عوامل، در یک یا چند تصویر، خطای

۱. باید خاطرنشان کرد مدت زمان عبور ماهواره Landsat از یک عارضه از سطح زمین شانزده روز است که معمولاً این بازه برای پیش‌بینی لحاظ می‌شود.

می‌دهند (شکل ۷-ب). حتی در هریک از این دو مورد نیز دیده می‌شود که، اگرچه مدل نتوانسته به‌طور کامل تغییرات را ثبت کند، برآوردها تا حدی به واقعیت نزدیک است. به‌طور کلی، با توجه به کاهش خطاهای ذکر شده، می‌توانیم از مدل ESTARFM به‌منزله مدلی قدرتمند، برای ترکیب تصاویر سنجنده‌های MODIS و OLI، استفاده کنیم تا به پیش‌بینی بازتابندگی سطحی امواج الکترومغناطیس، در مقیاس زمانی روزانه و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، دست بیابیم.

خطوط ممتد نشان‌دهنده زمین کشاورزی است که در تصویر پیش‌بینی شده (ج) دارای پوشش گیاهی خوبی نیست اما همان‌گونه که طبق داده‌های ثبت شده از تصویر Landsat (الف) مشاهده می‌شود، در واقعیت، طی این نُه روز گیاهان رشد کردند و از سبزینگی تقریباً خوبی برخوردارند. عکس این خطا در مستطیل قرمز رنگ با خطوط مقطع دیده می‌شود؛ بدین صورت که میزان پوشش گیاهی در واقعیت کم است (شکل ۷-الف) اما مقادیر برآورده پوشش مناسب را نشان



شکل ۷. تصاویر روز جولایی ۲۲۹ سال ۲۰۱۶: سنجنده OLI (داده مشاهده‌ای) (الف)؛ سنجنده MODIS (ب)؛ تصویر پیش‌بینی شده با مدل ESTARFM (برآورده شده) (ج)

۴- نتیجه‌گیری

تصاویر ماهواره‌ای اغلب با قدرت تفکیک زمانی، مکانی و طیفی محدود می‌شوند. برای رفع پیچیدگی‌های مکانی و طیفی، باید بین تصاویر سنجنده‌های گوناگون، با توجه به قابلیت‌های متفاوت آنها، موازنه‌ای برقرار کرد. اما در شرایطی، به منظور تحلیل پدیده‌ها، نیاز به تصاویر با تکرارپذیری و تفکیک مکانی بالا ضروری است. بنابراین، دسترسی به تمامی قدرت تفکیک‌ها در مطالعات گوناگون (شامل زمانی، مکانی و طیفی) لازم است و خود این موضوع یکی از چالش‌های اساسی پیش روی محققان به‌شمار می‌رود. به منظور غلبه بر این محدودیت‌ها، بسیاری از محققان تلاش کردند، با استفاده از روش‌های گوناگون، از قدرت تفکیک زمانی و مکانی سنجنده‌های متفاوت به صورت هم‌زمان استفاده کنند. از جمله روش‌هایی که به تازگی در این زمینه توسعه یافته، مدل ESTRAFM است. در این مطالعه، قابلیت استفاده از این مدل برای به‌کارگیری قابلیت‌های مکانی تصاویر سنجنده OLI و زمانی سنجنده MODIS، به قصد پیش‌بینی باندهای مرئی و فروسرخ، ارزیابی شد. در این راستا، روزهای جولایی ۲۰۱۳ و ۲۲۹ در سال ۲۰۱۶ به‌منزله داده‌های مشاهده‌ای انتخاب شد. برای اجرای این مدل، ابتدا مراحل گوناگون مدل، با بررسی منابع، تشریح شد. در مرحله بعد، تصاویر سنجنده‌های OLI و MODIS تصحیح‌شده در تاریخ‌های مورد نظر وارد مدل شد و در تاریخ‌های پیش‌بینی مقادیر باندهای گوناگون در دو تاریخ مذکور (مدت دوره: شانزده روز) و نیز محصول NDVI در روز ۲۱۳ پیش‌بینی شد. سپس برای ارزیابی نتایج مدل مورد نظر، تمامی پیکسل‌های تخمین‌زده شده به صورت نظیربه‌نظیر با پیکسل‌های تصویرمبنا در آن محدوده مقایسه شدند که دستاوردهای زیر را دربر داشت:

الف) باتوجه نتایج ارزیابی، میانگین همبستگی باندهای آبی، سبز، قرمز و فروسرخ نزدیک پیش‌بینی‌شده دریافتی با تصویر سنجنده OLI به‌صورت میانگین در این دو دوره (به ترتیب برابر با ۰/۹۰، ۰/۹۱، ۰/۹۱ و ۰/۸۵) و درصد خطا در باندهای مورد نظر (به ترتیب ۱۵/۳، ۱۶/۲، ۱۶/۵ و ۱۳/۷)، می‌توان نتیجه گرفت مدل ESTRAFM در

پیش‌بینی بازتابندگی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، از دقت مطلوبی برخوردار است. این موضوع با نتایج پژوهش‌های محققان دیگر، مانند ژو و همکاران (۲۰۱۰)، تطابق دارد.

ب) میزان همبستگی و مجذور میانگین مربعات خطا حاصل از مقایسه شاخص NDVI پیش‌بینی شده با استفاده از مدل ESTRAFM و تصویر مشاهده‌ای، به ترتیب برابر با ۰/۸۷ و ۰/۰۵۶ می‌باشد. این موضوع بیان می‌کند که مدل ESTRAFM نه تنها در تخمین بازتابندگی سطحی روزانه کارایی مناسبی دارد، بلکه می‌توان از این مدل برای تخمین محصولات سنجش از دور (مانند NDVI) نیز استفاده کرد. پیش‌تر، کارایی این مدل در پیش‌بینی دیگر شاخص‌های سنجش از دوری تأیید شده بود (Jarihani et al., 2014).

ج) به‌رغم کارایی این مدل در پیش‌بینی مقادیر بازتابندگی، باید به محدودیت‌ها و خطاهای احتمالی آن، به‌ویژه در شرایط وجود ابر، طوفان‌های گردوغبار و موارد مشابه، توجه خاص داشت.

د) به‌طورکلی، نتایج تحقیق حاضر بیان می‌کند که مدل مورد نظر، در زمینه پیش‌بینی بازتابندگی سطحی و نیز برآورد محصولات سنجش از دوری از آنها، به‌صورت روزانه با قدرت تفکیک ۳۰ متر، دقت قابل قبولی دارد که تا کنون در بسیاری از مطالعات، به‌ویژه در ایران، نادیده گرفته شده است.

با توجه به عملکرد مناسب مدل ESTARFM در تحقیق حاضر و به‌منظور توسعه این تحقیق، پیشنهاد می‌کنیم:

۱. این مدل روی شاخص‌های دیگر و حتی محصولات مشابه تبخیر-تغرق واقعی ارزیابی شود.
۲. کارایی مدل ESTARFM با سنجنده‌های دیگر ارزیابی شود.
۳. با توجه به اینکه اجرای این مدل در منطقه‌ای با تنوع کاربری بالا (مانند بخشی از حوضه آبریز زاینده‌رود) دقت مناسبی داشته است، عملکرد آن به تفکیک کاربری‌های گوناگون نیز بررسی شود.

۵- منابع

- Adams, J.B., Smith, M. D. and Johnson, P. E. 1986, Spectral mixture modeling: A new analysis of rock and soil types at the viking lander 1 site. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 91(8), PP. 8098-81120.
- Aiazzi, B., Alparone, L., Baronti, S. & Garzelli, A., 2002, **Context-Driven Fusion of High Spatial and Spectral Resolution Images Based on Oversampled Multiresolution Analysis**, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(10), PP. 2300–2312.
- Bindhu, V., Narasimhan, B. & Sudheer, K., 2013, **Development and Verification of a Non-Linear Disaggregation Method (NL-DisTrad) to Downscale MODIS Land Surface Temperature to the Spatial Scale of Landsat Thermal Data to Estimate Evapotranspiration**, *Remote Sensing of Environment*, 135, PP. 118–129.
- Carper, W.J., 1990, **The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformations for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data**, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 56(4), PP. 457–467.
- Chen, B., Ge, Q., Fu, D., Yu, G., Sun, X., Wang, S. & Wang, H., 2010, **A Data-Model Fusion Approach for Upscaling Gross Ecosystem Productivity to the Landscape Scale Based on Remote Sensing and Flux Footprint Modelling**, *Biogeosciences*, 7(9), PP. 2943–2958.
- Chen, J., Liu, J., Cihlar, J. & Goulden, M., 1999, **Daily Canopy Photosynthesis Model through Temporal and Spatial Scaling for Remote Sensing Applications**, *Ecological Modelling*, 124(2), PP. 99–119.
- Fu, D., Chen, B., Wang, J., Zhu, X. & Hilker, T., 2013, **An Improved Image Fusion Approach Based on Enhanced Spatial and Temporal the Adaptive Reflectance Fusion Model**, *Remote Sensing*, 5(12), PP. 6346–6360.
- Gao, F., Masek, J., Schwaller, M. & 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(8), PP. 2207–2218.
- Genderen, J.V. & Pohl, C., 1994, **Image Fusion: Issues, Techniques and Applications**, Strasbourg, France, PP. 18–26.
- Geo. Y. and Long D., 2008, Intercomparison of remote sensing-based models for estimation of evapotranspiration and accuracy assessment based on swat. *Hydrological Processes*, 22(25), pp.4850-4869.
- Hilker, T., Wulder, M.A., Coops, N.C., Linke, J., McDermid, G., Masek, J.G., Gao, F. & 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(8), PP. 1613–1627.
- Hilker, T., Wulder, M.A., Coops, N.C., Seitz, N., White, J.C., Gao, F., Masek, J.G. & Stenhouse, G., 2009, **Generation of Dense Time Series Synthetic Landsat Data through Data Blending with MODIS Using a Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model**, *Remote Sensing of Environment*, 113(9), ۱۹۸۸-۱۹۹۹.
- Hong, S.-h., Hendrickx, J.M. & Borchers, B., 2009, **Up-Scaling of SEBAL Derived Evapotranspiration Maps from Landsat (30m) to MODIS (250m) Scale**, *Journal of Hydrology*, 370(1), PP. 122–138.
- Jarihani, A.A., McVicar, T.R., Van Niel, T.G., Emelyanova, I.V., Callow, J.N. & Johansen, K., 2014, **Blending Landsat and MODIS Data to Generate Multispectral Indices: A Comparison of “INDEX-then-Blend” and “Blend-then-Index” Approaches**, *Remote Sensing*, 6(10), PP. 9213–9238.
- Luo, Y., Trishchenko, A.P. & Khlopenkov, K.V., 2008, **Developing Clear-Sky, Cloud and Cloud Shadow Mask for Producing Clear-Sky Composites at 250-Meter Spatial Resolution for the Seven MODIS Land Bands over Canada and North America**, *Remote Sensing of Environment*, 112(12), PP. 4167–4185.
- Merlin, O., Duchemin, B., Hagolle, O., Jacob, F., Coudert, B., Chehbouni, G., Dedieu, G., Garatuza, J. & Kerr, Y., 2010, **Disaggregation of MODIS Surface Temperature over an Agricultural Area Using a Time Series of Formosat-2 Images**, *Remote Sensing of Environment*, 114(11), PP. 2500–2512.

- Polh, C. & Van Genderen, J., 1998, **Multisensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods and Applications**, International Journal of Remote Sensing, 19(5), PP. 823–854.
- Roy, D.P., Ju, J., Lewis, P., Schaaf, C., Gao, F., Hansen, M. & Lindquist, E., 2008, **Multi-Temporal MODIS–Landsat Data Fusion for Relative Radiometric Normalization, Gap Filling, and Prediction of Landsat Data**, Remote Sensing of Environment, 112(6), PP. 3112–3130.
- Shettigara, V., 1992, **A Generalized Component Substitution Technique for Spatial Enhancement of Multispectral Images Using a Higher Resolution Data Set**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58(5), PP. 561–567.
- Tasumi, M., Allen, R.G. & Trezza, R., 2008, **At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance**, Journal of Hydrologic Engineering, 13(2), PP. 51–63.
- Walker, J., De Beurs, K. & Wynne, R., 2014, **Dryland Vegetation Phenology across an Elevation Gradient in Arizona, USA, Investigated with Fused MODIS and Landsat Data**, Remote Sensing of Environment, 144, PP. 85–97.
- Walker, J., De Beurs, K., Wynne, R. & Gao, F., 2012, **Evaluation of Landsat and MODIS Data Fusion Products for Analysis of Dryland Forest Phenology**, Remote Sensing of Environment, 117, PP. 381–393.
- Woodcock, C.E. & Strahler, A.H., 1987, **The Factor of Scale in Remote Sensing**, Remote Sensing of Environment, 21(3), PP. 311–332.
- Yocky, D.A., 1996, **Multiresolution Wavelet Decomposition and the Merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT Panchromatic Data**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 62(9), PP. 1067–1074.
- Zhang, Y., 2004, **Understanding Image Fusion**, Photogramm. Eng. Remote Sens., 70(6), PP. 657–661.
- Zao, S., Yang Y., Qiu, G., Yao, Y., and Li, C., 2010, Remote detection of bare soil moisture using a surface -temperature-based soil evaporation transfer coefficient. International Journal of Applied Earth observation and Geoinformation 12: 351-358.
- Zhu, X., Chen, J., Gao, F., Chen, X. & Masek, J.G., 2010, **An Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model for Complex Heterogeneous Regions**, Remote Sensing of Environment, 114(11), PP. 2610–2623.