

ارزیابی عملکرد مکانی و زمانی الگوریتم ریزمقیاس‌نمایی ESTARFM در تولید تصاویر لندست-مانند از تصاویر مادیس

محمود علیزاده^۱، علی جعفر موسیوند^{۲*}، سمیه سیما^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور و GIS، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه سنجش‌ازدور و GIS، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت: ۹۸/۲/۱۶ پذیرش: ۹۸/۹/۵

چکیده

سری‌های زمانی داده‌های سنجش‌ازدوری نقش مهمی در مدل‌سازی و پایش تغییرات عوارض و پدیده‌های سطح زمین در گذر زمان دارند. با این حال، هرچند سری زمانی تصاویر سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی پایین (بیش از ۱۰۰ متر، از قبیل مادیس) در دسترس هستند، تهیه‌ی سری زمانی منظم از داده‌های ماهواره‌های اپتیک با قدرت تفکیک مکانی مناسب (بهتر از ۳۰ متر، از جمله لندست) با توجه به پیچیدگی مدارهای ماهواره‌ها و همچنین ابرناکی، به‌خصوص در مناطق مرطوب و مرتفع، چالشی اساسی در استفاده از این داده‌ها است. یکی از روش‌های مرسوم برای برطرف کردن این چالش، تولید تصاویر لندست-مانند از طریق ریزمقیاس‌نمایی تصاویر مادیس با استفاده از مدل‌هایی چون مدل ESTARFM است. در این تحقیق، مدل ESTARFM به‌منظور ریزمقیاس‌نمایی تصاویر مادیس برای تولید تصاویر لندست-مانند در مناطق ناهمگن با استفاده از سه روش بازنمونه‌گیری تصویر، پوشش‌های زمینی مختلف و اختلاف زمانی بین تصاویر ورودی و شبیه‌سازی‌شده، به‌طور کمی ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از مدل با روش بازنمونه‌گیری خطی دوسویه با اختلاف جزئی عملکرد بهتری از سایر روش‌های بازنمونه‌گیری دارد. همچنین، مدل ESTARFM می‌تواند تصاویر لندست-مانند با RMSE بهتر از ۰,۰۲ بازتابندگی سطحی و ضریب تعیین بالاتر از ۹۰ درصد در پوشش‌های



مختلف زمینی تولید کند. با افزایش اختلاف زمانی بین تصاویر ورودی و تصویر شبیه‌سازی شده، دقت مدل به صورت معنی‌داری کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: ریزمقیاس‌سازی، *ESTARFM*، تصویر لندست - مانند، شبیه‌سازی بازتابندگی، تصاویر مادیس

۱- مقدمه

داده‌های سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای در تشخیص تغییرات سطح زمین و پایش تغییرات پوشش و کاربری اراضی در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت اهمیت ویژه‌ای دارند. با این حال، در حال حاضر تهیه‌ی سری‌های زمانی با قدرت تفکیک زمانی مناسب تنها با استفاده از سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی پایین (بیش از ۱۰۰ متر)، از قبیل MODIS و AVHRR، امکان‌پذیر است. محدودیت‌های تکنیکی، ابرناکی و پیکربندی مدارهای ماهواره‌های سنجنش‌زدوری امکان تهیه‌ی تصاویر با قدرت تفکیک‌های مکانی و زمانی بالا را فراهم نمی‌کند. از این رو، همواره نوعی موازنه بین قدرت تفکیک‌های مکانی و زمانی یک سنجنده وجود خواهد داشت (وود کاک و استرالهر، ۱۹۸۷؛ چن و همکاران، ۱۹۹۹؛ هیلکر و همکاران، ۲۰۰۹؛ موسیوند و همکاران، ۲۰۱۵). برای مثال، تصاویر ماهواره‌ای Landsat، Spot و IRS که قدرت تفکیک مکانی مناسبی (بهتر از ۳۰ متر) برای مطالعات منابع طبیعی، کشاورزی، منابع آب و تغییرات پوشش زمین دارند، دارای قدرت تفکیک زمانی چند روزه تا چند ده روزه هستند. قدرت تفکیک زمانی پایین سنجنده‌ها و ابرناکی دو عامل مهم محدوده‌کننده برای استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به منظور پایش تغییرات سریع سطح زمین در مطالعات مختلف هستند. در نتیجه، زمانی که هدف تهیه‌ی سری زمانی داده‌های سنجنش‌زدوری با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا باشد، به‌ناچار باید از روش‌های ترکیب و تلفیق تصاویر استفاده شود.

راه‌حل‌های مختلفی، از جمله تلفیق تصاویر^۱ (روی و همکاران، ۲۰۰۸؛ واکر و همکاران، ۲۰۱۲) و ریزمقیاس‌نمایی^۲ (مرلین و همکاران، ۲۰۱۰) برای رفع این محدودیت ارائه شده است. در تلفیق تصاویر، به‌طور معمول باند پانکروماتیک (یا باندهای با قدرت تفکیک مکانی بالا) برای بهبود قدرت تفکیک مکانی تصاویر چندطیفی به‌کار می‌رود. آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA^۳)، IHS^۴ و تبدیل

1. Image fusion
2. Down-scaling
3. Principal component analysis
4.. Intensity-hue-saturation

موجک^۱ از جمله روش‌های مرسوم تلفیق تصاویر به‌شمار می‌روند. با این حال، این روش‌ها فقط قدرت تفکیک مکانی تصاویر را بهبود می‌بخشند و تأثیری بر قدرت تفکیک زمانی تصاویر ندارند (ایازی و همکاران، ۲۰۰۲). چنین روش‌هایی محدودیت‌های گوناگونی، از قبیل تغییر خصوصیات طیفی، رادیومتریک و اعوجاج تصاویر هم دارند (رحیم‌پور و همکاران، ۱۳۹۶).

در عوض، ریزمقیاس‌نمایی روش مناسبی برای تهیه‌ی سری زمانی تصاویر سنجش‌ازدوری با ترکیب داده‌های مختلف فراهم می‌کند. روش‌های متنوعی برای ریزمقیاس‌نمایی تصاویر ماهواره‌ای پیشنهاد شده است. ابتدا گائو و همکاران (۲۰۰۶) با ارائه‌ی مدل STARFM^۲ و با ریزمقیاس‌نمایی تصاویر لندست و مادیس، قدرت تفکیک مکانی و زمانی را به‌طور هم‌زمان افزایش دادند. با وجود کارکرد مناسب مدل STARFM برای مناطق همگن (مناطق که غالباً از یک یا تعداد محدودی پوشش زمینی تشکیل شده‌اند) که کاربری‌های یکسانی در تصاویر مادیس و لندست دارند، استفاده از این مدل در مناطق ناهمگن با محدودیت‌های مختلفی روبه‌رو بوده است. اختلاط طیفی کاربری‌های گوناگون یکی از این محدودیت‌ها بوده است. همچنین، اگر در فاصله‌ی زمانی دو تصویر، پوشش زمین تغییر کند و در یکی از تصاویر لندست ورودی به مدل، این تغییر وجود نداشته باشد (به‌وقوع نپیوسته باشد و ثبت نشده باشد)، این مدل نمی‌تواند این تغییرات را ثبت و پیش‌بینی کند (گائو و همکاران، ۲۰۰۶). هیلکر و همکاران (۲۰۰۹) مدل STAARCH^۳ را برای رفع چنین محدودیت‌هایی ارائه کردند که با وجود رفع برخی محدودیت‌ها، کماکان توانایی ریزمقیاس‌نمایی در مناطق ناهمگن را ندارد. ژو و همکاران (۲۰۱۰) برای رفع مشکلات و محدودیت‌های مدل STARFM، مدل ESTARFM^۴ را پیشنهاد دادند که نتایج نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب این مدل در ریزمقیاس‌نمایی تصاویر مادیس با استفاده از تصاویر لندست در مقایسه با سایر روش‌های موجود، به‌خصوص در مناطق ناهمگن است (فو و همکاران، ۲۰۱۳). امیلیانو و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای، عملکرد دو مدل STARFM و ESTARFM را ارزیابی کردند و جمع‌بندی نمودند که مدل ESTARFM در مناطق با تنوع کاربری زیاد و متفاوت، عملکرد بهتری در مقایسه با مدل STARFM دارد. با این حال، اگر اختلاف زمانی بالایی (معمولاً بیش از یک ماه) بین تاریخ تصاویر ورودی و پیش‌بینی باشد، مدل STARFM عملکرد بهتری خواهد داشت. ریزمقیاس‌نمایی تصاویر مادیس با تصاویر لندست در مناطق مختلف و برای مطالعات گوناگون با استفاده از روش ESTARFM

1. Wavelet decomposition
2. Spatial temporal adaptive reflectance fusion model
3. Spatial temporal adaptive algorithm for mapping reflectance change
4. Enhanced STARFM



انجام شده است (ژو و همکاران، ۲۰۱۰؛ واکر و همکاران، ۲۰۱۲؛ ژان و همکاران، ۲۰۱۳؛ امیلیانو و همکاران، ۲۰۱۳؛ گائو و همکاران، ۲۰۱۵؛ وو و همکاران، ۲۰۱۶). واضح است که عملکرد تمامی این مدل‌ها (از جمله مدل ESTARFM) از تنوع پوشش زمینی موجود در تصویر و اختلاف زمانی بین تصویر ورودی و پیش‌بینی متأثر است و همچنین، همگن و یا ناهمگن بودن منطقه تأثیر بسزایی در عملکرد مدل‌ها دارد. با این حال، تاکنون کمتر مطالعه‌ای تجزیه و تحلیل کمی عملکرد مدل ESTARFM در شرایط مختلف زمانی و مکانی را انجام داده است تا توانایی این مدل برای مطالعات مختلف مشخص شود. بررسی شرایط مختلف مکانی، زمانی و ارزیابی تأثیر پیش‌پردازش‌های مختلف بر تصاویر ماهواره‌ای قبل از ورود به مدل، از مهم‌ترین مواردی هستند که باید هنگام به‌کارگیری مدل به آن‌ها توجه شود.

در این مطالعه، دقت مدل ESTARFM را برای ریزمقیاس‌نمایی تصاویر مادیس و تولید تصاویر لندست-مانند بررسی و ارزیابی می‌کنیم. همچنین، تأثیرات ناشی از انتخاب روش بازنمونه‌گیری^۱ (در مرحله‌ی پیش‌پردازش)، ابعاد تصاویر استفاده‌شده (تمام، نصف و یک‌چهارم تصویر)، اختلاف زمانی بین گرفتن تصاویر لندست و مادیس و تنوع کلاس‌های پوشش زمین بر نتایج به‌دست‌آمده از مدل را بررسی می‌کنیم. سؤالات این پژوهش عبارت‌اند از:

۱. کدام روش بازنمونه‌گیری (نزدیک‌ترین همسایه^۲، بازنمونه‌گیری خطی دوسویه^۳ و پیش‌مکعبی^۴) تصاویر مادیس قبل از ورود به مدل، علاوه بر حفظ ویژگی‌های طیفی و رادیومتریک تصویر، به نتایج بهتر از مدل ESTARFM منجر می‌شود؟
۲. تأثیر استفاده از ابعاد مختلف تصویر ورودی بر خروجی مدل چگونه است؟
۳. حداکثر اختلاف زمانی بین دو تصویر ورودی برای ریزمقیاس‌نمایی باید چقدر باشد تا نتایج از دقت قابل‌قبولی برخوردار باشند؟
۴. عملکرد این مدل در کلاس‌های کاربری مختلف چگونه است؟

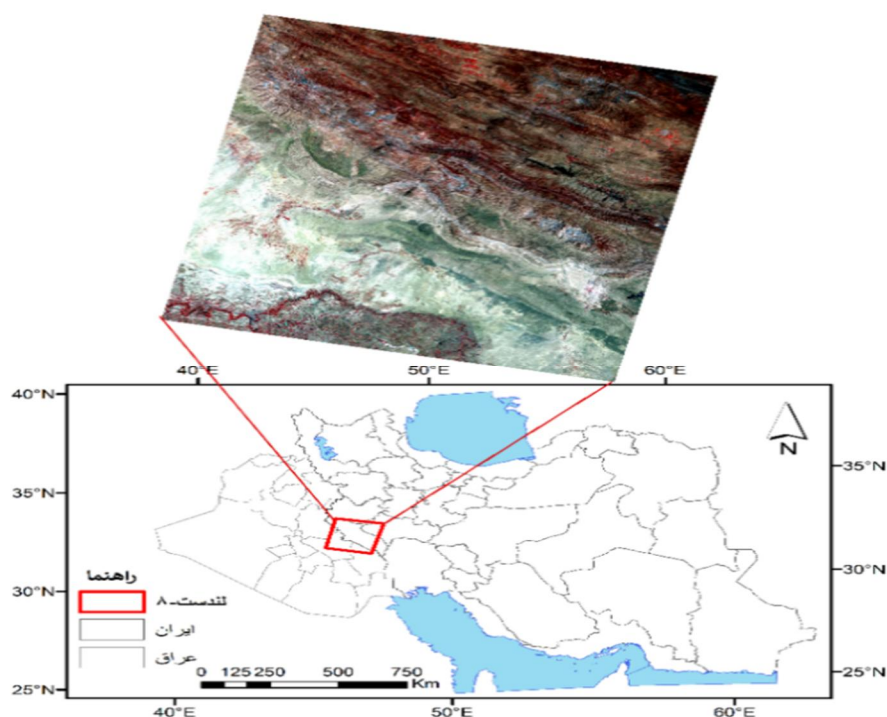
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه‌ی مورد مطالعه و داده‌های به‌کاررفته

به‌منظور ارزیابی دقیق مدل ESTARFM در شرایط و پوشش‌های مختلف زمینی، کوشیدیم یک منطقه‌ی مطالعاتی با تنوع زیاد پوشش زمین را انتخاب کنیم. بنابراین، نواحی کوهستانی

1.. Resampling
2.Nearest neighbor
3.Bilinear
4.Cubic

زاگرس میانی، شامل استان‌های ایلام، بخش‌هایی از لرستان و کرمانشاه و همچنین قسمت‌هایی از استان‌های میسان و واسط کشور عراق (واقع در یک تصویر لندست-۸، سطر ۳۷، ستون ۱۶۷) را به‌عنوان منطقه‌ی مطالعاتی در نظر گرفتیم (شکل ۱).



شکل ۱: محدوده‌ی مطالعاتی دربرگیرنده‌ی نواحی کوهستانی زاگرس میانی شامل استان‌های ایلام، بخش‌هایی از لرستان و کرمانشاه و همچنین قسمت‌هایی از استان‌های میسان و واسط کشور عراق، همراه با تصاویر لندست (ترکیب باندهی ۳-۴-۵)

بیشتر منطقه‌ی مطالعاتی شامل سرزمینی مرتفع و عمدتاً کوهستانی و ناهموار است که رشته‌کوه زاگرس بخش زیادی از آن را دربر گرفته است. جنوب و جنوب غرب تصویر به دشت‌های هموار در استان‌های میسان و واسط کشور عراق ختم می‌شود. منطقه‌ی مطالعاتی موردنظر تنوع نسبتاً زیادی از نظر اراضی بایر دارد. متوسط ارتفاع منطقه ۵۰۰ متر از سطح دریا است. قسمت شمالی و مرکزی تصویر ارتفاع بالای ۱۰۰۰ متر تا حداکثر ۲۷۹۵ متر دارد و نواحی جنوب و جنوب غربی کاملاً مسطح و هم‌سطح آب‌های آزاد است. بیشتر قسمت‌های این



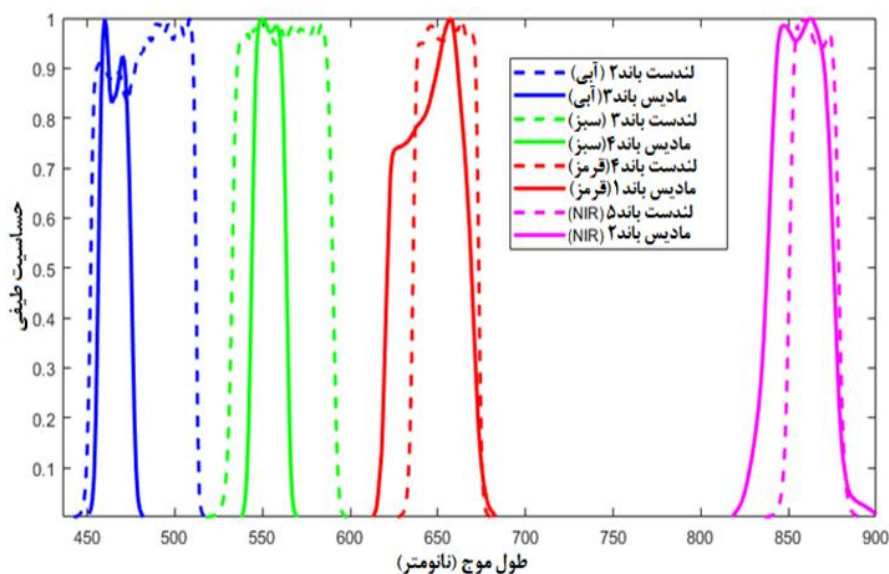
منطقه اقلیم گرم و خشک و کوهستانی دارد و متوسط بارش سالیانه حدود ۴۵۰ میلی‌متر و میانگین دما ۱۵ درجه‌ی سانتی‌گراد است (شرکت مدیریت منابع آب ایران^۱، ۱۳۹۴). استان ایلام که بیشتر مساحتش در منطقه‌ی مطالعاتی واقع شده است، میانگین بارندگی درازمدت ۳۰ ساله در حدود ۵۹۵ میلی‌متر با متوسط دمای ۳۰ ساله‌ی ۱۶/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد دارد؛ درحالی که میانگین سالانه‌ی دما در استان‌های واسط و میسان کشور عراق به‌طور میانگین ۲۴/۳۳ گزارش شده است (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۴).

تصاویر بازتابندگی سطحی^۲ ماهواره‌ی لندست-۸ با ابرناکی کمتر از ۵ درصد مربوط به دو مقطع زمانی سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ را از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS)^۳ دریافت کردیم. این داده‌ها با سطح پردازش L2 بودند که تصحیحات رادیومتریک و هندسی و همچنین تصحیح اتمسفری روی آن‌ها اعمال شده است. همچنین، محصول هشت‌روزه‌ی بازتابندگی سطحی MOD09A1 با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر از سنجنده‌ی مادیس را با نزدیک‌ترین تاریخ به تصاویر لندست، دریافت کردیم. جدول ۱ تاریخ تصاویر لندست و مادیس به‌کاررفته در این تحقیق را نشان می‌دهد. دلیل انتخاب این تاریخ‌ها برای منطقه‌ی مطالعاتی، تغییر زیاد پوشش اراضی در این بازه‌ی زمانی (آوریل تا آگوست) و همچنین عدم ابرناکی تصاویر برای تحلیل بود. به همین دلیل، تنها تصاویر موجود با این شرایط، به دو سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ (جدول ۱) مربوط بود. اندازه‌ی پیکسل تصاویر بازتابندگی سطحی مادیس با استفاده از نرم‌افزار MRT^۴ به ۳۰ متر و سیستم تصویر آن‌ها به UTM^۵ تغییر یافت. در این تحقیق، به‌دلیل هزینه‌ی محاسباتی بالای مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی، تصمیم گرفتیم از چهار باند آبی، سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک سنجنده‌ی مادیس و باندهای متناظر آن در لندست استفاده کنیم (شکل ۱). این باندها، محدوده‌های طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک را پوشش می‌دهند و باوجود تفاوت شماره‌ی باند در دو سنجنده، محدوده‌ی طیفی باندهای متناظر شباهت زیادی دارند و در مطالعات مختلف برای ریزمقیاس‌نمایی تصاویر مادیس به‌کار رفته‌اند (چن و همکاران، ۲۰۱۰؛ فنگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ هیلکر و همکاران، ۲۰۰۹؛ وو و همکاران، ۲۰۱۶).

1. IWRMco
2. Surface reflectance
3. United States Geology Surveying
4. MODIS Reprojection Tool
5. Universal Transverse Mercator

جدول ۱: تاریخ‌های تصاویر لندست و مادیس ورودی به مدل و تصویر شبیه‌سازی شده

تصاویر ورودی		تاریخ پیش‌بینی و اعتبارسنجی	اختلاف زمانی
Landsat	MODIS		
۲۰ آوریل ۲۰۱۵	۲۳ آوریل ۲۰۱۵	۷ ژوئن ۲۰۱۵	۴۸ روز
۲۵ جولای ۲۰۱۵	۲۸ جولای ۲۰۱۵		
۱ جولای ۲۰۱۸	۴ جولای ۲۰۱۸	۱۷ جولای ۲۰۱۸	۱۶ روز
۲ آگوست ۲۰۱۸	۵ آگوست ۲۰۱۸		



شکل ۲: باندهای متناظر سنجنده‌های مادیس و لندست-۸ برای ریزمقیاس‌نمایی

۲-۲-۲ مدل ESTARFM

مدل ESTARFM نسخه‌ی توسعه‌یافته‌ی مدل STARFM برای استفاده در مناطق ناهمگن است. اساس این مدل بر این فرض استوار است که بین تصاویر سنجنده‌های مختلف در یک زمان معین، همبستگی وجود دارد و از این همبستگی برای ریزمقیاس‌نمایی تصاویر و همچنین حداقل کردن خطاهای سیستمی ناشی از تفاوت دو سنجنده بهره‌برده می‌شود (Zhu & Chen, 2010). بدیهی است که این همبستگی و ریزمقیاس‌نمایی فقط برای باندهای طیفی با



محدوده‌ی طیفی مشابه در دو سنجنده امکان‌پذیر است (شکل). این مدل برای دو حالت مختلف پیکسل‌های همگن و ناهمگن شرایط مختلفی را در نظر می‌گیرد. در یک محدوده‌ی همگن، می‌توان فرض کرد که میزان بازتابندگی بین پیکسل مادیس و پیکسل‌های لندست متناظر با آن در یک زمان، شباهت بسیار بالایی دارند و تفاوت موجود فقط از تفاوت‌های سیستمی سنجنده‌ها ناشی خواهد بود. در این صورت، بازتابندگی لندست به‌صورت معادله‌ی خطی از بازتابندگی پیکسل متناظر مادیس نوشته می‌شود (رابطه‌ی ۱).

$$L(\chi, \gamma, T_p, B) = L(\chi, \gamma, T_o, B) + \alpha (M(\chi, \gamma, T_p, B) - M(\chi, \gamma, T_o, B)) \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

$L(\chi, \gamma, T_p, B)$ و $L(\chi, \gamma, T_o, B)$ بازتابندگی‌های لندست در پیکسل χ, γ و زمان‌های T_p و T_o و باند B ؛ $M(\chi, \gamma, T_p, B)$ و $M(\chi, \gamma, T_o, B)$ بازتابندگی‌های مادیس در پیکسل χ, γ و زمان‌های T_p و T_o و باند B و ضرایب تبدیل و زمان p مربوط به تاریخ پیش‌بینی و زمان o تاریخ تصویر ورودی هستند. واضح است که در واقعیت، غالب پیکسل‌ها ترکیبی از چند پوشش متفاوت روی زمین هستند و به‌صورت پیکسل ناهمگن و مختلط در تصویر وجود خواهند داشت. در حالت پیکسل مختلط، اگر بازتابندگی پیکسل را به‌صورت ترکیب خطی از بازتابندگی پوشش زمین‌های مختلف موجود در پیکسل که با مساحت هر پوشش در پیکسل وزن‌دهی شده باشند فرض کنیم، می‌توان تغییرات بازتابندگی بین دو تاریخ متفاوت را تابعی از مجموع وزن‌دهی‌شده‌ی تغییرات هر پوشش در پیکسل در نظر گرفت. در این حالت، بازتابندگی لندست به‌صورت تابعی خطی از مجموع وزن‌دهی‌شده‌ی تغییرات هر پوشش در پیکسل مادیس ضرب در میزان بازتابندگی متناظر آن خواهد بود (ژو و همکاران، ۲۰۱۰). اگر بنا باشد که علاوه‌بر پیکسل هدف، پیکسل‌های همسایه‌ی مشابه آن نیز در نظر گرفته شوند، با یک پنجره‌ی متحرک با اندازه‌ی w می‌توان پیکسل‌های مشابه را پیدا کرد و رابطه‌ی زیر بین بازتابندگی لندست و مادیس برقرار خواهد بود:

$$L\left(\chi_{w/2}, \gamma_{w/2}, T_p, B\right) = L\left(\chi_{w/2}, \gamma_{w/2}, T_o, B\right) + \sum_{i=1}^N W_i \times \mathcal{G}_i \times (M(\chi_i, \gamma_i, T_p, B) - M(\chi_i, \gamma_i, T_o, B)) \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

در رابطه‌ی بالا، N تعداد پیکسل‌های مشابه در پنجره‌ی متحرک شامل خود پیکسل مرکزی (هدف) با مختصات $W_i, \chi_{w/2}, \gamma_{w/2}$ وزن نامین پیکسل مشابه و θ_i ضریب تبدیل نامین پیکسل مشابه است. اندازه‌ی پنجره‌ی متحرک برای جست‌وجوی پیکسل‌های مشابه براساس همگنی منطقه، به‌صورت اندازه‌ی کوچک‌تر برای مناطق همگن و بزرگ‌تر برای مناطق ناهمگن، تعیین می‌شود. در این تحقیق، از اندازه‌ی پنجره‌ی متحرک پیش‌فرض خود مدل استفاده شد که برابر با ۲۵ است.

برای تعیین ضرایب رابطه‌ی ۲ و تعیین بازتابندگی پیکسل تصویر پیش‌بینی‌شده در مدل ESTARFM، به دو زوج تصویر لندست و مادیس از دو زمان متفاوت و همچنین یک تصویر مادیس برای زمانی که قرار است تصویر لندست-مانند شبیه‌سازی شود نیاز است. معمولاً از دو تصویر لندست و مادیس در زمان‌های قبل و بعد از تاریخ پیش‌بینی استفاده می‌شود. ابتدا، پیش‌پردازش‌های لازم از قبیل تصحیحات هندسی و اتمسفری روی همه‌ی تصاویر لندست و مادیس انجام می‌شود تا بازتابندگی سطحی تولیدشده و تمامی تصاویر از نظر مکانی کاملاً بر هم منطبق باشند. سپس، تصاویر مادیس با باز نمونه‌گیری به اندازه‌ی پیکسل لندست (۳۰ متر) تبدیل می‌شوند. در گام اول، دو تصویر لندست زمان اول و دوم با روش‌های نظارت‌نشده طبقه‌بندی می‌شوند و با استفاده از یک پنجره‌ی متحرک پیکسل‌های مشابه پیکسل مرکزی پنجره‌ی متحرک تعیین می‌شود. برای اینکه یک پیکسل مشابه پیکسل مرکزی باشد، باید قدرمطلق اختلاف آن پیکسل با پیکسل مرکزی در هر باند طیفی، کمتر یا مساوی دو برابر انحراف معیار آن باند تقسیم بر تعداد کلاس‌ها باشد. هر پیکسلی که در تمامی باند این شرط را داشته باشد، به‌عنوان پیکسل مشابه برچسب خواهد خورد. در نتیجه، برای هر پیکسل، تعدادی پیکسل مشابه وجود دارد که با توجه به فاصله‌ی آن‌ها از پیکسل مرکزی و همچنین میزان همبستگی آن‌ها با پیکسل مرکزی وزن‌دهی (بین صفر و ۱) می‌شوند. برای به‌دست آوردن ضرایب تبدیل نیز از رگرسیون پیکسل‌های مشابه استفاده خواهد شد و در نهایت، بازتابندگی پیکسل لندست مرکزی در زمان پیش‌بینی از طریق وزن‌دهی زمانی بازتابندگی دو پیکسل لندست قبل و بعد از آن به‌دست می‌آید. برای اطلاع از جزئیات کامل مدل ESTARFM، به مقاله‌ی ژو و همکاران (۲۰۱۰) مراجعه کنید.

۳- روش انجام تحقیق

برای ارزیابی دقیق عملکرد مدل ESTARFM، این تحقیق را در سه بخش متفاوت انجام دادیم. در ادامه توضیح مختصری در خصوص هر بخش ارائه می‌کنیم.



الف. تأثیر روش‌های بازنمونه‌گیری بر عملکرد مدل

ضرایب و وزن‌های استفاده‌شده در مدل ESTARFM (رابطه‌ی ۲) برای شبیه‌سازی تصویر لندست-مانند با استفاده از یک پنجره‌ی متحرک و با رگرسیون‌گیری از تصویر مادیس و لندست به‌دست می‌آیند. در این شرایط، باید تصویر مادیس بازنمونه‌گیری شود و به قدرت تفکیک مکانی لندست تبدیل شود. روشن است که روش بازنمونه‌گیری به‌کاررفته در عملکرد مدل برای تولید تصاویر لندست-مانند تأثیر دارد. برای بررسی تأثیر روش‌های مختلف بازنمونه‌گیری بر عملکرد مدل، از سه روش مرسوم بازنمونه‌گیری، شامل نزدیک‌ترین همسایگی^۱، مکعبی^۲ و خطی^۳ استفاده کردیم. تصاویر سنجنده‌ی مادیس را ابتدا با هریک از روش‌های بازنمونه‌گیری ذکرشده به‌اندازه‌ی پیکسل لندست تبدیل و پس از ریزمقیاس‌نمایی، نتایج را با هم مقایسه کردیم.

ب. تحلیل مکانی

بدیهی است که تنوع و توزیع پوشش‌های مختلف زمین در تصویر و همچنین اندازه‌ی پنجره‌ی متحرک استفاده‌شده، تأثیر مستقیمی بر استخراج ضرایب استفاده‌شده در مدل ESTARFM دارد. زمان موردنیاز برای پردازش و ریزمقیاس‌نمایی نیز تابعی از اندازه‌ی تصویر ورودی به مدل است. هر قدر که این تصویر محدوده‌ی گسترده‌تری را پوشش دهد، زمان پردازش بالتبع بیشتر خواهد بود. بنابراین، نیاز است تا اثر این دو عامل (اندازه‌ی تصویر و نوع پوشش زمین) بر عملکرد مدل ارزیابی شود. در این تحقیق، تصاویر با سه اندازه‌ی مختلف شامل یک‌چهارم، نصف و کل تصویر را برای ریزمقیاس‌نمایی به‌کار بردیم و تأثیر اندازه‌ی تصویر بر نتایج ریزمقیاس‌نمایی را بررسی کردیم. همچنین، برای نشان دادن میزان تأثیر نوع پوشش زمین بر نتیجه‌ی ریزمقیاس‌نمایی، منطقه‌ی مطالعاتی را انتخاب کردیم که از نظر نوع پوشش و اقلیم از تنوع بالایی برخوردار است تا میزان دقت مدل در هر کلاس پوشش زمین را ارزیابی کنیم.

ج. تحلیل زمانی

بازتابندگی سطوح مختلف با گذر زمان دستخوش تغییر می‌شود و طبیعی است که هر چند این اختلاف بیشتر باشد، انتظار می‌رود تفاوت بیشتری بین دو بازتابندگی سطحی مشاهده شود. با توجه به اینکه مدل ESTARFM از تصاویر لندست و مادیس در دو زمان مختلف قبل و بعد از تاریخ پیش‌بینی برای شبیه‌سازی تصویر استفاده می‌کند، واضح است که عامل زمان تأثیر شگرفی بر عملکرد این مدل خواهد داشت. این مهم قبلاً در مطالعات مختلف نشان داده شده است (ژو و

1. Nearest neighbor
2. Cubic convolution
3. Bilinear

همکاران، ۲۰۱۰). با این حال، باید تأثیر عامل زمان و تفاوت زمانی بین دو تصویر به صورت کمی برای شرایط مختلف اندازه‌گیری شود و حداکثر اختلاف زمانی بین دو تصویر برای انجام ریزمقیاس‌نمایی با نتایج قابل قبول مشخص شود. در این تحقیق، از تصاویر با اختلاف زمانی‌های مختلف به‌عنوان تصویر ورودی برای مدل استفاده کردیم تا میزان تأثیر اختلاف زمانی بین تصاویر بر نتایج کمی‌سازی شود. برای این منظور، عملکرد مدل را در شرایط اختلاف زمانی بین دو تصویر ۱۶ روزه و ۴۸ روزه بررسی کردیم. زمان تصویر را به‌گونه‌ای انتخاب کردیم که در منطقه‌ی مطالعاتی پوشش سطح زمین تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای بین دو تاریخ داشته باشد (مانند تغییر از گیاه به خاک و بالعکس) تا توانایی مدل در بازسازی تصویر لندست-مانند از تصاویر مادیس را بسنجیم.

۴- نتایج

در این بخش، نتایج مربوط به روش بازنمونه‌گیری، تحلیل‌های مکانی و زمانی و اثر آن‌ها بر عملکرد مدل ESTARFM را ارائه می‌کنیم. برای سنجش میزان تأثیر عوامل مختلف بر کارایی مدل، از پنج شاخص آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)^۱، جذر میانگین مربعات نرمال‌شده‌ی خطا (NRMSE)^۲، انحراف از خط یک-یک (Bias)، انحراف معیار (Std) و ضریب تعیین استفاده کردیم. تنوع شاخص‌های آماری امکان ارزیابی دقیق نتایج را فراهم می‌کند. برای تحلیل‌های مکانی و همچنین اثر روش بازنمونه‌گیری، از تصاویر لندست اول جولای و دوم آگوست ۲۰۱۸ و تصاویر مادیس چهارم جولای و پنجم آگوست ۲۰۱۸ به‌عنوان تصاویر ورودی برای شبیه‌سازی تصویر تاریخ هفدهم جولای لندست-مانند استفاده کردیم. در تحلیل زمانی نیز تاریخ هر تصویر ورودی و شبیه‌سازی‌شده را در بخش مربوطه آوردیم.

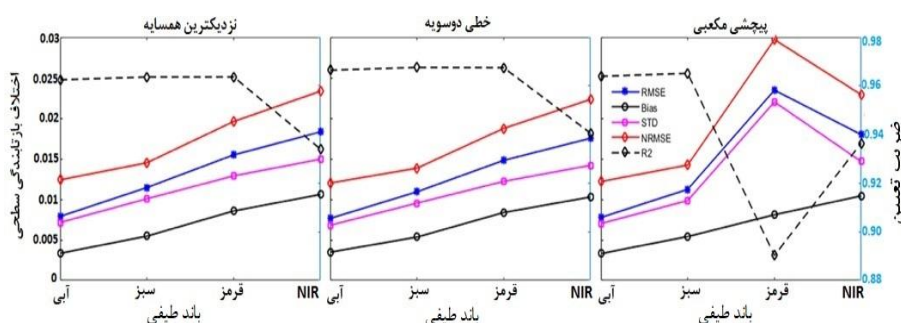
۴-۱. تأثیر روش‌های بازنمونه‌گیری

در *Error! Reference source not found.* نتایج حاصل از اعمال سه روش بازنمونه‌گیری مختلف در مدل ESTARFM نشان داده شده است. روی محور افقی باندهای طیفی مختلف، روی محور عمودی سمت راست مقدار ضریب تعیین و روی محور عمودی سمت چپ مقادیر چهار شاخص آماری دیگر را نشان می‌دهد. میزان RMSE بازتابندگی سطحی هر سه روش بازنمونه‌گیری، در تمامی باندها کمتر از ۰,۰۲۵ است. باوجود نزدیک بودن مقادیر RMSE هر سه روش، نتایج حاصل از روش بازنمونه‌گیری خطی اندکی بهتر از دو روش دیگر بوده و مقدار RMSE در این حالت در تمامی باندها، کمتر از ۰,۰۱۷ بوده است. به این ترتیب، شاخص

1. Root mean square error (RMSE)

2. Normalized root mean square error (RMSE)

NRMSE که برخلاف شاخص RMSE به واحد و مقدار اعداد وابستگی ندارد نیز مقادیر کمتر از ۰,۰۳ برای هر سه روش در تمام باندها را نشان می‌دهد. شباهت مقادیر و رفتار دو شاخص RMSE و NRMSE در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد که مقادیر حاصل شده چندان تحت تأثیر واحد و مقدار نتایج نبوده‌اند و میانگین کلی خطای بین مدل و داده‌های واقعی این میزان بوده است.



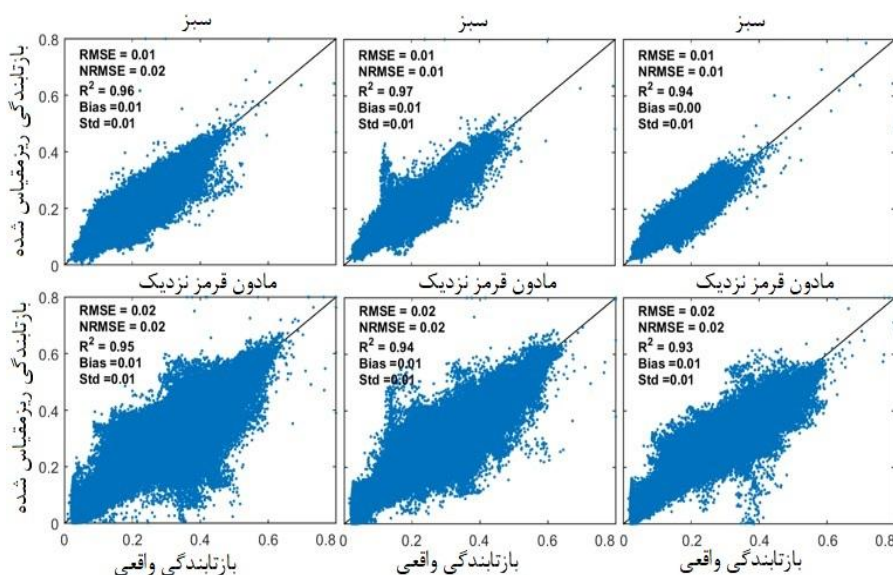
شکل ۳: شاخص‌های آماری مربوط به نتایج روش‌های متفاوت باز نمونه‌گیری برای اختلاف زمانی ۶ روزهای سال ۲۰۱۸

مشابه حالت قبلی، مقادیر این شاخص برای روش باز نمونه‌گیری خطی حداقل و برای روش مکعبی بیشترین مقدار را به دست داده است. خطای Bias در تمام روش‌ها کمتر از ۰,۰۱ و انحراف معیار نیز رفتاری مشابه RMSE را برای هر سه روش به دست می‌دهد. خطای Bias کم نشان می‌دهد که به طور کلی، بیش‌برازشی یا کم‌برازشی خاصی در داده‌های مدل شده وجود ندارد. میزان ضریب تعیین نیز برای همه‌ی روش‌ها، به استثنای باند قرمز در روش مکعبی، مقداری بالاتر از ۰,۹۴ به دست آمده است که نشان‌دهنده‌ی ضریب تعیین بالای نتایج شبیه‌سازی شده با تصویر اصلی است. این ضریب تعیین مشخص می‌کند که داده‌های مدل شده تا چه اندازه به صورت یک رابطه‌ی خطی از مدل اصلی قابل توضیح هستند. مقایسه‌ی باندهای مختلف نشان می‌دهد که در هر سه روش، باند آبی کمترین مقدار خطا را داشته و بیشترین ضریب تعیین را نمایش داده است. با افزایش طول موج از باند آبی به سمت باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک، در هر سه روش، به استثنای باند قرمز در روش مکعبی، میزان خطا افزایش می‌یابد و ضریب تعیین اندکی پایین می‌آید. نتایج تأیید می‌کند که دو روش خطی و نزدیک‌ترین همسایه عملکرد تقریباً یکسانی در شاخص‌های آماری دارند و روش‌های مناسبی برای باز نمونه‌گیری تصویر هستند؛ هر چند روش خطی اندکی بهتر عمل می‌کند و می‌تواند برای

بازنمونه‌گیری تصویر گزینه‌ی اول باشد. این درحالی است که روش مکعبی به‌خصوص در باند قرمز خطای بیشتری تولید کرده و ضریب تعیین پایین‌تری داشته است.

۲-۴- تحلیل مکانی

در *Error! Reference source not found.* مقایسه‌ی باندهای مادون قرمز نزدیک و باند سبز تصاویر اصلی با تصاویر شبیه‌سازی شده در یک‌چهارم، نصف و کل تصویر همراه با پنج شاخص آماری را ارائه کرده‌ایم. در تحلیل استفاده از یک‌چهارم تصویر، تصویر ماهواره‌ای را به چهار قسمت تقسیم و از هر چهار قسمت استفاده کردیم. نتایج ارائه‌شده میانگین هر چهار حالت هستند.



شکل ۴: مقایسه‌ی باندهای سبز (ردیف بالا) و مادون قرمز نزدیک (ردیف پایین) تصاویر اصلی با تصاویر شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل ESTARFM به ترتیب (از چپ به راست) در یک‌چهارم، نصف و کل تصویر

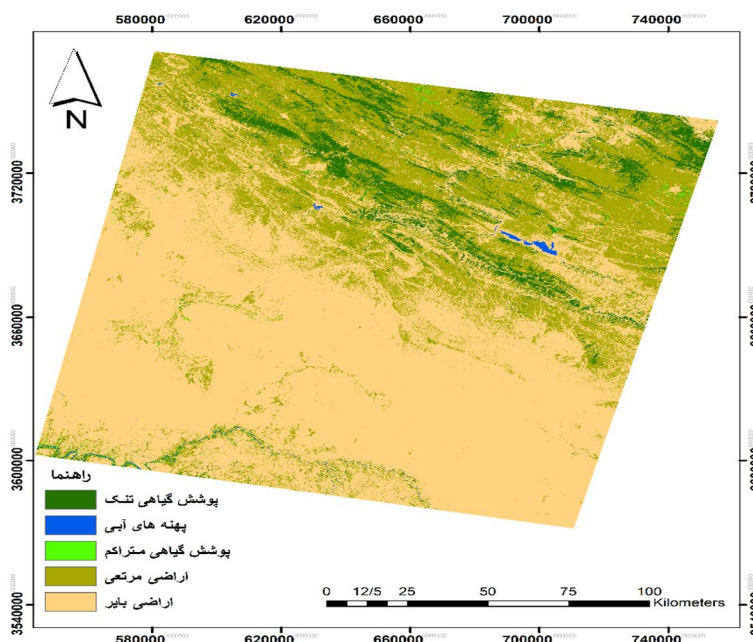
نتایج نشان می‌دهد که در هر سه حالت استفاده از یک‌چهارم، نصف و کل تصویر، ضریب تعیین بالایی (بالاتر از ۹۳ درصد) بین تصویر شبیه‌سازی‌شده و تصویر اصلی وجود دارد. با این حال، به نظر می‌رسد که استفاده از کل تصویر با انحراف معیار ۰,۰۱، همراه با خطای بایاس



صفر درصد و ضریب تعیین ۰,۹۴ و میزان RMSE و NRMSE در حدود ۰,۰۱ بهترین عملکرد را داشته است. نکته‌ی جالب دیگر عملکرد بهتر باند سبز در مقایسه با باند مادون قرمز نزدیک در تمام حالت‌ها است که علاوه بر ضریب تعیین بالاتر، میزان خطا و انحراف معیار کمتر بوده است. با اینکه توضیح روشنی برای این نتایج وجود ندارد، شاید عملکرد بهتر باند سبز تا حدودی با نسبت سیگنال به نویز بهتر این باند در مقایسه با باند مادون قرمز مرتبط باشد. برای شبیه‌سازی تصویر، در این تحقیق از یک کامپیوتر با RAM ۶ گیگابایتی و CPU ۲,۶ گیگاهرتزی Intel (R)Core(TM) i7CPU استفاده کردیم. زمان پردازش تحلیل‌های مختلف در حدود ۴ ساعت و ۴۸ دقیقه برای کل تصویر، ۲ ساعت و ۵۰ دقیقه برای نصف تصویر و ۱ ساعت و ۲۵ دقیقه برای یک‌چهارم تصویر برای هر باند بوده است. باتوجه به زمان پردازش نسبتاً طولانی در این روش، به نظر می‌رسد که اگر منطقه‌ی مطالعاتی فقط محدوده‌ی کوچکی از تصویر را دربر گرفته باشد، باید نوعی مصالحه بین زمان پردازش و دقت موردنظر صورت بگیرد. در *Error! Reference source not found.* مشخص است که در هر سه حالت استفاده از یک‌چهارم، نصف و تمام تصویر، با اینکه نوع پوشش زمینی متفاوتی در هر تصویر وجود داشت، نتایج کم‌وبیش مشابهی به دست آمده است. در نتیجه، در حالتی که هزینه‌ی محاسباتی انجام ریزمقیاس‌نمایی با کل تصویر بالا باشد، می‌توان محدوده‌ی مطالعاتی موردنظر را از کل تصویر جدا کرد و ریزمقیاس‌نمایی را فقط با این محدوده انجام داد.

برای بررسی تأثیر کلاس‌های مختلف پوشش زمین بر عملکرد مدل، تصویر لندست با بیشترین شباهت را به پنج کلاس پوشش اراضی، شامل پوشش گیاهی متراکم، پوشش گیاهی تنک، آب، خاک و خاک لخت، طبقه‌بندی کردیم (*Error! Reference source not found.*). کلاس‌های پوشش را به صورت کلاس‌های کلی و عمومی انتخاب کردیم تا علاوه بر افزایش دقت طبقه‌بندی، توانایی مدل در کلاس‌های مرسوم پوشش زمین که در اغلب طبقه‌بندی‌ها وجود دارند، بررسی شود. نتایج عملکرد مدل ESTARFM در شبیه‌سازی تصویر لندست-مانند در کلاس‌های مختلف پوشش زمین در چهار باند طیفی مشترک لندست و مادیس و پنج شاخص آماری در جدول ۲ خلاصه شده است. آن‌گونه که در جدول می‌بینیم، کارکرد مدل در کلاس‌های مختلف پوشش زمانی تفاوت‌های معنی‌داری برای برخی کلاس‌ها دارد. بهترین عملکرد مدل به دو کلاس پوشش گیاهی تنک و اراضی بایر مربوط بوده است و مدل ضعیف‌ترین عملکرد را در کلاس‌های پوشش گیاهی متراکم و پهنه‌های آبی داشته است. به صورت قطعی نمی‌توان در خصوص کارکرد مدل در هر کلاس اظهارنظر کرد. با این حال شاید دلیل نتایج بهتر برای اراضی بایر و پوشش گیاهی تنک تا حدودی تغییرات اندک و سطحی این

دو کلاس در بازه‌ی زمانی شبیه‌سازی شده (ماه‌های جولای و آگوست) باشد. در عوض، در کلاس‌های پوشش گیاهی متراکم و پهنه‌های آبی که با تغییرات بیشتری در این ایام همراه هستند، انتظار تغییرات سطحی بیشتری می‌رود که به نتایج ضعیف‌تر در شبیه‌سازی تصویر لندست-مانند منتهی شده است. برای مثال، کلاس پوشش گیاهی متراکم (شکل ۶) بیشتر شامل اراضی کشاورزی است که اغلب در ماه‌های جولای و آگوست برداشت و کشت مجدد می‌شوند؛ در حالی که کلاس پوشش گیاهی تنک شامل اراضی تنک جنگلی است که در این ماه‌ها تغییرات فنولوژیکی بسیار کمتری در مقایسه با اراضی کشاورزی دارند. جالب است که دقت مدل در تولید تصویر لندست-مانند در باندهای مختلف طیفی عملکرد متفاوتی داشته است؛ به این صورت که مدل در باند آبی در تمام کلاس‌ها بهترین عملکرد و در باند مادون قرمز نزدیک پایین‌ترین میزان دقت را داشته است. کاهش دقت از باند آبی به باند مادون قرمز نزدیک دارای الگوی تکراری در تمام حالات مختلف است. دلیل مشخص و قطعی برای این امر وجود ندارد؛ اما ممکن است نسبت سیگنال به نویز بالاتر باندهای مرئی تا حدودی عامل این کاهش دقت از محدوده‌ی مرئی به مادون قرمز باشد.



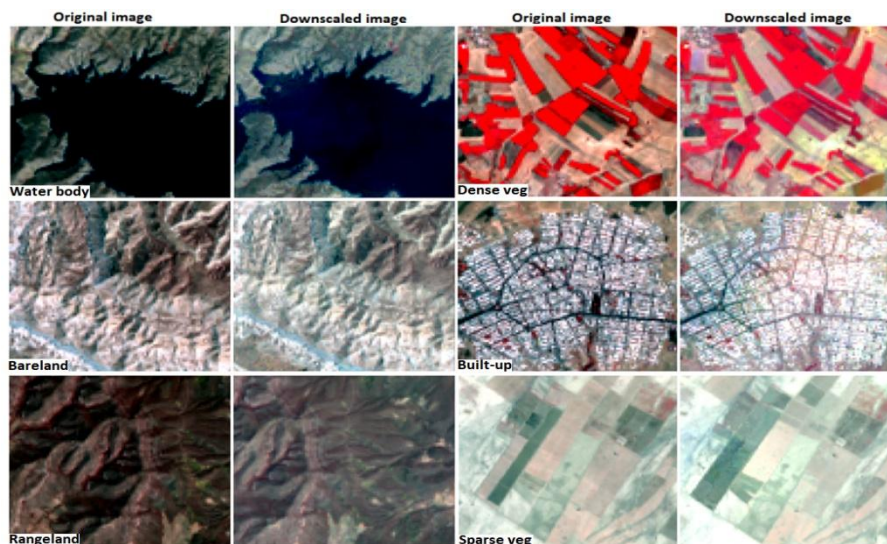
شکل ۵: تصویر لندست-۸ طبقه‌بندی شده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه با پنج کلاس پوشش زمینی



علاوه بر جزئیات عملکرد مدل در کلاس‌های پوشش زمینی مختلف در جدول ۲، نمونه‌هایی از تصویر شبیه‌سازی‌شده‌ی لندست-مانند و تصویر اصلی لندست ۱۷ جولای سال ۲۰۱۸ منطقه‌ی مطالعاتی در کلاس‌های مختلف در شکل ۱، از نظر بصری با هم مقایسه شده‌اند. از این شکل مشخص می‌شود که از نظر بصری، عملکرد مدل در شبیه‌سازی کلاس‌های مختلف پوشش زمین تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد که به‌نوعی تأییدکننده‌ی این نتایج جدول ۲ است که کلاس اراضی بایر و پوشش گیاهی تنک شباهت بیشتر و پهنه‌های آبی و پوشش گیاهی متراکم شباهت کمتری را در شکل نشان می‌دهند. در شکل ۱، کلاس اراضی ساخته‌شده نیز صرفاً برای تحلیل بصری نشان داده شده است که با تصاویر واقعی مقایسه شود.

جدول ۲: عملکرد مدل *ESTARFM* در شبیه‌سازی تصویر لندست-مانند از تصاویر مادیس در کلاس‌های مختلف پوشش زمین در چهار باند طیفی مشترک آبی، سبز، قرمز و مادون‌قرمز نزدیک

Cover type			Blue	Green	Red	NIR
پوشش گیاهی متراکم	Dense veg	RMSE	0.013	0.016	0.026	0.038
		NRMSE	0.063	0.060	0.079	0.074
		R	0.706	0.743	0.706	0.681
		Bias	0.001	0.002	0.003	0.011
		Std	0.013	0.015	0.026	0.036
پوشش گیاهی تنک	Sparse veg	RMSE	0.005	0.007	0.010	0.013
		NRMSE	0.030	0.029	0.028	0.017
		R	0.845	0.853	0.847	0.896
		Bias	0.001	0.001	0.003	0.007
		Std	0.005	0.007	0.009	0.011
پهنه‌ی آبی	Water body	RMSE	0.016	0.018	0.025	0.034
		NRMSE	0.037	0.036	0.045	0.060
		R	0.851	0.868	0.846	0.547
		Bias	-0.006	-0.004	-0.007	-0.007
		Std	0.015	0.017	0.024	0.034
اراضی مرتعی	Rangeland	RMSE	0.007	0.010	0.014	0.016
		NRMSE	0.028	0.033	0.036	0.031
		R	0.915	0.916	0.910	0.876
		Bias	0.003	0.005	0.008	0.010
		Std	0.006	0.008	0.011	0.013
اراضی بایر	Bareland	RMSE	0.008	0.012	0.015	0.018
		NRMSE	0.013	0.015	0.020	0.022
		R	0.956	0.960	0.961	0.949
		Bias	0.004	0.006	0.009	0.010
		Std	0.007	0.010	0.013	0.014



شکل ۶: مقایسه‌ی بصری پوشش‌های زمینی مختلف در تصویر شبیه‌سازی‌شده‌ی لندست-مانند (سمت راست هر تصویر) و تصویر اصلی لندست (سمت چپ هر تصویر) منطقه‌ی مطالعاتی با RGB ترکیب باندی ۴-۳-۲ (نوع پوشش هر تصویر در پایین سمت راست آن آمده است)

۳-۴- تحلیل زمانی

برای بررسی میزان تأثیر اختلاف زمانی بین تصاویر ورودی و تصویر شبیه‌سازی‌شده در عملکرد مدل، دو بازه‌ی مختلف زمانی با اختلاف ۱۶ روزه و ۴۸ روزه را در نظر گرفتیم. در حالت اول، اختلاف زمانی بین دو تصویر ورودی لندست (۱ جولای و ۲ آگوست سال ۲۰۱۸) و تصویر شبیه‌سازی‌شده (۱۷ آگوست) را ۱۶ روز و در حالت دوم، اختلاف زمانی بین دو تصویر ورودی لندست (۲۰ آوریل و ۲۵ جولای سال ۲۰۱۵) و تصویر شبیه‌سازی‌شده (۷ ژوئن) را ۴۸ روز در نظر گرفتیم. تصاویر ورودی مادیس را نیز باتوجه به اینکه بازتابندگی سطحی ۸ روزه بودند، در نزدیک‌ترین زمان به تصویرهای ورودی لندست انتخاب کردیم (جدول ۱). سپس شبیه‌سازی را با اندازه‌ی تصویرهای مختلف یک‌چهارم، نصف و کل تصویر برای هر دو بازه‌ی زمانی انجام دادیم و نتایج را با تصویر لندست اصلی مقایسه کردیم. جدول ۳ نتایج تحلیل زمانی یک‌چهارم، نصف و کل تصویر با اختلاف زمانی ۱۶ روزه و ۴۸ روزه بین تصویر ورودی و تصویر شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد. در جدول می‌بینیم که با افزایش اختلاف زمانی بین دو تصویر



ورودی و تصویر شبیه‌سازی‌شده، دقت شبیه‌سازی کاهش یافته است (افزایش RMSE, STD و کاهش R2). این کاهش فارغ از اینکه از یک‌چهارم، نصف و یا کل تصویر استفاده شده باشد، در تمام حالات روند مشابهی دارد. میزان RMSE در حالت اختلاف ۴۸ روزه ممکن است تا ۰,۳۰، بازتابندگی سطحی در باند قرمز برای حالت کل تصویر باشد؛ در حالی که در سایر باندها این میزان معمولاً کمتر از ۰,۰۲، به‌دست آمده است. علاوه‌بر کاهش دقت، میزان همبستگی بین تصویر شبیه‌سازی‌شده و تصویر اصلی با افزایش اختلاف زمانی بین دو تصویر کم شده است. شاخص‌های آماری RMSE و NRMSE به‌صورت میانگین بین تصاویر شبیه‌سازی‌شده با فاصله‌ی زمانی ۱۶ روزه و ۴۸ روزه نسبت‌به تاریخ پیش‌بینی، کمترین مقدار در باند مادون قرمز نزدیک و بیشترین مقدار در باند قرمز را دارد. این موضوع به‌ویژه هنگام استفاده از یک‌چهارم تصویر قابل توجه است که احتمالاً به‌دلیل زیاد بودن نوسانات پوشش زمین است.

جدول ۳: نتایج تحلیل زمانی یک‌چهارم، نصف و کل تصویر با اختلاف زمانی ۱۶ روزه و ۴۸ روزه بین تصویر ورودی و تصویر شبیه‌سازی‌شده

		Blue	Green	Red	NIR
یک‌چهارم تصویر (اختلاف زمانی ۱۶ روزه)	RMSE	0.010	0.011	0.010	0.020
	NRMSE	0.010	0.010	0.020	0.020
	R	0.940	0.940	0.950	0.930
	Bias	0.000	0.000	0.010	0.010
	Std	0.010	0.010	0.010	0.010
یک‌چهارم تصویر (اختلاف زمانی ۴۸ روزه)	RMSE	0.010	0.020	0.040	0.020
	NRMSE	0.020	0.030	0.050	0.030
	R	0.780	0.820	0.650	0.810
	Bias	0.010	0.000	0.020	0.000
	Std	0.010	0.020	0.030	0.020
نصف تصویر (اختلاف زمانی ۱۶ روزه)	RMSE	0.008	0.011	0.015	0.015
	NRMSE	0.012	0.014	0.019	0.022
	R	0.966	0.968	0.967	0.941
	Bias	0.003	0.005	0.008	0.010
	Std	0.007	0.010	0.012	0.014
نصف تصویر (اختلاف زمانی ۴۸ روزه)	RMSE	0.010	0.020	0.030	0.020
	NRMSE	0.020	0.030	0.040	0.030
	R	0.880	0.890	0.850	0.850
	Bias	0.010	0.000	0.010	0.000
	Std	0.010	0.020	0.030	0.020
کل تصویر (اختلاف زمانی ۱۶ روزه)	RMSE	0.008	0.011	0.015	0.017
	NRMSE	0.012	0.014	0.019	0.022
	R	0.969	0.972	0.971	0.949
	Bias	0.003	0.006	0.008	0.010
	Std	0.007	0.010	0.012	0.014
کل تصویر (اختلاف زمانی ۴۸ روزه)	RMSE	0.010	0.020	0.030	0.020
	NRMSE	0.020	0.030	0.040	0.030
	R	0.870	0.890	0.870	0.850

	<i>Bias</i>	0.000	0.000	0.010	0.000
	<i>Std</i>	0.010	0.020	0.030	0.020

۵- بحث و جمع‌بندی

ریزمقیاس‌نمایی تصاویر مادیس روش مناسبی برای تولید تصاویر لندست-مانند و فراهم کردن سری زمانی داده‌های سنجش‌ازدور با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا است. در بین روش‌های مختلف ارائه‌شده برای ریزمقیاس‌سازی، مدل ESTARFM از توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی تصاویر لندست-مانند در مناطق ناهمگن برخوردار است. در این تحقیق، ارزیابی دقت مدل ESTARFM برای ریزمقیاس‌نمایی تصاویر مادیس روی پوشش‌های مختلف زمین، اندازه‌ی تصویر ورودی، اختلاف زمانی بین تصاویر ورودی و تصویر پیش‌بینی و همچنین روش بازنمونه‌گیری انجام شد. ریزمقیاس‌نمایی تصاویر با استفاده از روش بازنمونه‌گیری خطی نتایج بهتری در مقایسه با دو روش نزدیک‌ترین همسایه و مکعبی داشت؛ هرچند به دلیل نزدیکی نتایج، سایر روش‌ها نیز برای ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌شوند. در تحلیل مکانی کارکرد مدل ESTARFM در اندازه‌ی تصویرهای مختلف، نشان داده شد که زمان اجرای مدل با اندازه‌ی کل تصویر تقریباً سه برابر حالتی زمان خواهد برد که فقط یک‌چهارم تصویر استفاده شود؛ در حالی که تفاوت دقت چشمگیری بین دو حالت وجود ندارد. افزایش زمان محاسباتی با توجه به ماهیت روش در طبقه‌بندی تصویر و اعمال پنجره‌ی متحرک روی تمامی پیکسل‌ها قابل توجیه است. عدم تفاوت قابل‌ملاحظه در دقت نتایج بین حالت‌های استفاده از یک‌چهارم، نصف و کل تصویر نیز به این صورت توضیح داده می‌شود که در اغلب موارد، کاهش وسعت منطقه باعث کاهش تعداد کلاس موجود در تصویر می‌شود و با توجه به اینکه مدل ESTARFM رگرسیون ضرایب را براساس کلاس‌های موجود در تصویر به‌دست می‌آورد، نوعی توازن بین تعداد کلاس و تعیین ضرایب برقرار می‌شود و کاهش دقت ناشی از کاهش تعداد پیکسل‌های مشابه در تصویر با خالص‌تر شدن کلاس‌ها تا حدودی جبران می‌شود. کاهش چشمگیر زمان محاسباتی در حالت اجرا با یک‌چهارم و نصف تصویر در حالی که دقت تغییر چندانی نمی‌کند، ممکن است در مطالعاتی به‌کار رود که در آن‌ها منطقه‌ی مورد مطالعه فقط بخشی از تصویر است.

همچنین، مشخص شد که عملکرد مدل به تنوع کلاس‌های پوشش زمین وابستگی زیادی دارد و در کلاس‌های مختلف دارای عملکرد متفاوتی است که گاه ممکن است باعث تا میانگین ۰,۰۳ اختلاف در میزان بازتابندگی بین تصویر اصلی و شبیه‌سازی‌شده شود. با اینکه مدل ESTARFM می‌تواند تصاویر لندست-مانند با RMSE بهتر از ۰,۰۲ بازتابندگی سطحی و ضریب تعیین بالاتر از ۹۰ درصد در پوشش‌های مختلف زمینی را تولید کند، دقت مدل به‌صورت معنی‌داری در کلاس‌های پوشش گیاهی متراکم و پهنه‌های آبی، کمتر از سایر



کلاس‌ها بود. بهترین نتایج برای کلاس‌هایی به دست آمد که انتظار می‌رود حداقل تغییرات سطحی در بازه‌ی زمانی موردنظر را در منطقه تجربه کرده‌اند. در کلاس پهنه‌های آبی، تا ۰,۰۲ اختلاف در میزان بازتابندگی بین تصویر شبیه‌سازی‌شده و تصویر اصلی (RMSE) وجود دارد که باتوجه به میزان بازتابندگی پایین پهنه‌های آبی، این میزان درصد بالایی قلمداد می‌شود و در شبیه‌سازی تصاویر پهنه‌های آبی یا مناطق ساحلی با این مدل، اشکال ایجاد می‌کند. به این ترتیب، به نظر می‌رسد که تصاویر شبیه‌سازی‌شده در مناطق کشاورزی با استفاده از روش ESTARFM، به خصوص برای مطالعات بازبایی پارامترهای گیاهی از تصاویر سنجش‌ازدوری، کارایی چندانی نداشته باشند. دلیل این مسئله اختلاف نسبتاً بالای تصویر شبیه‌سازی‌شده با تصویر اصلی است که نتایج غیرقابل‌اطمینانی در تخمین مقدار پارامترهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی گیاهی تولید می‌کند.

در پاسخ به این سؤال که حداکثر اختلاف زمانی بین دو تصویر ورودی برای ریزمقیاس‌نمایی چقدر باید باشد تا نتایج از دقت قابل‌قبولی برخوردار باشند، باید بگوییم که این موضوع به عوامل مختلفی، از جمله میزان تغییر قابل‌انتظار در بازه‌ی زمانی موردنظر، نوع پوشش زمین و پیش‌پردازش تصاویر وابسته است. با این حال، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در حالتی که بین دو تصویر ورودی لندست و تصویر پیش‌بینی ۴۸ روز اختلاف زمانی وجود داشته است، مدل ESTARFM می‌توانست تصاویر لندست-مانند با RMSE بهتر از ۰,۰۳ در تمامی باندها و در شرایط مختلف (یک‌چهارم، نصف و کل تصویر) تولید کند. روشن است که از زمان در اینجا به‌عنوان جایگزینی برای تغییرات پوشش زمین استفاده شده است و نمی‌توان از آن با عنوان عامل قطعی ذکر کرد که بیش از یک زمان خاصی دیگر مدل کارایی ندارد. بیشتر باید به‌عنوان معیاری از تغییرات سطحی به زمان نگاه کرد. این میزان RMSE شاید برای کاربردهایی از قبیل طبقه‌بندی و آشکارسازی تغییرات قابل‌قبول باشد، ولی باتوجه به دقت موردنیاز برای تخمین مقادیر کمی (موسیوند و همکاران، ۲۰۱۵) از تصاویر سنجش‌ازدوری، پذیرفتنی نیست. نکته‌ی دیگر در تمام حالات بررسی‌شده در این تحقیق، تفاوت دقت شبیه‌سازی در باندهای مختلف تصویر است. در بیشتر موارد، باندهای مرئی نتایج بهتری از باند مادون قرمز دارند. دقت مدل در شبیه‌سازی با افزایش طول موج (باند) کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند با نسبت سیگنال به نویز باندهای مرئی مرتبط باشد که عموماً سیگنال به نویز بالاتری از باندهای مادون قرمز دارند.

تحلیل‌های مختلف صورت‌گرفته در این مطالعه نشان می‌دهد که مدل ESTARFM توان شبیه‌سازی تصاویر لندست-مانند از تصاویر مادیس با میزان خطای کمتر از ۱۰ درصد در شرایط مختلف را دارد. باتوجه به اینکه در مطالعات دیگر در مناطق مختلف نتایج کمابیش

مشابهی به دست آمده است (فو و همکاران، ۲۰۱۳؛ امیلیانوا و همکاران، ۲۰۱۳؛ گائو و همکاران، ۲۰۱۵)، امکان به کارگیری تصاویر شبیه سازی شده با این مدل برای مطالعات تشخیصی و کیفی وجود دارد. با این حال، استفاده از این تصاویر برای بازیابی پارامتر و مطالعات کمی چالش برانگیز است و باید احتیاط لازم در استفاده از این تصاویر در نظر گرفته شود. پیشنهاد می دهیم که در مطالعات آتی، اندازه‌ی پنجره و روش طبقه بندی به کاررفته در مدل ESTARFM در مناطق مختلف آزمایش و ارزیابی شود. همچنین، توانایی مدل در ریزمقیاس‌نمایی سایر تصاویر ماهواره‌ای نیازمند انجام مطالعات دیگر است. زمان محاسباتی نسبتاً بالای اجرای مدل از دیگر موارد ضعف آن است که باید در مطالعات آتی، بیشتر بررسی شود.

منابع

- Aiazzi, B., et al. (2002). "Context-driven fusion of high spatial and spectral resolution images based on oversampled multiresolution analysis." *Remote Sensing of Environment* **40**(10): 2300-2312.
- Chen, J., et al. (1999). "Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications." *Ecological Modelling* **124**(2-3): 99-119.
- Emelyanova, I. V. (2013). "Assessing the accuracy of blending Landsat-MODIS surface reflectances in two landscapes with contrasting spatial and temporal dynamics: A framework for algorithm selection." *Remote Sensing of Environment* **133**: 193-209-2013 v.2133.
- Feng, G., et al. (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): 2207-2218.
- Fu, D., et al. (2013). "An improved image fusion approach based on enhanced spatial and temporal the adaptive reflectance fusion model." *Remote Sensing* **5**(12): 6346-6360.
- Gao, F., et al. (2015). "Fusing Landsat and MODIS Data for Vegetation Monitoring." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* **3**(3): 47-60.



- Gao, F., et al. (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): 2207-2218.
- Hilker, T., et al. (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): 1988-1999.
- Hilker, T., et al. (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): 1988-1999.
- IWRMco (2015). Daily Rainfall report of Iran Based on Seconder Catchment Areas. In: Iran Water Resource Management Company
- Merlin, O., et al. (2010). "Disaggregation of MODIS surface temperature over an agricultural area using a time series of Formosat-2 images." *Remote Sensing of Environment* **114**(11): 2500-2512.
- Mousivand, A., et al. (2015). "Multi-temporal, multi-sensor retrieval of terrestrial vegetation properties from spectral-directional radiometric data." *Remote Sensing of Environment* **158**: 311-330.
- Mousivand, A., Verhoef, W., Menenti, M., & Gorte, B. (2015). Modeling Top of Atmosphere Radiance over Heterogeneous Non-Lambertian Rugged Terrain. *Remote Sensing*, 7(6), 8019. doi:10.3390/rs70608019.
- Roy, D. P., et al. (2008). "Multi-temporal MODIS-Landsat data fusion for relative radiometric normalization, gap filling, and prediction of Landsat data." *Remote Sensing of Environment* **112**(6): 3112-3130.
- Walker, J. J., et al. (2012). "Evaluation of Landsat and MODIS data fusion products for analysis of dryland forest phenology." *Remote Sensing of Environment* **117**: 381-393.
- Woodcock, C. E. and A. H. J. R. s. o. E. Strahler (1987). "The factor of scale in remote sensing." *Remote Sensing of Environment* **21**(3): 311-332.

- Wu, M., et al. (2016). "An improved high spatial and temporal data fusion approach for combining Landsat and MODIS data to generate daily synthetic Landsat imagery." *Information Fusion* **31**: 14-25.
- Zhan, W., et al. (2013). "Disaggregation of remotely sensed land surface temperature: Literature survey, taxonomy, issues, and caveats." *Remote Sensing of Environment* **131**: 119-139.
- Zhu, X., et al. (2010). "An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions." *Remote Sensing of Environment* **114**(11): 2610-2623