

مقایسه روش‌های پر کردن پیکسل‌های فاقد داده در تصاویر ماهواره لندست ۷ ETM+ در برآورد نقشه ضریب

گیاهی

مریم طاهرپور^۱، نادر پیرمرادیان^{۲*}، مجید وظیفه دوست^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۲/۵)

چکیده

داده‌های ماهواره‌ای لندست ۷ ETM+ به‌طور گسترده‌ای در مطالعات پوشش گیاهی و توزیع مکانی ضریب گیاه در مقیاس منطقه‌ای و جهانی استفاده می‌شوند اما شکست تصحیح کننده خط اسکن (SLC) در سال ۲۰۰۳ تا حد زیادی سودمندی آن را کاهش داده است. علاوه بر این، شکست مذکور دائمی است و تلاش‌های متعاقب آن برای بازیابی تصحیح کننده خط اسکن ناموفق بوده، بنابراین راه لازم و عملی برای رسیدگی به این مشکل پر کردن پیکسل‌های فاقد داده در تصاویر SLC-off است. اگرچه روش‌های پیشنهادی مختلفی برای پر کردن شکافها وجود دارد اما کیفیت تصاویر پر شده در مناطق ناهمگن هنوز هم برای بیشتر برنامه‌های کاربردی رضایت‌بخش نیست. این پژوهش به مقایسه دو روش زمین آماری و استفاده از داده‌های کمکی مودیس برای پر کردن شکافها در تصاویر SLC-off در تصویر لندست ۷ ETM+ و با هدف برآورد مقادیر ضریب گیاهی گیاه برنج در بخش شرقی واحد عمرانی F₁ از شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود پرداخته است. نتایج نشان داد که برآوردها در روش IDW با مقدار NRMSE برابر ۶/۰۹ درصد دارای بیشترین دقت بوده و روش‌های FGMAD و FAD به ترتیب با مقدار NRMSE برابر ۱۴/۷۵ و ۱۴/۹۷ در رتبه‌های بعدی از نظر دقت برآورد قرار می‌گیرند. روش FDCAD، کم‌ترین دقت را در برآوردها داشت.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، زمین آمار، تبخیر، تعرق

مقدمه

مطالعات نیاز آبی برنج در راستای افزایش بهره‌وری آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عمومی‌ترین روش برآورد نیاز آبی هر گیاه، حاصل‌ضرب تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET₀) در ضریب گیاهی مربوط به گیاه مورد نظر (K_c) است (ET_c = ET₀ × K_c). برآورد K_c خالی از زحمت نخواهد بود زیرا که نیازمند اطلاعاتی از وضعیت گیاه و اندازه‌گیری‌های لایسیمتری است و اطلاعات مذکور همیشه و در همه جا در دسترس نیست. در این راستا استفاده از فن سنجش از دور می‌تواند راه‌گشا باشد.

به دلیل اهمیت آگاهی از توزیع مکانی K_c و پارامترهای پوشش گیاهی، فناوری سنجش از دور به‌علت جمع‌آوری داده‌های مکانی در مقیاس وسیع و به‌روز بودن اطلاعات می‌تواند گزینه مناسبی در تعیین پارامترهای مورد نیاز باشد. شباهت بین منحنی ضریب گیاهی و شاخص پوشش گیاهی گرفته شده از ماهواره نشان داد که مدل‌سازی ضریب گیاهی به‌عنوان تابعی از

شاخص پوشش گیاهی از داده‌های سنجش از دور امکان‌پذیر است (Kambel et al., 2013). ضرایب گیاهی می‌تواند با شاخص‌های گیاهی (VIS¹) مرتبط باشند و از بازتاب انرژی از سطح پوشش گیاهی در باندهای خاص از طیف الکترومغناطیسی توسط سنجش از دور استخراج شوند. با توجه به پارامترهای این مدل‌ها مشخص است که همه آنها به نوع پوشش زمینی وابسته‌اند، که اگر شاخص‌های پوشش گیاهی هم‌چون NDVI^۲ با دقت تعیین شود، کل روند با دقت کافی محاسبه می‌شوند. محصولات سنجنده‌هایی هم‌چون SPOT، IRS به‌علت نداشتن باند حرارتی، ASTER و MISR به‌علت تفکیک فضایی نامناسب و وجود تحریم و NOAA و MSG و برخی از ماهواره‌های روسی به‌علت قدرت تفکیک مکانی ضعیف، قابل استفاده نیستند. این مساله استفاده از تصاویر SLC-off ETM+ را ترغیب می‌کند.

1. Vegetation Index

2. Normalized Difference Vegetation Index

به‌طور کلی روش‌های پرکردن شکاف‌ها در تصاویر ETM+ را به دو گروه کلی روش‌های تک منبعی (Maxwell, 2004;) و روش‌های چند منبعی می‌توان تقسیم کرد. در روش دوم با استفاده از داده‌های چند زمانی لندست ۷ برای بازیابی شکاف‌ها بر اساس پیش‌بینی مقادیر اسکن نشده می‌توان به چهار روش اساسی: USGS/NASA (Ali and Mohammed, 2013;)، زمین آماری^۲ (Zhang et al., 2007; Pringle et al., 2009; Zhu et al., 2012)، PCT^۳ (Boloorani et al., 2008) و روش NSPI^۴ (Chen et al., 2011; Mohammady et al., 2013) اشاره کرد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2007) روش درون‌یابی مکانی، الگوریتم‌های زمین آماری، را ارائه داد که توانست به‌طور موثری شکاف داده‌ها را در تصاویر ETM+ با استفاده از پیش‌بینی‌های دیجیتال از مقادیر رقومی در مجموعه داده‌های مشابه از شکاف‌ها برآورد کند. کریجینگ معمولی و کوکریجینگ معمولی استاندارد شده برای برآورد مقادیر عددی دیجیتال مورد استفاده قرار گرفت و از واریوگرام برای توصیف ساختار مکانی و اندازه-گیری همبستگی مکانی، به‌منظور پر کردن شکاف در تصاویر ETM+ استفاده شد. پرینگل و همکاران (Pringle et al., 2009) نیز با استفاده از اطلاعات استخراج شده از سه تصویر ETM+ SLC-off با فاصله زمانی نزدیک از همان اسکن برای پیش‌بینی مقادیر بازتاب در مکان‌های اسکن نشده با استفاده از یک الگوریتم کوکریجینگ با اطلاعات ثانویه قبل و بعد از آن تصاویر و بازگشت به روش کریجینگ، زمانی که اطلاعات کافی در تصاویر ثانویه وجود ندارد، استفاده کرد. نتایج نشان داد پیش-بینی دقیقی از تمام پیکسل‌های اسکن نشده با روش زمین آماری انجام شد در حالی که دارای نقاط وضعی مانند دشواری پیش‌بینی دقیق در محل اتصال بین عوارض و سرعت پایین محاسبات نیز بود.

عملکرد الگوریتم‌هایی که از تصاویر چند زمانی لندست استفاده می‌کنند در شرایطی که تفاوتی اساسی در پرتو هدف وجود داشته باشد ممکن است ناکارآمد باشد. بنابراین به‌طور معمول ادغام داده‌های ماهواره، مشاهدات بیشتری از سطح را در یک دوره زمانی معین فراهم می‌کند و در دسترس بودن داده-های عاری از ابر در مناطق با تنوع ابری روزانه را فراهم می‌کند و به‌طور بالقوه مشاهدات بیشتری برای معکوس مدل‌ها از لحاظ

سری ماهواره‌های لندست در سال ۱۹۷۲ راه‌اندازی شدند که به‌طور مداوم تصاویری از زمین-فضا را جمع‌آوری کردند (Goward et al., 2006). حسگرهای لندست شامل: TM (Thematic Mapper)، ETM+ (Enhanced Thematic Mapper plus) و MSS (Multi-Spectral Scanner) است. حسگر نقشه‌بردار موضوعی (TM) بر روی برد لندست ۵ به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیش از عمر برنامه‌ریزی شده خود عمر کرده (Bédard et al., 2008) و از نوامبر ۲۰۱۱ متوقف شده است (USGS, 2012) و حسگر ETM+ ماهواره لندست ۷ جانشین شده است. با این حال در ۳۱ می ۲۰۰۳ اصلاح‌گر خط اسکن (SLC) از ETM+ برای همیشه شکست خورد. تصحیح کننده خط اسکن قسمتی از سنجنده ETM+ است که باعث حرکت آینه اسکن کننده سنجنده به صورت پیاپی به جلو و عقب در هنگام اخذ تصویر می‌شود و در نتیجه سبب تولید نوارهای اسکن شده موازی از صحنه می‌گردد. این شکاف‌ها با نزدیک شدن به مرکز تصویر کمتر می‌شود که در قسمت مرکزی تصویر در تمامی باندهای سنجنده در حد ۱۲۰۰ پیکسل بدون شکاف و به‌طور صحیح اسکن می‌شود، اما هر قدر از مرکز به لبه‌ها نزدیک می‌شویم، بر مقدار شکاف‌ها افزوده می‌شود، به طوری که در لبه‌ها مقدار آن به ۱۴ پیکسل می‌رسد (Ahadnezhad Rooshti, 2011). بر این اساس داده‌های قابل استفاده در هر اسکن ۲۲ درصد کاهش یافته است (Maxwell et al., 2007; Storey et al., 2005; Pringle et al., 2009; Zhang et al., 2007; Ali and Mohammed, 2013).

تصاویر لندست طولانی‌ترین آرشیو از تصاویر جهانی با قدرت تفکیک متوسط، کالیبراسیون بالا، داده‌های چند طیفی از منابع منحصر به فرد برای برنامه‌های کاربردی در مقیاس‌های مختلف، از جمله کاربری اراضی و پوشش اراضی (Fuller et al., 1994)، شناسایی تغییرات (Byrne et al., 1980; Liu and Cai, 2011) و نظارت بر پویایی اکوسیستم (Fisher et al., 2006; Masek et al., 2008) را شامل می‌شوند. در نتیجه پر کردن شکاف‌ها در تصاویر ETM+ با SLC خاموش، که به‌عنوان SLC-off اشاره می‌شود، با وجود پرهزینه بودن و اغلب در دسترس نبودن (Ju and Roy, 2008)، برای اطمینان از تداوم طولانی‌ترین آرشیو ماهواره‌ای بسیار حیاتی و ضروری است. همچنین تصاویر ETM+ پر شده می‌تواند مکملی با ارزش در مناطق اغلب ابری باشد (Xiaolin et al., 2012) که در حال حاضر فقط حسگر^۱ LDCM جانشین آن شده است.

2. Geostatistical methodology
3. Principal Component Transformation
4. Neighborhood Similar Pixel Interpolator

1. Landsat Data Continuity Mission

درجه و ۳۸ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۴۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی واقع شده است.

برآورد ضریب گیاهی

در نشریه FAO-56 دو روش K_c "منفرد" و K_c "دوگانه" برای برآورد ضریب گیاهی معرفی شده است (Allen et al., 1998). K_c منفرد یا متوسط در یک روز خاص، نشان دهنده میانگین شدت تبخیر از سطح گیاه و خاک است. ساده‌ترین روش برای به‌دست آوردن K_c ، مدل‌سازی ضریب گیاهی به‌عنوان تابعی از شاخص پوشش گیاهی از داده‌های سنجش از دور است که از یک رابطه خطی بین NDVI و K_c استفاده می‌کند (Belmonte et al., 2005).

$$K_c = 1.25 \times NDVI + 0.2 \quad (\text{رابطه ۱})$$

K_c معرف ضریب گیاهی و NDVI از مقایسه بازتاب انرژی الکترومغناطیس توسط پوشش گیاهی در بازه‌های طیفی مرئی (red) تا مادون قرمز نزدیک (NIR) استخراج می‌گردد.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن NIR، بازتاب ثبت شده در باند مادون قرمز نزدیک ($0.7\mu\text{m} - 0.9\mu\text{m}$) ماهواره و RED، بازتاب ثبت شده در باند مادون قرمز ($0.63\mu\text{m} - 0.69\mu\text{m}$) است.

الگوریتم‌های پر کردن شکاف در تصاویر لندست ۷ ETM+ SLC-off

از میان تمام الگوریتم‌های ارائه شده روش‌هایی که در عین سادگی محاسباتی، نیازمند تصاویر کمکی پر TM یا ETM+ SLC-on در بازه زمانی مورد بررسی نباشد، مد نظر بود. در نهایت پس از بررسی منابع مختلف، روش‌های درون‌یابی IDW و زمین آماری کریجینگ معمولی و روش‌های ترکیبی با استفاده از محصولات سنجنده مودیس شامل روش ترکیبی با استفاده از داده‌های کمکی (مودیس) (FAD^3)، روش ترکیبی با استفاده از میانگین کل داده‌های کمکی (مودیس) ($FGMAD^3$) و روش ترکیبی طبقه‌بندی داده‌ها با استفاده از داده‌های کمکی (مودیس) ($FDCAD^3$) انتخاب شد و مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). هم‌چنین باید خاطر نشان کرد که در این راستا از دو تصویر لندست ۵ TM و دو تصویر مودیس استفاده شد.

در این بررسی از دو باند بازتابش سطح زمین محصولات MOD02QKM با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر استفاده شد

فیزیکی فراهم می‌کند. مطالعات متعددی با استفاده از تصاویری از حسگرهای غیر لندست ۷ ETM+ که زمان کسب آن‌ها نزدیک به تصویر SLC-off اصلی بود برای پیش‌بینی مقادیر از دست رفته به‌کار گرفته شد (Reza and Ali, 2008; Boloorani Gao et al., 2008; Chen et al., 2010; Chen et al., 2011). ال. (2006) یک روش ترکیبی تجربی را گسترش دادند، که مدلی ترکیبی با بازتاب انطباقی زمانی و مکانی (STARFM) بوده که داده‌های لندست ۷ ETM+ ۳۰ متر را با داده‌های بازتاب مودیس ۵۰۰ متر ترکیب کرد. در همین راستا روی و همکاران (2008) یک رویکرد ترکیبی نیمه‌فیزیکی^۱ را با استفاده از محصول مودیس BRDF/Albedo برای توصیف BRDF سطح مدوله شده از تغییرات پیکسل فرعی در مقیاس پیکسل ETM+ ارائه داد.

اکثر روش‌هایی که تاکنون برای پر کردن پیکسل‌های اسکن نشده به‌کار گرفته شده، غالباً روش‌های درون‌یابی و یا میانگین‌گیری از پیکسل‌های مجاور بوده است. به نظر می‌رسد این روش‌ها برای محاسبه پارامترهایی مانند ضریب گیاهی که به‌شدت به نوع پوشش وابسته است، نارسا و ناکافی باشد. به همین دلیل در اینجا به مقایسه این روش‌ها با روشی ترکیبی با تصاویر کمکی سنجنده مودیس پرداخته شد. این مطالعه به مقایسه دو روش درون‌یابی و استفاده از داده‌های کمکی مودیس در همان تاریخ برای پر کردن شکاف‌ها در تصاویر SLC-off می‌پردازد. در این مقاله سعی بر این است تا کارایی این روش‌ها در برآورد مقادیر اسکن نشده در تصویر لندست ۷ ETM+ با هدف برآورد مقادیر ضریب گیاهی گیاه برنج در بخش شرقی واحد عمرانی F_1 از شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود واقع در دشت فومنات در شمال ایران که دارای مزارع وسیع کشت برنج است مورد بررسی قرار گیرد.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

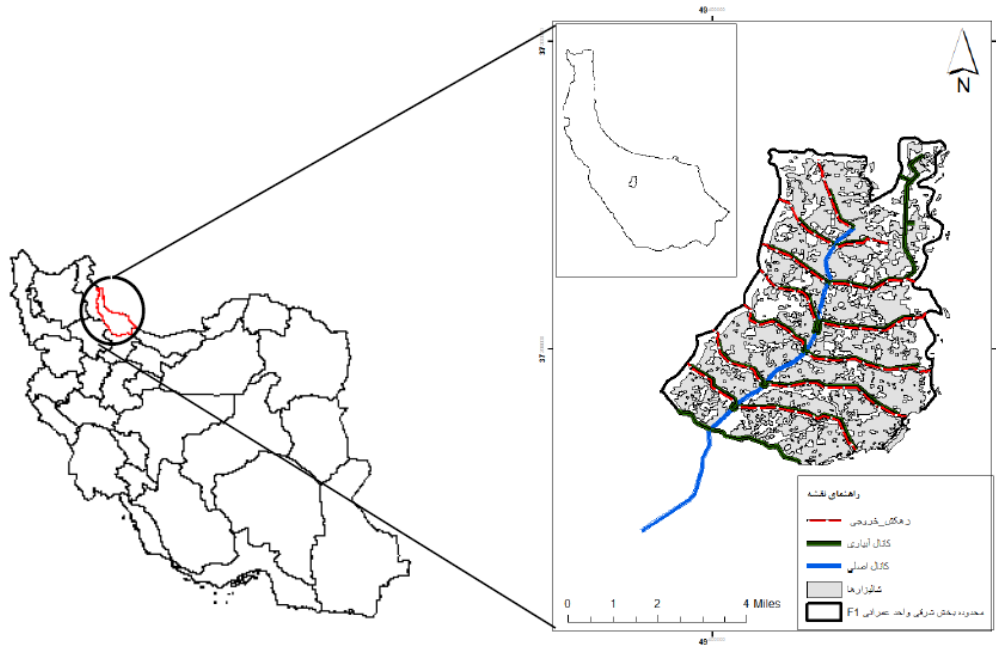
محدوده مورد مطالعه اراضی بخش شرقی واحد عمرانی F_1 واقع در دشت فومنات در استان گیلان است (شکل ۱). این واحد عمرانی در شهرستان‌های شفت و فومن بین کانال فومن، رودخانه پسیخان (شاخه چوبر)، رودخانه شاخزر (شاخه گشت رودخانه) و کانال پسیخان در پهنه جغرافیایی ۲۰۷۰۰ هکتار گسترش دارد. واحد مذکور در بین طول‌های جغرافیایی ۴۹

2 . Fusion using by Auxiliary Data
3 . Fusion using by Global Mean Auxiliary Data
4 . Fusion using by Global Mean Auxiliary Data

1. semi-physical fusion

دو تصویر مودیس به دست آمده در همان تاریخهای لندست ۵ است. در این بررسی بیشترین سعی در کسب تصاویر با کمترین پوشش ابر و تفاوت زمانی صورت گرفت.

که باندهای لندست ۷ و لندست ۵ و باندهای متناظر مودیس در جدول ۲ نشان داده شده است. تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق شامل دو تصویر لندست ۵ (۱۶ تیر ۱۳۹۰ و ۱ مرداد ۱۳۹۰)، یک تصویر لندست ۷ (۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۱) و



شکل ۱- نمایی از محدوده مورد مطالعه در استان گیلان

جدول ۱- مشخصات تصاویر لندست و مودیس مورد استفاده برای بررسی روش‌های ترکیبی و روش‌های درون‌یابی

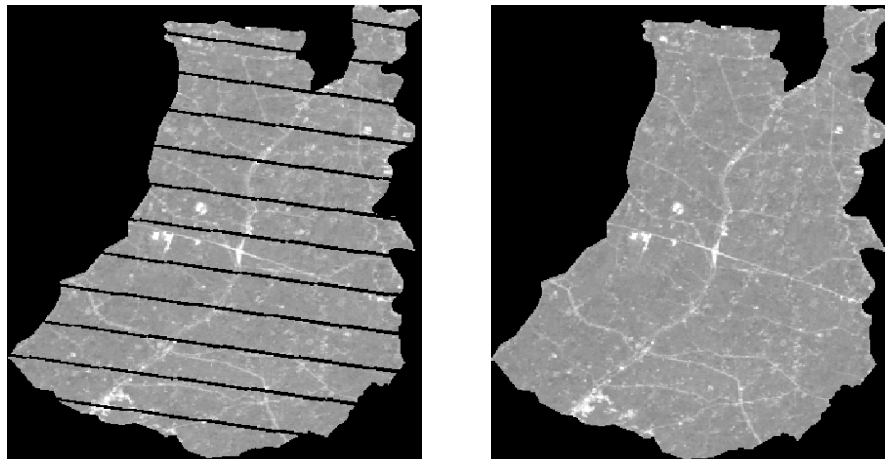
تاریخ گذر ماهواره		سطح محصولات		تصاویر مورد استفاده		روش اصلاح تصویر
مودیس	لندست	مودیس	لندست	مودیس	لندست	
۱۳۹۰/۰۴/۱۶	۱۳۹۰/۰۴/۱۶	L1 mod02qkm	L1 GB	Mod02 ⁷	TM	FAD
۱۳۹۰/۰۵/۰۱	۱۳۹۰/۰۵/۰۱	L1 mod02qkm	L1 GB	Mod02	ETM+	
۱۳۹۰/۰۴/۱۶	۱۳۹۰/۰۴/۱۶	L1 mod02qkm	L1 GB	Mod02	TM	FGMAD
۱۳۹۰/۰۵/۰۱	۱۳۹۰/۰۵/۰۱	L1 mod02qkm	L1 GB	Mod02	ETM+	
۱۳۹۰/۰۴/۱۶	۱۳۹۰/۰۴/۱۶	L1 mod02qkm	L1 GB	Mod02	TM	FDCAD
۱۳۹۰/۰۵/۰۱	۱۳۹۰/۰۵/۰۱	L1 mod02qkm	L1 GB	Mod02	ETM+	
-	۱۳۹۰/۰۴/۱۶	-	L1 GB	-	TM	درون‌یابی کریجینگ
-	۱۳۹۰/۰۴/۱۶	-	L1 GB	-	TM	درون‌یابی IDW

* Mod02: Level-1B Calibrated Geolocation Data Set

*مقادیر path/row تصاویر لندست مورد استفاده P166/R034 است.
*مقادیر MODIS Tile ID تصاویر مودیس مورد استفاده h21v05 است.

جدول ۲- مشخصات باندهای لندست ۷ ETM+، لندست ۵ TM و ۲ باند متناظر مودیس (شماره باند در پرانتز آمده است)

تاریخ دریافت تصویر	تفکیک مکانی (m)	طول موج (μm)	لندست
۱۳۹۱/۰۲/۲۵	۳۰	(۳) ۰/۶۳-۰/۶۹	لندست ۷ ETM+
	۳۰	(۴) ۰/۷۸-۰/۹	
۱۳۹۰/۰۴/۱۶	۳۰	(۳) ۰/۶۳-۰/۶۹	لندست ۵ TM
۱۳۹۰/۰۵/۰۱	۳۰	(۴) ۰/۷۶-۰/۹۰	
۱۳۹۰/۰۴/۱۶	۲۵۰	(۱) ۰/۶۲-۰/۶۷	مودیس
۱۳۹۰/۰۵/۰۱	۲۵۰	(۲) ۰/۸۴-۰/۸۷	



شکل ۲- ترکیب باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک تصویر لندست TM برای شبیه‌سازی مطالعاتی الف) تصویر 11M بدست آمده در ۱۶ تیر ۱۳۹۰، ب) شبیه‌سازی شکاف‌های فاقد داده با استفاده از ماسک گپ از یک تصویر SLC-off ETM+ در ۱۳۹۱/۲/۲۵ (t₃)

رابطه (۳) تعریف شد.

(رابطه ۳)

$$\rho(b_3, t_1)_{TM} = \frac{\rho(b_3, t_2)_{TM}}{\rho(b_1, t_2)_{MODIS}} \times \rho(b_1, t_1)_{MODIS}$$

$$\rho(b_4, t_1)_{TM} = \frac{\rho(b_4, t_2)_{TM}}{\rho(b_2, t_2)_{MODIS}} \times \rho(b_2, t_1)_{MODIS}$$

که در روش FAD، $\rho(b_3, t_2)_{TM}$ و $\rho(b_4, t_2)_{TM}$ بازتاب لندست ۵ TM مدل شده به ترتیب برای باندهای ۳ و ۴ در زمان t_2 ، $\rho(b_3, t_1)_{TM}$ و $\rho(b_4, t_1)_{TM}$ بازتاب لندست ۵ TM به ترتیب برای باندهای ۳ و ۴ در زمان t_1 ، $\rho(b_1, t_2)_{MODIS}$ و $\rho(b_1, t_1)_{MODIS}$ بازتاب مودیس در باند ۱ در زمان t_1 و t_2 ، که متناظر با باندهای لندست، در زمان t_1 و t_2 است و $\rho(b_2, t_1)_{MODIS}$ و $\rho(b_2, t_2)_{MODIS}$ بازتاب مودیس در باند ۲ در زمان t_1 و t_2 ، که متناظر با باندهای لندست، در زمان t_1 و t_2 است. به منظور بالا بردن دقت محاسبات روابط (۴) به شکل روابط (۵) و (۳) بسط داده شد.

(رابطه ۴)

$$\rho(b_3, t_1)_{TM} = \frac{\rho(b_3, t_2)_{TM}}{GM(\rho(b_1, t_2)_{MODIS}) \times GM(\rho(b_1, t_1)_{MODIS})}$$

$$\rho(b_4, t_1)_{TM} = \frac{\rho(b_4, t_2)_{TM}}{GM(\rho(b_2, t_2)_{MODIS})} \times GM(\rho(b_2, t_1)_{MODIS})$$

$$\rho(b_3, c_K, t_1)_{TM} = \frac{\rho(b_3, c_K, t_2)_{TM}}{\rho(b_1, c_K, t_2)_{MODIS}} \times \rho(b_1, c_K, t_1)_{MODIS}$$

(رابطه ۵)

$$\rho(b_4, c_K, t_1)_{TM} = \frac{\rho(b_4, c_K, t_2)_{TM}}{\rho(b_2, c_K, t_2)_{MODIS}} \times \rho(b_2, c_K, t_1)_{MODIS}$$

در روش FGMAD رابطه (۴)، $GM(\rho(b_1, t_1)_{MODIS})$ و

در این مطالعه به منظور مقایسه مقادیر تخمین زده شده در پیکسل‌های فاقد داده با مقادیر داده‌های اصلی در این پیکسل‌ها، از یک تصویر لندست ۵ TM به دست آمده در ۱۶ تیر ۱۳۹۰ به عنوان تصویر لندست ۵ SLC-off با شکاف‌های اسکن نشده، شبیه‌سازی شد (شکل ۲). این شکاف‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از ماسک شکاف^۱ از یک تصویر لندست ۷ SLC-off ETM+ در دسترس، در زمان دیگری (۱۳۹۱/۲/۲۵) که با نام t_3 نام‌گذاری شده، تولید شد و تصویر شبیه‌سازی شده به عنوان تصویر SLC-off هدف (شکل ۲-ب) استفاده شد.

روش‌های ترکیبی

در این مطالعه به منظور استخراج شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی، دو باند قرمز (۰/۶۳-۰/۶۹ μm) و مادون قرمز نزدیک (۰/۷۸-۰/۹ μm) برای پر کردن شکاف‌ها در تصاویر لندست انتخاب شدند. به دلیل متناظر بودن طول موج باندهای ۱ و ۲ مودیس با باندهای ۳ و ۴ لندست، از این دو باند در محاسبات استفاده شد (جدول ۲). در مرحله بعد جهت کاهش خطای تطبیق با تصویر لندست، محصول MOD02qkm ۲۵۰ متری با بازسازی نزدیک‌ترین همسایه^۲ به تولید ابعاد پیکسل خروجی ۳۰ متر پرداخته شد. تاریخ ۱۶ تیر ۱۳۹۰ به عنوان زمان t_1 و تاریخ ۱ مرداد ۱۳۹۰ به عنوان زمان t_2 در نظر گرفته شد و پیش‌بینی بازتاب لندست در زمان t_1 از مشاهدات تصاویر کمکی لندست در زمان t_2 و مودیس در زمان t_1 و t_2 به صورت

1. Gap
2. Nearest neighbor resampling

اندازه‌گیری شده در نقطه i ، d_i فاصله بین Z_i و m توان وزنی است که تعیین کننده نرخ اثر d_i است و به‌طور معمول بین ۱ تا ۵ تغییر می‌کند.

روش کریجینگ

تکنیک‌های زمین آماری برای داده‌های مکانی با استفاده از اطلاعات همبستگی مکانی برای پیش‌بینی مقادیر گم‌شده تصاویر ETM+ SLC-off نیز طراحی شده‌اند (شکل ۴). در روش‌های زمین‌آماری، واریوگرام بیان‌کننده ساختار مکانی یک متغیر است. به منظور محاسبه واریوگرام از رابطه (۷) استفاده می‌شود. در این مطالعه به منظور برازش واریوگرام از مدل کروی استفاده شد.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن $\gamma(h)$ مقدار واریوگرام برای جفت نقاطی که به فاصله h از یکدیگر قرار دارند، $N(h)$ تعداد زوج نقاطی که در یک امتداد معین و در فاصله‌ای به اندازه h از هم قرار دارند، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر Z در موقعیت x_i و $Z(x_i+h)$ مقدار مشاهده شده متغیر Z در موقعیت x_i+h است.

روش کریجینگ معمولی^۴ از معروف‌ترین انواع کریجینگ است که در آن مقادیر متغیر در نقاط فاقد آمار بر اساس میانگین‌گیری متحرک وزنی خطی از مقادیر متغیر در نقاط معلوم برآورد می‌شوند. رابطه (۸)، برآورد کننده کریجینگ معمولی را به‌صورت یک جمع خطی وزن‌دار نشان می‌دهد که هدف یافتن وزن‌های آماری نمونه‌ها است به‌طوری که علاوه بر ناریب بودن برآورد، واریانس برآورد نیز حداقل گردد.

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در این رابطه $Z(x_0)$ برآورد آماری از متغیر مورد نظر و λ_i وزن آماری اختصاص داده شده به نمونه i است. N تعداد نمونه‌های قرار گرفته در همسایگی نقطه مورد نظر است.

معیارهای ارزیابی خطا

در فرآیند ارزیابی، نقشه ضریب گیاهی برآورد شده با استفاده از تصویر لندست ۵ در تاریخ ۱۶ تیر ۱۳۹۰ که ماسک شکاف روی آن اعمال نشده بود به‌عنوان تصویر اصلی و با بهره‌گیری از رابطه (۱) تهیه شد و با نقشه‌های ضریب گیاهی تهیه شده از روش‌های مذکور از نظر آماری مقایسه شد. به منظور ارزیابی نتایج از معیار ریشه نرمال میانگین مربعات خطا مطابق رابطه (۸)

میانگین کل^۱ بازتاب مودیس در باند ۱ در زمان t_1 و t_2 و $GM(\rho(b_2, t_2)_{MODIS})$ و $GM(\rho(b_2, t_1)_{MODIS})$ میانگین کل^۲ بازتاب مودیس در باند ۲ در زمان t_1 و t_2 است. در روش FDCAD رابطه (۵)، $\rho(b, c_k, t_1)$ و $\rho(b, c_k, t_2)$ میزان بازتاب در کلاس k در باندهای متناظر در زمان t_1 و t_2 است. در رابطه (۵) تصاویر ETM+ به ۵ کلاس با روش طبقه‌بندی نظارت نشده^۳ طبقه‌بندی شدند تا میزان بازتاب در هر یک از ۵ کلاس تخمین زده شود که در شکل ۲-۳ روند انجام محاسبات به-صورت فلوجارت آمده است.

روش‌های درون‌یابی مبتنی بر GIS

روش‌های درون‌یابی (Interpolation) مجموعه‌ای از مدل‌های مختلف ریاضی و آماری را برای پیش‌بینی مقادیر نامعلوم به‌کار می‌گیرند. آنچه مسلم است شباهت نقاط مجهول به نزدیک‌ترین نقاط معلوم یا اصل نزدیکترین همسایه است که پایه روش‌های درون‌یابی است و این که چگونه این اصل مورد استفاده قرار می‌گیرد بستگی به مدل انتخابی دارد که جزئیات آن شرح داده می‌شود. در یک دسته‌بندی کلی روش‌های درون‌یابی به دو رده بزرگ تقسیم می‌شوند: روش‌های درون‌یابی جبری یا قطعی و روش‌های درون‌یابی زمین آماری. درون‌یابی جبری بر نقاط اندازه‌گیری شده متکی است و برای درون‌یابی از توابع ریاضی استفاده می‌کند. علم زمین آمار نیز از آمارها در علوم مربوط به زمین مانند زمین‌شناسی و جغرافیا استفاده می‌کند به بیانی دیگر علم آمار مکانی است.

روش وزن‌دهی عکس فاصله (Inverse Distance Weighting, IDW)

روش درون‌یابی IDW بر این فرض استوار است که تاثیر پدیده مورد نظر با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. درون‌یابی در این شیوه به این ترتیب برآورد می‌شود که محدوده مورد نظر تبدیل به ماتریسی با سلول‌های هم‌اندازه می‌شود. در این شبکه مقدار متغیر در سلول‌هایی معلوم است یا به عبارتی اندازه‌گیری شده است و در سایر سلول‌ها نامعلوم است. مقدار متغیر در نقاط نامعلوم با استفاده از رابطه (۶) قابل محاسبه است است (Pirmoradian et al., 2010).

$$Z = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i / d_i^m)}{\sum_{i=1}^N (1 / d_i^m)} \right] \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن Z مقدار برآورد شده متغیر نامعلوم، Z_i مقدار

1. Global Mean
2. Global Mean
3. Unsupervised

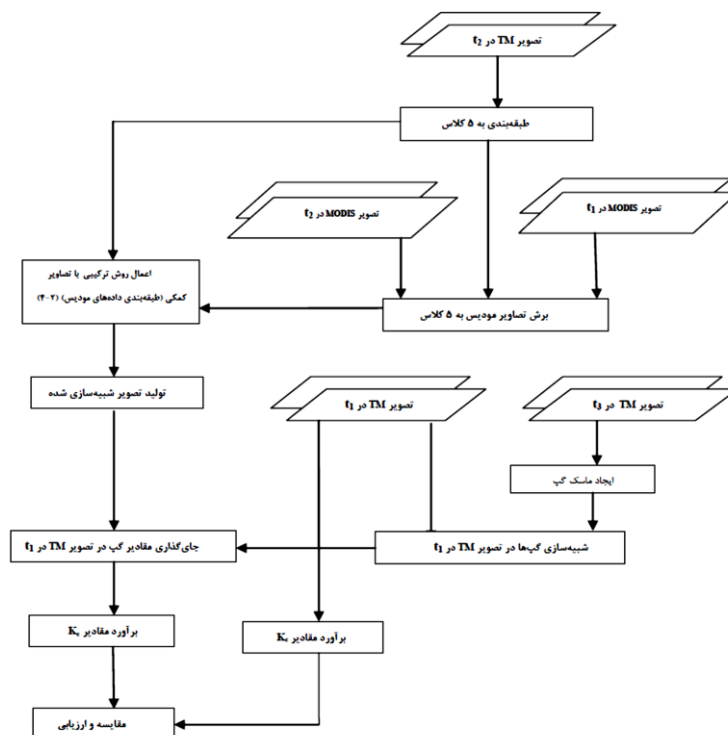
4. Ordinary kriging

شبیه‌سازی شده و n تعداد کل داده است. مقایسه داده‌ها برای تمام پیکسل‌های تحت تخمین انجام شد. لازم به ذکر است که مقدار NRMSE کم‌تر ۱۰ درصد نشان دهنده درجه دقت عالی، بین ۲۰-۳۰ درصد درجه دقت مناسب، بین ۳۰-۴۰ درصد درجه دقت متوسط و بیش از ۴۰ درصد بیان‌گر ضعیف بودن برآوردها است.

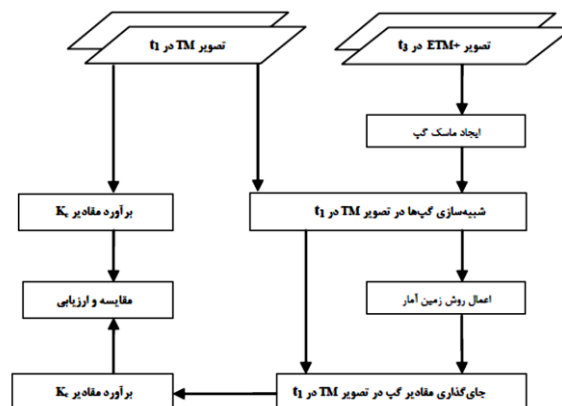
استفاده شد. لازم به ذکر است که با توجه به تک کشتی بودن منطقه، محدوده شالیزارهای منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه کاربری اراضی جدا شد و مقایسه داده‌ها اختصاصاً برای گیاه برنج صورت گرفت.

$$\text{NRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (x_0 - x_s)^2}{n}}}{\bar{x}_0} \times 100 \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن x_0 مقادیر داده‌های اصلی، x_s مقادیر داده‌های



شکل ۳- فلوجارت روش FDCAD برای پر کردن شکاف‌های فاقد داده در تصویر SLC-off



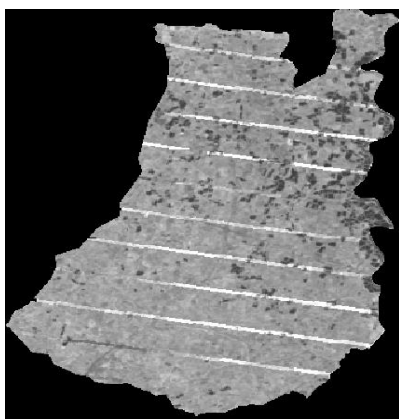
شکل ۴- فلوجارت روش‌های درون‌یابی مبتنی بر GIS برای پر کردن شکاف‌های فاقد داده در تصویر SLC-off

ترتیب در شکل ۵-الف و ۵-ب نشان داده شده است. در تصویر نهایی در نتایج پرشدگی حاصل از روش FAD برای هر دو باند ۳ و ۴ هاشورهای روشن مشاهده شد. ترکیب باندهای ۳ و ۴ در

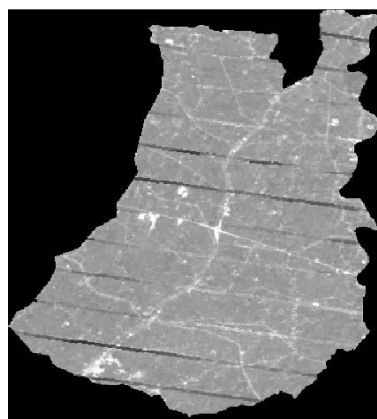
نتایج و بحث
تصاویر بازسازی پیکسل‌های اسکن نشده تصویر در تاریخ ۱۳۹۰/۴/۱۶ با استفاده از روش FAD برای دو باند ۳ و ۴ به-

نتایج حاصل از پرشدگی را در مقایسه با روش‌هایی مانند تطبیق هیستوگرام خطی محلی (USGS) بهبود داده است (Pringle *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2009). همچنین (Abdoljabbar *et al.*, 2014) روش‌های درون‌یابی زمین آمار را برای بسیاری از برنامه‌های کاربردی، در مقیاس بزرگ منطقه که در آن تغییرات سریع فصلی صورت می‌گیرد مناسب شمردند.

بازسازی پیکسل‌های اسکن نشده تصویر در تاریخ ۱۳۹۰/۴/۱۶ با استفاده از روش‌های درون‌یابی IDW و کریجینگ معمولی به- ترتیب در شکل ۶-الف و ۶-ب ارائه شده است. با این حال هنوز هم برخی از الگوهای خط‌کشی‌های بصری در نتایج پر شدگی ناشی از اثرات هموارسازی در شکل‌های ۶ مشاهده می‌شود. مطالعات موردی نشان داده‌اند که روش‌های زمین آماری دقت

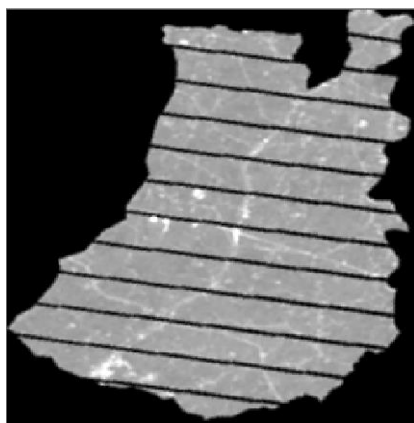


ب

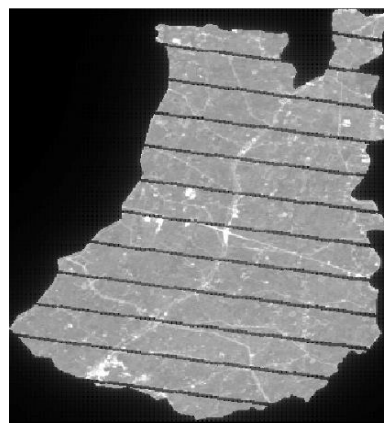


الف

شکل ۵- بازسازی پیکسل‌های اسکن نشده تصویر در تاریخ ۱۳۹۰/۴/۱۶ با استفاده از روش FAD در باندهای ۳ (الف) و ۴ (ب)



ب



الف

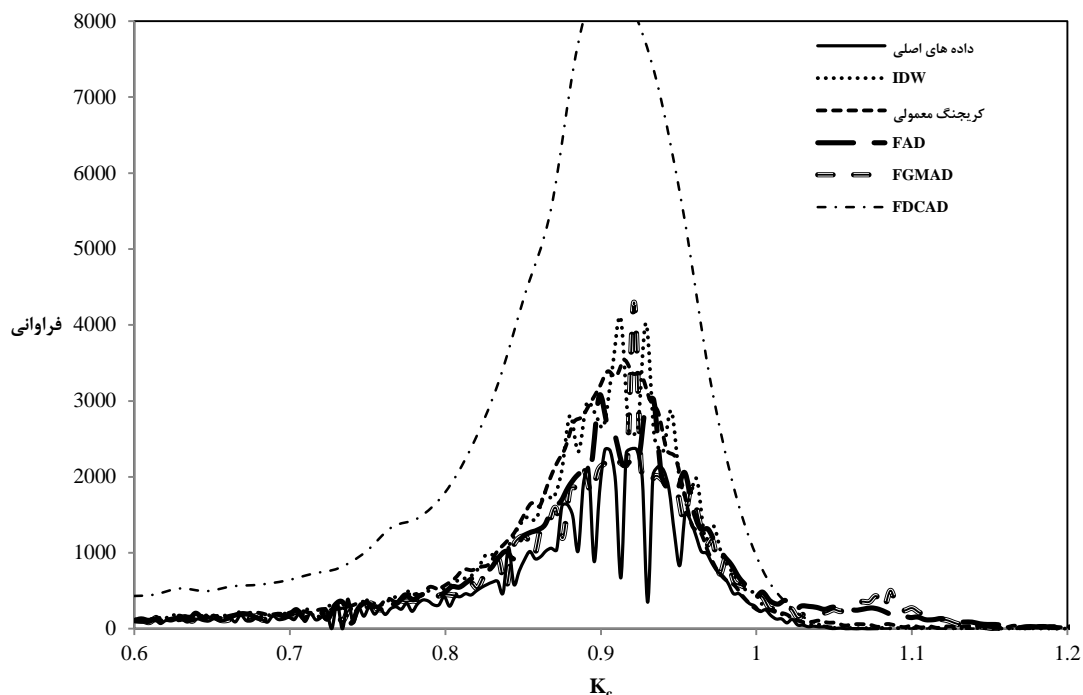
شکل ۶- ترکیب باندهای ۳ و ۴ در بازسازی پیکسل‌های اسکن نشده تصویر در تاریخ ۱۳۹۰/۴/۱۶ با استفاده از روش‌های درون‌یابی IDW (الف) و کریجینگ معمولی (ب)

۰/۸ تا ۰/۹۵ مشاهده می‌گردد که با نرمال‌سازی مقادیر NDVI نیز باز این ناهمواری مشاهده شد. این موضوع می‌تواند نشأت گرفته از به وجود آمدن خطا در حین جدا کردن مزارع از جنگل‌ها و وجود ابر و آلودگی‌های اتمسفری باشد. توزیع فراوانی روش‌های درون‌یابی، به‌خصوص روش کریجینگ معمولی نشان

توزیع فراوانی مقادیر به دست آمده ضریب گیاهی با استفاده از ۵ روش ذکر شده برای منطقه مورد مطالعه و در تاریخ ۱۳۹۰/۴/۱۶ مورد بررسی و در شکل ۷ نشان داده شده است. در این ارزیابی در مقادیر ضریب گیاهی تصویر اصلی (تصویر لندست ۵ بدون شکاف) ناهمواری زیادی در محدوده

روش‌های FGMAD و FAD مقادیری نزدیک‌تر به مقادیر K_c استخراج شده از تصویر اصلی لندست ۵ TM در تاریخ ۱۶ تیر ۱۳۹۰ نسبت به روش FDCAD به دست آمد.

داد که قادر به شبیه‌سازی داده‌هایی هموارتر نسبت به سایر روش‌ها خواهد بود که می‌تواند یکی از مزیت‌های اصلی این روش تلقی شود. همچنین با توجه به شکل ۷ مقادیر K_c در



شکل ۷- توزیع فراوانی مقادیر به دست آمده K_c با استفاده از روش‌های FAD و روش‌های IDW و کریجینگ معمولی و تصویر اصلی لندست ۵ TM

حداقل ابر هستند، با این وجود چون باند ۱ مودیس در ناحیه نور مرئی (visible) قرار می‌گیرد نسبت به باندهای دیگر بیش‌تر تحت تاثیر بازتاب ناشی از مواد معلق اتمسفری قرار می‌گیرد که باعث برآورد مقادیر بالایی شده است. روش ترکیبی توسعه یافته ممکن است به‌طور بالقوه برای ETM+ ابری و پر کردن گپ SLC-off و برای نرمال‌سازی رادئومتری مورد نیاز برای تولید محصولات بدون درز موزاییک مناطق بزرگ استفاده شود (Roy *et al.*, 2008). از مزایای خاص این روش این است که نیازی به پارامترهای تنظیم ندارد و براساس هر پیکسل اعمال می‌شود و تحت تاثیر پیکسل‌های گم‌شده یا پیکسل‌های آلوده همسایه در لندست قرار نمی‌گیرد و این باعث پیشرفت‌هایی در آینده خواهد شد.

نقشه توزیع مکانی مقادیر NDVI در تصاویر پر شده با استفاده از روش درون‌یابی IDW و نیز توزیع مکانی K_c به دست آمده از رابطه خطی K_c -VI برای تمام شالیزارهای موجود در بخش شرقی واحد عمرانی F_1 به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. روند تغییرات مکانی ضریب گیاهی مشاهده شده در منطقه در تاریخ مورد بررسی به دلیل متغیر بودن

مقادیر معیارهای آماری شامل میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل K_c استخراج شده بر مبنای تصویر اصلی مربوط به تاریخ ۱۳۹۰/۴/۱۶ و نیز تصاویر شبیه‌سازی شده لندست ۵ در همان تاریخ برای سه روش FAD، FGMAD و FDCAD و دو روش درون‌یابی IDW و کریجینگ معمولی در جدول ۳ ارائه شده است. به منظور ارزیابی نتایج و انتخاب روش برتر، مقادیر ریشه نرمال میانگین مربعات خطا (NRMSE) با تبدیل داده‌های رستری^۱ به نقطه^۲ و برای تمام نقاط برآورد در محیط اکسل محاسبه شد. نتایج نشان داد روش IDW با مقدار NRMSE برابر ۶/۰۸ درصد و با درجه دقت عالی، برآورد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است. به ترتیب روش FGMAD و روش FAD با NRMSE برابر ۱۴/۷۵ و ۱۴/۹۷ درصد، دارای درجه دقت خوب بودند. با مقایسه پیکسل‌های متناظر در دو تصویر مودیس مورد استفاده، مقادیر بازتاب مودیس در باند ۱ در زمان t_2 به‌طور قابل توجهی بیش‌تر از مقادیر بازتاب مودیس در زمان t_1 مشاهده شد. در این مطالعه تصاویر اخذ شده دارای

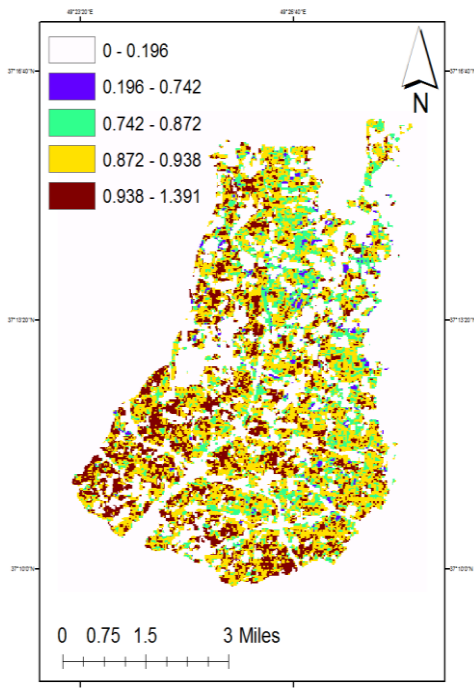
1. Raster
2. Point

۰/۶۷ و بیشترین فراوانی مقادیر K_c بین ۰/۸ تا ۱/۳ به دست آمده و مقادیر قابل قبولی را نشان می‌دهد.

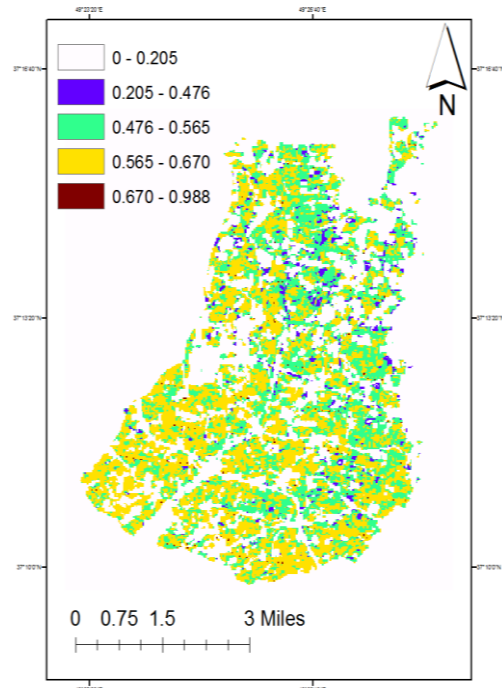
تاریخ‌های کشت برنج در منطقه از توزیع خاصی پیروی نمی‌کند. تاریخ ۱۶ تیر به طور تقریبی مصادف با دوره میانی رشد برنج در منطقه است که بیشترین فراوانی مقادیر NDVI بین ۰/۴۷ تا

جدول ۳- شاخص‌های آماری نقشه‌های K_c و معیار NRMSE در ارزیابی روش‌های پر کردن شکاف تصاویر SLC-off ETM+

روش‌های پر کردن شکاف و تصویر اصلی TM	میانگین	انحراف معیار	حداکثر	حداقل	NRMSE (%)
تصویر اصلی TM	۰/۵۳۲	۰/۴۳۳	۱/۰۸۱	.	.
FAD	۰/۵۴۳	۰/۴۴۲	۱/۲۷۸	.	۱۴/۹۷
FGMAD	۰/۵۴۴	۰/۴۴۲	۱/۱۷۳	.	۱۴/۷۵
FDCAD	۰/۵۰۱	۰/۴۳۸	۱/۵۸۴	.	۳۵/۲۱
IDW	۰/۵۳۴	۰/۴۳۵	۱/۳۹	.	۶/۰۸
کریجینگ معمولی	۰/۵۳۹	۰/۴۳۹	۱/۳۹۴	.	۱۶/۹۰



شکل ۹- نقشه توزیع مقادیر K_c به دست آمده در تصاویر پر شده توسط درون‌یابی IDW در بخش شرقی واحد عمرانی F₁ در ۱۳۹۰/۴/۱۶



شکل ۸- نقشه توزیع مقادیر NDVI به دست آمده در تصاویر پر شده توسط درون‌یابی IDW در بخش شرقی واحد عمرانی F₁ در ۱۳۹۰/۴/۱۶

رسیده به سنجنده مربوط به اتمسفر خواهد بود. از آنجا که باند ۱ مودیس در ناحیه نور مرئی قرار دارد، نسبت به باندهای دیگر مودیس بیشتر تحت تاثیر آلودگی قرار گرفته و این بر دقت شبیه‌سازی تاثیر گذاشته و این تاثیر در تصویر با هاشورهای نمایان شده است.

با توجه به این که در تصاویر SLC-off ETM+ پیکسل-های فاقد داده به طور کامل در میان اسکن‌های به دست آمده در تاریخ‌های مختلف یکسان نبوده و همپوشانی ندارند، تصاویر در یک تاریخ مشخص می‌توانند به عنوان تصاویر ورودی برای پر کردن شکاف در تصاویر SLC-off ETM+ در تاریخی دیگر

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که در ترمیم تصاویر SLC-off، روش IDW با مقدار NRMSE برابر ۶/۰۹ درصد دقیق‌ترین مدل و روش FDCAD با NRMSE برابر ۳۵/۲۱ درصد ضعیف‌ترین نتیجه را حاصل کرد. از دلایل پایین بودن دقت برآوردها در روش FAD را می‌توان زیاد بودن اختلاف مقادیر بازتابش مودیس در زمان t_2 نسبت به مقادیر بازتابش مودیس در زمان t_1 در باند ۱ دانست. با وجود ذرات معلق در اتمسفر، طول موج‌های کوتاه بیشتر تحت تاثیر قرار می‌گیرند و در اتمسفر منتشر یا پخش می‌شوند. در نتیجه علاوه بر بازتاب‌های سطح زمین، بخشی از بازتاب‌های

است که نیازی به پارامترهای تنظیم ندارد و براساس هر پیکسل اعمال می‌شود و تحت تاثیر پیکسل‌های گم شده یا پیکسل‌های آلوده همسایه در لندست قرار نمی‌گیرد و این باعث پیشرفت‌هایی در آینده می‌شود. عمدتاً به دلیل فراوانی و سهولت دسترسی تصاویر، مودیس شانس زیادی برای بازیابی تصاویر ETM+ SLC-off دارد.

استفاده شوند. روش ترکیبی توسعه یافته در این تحقیق که برای پیش‌بینی بازتاب TM ارائه شده است، می‌تواند به‌طور بالقوه برای ETM+ ابری و پر کردن شکاف SLC-off و برای نرمال‌سازی رادیومتری مورد نیاز برای تولید محصولات بدون درز موزاییک مناطق بزرگ و یا برای هر داده ماهواره‌ای با رزولوشن مکانی بالا استفاده شود. از مزایای خاص این روش این

REFERENCES

- Abdoul Jabar, A.S., Sulang, G. and George, L.E. (2014). Survey on gap filling algorithms in Landsat 7 ETM+ images. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 63, 136-146.
- Ahadnezhad Rooshti, M. (2011). Provide an algorithm to reconstruct the defect images of not working Scan Line Corrector (SLC) Landsat 7 ETM+ and its use in the preparation of land use and land cover maps, a Case Study of Znan. *Geography and Development*. 22, 23-38.
- Alexandridis, T.K., Cherif, I., Kalogeropoulos, C., Monachou, S., Eskridge, K. and Silleos, N. (2013). Rapid error assessment for quantitative estimations from Landsat 7 gap-filled images. *Remote Sens*. 9, 920-928.
- Ali S. M and Mohammed M. J (2013) Gap-filling restoration methods for ETM+ sensor images. *Iraqi Journal of Science*. 54, 206-214.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Bédard, F., Reichert, G., Dobbins, R. and Trépanier, I. (2008). Evaluation of segment-based gap-filled Landsat ETM+ SLC-off satellite data for land cover classification in southern Saskatchewan, Canada. *International Journal of Remote Sensing*. 29, 2041-2054.
- Belmonte, A.C., Jochum, A.M., Garcia, A.C., Rodriguez, A.M. and Fuster, P.L. (2005). Irrigation management from space: Towards user-friendly products. *Irrigation and Drainage Systems*. 19, 337-353.
- Bolorani, A.D., Erasmi, S. and Kappas, M. (2008). Multi-source remotely sensed data combination: projection transformation gap-fill procedure. *Sensors*. 8, 4429-4440.
- Byrne, G.F., Crapper, P.F. and Mayo, K.K. (1980). Monitoring land-cover change by principal component analysis of multi-temporal Landsat data. *Remote Sensing of Environment*. 10, 175-184.
- Chen, F., Tang, L. and Qiu, Q. (2010). Exploitation of CBERS-02B as auxiliary data in recovering the Landsat 7 ETM+ SLC-off image. 18TH international conference, Beijing. 1-6.
- Chen, J., Zhu, X., Vogelmann, J.E., Gao, F. and Jin, S. (2011). A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *Remote Sensing of Environment*. 115, 1053-1064.
- Fisher, J.I., Mustard, J.F. and Vadeboncoeur, M.A. (2006). Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment*. 100, 265-279.
- Fuller, R.M., Groom, G.B. and Jones, A.R. (1994). The land-cover map of Great-Britain —An automated classification of Landsat Thematic Mapper data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 60, 553-562.
- Gao, F., Masek, J., Hall, J. and Schwaller, S. (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.
- Goward, S.N., Arvidson, T.J., Faundeen, F., Williams, D.L., Irons, D.L. and Franks, S. (2006). Historical record of Landsat global coverage: Mission operations, NSLRSDA, and international cooperator stations. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 72(10), 1155-1169.
- Hu, W., Li, M., Liu, Y., Huang, Q. and Mao, K. (2011). A new method of restoring ETM + SLC-off images based on multi-temporal images. 19TH international conference, Shanghai. 1-4.
- Ju, J.C. and Roy, D.P. (2008). The availability of cloud-free Landsat ETM plus data over the conterminous United States and globally. *Remote Sensing of Environment*. 112, 1196-1211.
- Masek, J.G., Huang, C.Q., Wolfe, R., Cohen, W., Hall F. and Kutler, J. (2008). North American forest disturbance mapped from a decadal Landsat record. *Remote Sensing of Environment*. 112: 2914-2926.
- Maxwell, S. (2004). Filling landsat ETM+ SLC-off gaps using a segmentation model approach. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 1109-1111.
- Maxwell, S. K., Schmidt, G.L. and Storey, J.C. (2007). A multi-scale segmentation approach to filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *International Journal of Remote Sensing*. 28, 5339-5356.
- Mohammady, M., Moradi, H.R., Zeinivand, H., Temme, A.J.A.M., Pourghasemi, H.R. and Alizadeh, H. (2013). Validating gap-filling of Landsat ETM+ satellite images in the Golestan Province, Iran. *Arabian Journal Geosciences*. 7,

- 3633-3638.
- Liu, D. and Cai S. (2011). A spatial-temporal modeling approach to reconstructing land-cover change trajectories from multi-temporal satellite imagery. *Annals of the Association of American Geographers*. [http:// dx. doi. org/ 10. 1080/ 00045608. 2011.596357](http://dx.doi.org/10.1080/00045608.2011.596357).
- Pirmoradian N., Rezaei, M. Davatgar, N. Tajdari, K. and Abolpour, B. (2010). Comparing of interpolation methods in rice cultivation vulnerability mapping due to groundwater quality in Guilan, north of Iran. *International Conference on Environmental Engineering and Applications (ICEEA)*, Singapore, 10-12 September.
- Pringle, M.J., Schmidt, S. and Muir, J.S. (2009). Geostatistical interpolation of SLC-off Landsat ETM+ images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 64, 654–664.
- Reza, M.M. and Ali, S.N. (2008). Using IRS products to recover landsat 7 ETM+ Defective Images. *American Journal of Applied Sciences*. 5, 618-625.
- Roy, D.P., Ju, J., Lewis, P., Schaaf, C., Gao, F., Hansen, M. and 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, 3112–3130.
- Storey, J., Engineer, P.S. and Falls, S. (2005). Landsat 7 scan line corrector-off gap-filled product development. *Global Priorities in Land Remote Sensing*. 1-13.
- USGS 2012 Landsat 5 suspension of operations extended. Available online at [http:// www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=3109](http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=3109) (accessed on March 25, 2012).
- USGS & NASA. (2013). SLC-off Gap-Filled Products Gap-fill Algorithm Methodology: Phase 2. October 2004. Gap-fill Algorithm, Available from [www. ga. gov. au/ servlet/ Big Obj File Manager? bigobjid=GA4861](http://www.ga.gov.au/servlet/BigObjFileManager?bigobjid=GA4861)(accessed on 2013).
- Xiaolin, Z., Desheng, L. and Chen, J. (2012). A new geostatistical approach for filling gaps in landsat ETM+ SLC-off images. *Remote Sensing of Environment*. 124, 49-60.
- Zhang, C., Li, W. and Travis, D. (2007). Gaps-fill of SLC-off Landsat ETM plus satellite image using a geostatistical approach. *International Journal of Remote Sensing*. 28, 5103–5122.
- Zeng, C., Shen, H. and Zhang, L. (2013). Recovering missing pixels for Landsat ETM+ SLC-off imagery using multi-temporal regression analysis and a regularization method. *Remote Sensing of Environment*. 131, 182–194.
- Zhu, X., Liu, D. and Chen, J. (2012). A new geostatistical approach for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *Remote Sensing of Environment*. 124, 49–60.