

مقایسه الگوریتم‌های ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مادیس به لندست ۸ به منظور برآورد تبخیر - تعرق

علی شمس‌الدینی*^۱، سارا نحوی^۲

۱- دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت: ۱۴۰۰/۴/۱۵ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۸

چکیده

در بسیاری از کاربردهای سنجش از دور در علوم زمین، تجزیه و تحلیل با صحت بالا، تنها با استفاده از تصاویری با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا امکان‌پذیر است. سنجنده مادیس بر خلاف قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا، قدرت تفکیک مکانی بسیار پایینی دارد. هدف این مطالعه، استفاده از الگوریتم‌های ریزمقیاس‌نمایی، به منظور ریزمقیاس‌کردن تصاویر مادیس به تصاویر لندست ۸ است. سپس تصاویر ریزمقیاس‌شده در برآورد تبخیر- تعرق واقعی، با استفاده از الگوریتم سبال در منطقه کشت و صنعت امیرکبیر مورد مقایسه قرار گرفته است. در این مطالعه از الگوریتم‌های STARFM، ESTARFM و Regression برای ریزمقیاس‌نمایی باندهای بازتابندگی و از الگوریتم‌های SADFAT، Regression و Cokriging برای ریزمقیاس‌نمایی باندهای حرارتی استفاده شده است. سپس تصاویر ریزمقیاس‌شده بازتابندگی و حرارتی، به منظور استفاده در مدل سبال، پردازش شد و تبخیر- تعرق واقعی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که در میان روش‌های ریزمقیاس‌نمایی اعمال‌شده بر باندهای بازتابندگی، STARFM با مجذور میانگین مربعات خطای ۰/۰۱۸۰ عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. در میان روش‌های اعمال‌شده بر باندهای حرارتی نیز الگوریتم SADFAT با مجذور میانگین مربعات خطای ۰/۰۲۲۴ عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. همچنین تبخیر- تعرق واقعی لحظه‌ای برآوردشده از خروجی روش‌های ریزمقیاس‌نمایی به ترتیب Regression/ ESTARFM، SADFAT/ ESTARFM، Regression/ STARFM و SADFAT/ STARFM با اختلاف کم و مجذور میانگین مربعات خطای



۰/۲۱۸ میلیمتر در ساعت بهترین عملکرد و روش Cokriging/ Regression با میانگین مربعات خطای ۰/۳۸۸ میلیمتر در ساعت، ضعیف‌ترین عملکرد را دارد.

واژه‌های کلیدی: ریزمقیاس‌نمایی، لندست ۸، مادیس، تبخیر- تعرق، کوکریجینگ، SADFAT، ESTARFM

۱- مقدمه

به دلیل محدودیت‌های فنی و مالی، نمی‌توان هم‌زمان توان تفکیک مکانی و زمانی بالایی برای تجهیزات سخت‌افزاری یک سنجنده فراهم کرد و همواره بین قدرت تفکیک مکانی و زمانی سنجنده‌ها تعادل وجود دارد. معمولاً قدرت تفکیک مکانی بالا در کنار قدرت تفکیک زمانی بالا برای یک سنجنده امکان‌پذیر نیست. سنجنده مادیس با وجود قدرت تفکیک زمانی بسیار بالایی که دارد و به طور روزانه برای هر ناحیه از زمین تصویر برداشت می‌کند، قدرت تفکیک مکانی بسیار پایینی دارد (قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر، ۵۰۰ متر و ۱ کیلومتر). در صورتی که سنجنده لندست، دارای قدرت تفکیک مکانی بالا (۳۰ متر برای باندهای چندطیفی و ۱۵ متر برای باند پانکروماتیک) و قدرت تفکیک زمانی پایین (۱۶ روزه) است (Zhang et al., 2013).

برای انجام مطالعاتی مانند برآورد تبخیر- تعرق، نیاز به دمای سطح زمین با توان تفکیک بالایی زمانی و مکانی است و برآورد تبخیر- تعرق واقعی با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا توسط سنجنده‌ای واحد ممکن نیست. از آنجا که قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا با یکدیگر به افزایش قابلیت اطمینان در تحلیل و استخراج اطلاعات از تصویر منجر می‌شود، بهترین راه غلبه بر این مشکل، ریزمقیاس کردن تصاویر با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا است.

ریزمقیاس‌نمایی فرآیندی است که تصاویر با قدرت تفکیک مکانی پایین را به تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا تبدیل می‌کند (Lee et al., 2014). تا کنون روش‌های متعددی برای ریزمقیاس‌نمایی ارائه شده است. این روش‌ها در باندهای بازتابندگی و حرارتی تصاویر ماهواره‌ای متفاوت است. گائو و همکاران^۱ (۲۰۰۶) جهت ادغام باندهای بازتابندگی تصاویر لندست در قدرت تفکیک مکانی بالا با تصاویر مادیس با قدرت تفکیک مکانی بالا، مدل تلفیق انعکاس تطبیقی زمانی و مکانی (STARFM)^۲ را ارائه داده‌اند. روش STARFM در مناطق همگن نتایج خوبی به همراه داشت؛ در حالی که در مناطق ناهمگن و با قطعات اراضی وسیع، پیکسل‌های مادیس مخلوط و ترکیبی از چند نوع پوشش است و منجر به کاهش صحت این روش در این

1. Gao et al.

2. spatial & temporal adaptive reflectance fusion model

مناطق شده است. اندرسون^۱ و همکاران (۲۰۱۰) از روش STARFM برای تخمین تبخیر- تعرق در قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده کرده‌اند. یکی از محدودیت‌های مدل مذکور این است که تأثیر پارامترهای زاویه تابش خورشید، زاویه دید سنجنده و ژئومتری سطح زمین در آن در نظر گرفته نمی‌شود. محدودیت دیگر این است که اگر تغییرات به وجود آمده در فاصله زمانی بین تصاویر متوالی لندست، در یکی از تصاویر مورد استفاده لندست ثبت نشود، با این روش نمی‌توان آن را در تصویر ریزمقیاس شده نشان داد. محدودیت بعدی که از موارد قبلی مهم‌تر است، اختلاط طیفی کاربری‌های گوناگون است. این روش برای پیکسل‌ها و محدوده‌های همگن توسعه یافته است که کاربری‌های یکسانی در پیکسل‌های مادیس و لندست دارد و در مناطق با کاربری‌های مختلف و نزدیک به هم، با خطا و چالش مواجه می‌شود (رحیم‌پور و همکاران، ۱۳۹۶). نتایج پژوهش رخس ماهپور و همکاران (۱۳۹۵) بیانگر این موضوع است که الگوریتم STARFM وابستگی بسیار شدیدی به یکنواختی ناحیه مورد مطالعه دارد و عدم یکنواختی و وجود تنوع زیاد در منطقه، می‌تواند نتایج حاصل از اعمال این الگوریتم را بسیار متأثر کند. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که صحت مراحل پیش‌پردازش و دیگر خطاها، به طور مستقیم بر نتایج الگوریتم مذکور تأثیرگذار است و هر چه ناحیه مورد بررسی همگن‌تر باشد، صحت نهایی افزایش خواهد یافت. همچنین عامل یکنواختی و همگنی، بسیار بیشتر از صحت روش‌های طبقه‌بندی تصویر تأثیرگذار است. به علاوه، دیگر عوامل خطا (مانند یکسان نبودن محدوده طیفی باندهای تصاویری که با هم ادغام می‌شود) منجر به کاهش صحت نتایج می‌شود. ژو و همکاران (۲۰۱۰) مدل ESTARFM^۲ را برای رفع کاستی‌های روش STARFM توسعه دادند. آن‌ها با استفاده از انعکاس مشاهده شده در دو زمان مختلف، ضریب تبدیل و اصلاح معادله وزن، صحت پیش‌بینی انعکاس در مناطق با پوشش ناهمگن را بهبود بخشیدند. در این الگوریتم با توجه به قدرت تفکیک مکانی پایین تصاویر مادیس و حضور پیکسل‌های مختلط، برای بهبود کارایی الگوریتم STARFM در ابتدا از یک طبقه‌بندی نظارت‌نشده جهت ادغام بازتابندگی سطح سنجنده‌های مادیس و لندست استفاده شده است (Zhu et al., 2010). املیانو و همکاران^۳ (۲۰۱۳) عملکرد دو روش ریزمقیاس‌نمایی ESTARFM و STARFM را ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که روش ESTARFM عملکرد بهتری در مناطق با تنوع مکانی مختلف، و روش STARFM نتیجه بهتری در مناطق با شرایط متنوع زمانی دارد. ونگ و

1. Anderson
2. enhanced spatial & temporal adaptive reflectance fusion model
3. Emelyanova et al.



همکاران^۱ (۲۰۱۴) روش ESTARFM را جهت پیش‌بینی رادیانس حرارتی و دمای سطح زمین با در نظر گرفتن چرخه سالانه دما و ناهمگونی سطح زمین بهبود بخشیدند و روش SADFAT^۲ را ارائه کردند. این روش دمای سطح زمین را به صورت روزانه با قدرت تفکیک مکانی لندست پیش‌بینی کرد و به طور قابل ملاحظه‌ای کاربرد دمای سطح زمین را توسعه داد. نتایج الگوریتم SADFAT حاکی از صحت خوب این روش در پیش‌بینی دما در سطح قدرت تفکیک مکانی لندست است. با وجود این، روش مذکور به سه تصویر مادیس متوالی و دو تصویر لندست نیاز دارد که کاربردهای این روش را محدود می‌کند. در مدل SADFAT ضریب تبدیل تغییرات رادیانس حرارتی پیکسل ناهمگن مادیس نسبت به پیکسل لندست تعیین می‌شود. به‌کارگیری این ضریب، صحت پیش‌بینی را در مناطق ناهمگن افزایش می‌دهد. با این حال روش مذکور محدودیت‌هایی دارد؛ برای مثال، ورودی این روش باید دو تصویر لندست و مادیس با شرایط زمان مشابه باشد، در حالی که امکان دسترسی به این داده‌ها در یک زمان، برای مناطقی با پوشش ابر زیاد سخت است. همچنین در صورتی که تغییرات دمای سطح زمین در پیکسل لندست یا مادیس دیده نشود، پیش‌بینی تغییرات با این روش امکان‌پذیر نیست. با این حال در نظر گرفتن مواردی در بهبود نتایج روش مؤثر خواهد بود؛ از جمله آنکه پنجره با توجه به همگن بودن منطقه انتخاب شود. از آنجا که نمی‌توان میزان تغییر رادیانس در دوره زمانی طولانی را ثابت فرض کرد، انتخاب تصاویر ورودی نزدیک به زمان پیش‌بینی، صحت روش را بهبود می‌بخشد. انتخاب تصاویر ورودی با پوشش یکسان در دو زمان، صحت روش را بالا می‌برد. طبقه‌بندی پوشش سطح زمین و اعمال این روش بر روی پوشش‌های مختلف و ارزیابی پیش‌بینی در هر نوع پوشش، عملکرد بهتر روش SADFAT را در پیش‌بینی دمای سطح در پوشش‌های مختلف نشان می‌دهد (محمدی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷).

برای پیکسل همگن تشکیل شده از یک پوشش زمینی در تصویر مادیس، تنها تفاوت‌های سیستماتیک، از جمله زمان اخذ داده، عرض باند، پارامترهای مداری، خطاهای زمین مکانی و اندازه پیکسل باعث ایجاد تفاوت رادیانس بین پیکسل تصاویر دو سنجنده می‌شود که تفاوت‌های سیستماتیک در انعکاس و رادیانس سطحی میان تصاویر سنجنده‌های مختلف و آنالیزها را به همراه دارد. بنابراین، داده‌های سنجنده‌های مختلف در زمان مشابه بعد از کالیبراسیون رادیومتریک، تصحیح هندسی و اتمسفری و هم‌بعدسازی با هم قابل مقایسه است، که در این حالت خطا و تفاوت بین پیکسل‌های دو سنجنده قابل محاسبه است (همان، ۱۳۹۷).

1. Weng et al.

2. spatio-temporal adaptive data fusion algorithm for temperature mapping

به دلیل پیچیدگی سطح زمین، بیشتر پیکسل‌ها در تصاویر مادیس از چند نوع پوشش زمین پوشیده شده است، که پیکسل ناهمگن نامیده می‌شود. تغییرات در رادیانس پیکسل ناهمگن بین دو زمان با جمع وزنی تغییرات رادیانس هر نوع پوشش زمین در پیکسل قابل محاسبه است و رادیانس پیکسل‌های ناهمگن با ترکیب خطی رادیانس پوشش‌های مختلف زمین در یک پیکسل و وزن‌دهی به وسیله درصد پوشش آن در هر پیکسل می‌تواند مدل‌سازی شود (Adams et al., 1986).

برای به دست آوردن تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، الگوریتم‌های متعددی ارائه شده است که از جمله می‌توان به الگوریتم‌های SEBAL (Bastiaansen, 2000)، SEBS (Su, 2002)، METRIC (Allen et al., 2007) و SSEBS (Senay et al., 2007) اشاره کرد. مطالعات زیادی که تا کنون در رابطه با محاسبه تبخیر- تعرق واقعی انجام شده است، عمدتاً نشان‌دهنده کارایی الگوریتم سبال در برآورد تبخیر- تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مختلف است (Bastiaansen, 2000؛ Hafeez et al., 2002؛ Bastiaansen et al., 2003؛ Ramosa et al., 2008؛ Li et al., 2008؛ Almahab & Busu, 2008). به همین خاطر در تحقیق حاضر برای محاسبه تبخیر- تعرق واقعی، از مدل سبال استفاده شد و محصولات حاصل از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی، به عنوان ورودی به این مدل داده شد. ارزیابی صحت مقادیر تبخیر- تعرق واقعی محاسبه‌شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نشان‌دهنده کارایی محصولات به دست آمده از روش‌های مختلف است. با توجه به مطالعات انجام‌شده در این زمینه، تا کنون مطالعه‌ای در رابطه با ترکیب باندهای حاصل از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی داده‌های حرارتی و داده‌های غیرحرارتی، جهت محاسبه تبخیر- تعرق واقعی صورت نگرفته است. در این مطالعه از الگوریتم‌های STARFM، ESTARFM و Regression جهت ریزمقیاس‌نمایی باندهای بازتابندگی و از الگوریتم SADFAT، Regression و Cokriging جهت ریزمقیاس‌نمایی باندهای حرارتی استفاده شده است و سپس با استفاده از ترکیب‌های مختلف محصولات حاصل از این روش‌ها، تبخیر- تعرق واقعی محاسبه شده و صحت نتایج، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- منطقه مورد مطالعه، داده‌های مورد استفاده و روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه (شکل ۱) کشت و صنعت امیرکبیر، واقع در جنوب استان خوزستان، یکی از هفت شرکت توسعه کشت نیشکر و صنایع جانبی، با طول و عرض جغرافیایی ۴۸.۲۸۷.۱۰۰ و ۳۱.۰۲۹.۶۹۶ درجه ("۴۸°۱۶'۵۲" شرقی و "۳۱°۰۱'۴۱" شمالی) است. کشت و صنعت



امیرکبیر در کیلومتر ۴۵ جاده اهواز- خرمشهر واقع شده است که از جنوب به کشت و صنعت میرزا کوچک‌خان محدود می‌شود و در شرق آن رودخانه بزرگ کارون قرار دارد. مساحت ناخالص اراضی این کشت و صنعت ۱۵ هزار هکتار و مساحت خالص آن ۱۲ هزار هکتار است که به چندین قطعه ۲۵ هکتاری تقسیم شده است.

در این تحقیق از تصاویر سنجنده مادیس که به روی ماهواره ترا قرار دارد و تصاویر سنجنده‌های OLI و TIRS ماهواره لندست ۸ استفاده شده است. اطلاعات تصاویر در جدول ۱ آمده است. شایان ذکر است که تصویر لندست زمان دوم به عنوان داده کمکی، جهت ارزیابی نتیجه شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

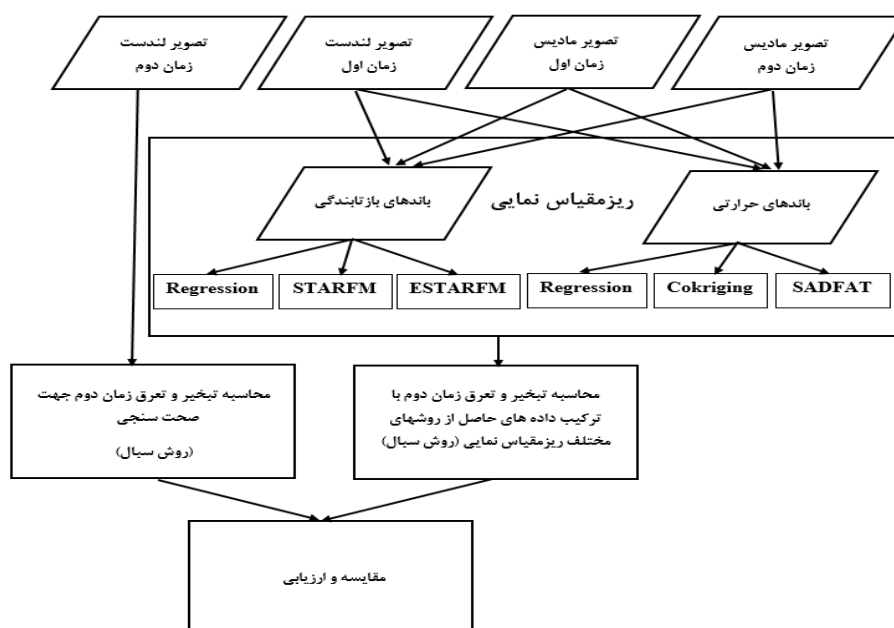


شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات تصاویر استفاده شده

| شماره روز | تاریخ تصویربرداری | سنجنده | ماهواره | عنوان |
|-----------|-------------------|----------|-----------|-------------|
| ۱۵۴ | ۲۰۲۰/۰۶/۰۲ | OLI_TIRS | LANDSAT 8 | تصویر لندست |
| ۱۷۰ | ۲۰۲۰/۰۶/۱۸ | | | |
| ۱۵۴ | ۲۰۲۰/۰۶/۰۲ | MODIS | Terra | تصویر مادیس |
| ۱۷۰ | ۲۰۲۰/۰۶/۱۸ | | | |

همان طور که در شکل ۲ آمده است، برای انجام این تحقیق ابتدا با استفاده از روش های مختلف ریزمقیاس نمایی، تصاویر مادیس به تصاویری با قدرت تفکیک مکانی لندست برای زمان دوم ریزمقیاس نمایی شده است. سپس با استفاده از تصاویر ریزمقیاس شده مادیس برای زمان دوم، مقادیر تبخیر- تعرق برای ترکیب های مختلف داده های ریزمقیاس شده با استفاده از روش سیال به دست آمد و نتایج با مقادیر تبخیر- تعرق حاصل از تصاویر لندست برای زمان دوم مقایسه و ارزیابی شده است.



شکل ۲- نمودار جریان تحقیق

۳- الگوریتم های ریزمقیاس نمایی

۳-۱- الگوریتم STARFM

الگوریتم STARFM که در سال ۲۰۰۶ ارائه شده است بر مبنای محاسبه وزن های مناسب پیکسل های همسایه، مقدار پیکسل مرکزی را در تصویر لندست زمان دوم پیش بینی می کند. بنابراین، الگوریتم فوق به صورت یک پنجره متحرک بر روی تصویر طبقه بندی شده لندست



زمان اول، حرکت کرده است و با توجه به تصاویر زمان اول و دوم مادیس و تصویر طبقه‌بندی‌شده لندست مربوط به زمان اول، اعمال خواهد شد (Gao et al., 2006).
الگوریتم فوق، بازتابندگی تصویر قدرت تفکیک مکانی بالا (لندست) را به صورت زیر پیش‌بینی می‌کند (ibid؛ رخس ماهپور، ۱۳۹۵؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۷):

$$L(x_i, y_j, t_0) = M(x_i, y_j, t_0) + L(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_k) \quad (1)$$

در اینجا L و M به ترتیب نشان‌دهنده بازتاب با تفکیک‌پذیری بالا (لندست) و بازتاب با تفکیک‌پذیری پایین (مادیس) است. t_0 و t_k زمان اخذ تصاویر مادیس و لندست و y_j و x_i ، موقعیت پیکسل در تصاویر است. رابطه مذکور برای پیکسل‌های همگن در تصویر مادیس، کاملاً منطقی خواهد بود. برای اطمینان از اینکه پیکسل‌های همسایه همگن است، تنها از پیکسل‌های طیفی مشابه (که به یک کلاس طیفی تعلق دارد) استفاده می‌شود. بنابراین یک تصویر لندست اولیه طبقه‌بندی‌شده با روش نظارت‌نشده مورد نیاز است تا بر اساس این تصویر، پیکسل‌هایی که از نظر طیفی مشابه یکدیگر هستند را شناسایی کرد.

جهت برآورد بازتابندگی لندست در مناطق ناهمگن، می‌توان از همسایه‌های همگن آن منطقه استفاده کرد، زیرا در همسایه‌های همگن، بازتابندگی مادیس و لندست یکسان است. بنابراین با توجه به مشخص بودن بازتابندگی مادیس، می‌توان بازتابندگی همسایه‌های همگن پیکسل مرکزی پنجره را نیز همان بازتابندگی مادیس در نظر گرفت. همچنین با وزن‌دهی به همسایه‌های همگن، میزان بازتابندگی برای یک پیکسل مشخص از تصویر لندست قابل پیش‌بینی است. در نتیجه اساس این فرآیند، یافتن پیکسل‌های همگن موجود در اطراف پیکسل مرکزی در تصویر لندست اولیه است. (رخس ماهپور، ۱۳۹۵). سپس جهت محاسبه باندهای بازتابندگی با استفاده از وزن‌های به‌دست‌آمده در داخل پنجره متحرک، از رابطه زیر استفاده می‌شود (Gao et al., 2006):

$$L(x_{w/2}, y_{w/2}, t_0) = \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^w \sum_{k=1}^n W_{ijk} \times (M(x_i, y_j, t_0) + L(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_k)) \quad (2)$$

در این رابطه، k تعداد پیکسل های همسایه داخل پنجره همسایگی، W عرض پنجره جست و جو و W_{ijk} وزن هر پیکسل همسایه است.

۲-۳- الگوریتم ESTARFM

ژو و همکاران^۱ (۲۰۱۰)، مدل ESTARFM را ارائه کرده اند. آن ها با استفاده از انعکاس مشاهده شده در دو زمان مختلف، ضریب تبدیل و اصلاح معادله وزن صحت پیش بینی انعکاس در مناطق با پوشش ناهمگن را بهبود بخشیده اند. در روش ESTARFM رابطه بین بازتاب با تفکیک پذیری پایین و بازتاب با تفکیک پذیری بالا برای پیکسل خالص در باند B به صورت مدل خطی به شرح زیر در نظر گرفته می شود:

$$L(x, y, t_k, B) = a \times M(x, y, t_k, B) + b \quad (۳)$$

در اینجا L و M به ترتیب نشان دهنده بازتاب با تفکیک پذیری بالا (لندست) و بازتاب با تفکیک پذیری پایین (مادیس) است. x و y مختصات پیکسل داده شده برای تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا و پایین، t_k تاریخ مورد نظر، a و b ضرایب مدل رگرسیون خطی برای کالیبراسیون نسبی بین بازتاب با قدرت تفکیک مکانی بالا و پایین است که باید به صورت محلی محاسبه شود. پیکسل خالص، پیکسلی است که در تصویر با قدرت تفکیک مکانی پایین حاوی بازتاب سطحی یک ناحیه همگن است و لذا پیکسل خالص، ناحیه وسیع با پوشش زمینی یکسانی را شامل می شود.

فرض کنید یک تصویر با قدرت تفکیک مکانی بالا و یک تصویر با قدرت تفکیک مکانی پایین در t_k و یک تصویر با قدرت تفکیک مکانی پایین دیگر در t_p موجود است. اگر نوع پوشش زمین و کالیبراسیون حسگر بین t_k و t_p تغییر نکنند، رابطه ۳ می تواند به صورت معادله زیر نوشته شود (Zhu et al., 2010):

$$L(x, y, t_p, B) = L(x, y, t_k, B) + a \times (M(x, y, t_p, B) - M(x, y, t_k, B)) \quad (۴)$$

1. Zhu et al.



معادله ۴ نشان می‌دهد که بازتاب با قدرت تفکیک مکانی بالا در t_p برابر با مجموع بازتاب با قدرت تفکیک مکانی بالا در t_k و تغییر مقیاس بازتاب از t_k به t_p است که توسط تصاویر با تفکیک پذیری پایین در تاریخ‌های مختلف ارائه شده است. در اینجا ضریب تبدیل a برای هر پیکسل توسط بایاس سیستم بین حسگرهایی که می‌تواند ثابت در نظر گرفته شود، تعیین می‌شود. اگر دو جفت از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا و پایین در روز t_m و t_n موجود باشد، می‌توان ضریب a را به وسیله یک رابطه رگرسیون خطی به دست آورد و سپس بازتاب با قدرت تفکیک مکانی بالا را در زمان پیش‌بینی t_p محاسبه کرد. لازم به ذکر است که فرض ثبات ضریب تبدیل a تنها در صورتی درست است که اطلاعات از نواحی نسبتاً همگن و با تغییر زمانی ناچیز باشد. از این الگوریتم برای باندهای بازتابندگی استفاده می‌شود.

۳-۳- الگوریتم SADFAT

وَنگ و همکاران (۲۰۱۴) روش SADFAT¹ را ارائه کرده‌اند. هدف اصلی روش SADFAT ایجاد همبستگی برای ادغام داده‌های چندسنجنده و کاهش تفاوت بین سیستم سنجنده‌ها است. پیش‌فرض روش SADFAT این است که دو سنجنده با قدرت تفکیک زمانی و مکانی متفاوت، انعکاس مشابه‌ای را ثبت می‌کند و تفاوت انعکاس آن‌ها در فاصله زمانی کوتاه مقداری ثابت است.

اگر یک جفت تصویر لندست و مادیس در زمان t_0 و یک تصویر مادیس در زمان t_p وجود داشته باشد، تصویر زمان t_p لندست پیش‌بینی می‌شود. برای حل معادله می‌توان با ارائه اطلاعات اضافی از پیکسل‌های مشابه همسایه در یک پنجره متحرک برای محاسبه پیکسل مرکزی استفاده کرد. بنابراین با فرض اینکه اندازه پنجره در حال حرکت w باشد، پیکسل لندست را می‌توان از رابطه زیر پیش‌بینی کرد:

$$R_L(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) = R_L(x_{w/2}, y_{w/2}, t_0) + \sum_{i=1}^N W_i \times h_i \times [R_M(x_i, y_i, t_p) - R_M(x_i, y_i, t_0)] \quad (5)$$

در این معادله R_m پیکسل تصویر مادیس، R_L پیکسل تصویر لندست، N تعداد پیکسل‌های مشابه برای پیش‌بینی پیکسل مرکزی، (x_i, y_i) موقعیت i امین پیکسل مشابه، $(x_{w/2}, y_{w/2})$

1. spatio-temporal adaptive data fusion algorithm for temperature mapping

موقعیت پیکسل مرکزی در هر پنجره، W_i وزن i امین پیکسل مشابه همسایه و h_i یا همان ضریب تبدیل، نسبت تغییر رادیانس لندست به مادیس است. در این معادله از روش پنجره متحرک استفاده شده است؛ همچنین پیکسل های همسایه با پوشش زمینی مشابه با پیکسل مرکزی در هر پنجره مشخص می شود و پیکسل های انتخاب شده، پیکسل مشابه نامیده می شود. نکته قابل توجه این است که طبق رابطه بالا، هر چه پیکسل تصویر با قدرت تفکیک پایین همگن تر باشد، پیش بینی رادیانس تصویر صحت بیشتری دارد. از این الگوریتم برای باندهای حرارتی استفاده شده است.

۴-۳- الگوریتم Cokriging

کوکریجینگ یک روش درون یابی است که از یک متغیر ثانویه دارای همبستگی با متغیر اولیه، جهت افزایش صحت و کاهش واریانس خطای تخمین استفاده می کند (Wu et al., 2009). بعضی از روش های کریجینگ، مثل کوکریجینگ از متغیرهای کمکی استفاده می کند تا صحت درون یابی را افزایش دهد و علاوه بر اینکه تعداد مشاهدات متغیر اصلی را کاهش می دهد، در هزینه نمونه برداری هم صرفه جویی می شود. در میان یابی از انواع روش های کریجینگ و کوکریجینگ استفاده می شود. استفاده از این روش ها مزایایی نظیر تحلیل واریوگرافی دارد. فاصله ای که در آن واریوگرام به حد ثابتی می رسد و به حالت خط افقی نزدیک می شود، دامنه یا شعاع تأثیر نامیده می شود و می توان از داده های موجود در این دامنه، برای تخمین مقدار متغیر مجهول استفاده کرد.

هدف ریزمقیاس نمایی کوکریجینگ، ادغام مجموعه داده ها با قدرت تفکیک متفاوت است و تصویر کوکریجینگ شده به صورت رابطه زیر نوشته می شود (Rodriguez- Galiano et al., 2012):

$$Z_{u0}^{k0}(x_0) = \sum_{i=1}^n \alpha_i Z_u^k(x_i) + \sum_{j=1}^m \beta_j Z_v^l(x_j) \quad (6)$$

$Z_{u0}^{k0}(x_0)$ یک متغیر تصادفی پیش بینی کوکریجینگ شده (ریزمقیاس نمایی شده) است که نشان دهنده مقدار پیکسل در مکان مرکزی x_0 و باند طیفی k_0 است. $Z_u^k(x_i)$ یک متغیر تصادفی در پیکسل هایی از تصویر با قدرت تفکیک بالا و باند طیفی k است و از n پیکسل استفاده می شود، $Z_v^l(x_j)$ یک متغیر تصادفی در پیکسل هایی از تصویر با قدرت تفکیک پایین و باند طیفی l است که از m پیکسل استفاده می شود و α_i و β_j به ترتیب عبارت از وزن های آماری



مخصوص متغیرهای اصلی و کمکی در موقعیت‌های x_i و x_j است (Myers, 1994). در این مطالعه، پیکسل‌های مربوط به تصویر MODIS با قدرت تفکیک مکانی پایین، به عنوان متغیر تصادفی استفاده شده است، که با استفاده از پیش‌بینی‌کننده کوکریجینگ، ریزمقیاس‌نمایی برای باندهای حرارتی انجام شده است. در تحقیق ارسط و همکاران (۱۳۹۸) که با هدف بررسی اثرات ریزمقیاس‌نمایی کوکریجینگ با استفاده از تصاویر مادیس در برآورد تبخیر-تعرق واقعی انجام شده است و اعتبارسنجی آن با استفاده از تصاویر لندست ۸ انجام شده است، نتایج نشان می‌دهد مقادیر میانگین تبخیر-تعرق واقعی حاصل ریزمقیاس‌نمایی با تبخیر-تعرق مرجع دارای اختلاف ناچیزی است.

۵-۳- الگوریتم Regression

رگرسیون خطی یک مدل آماری برای پیش‌بینی متغیرها از روی متغیرهای دیگر است. متغیری که پیش‌بینی بر روی آن انجام می‌شود متغیر وابسته و متغیری که کمک آن انجام می‌شود متغیر مستقل است. متغیرهای وابسته را معمولاً با y و متغیرهای مستقل را با x نمایش می‌دهند. در صورت وجود تنها یک متغیر مستقل، مدل رگرسیون خطی را ساده و در غیر این صورت چندگانه می‌نامند. همچنین در صورت پیش‌بینی چندین متغیر وابسته به جای یک متغیر، مدل رگرسیون خطی را چندمتغیره می‌نامند (Mardia et al., 1979). در روش رگرسیون، بین پارامترهای دو تصویر متوالی مادیس، یک رابطه رگرسیونی ایجاد می‌شود. از همین رابطه رگرسیونی، برای به دست آوردن پارامترهای تصویر شبیه‌سازی‌شده لندست در روز دوم با استفاده از تصویر لندست روز اول استفاده می‌شود (صالحی و همکاران، ۱۳۹۹). از این الگوریتم برای باندهای بازتابندگی و حرارتی استفاده شده است.

۴- برآورد تبخیر-تعرق

یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از داده‌های سنجش از دور، الگوریتم توازن انرژی برای سطح زمین (سبال) است. روش سبال بر پایه روابط تجربی و فیزیکی، میزان تبخیر-تعرق را با حداقل داده‌های زمینی و بر اساس معادله توازن انرژی برآورد می‌کند (Bastiaansen et al., 1998).

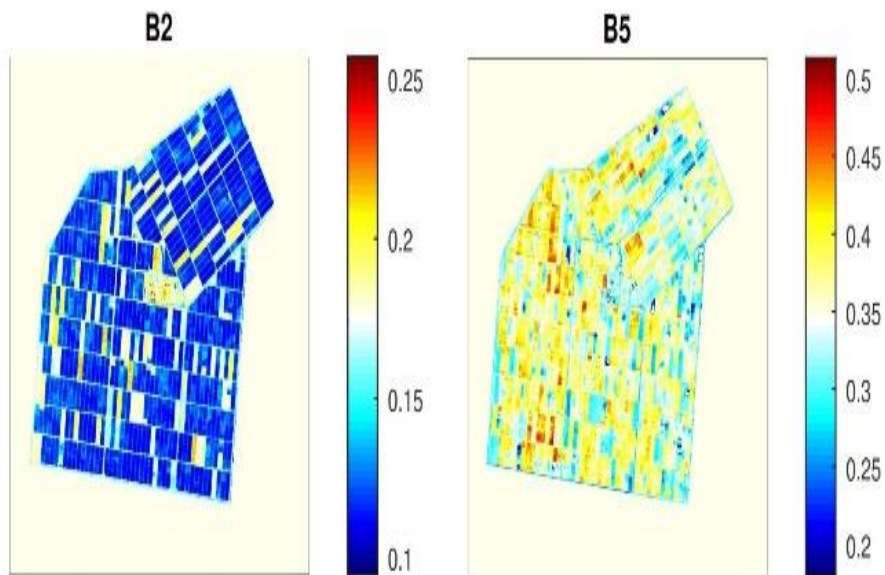
$$\lambda_{ET} = R_n - G - H \quad (7)$$

در معادله فوق λ_{ET} شار گرمای نهان (W/m^2)، R_n شار تابش خالص در سطح زمین (W/m^2)، G شار گرمای خاک (W/m^2) و H شار گرمای محسوس (W/m^2) است. روش محاسبه هر کدام از پارامترهای موجود در معادله فوق، در تحقیق باستینسن و همکاران (۲۰۰۲) به طور کامل تشریح شده است.

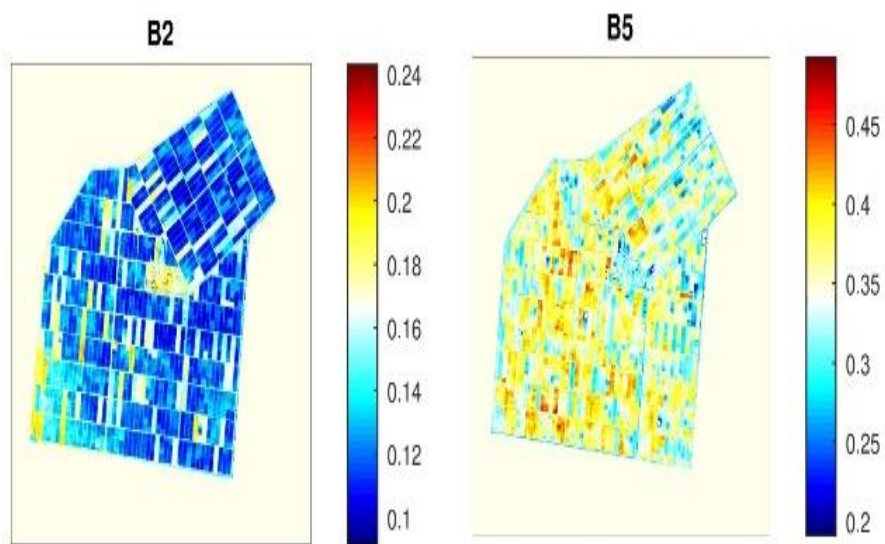
۵- نتایج

با توجه به آنکه مقایسه عملکرد الگوریتم های مختلف ریزمقیاس نمایی تصاویر بازتابندگی و حرارتی جهت تهیه نقشه تبخیر- تعرق، هدف اصلی این تحقیق است، الگوریتم های ریزمقیاس نمایی مذکور، بر روی داده های بازتابندگی و حرارتی مورد استفاده قرار گرفته اند. به منظور ارزیابی نتایج، باندهای ریزمقیاس نمایی شده با باندهای متناظر تصویر لندست اخذ شده در همان تاریخ، به صورت بصری و کمی مقایسه شده است. برای مقایسه کمی این داده ها، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و نیز ضریب تعیین (R^2) استفاده شد. شکل ۳ باندهای بازتابندگی اصلی و ریزمقیاس نمایی شده و شکل ۴ باند حرارتی اصلی و ریزمقیاس نمایی شده را نشان می دهد. در شکل ۳ و ۴، تصاویر مربوط به دو باند منتخب ۲ و ۵ بازتابندگی به عنوان باندهایی که به ترتیب روش های ریزمقیاس نمایی در مورد آنها بهترین و ضعیف ترین عملکرد را داشته است و باند ۱۱ حرارتی ارائه شده است. همچنین جدول ۲ نشان دهنده مقادیر R^2 و RMSE برای باندهای ریزمقیاس شده در مقایسه با باندهای متناظر اصلی و نیز شکل ۴ نشان دهنده نمودارهای نقطه ای دو بعدی آن است. بدیهی است هر چه پراکندگی مقادیر پیکسل ها در نمودار نقطه ای به شکل قطری نزدیک تر باشد، نشان دهنده عملکرد بهتر الگوریتم به کار گرفته شده برای نشان دادن تغییرات مربوط به داده ها است.

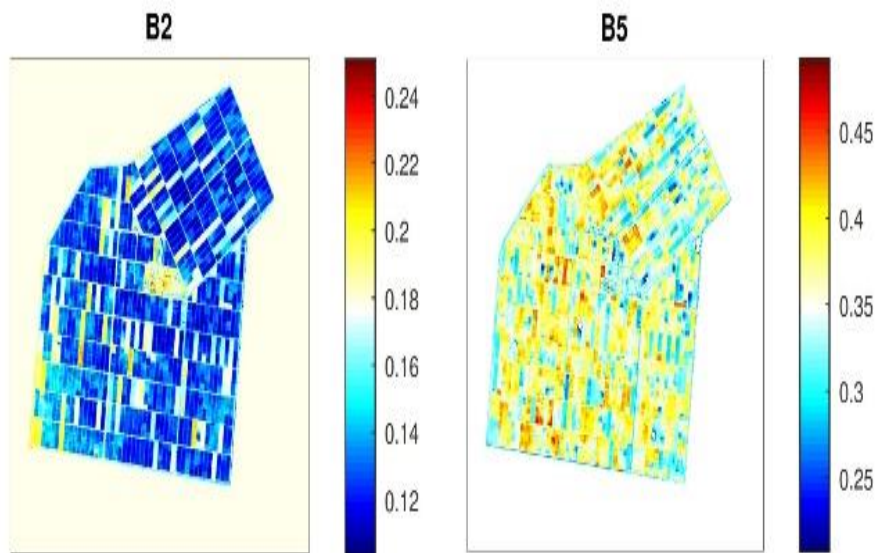
مقایسه بصری باندهای ریزمقیاس شده و باندهای متناظر اصلی در شکل ۳ و ۴ و ملاحظه مقادیر شاخص های مجذور میانگین مربعات خطا و نیز ضریب تعیین ارائه شده برای باندهای ریزمقیاس شده در جدول ۲ و ۳، صحت خوب الگوریتم های ریزمقیاس نمایی مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می دهد. همچنین با مشاهده نمودارهای نقطه ای ارائه شده در شکل ۵ و ۶، می توان به این نتیجه رسید که الگوریتم های ریزمقیاس نمایی مورد استفاده در این تحقیق، قادر است تغییرات مربوط به مقادیر پیکسل های باندهای بازتابندگی و حرارتی را به خوبی تخمین بزند.



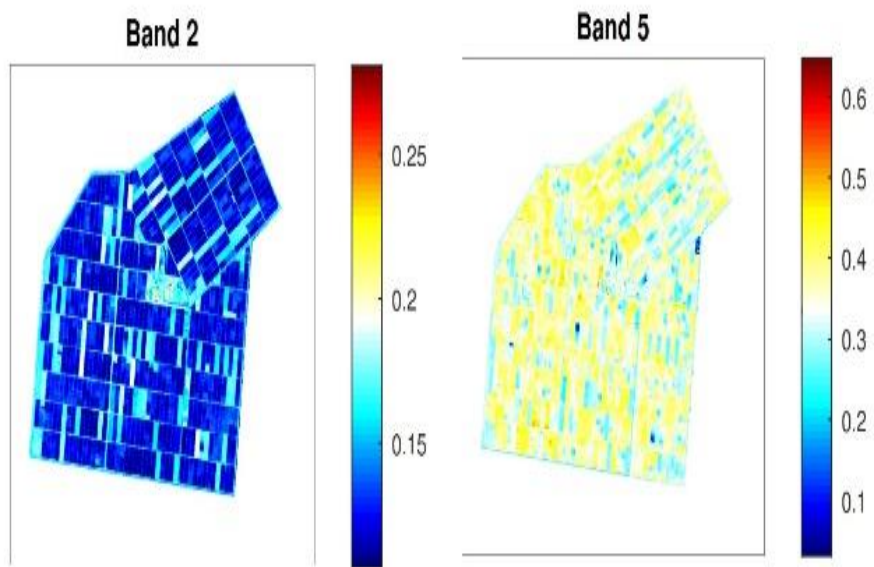
تصویر لندست واقعی در زمان دوم جهت مقایسه با شبیه‌سازی ها



خروجی STARFM

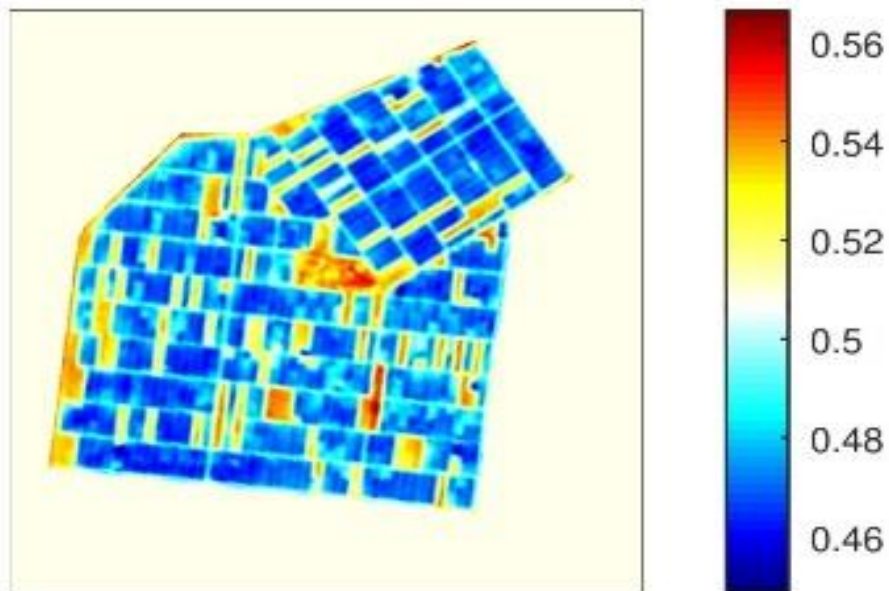


خروجی ESTARFM

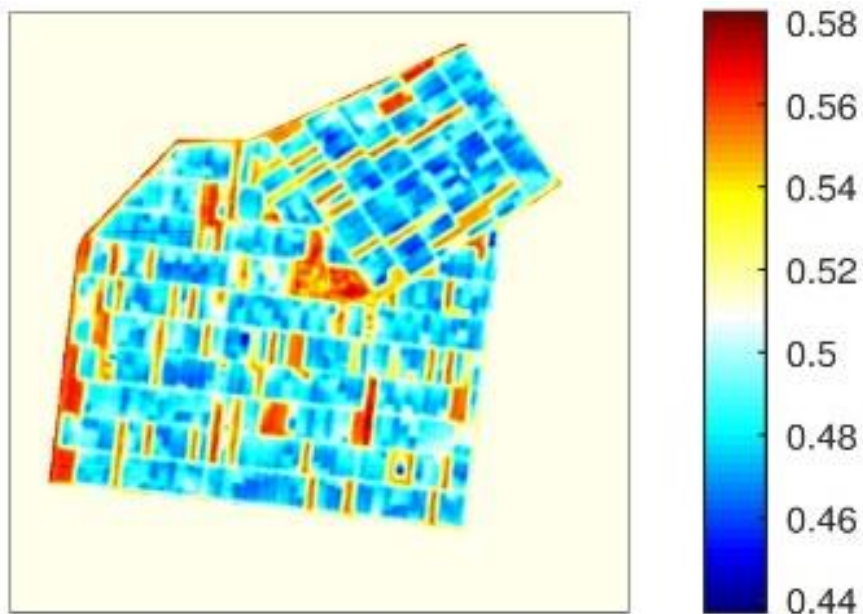


خروجی Regression

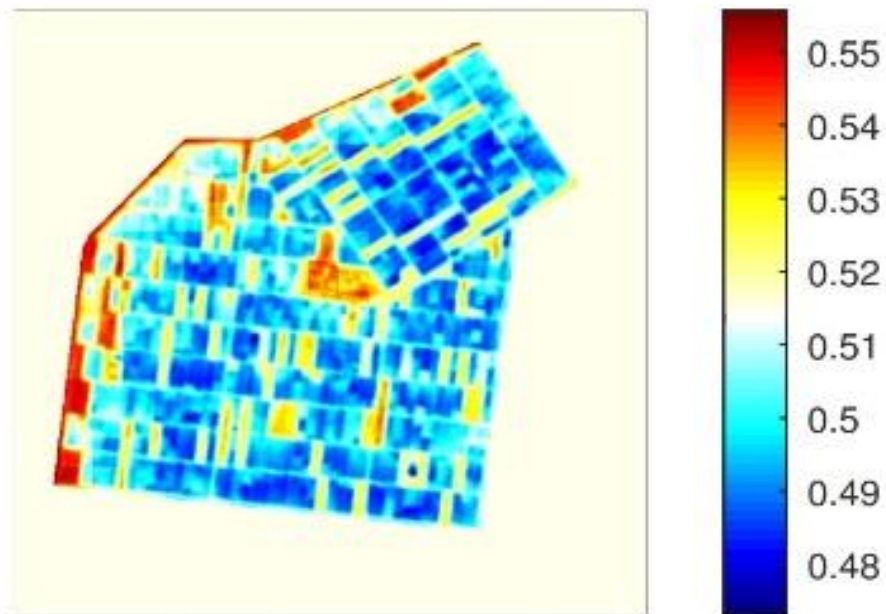
شکل ۳- مقایسه خروجی ریز مقیاس نمایی باندهای بازتابندگی



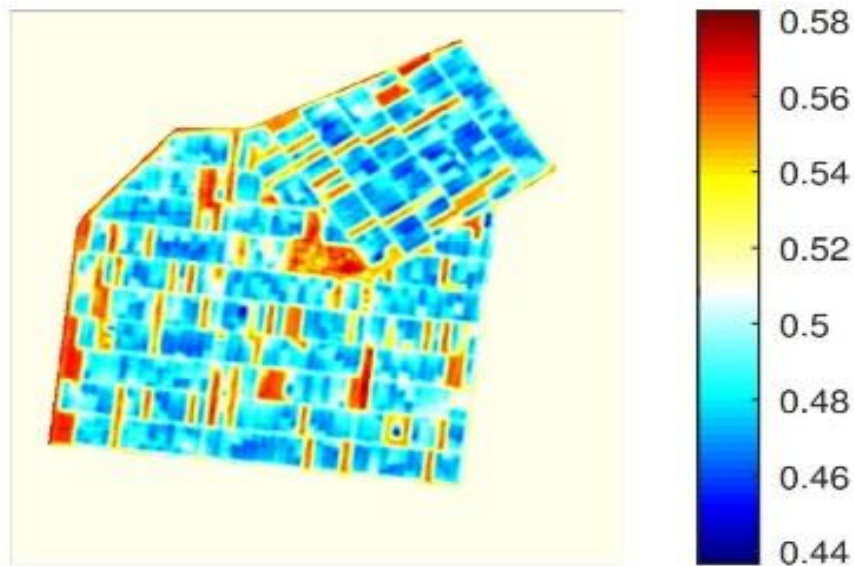
تصویر لندست واقعی در زمان دوم جهت مقایسه با شبیه‌سازی‌ها



خروجی SADFAT

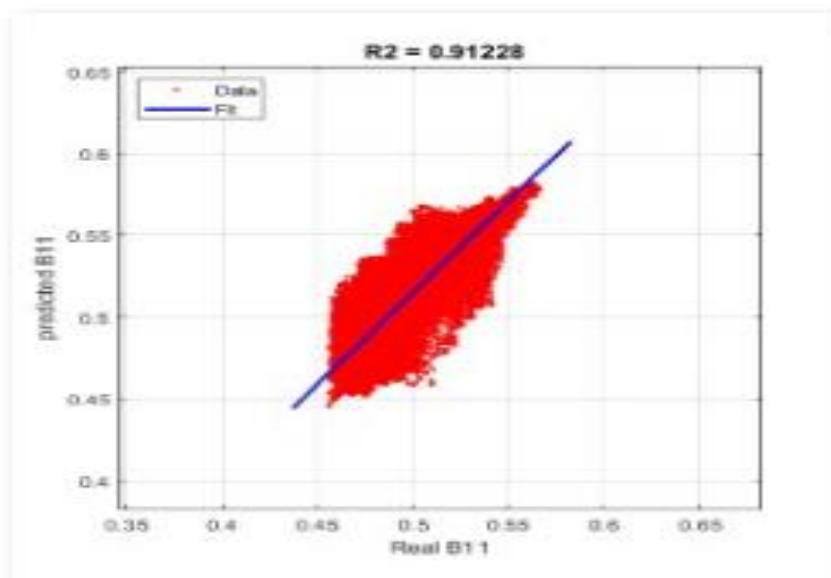


خروجی Cokriging

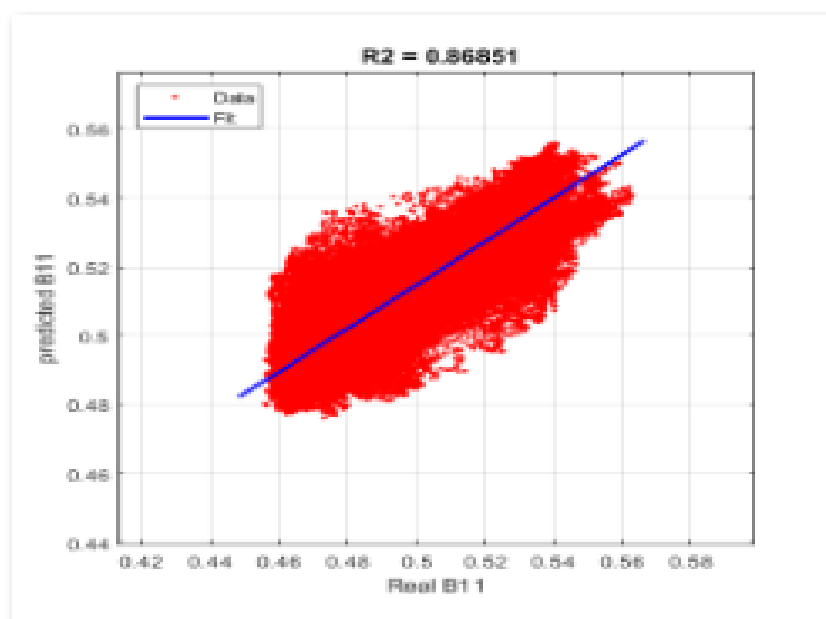


خروجی Regression

شکل ۴- مقایسه خروجی ریزمقیاس نمایی باند حرارتی

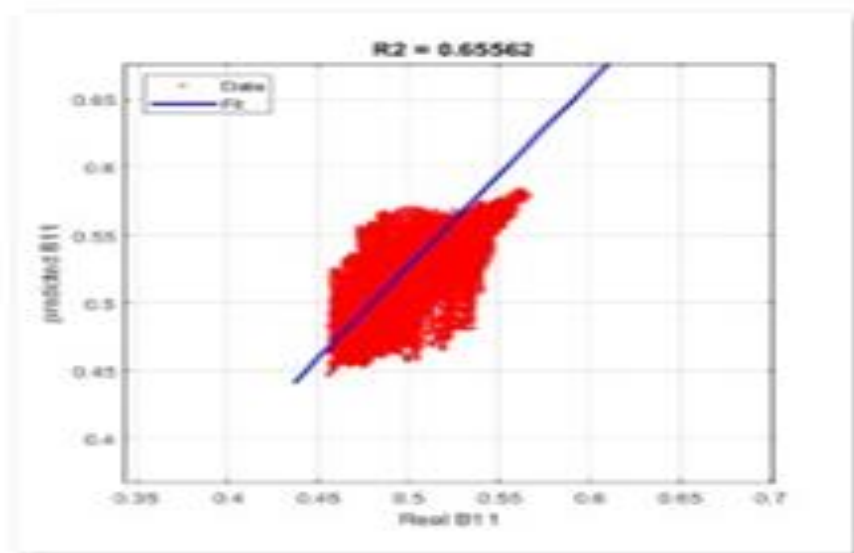


خروجی SADFAT



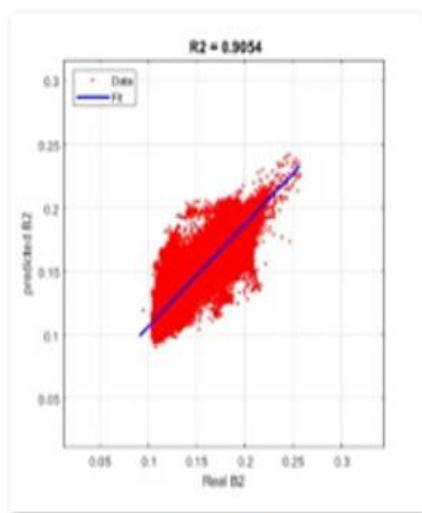
خروجی Cokriging

مقایسه الگوریتم های ریز مقیاس نمایی داده های... علی شمس الدینی و همکار

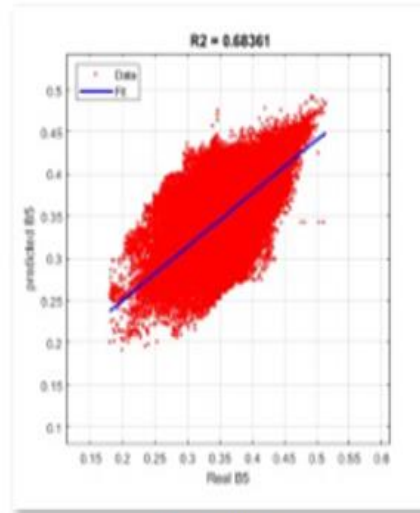


خروجی Regression

شکل ۵- مقایسه باند حرارتی واقعی لندست (محور افقی) با باندهای شبیه سازی شده لندست (محور عمودی)

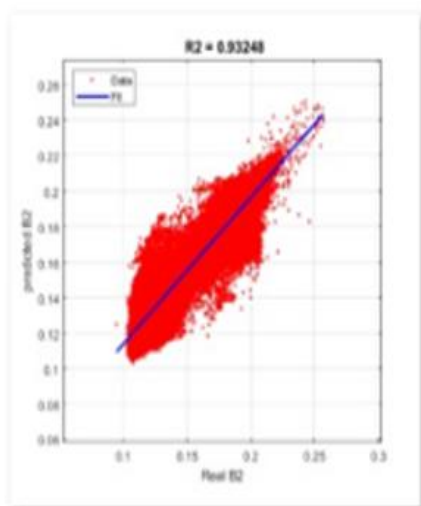


StarfmB2_R

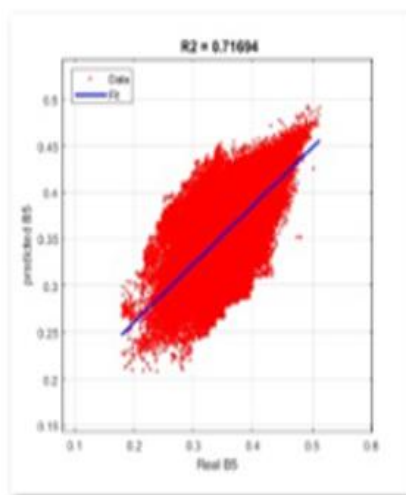


StarfmB5_R

خروجی STARFM

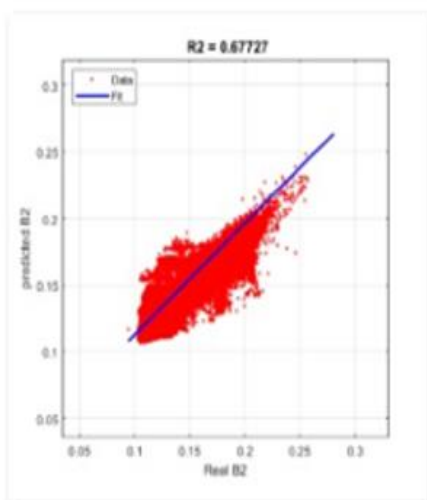


EstarfmB2_R

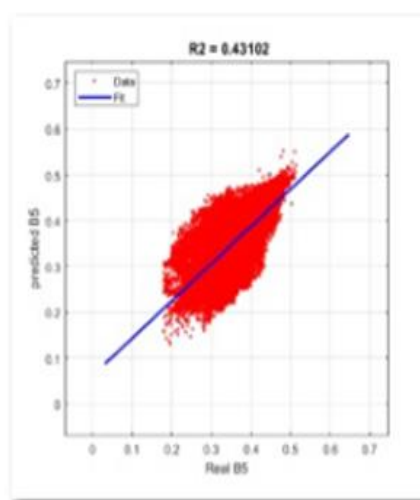


EstarfmB5_R

خروجی ESTARFM



RegressionB2_R



RegressionB5_R

خروجی Regression

شکل ۶- مقایسه باندهای بازتابندگی واقعی لندست (محور افقی) با باندهای شبیه‌سازی شده لندست (محور عمودی)

جدول ۲- مقایسه باندهای انعکاسی در تصویر واقعی لندست و تصویر شبیه سازی شده با روش های ریز مقیاس نمایی

| روش | باند | مجدور میانگین مربعات خطا | ضریب تعیین |
|------------|------|-----------------------------|------------|
| STARFM | ۲ | ۰/۰۰۹۲۹۳۵ | ۰/۹۰۷۰ |
| STARFM | ۳ | ۰/۰۱۲۰۸۸ | ۰/۹۰۵۸۹ |
| STARFM | ۴ | ۰/۰۱۷۴۶۸ | ۰/۹۳۳۱۱ |
| STARFM | ۵ | ۰/۰۲۴۳۶۳ | ۰/۶۸۹۲۵ |
| STARFM | ۷ | ۰/۰۲۷۴۷۲ | ۰/۹۰۳۶۳ |
| ESTARFM | ۲ | ۰/۰۰۹۹۰۰۷ | ۰/۹۳۳۵۶ |
| ESTARFM | ۳ | ۰/۰۱۳۱ | ۰/۹۲۹۵۳ |
| ESTARFM | ۴ | ۰/۰۱۷۸۵۵ | ۰/۹۵۱۵۹ |
| ESTARFM | ۵ | ۰/۰۲۳۱۵۲ | ۰/۷۱۹۲۰ |
| ESTARFM | ۷ | ۰/۰۲۸۹۶۴ | ۰/۹۲۰۶۱ |
| Regression | ۲ | ۰/۰۲۰۳۷۴ | ۰/۶۷۹۴۷ |
| Regression | ۳ | ۰/۰۳۱۴۰۴ | ۰/۶۵۶۵۰ |
| Regression | ۴ | ۰/۰۵۵۲۰۶ | ۰/۶۸۶۷۴ |
| Regression | ۵ | ۰/۰۵۳۹۷ | ۰/۴۳۰۳۸ |
| Regression | ۷ | ۰/۰۷۸۴۶۷ | ۰/۶۵۳۹۲ |

جدول ۳- مقایسه باندهای حرارتی در تصویر واقعی لندست و تصویر شبیه سازی شده با روش های ریز مقیاس نمایی

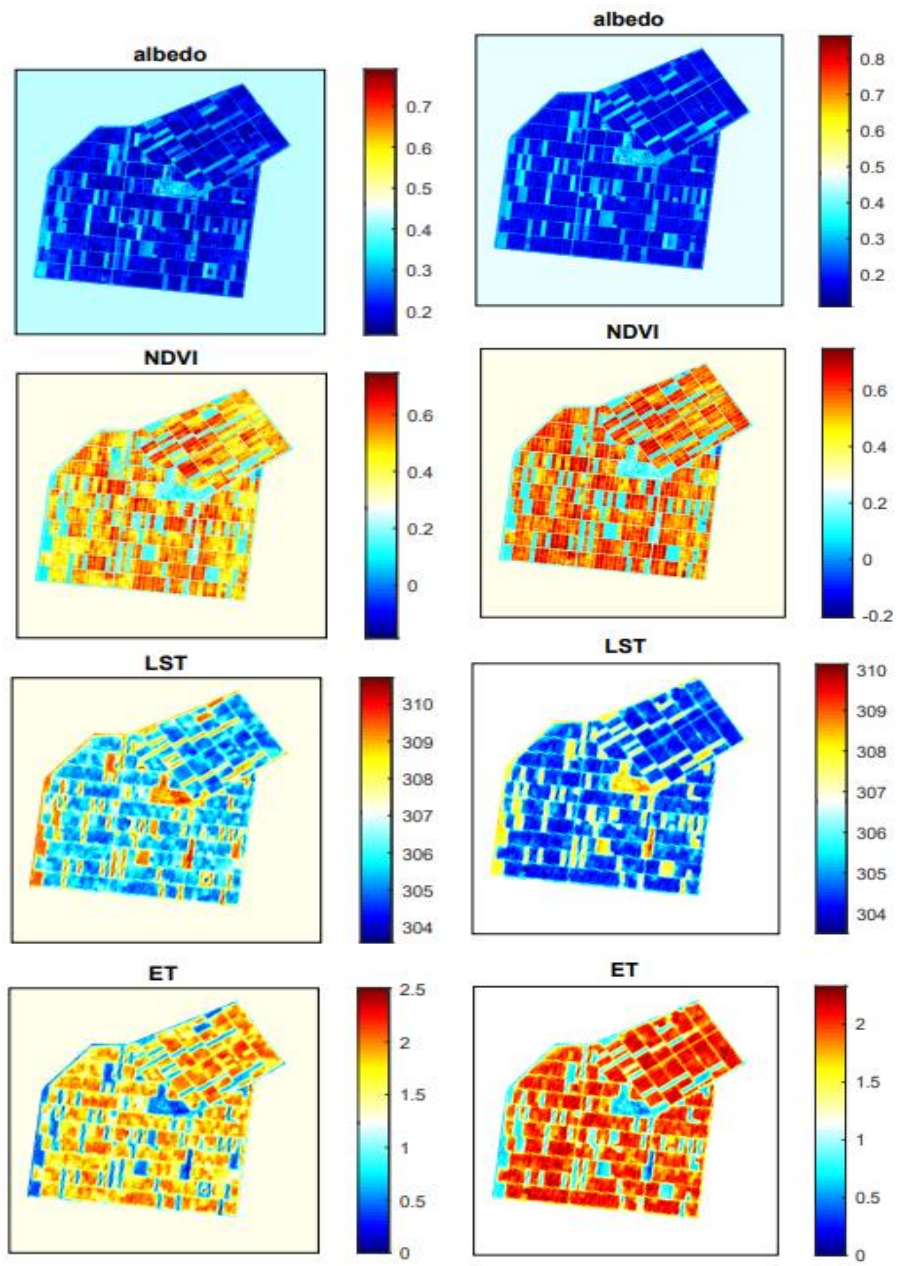
| روش | باند | مجدور میانگین مربعات خطا | ضریب تعیین |
|------------|------|-----------------------------|------------|
| SADFAT | ۱۰ | ۰/۰۲۷۶۳۱ | ۰/۹۱۷۷ |
| SADFAT | ۱۱ | ۰/۰۱۷۱۴۷ | ۰/۹۱۲۲۸ |
| Cokriging | ۱۰ | ۰/۰۲۸۵۸۹ | ۰/۸۷۵۳۸ |
| Regression | ۱۰ | ۰/۰۱۸۱۳۷ | ۰/۸۶۸۵۱ |
| Regression | ۱۱ | ۰/۰۵۴۵۸۶ | ۰/۶۶۱۸۰ |
| Cokriging | ۱۱ | ۰/۰۳۸۲۴۷ | ۰/۶۵۵۶۲ |



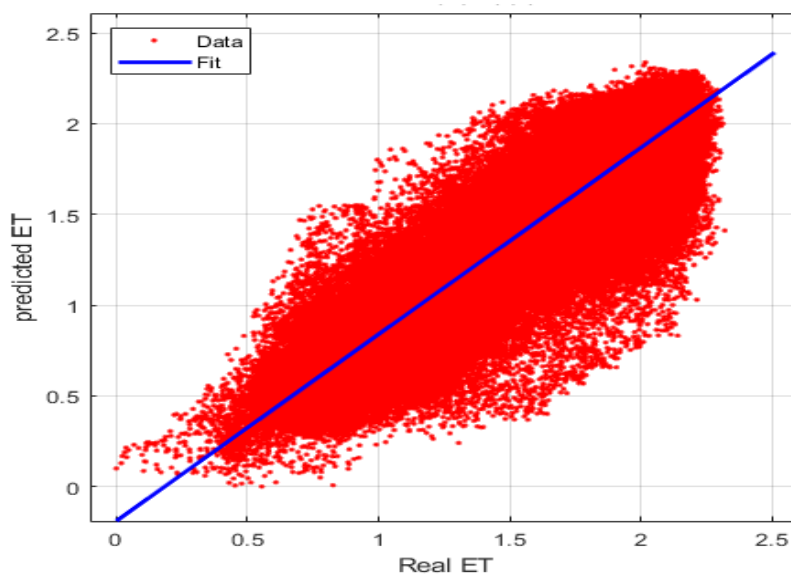
شکل ۷ توزیع مکانی آلبیدو، شاخص پوشش گیاهی، دمای سطحی و تبخیر- تفرق واقعی لحظه‌ای حاصل از تصویر اصلی و ریزمقیاس‌نمایی شده را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۴ نشان‌دهنده مقادیر R^2 و RMSE مربوط به نقشه‌های تبخیر- تفرق واقعی محاسبه‌شده با استفاده از باندهای ریزمقیاس‌شده در مقایسه با باندهای مناظر اصلی و نیز شکل ۸ نشان‌دهنده نمودار نقطه‌ای دو بعدی آن است. در شکل ۷، با توجه به تعداد زیاد روش‌های مورد استفاده در این تحقیق برای ترکیب تصاویر ریزمقیاس‌شده بازتابندگی و حرارتی با هم، تنها نتیجه حاصل از روش ESTARFM/ Regression به عنوان روشی که بهترین نتیجه را دارد، در اینجا آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، تغییرات تبخیر- تفرق واقعی در منطقه مورد مطالعه، بالا است. در شکل ۷، مناطق با رنگ آبی دارای کمترین مقدار تبخیر- تفرق است که در منطقه زمین‌های بایر قرار دارد و مناطق با رنگ قرمز بیشترین مقدار تبخیر- تفرق را دارد که در منطقه دارای پوشش گیاهی قرار گرفته است. همچنین با توجه به شکل ۸ و جدول ۴، مشاهده می‌شود که تبخیر- تفرق برآوردشده، قابل قبول است.

با توجه به جدول ۴، تبخیر- تفرق برآوردشده از خروجی روش‌های ریزمقیاس‌نمایی، به ترتیب ESTARFM/ Regression، STARFM/ SADFAT، ESTARFM/ Regression و STARFM/ SADFAT با اختلاف کم بهترین عملکرد، و روش Regression/ Cokriging ضعیف‌ترین عملکرد را دارد.



شکل ۷- توزیع مکانی آلبدو، شاخص پوشش گیاهی، دمای سطحی و تبخیر- تعرق واقعی لحظه‌ای حاصل ریزمقیاس نمایی (چپ) و حاصل تصویر واقعی لندست (راست)



شکل ۸- مقایسه تبخیر- تعرق واقعی لحظه‌ای حاصل از تصویر اصلی و شبیه‌سازی شده حاصل ریزمقیاس‌نمایی **ESTARFM/ Regression**

جدول ۴- مقایسه تبخیر- تعرق به دست آمده از تصویر واقعی لندست و تصاویر شبیه‌سازی شده با روش‌های ریزمقیاس‌نمایی

| روش | مجدور میانگین مربعات خطا | ضریب تعیین |
|-----------------------|--------------------------|------------|
| ESTARFM/Regression | ۰.۲۱۷۰۵ | ۰.۹۱۸۹۵ |
| ESTARFM /SADFAT | ۰.۲۱۸ | ۰.۹۱۸۷۹ |
| STARFM /Regression | ۰.۲۱۸۶۶ | ۰.۹۱۸۳۵ |
| STARFM/ SADFAT | ۰.۲۱۹۵۶ | ۰.۹۱۸۱۹ |
| Regression/Regression | ۰.۲۱۹۷۵ | ۰.۹۱۸۳ |
| Regression/ SADFAT | ۰.۲۲۰۷۴ | ۰.۹۱۸۱۳ |
| STARFM /Cokriging | ۰.۳۷۰۹۸ | ۰.۸۴۴۲۷ |
| ESTARFM /Cokriging | ۰.۳۷۲۹۵ | ۰.۸۴۵۷۵ |
| Regression/Cokriging | ۰.۳۸۸۱۷ | ۰.۸۴۱۱۸ |

۶- بحث

با توجه به مقادیر RMSE ارائه شده، می توان نتیجه گرفت که الگوریتم های ریزمقیاس نمایی STARFM، ESTARFM، Regression، SADFAT و Cokriging همگی از عملکرد خوبی برخوردار است. در میان روش های اعمال شده بر باندهای بازتابندگی، به ترتیب STARFM با مجذور میانگین مربعات خطای $0/0180$ از بهترین عملکرد و پس از آن ESTARFM با مجذور میانگین مربعات خطای $0/0186$ و Regression با مجذور میانگین مربعات خطای $0/0479$ از عملکرد خوبی برخوردار است. در میان روش های اعمال شده بر باندهای حرارتی، الگوریتم SADFAT با مجذور میانگین مربعات خطای $0/0224$ بهترین عملکرد و سپس Cokriging با مجذور میانگین مربعات خطای $0/0234$ و Regression با مجذور میانگین مربعات خطای $0/0464$ عملکرد خوبی داشته است. باید این نکته را در نظر داشت که اختلاف خروجی ها بسیار کم است و با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه این تحقیق منطقه ای همگن از پوشش زمین های کشاورزی تک محصولی نیشکر است، این مسئله می تواند در نزدیکی عملکرد روش های ریزمقیاس نمایی و نیز صحت بالای خروجی های حاصل از آن مؤثر باشد.

در تمام روش ها صحت ریزمقیاس نمایی در باندهای مختلف، متفاوت است و این تفاوت ناشی از دلایل مختلفی است. اول اینکه با توجه به متفاوت بودن اثر اتمسفر برای طول موج های مختلف (Roy et al., 2008)، تفاوت در شرایط جوی به دلیل تفاوت در زمان اخذ داده های مادیس و لندست، می تواند یکی از علل تفاوت عملکرد در باندهای مختلف باشد (Bhandari, 2012). دلیل دوم، عدم هم پوشانی کامل باندهای متناظر مادیس و لندست از لحاظ طول موج است که می تواند با ایجاد تفاوت طیفی در باندهای متناظر، بر نتایج ریزمقیاس نمایی تأثیر بگذارد (Pohl et al., 1998؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۷)

با مقایسه نتایج ریزمقیاس نمایی در باندهای مختلف، مشخص شد که خطای مربوط به ریزمقیاس نمایی باند ۵ به طور مشترک در تمام روش ها بیشتر از سایر باندهای بازتابندگی است. بهاندردی و همکاران (۲۰۱۲) از الگوریتم STARFM برای ریزمقیاس نمایی تصاویر لندست در کوئینزلند استرالیا استفاده کرده اند. نتایج ایشان نیز نشان می دهد ضریب تعیین بین برخی از باندهای ریزمقیاس شده و باندهای واقعی پایین است. در این تحقیق بیان شده است که هیچ دلیل آشکاری برای توجیه پایین بودن ضریب تعیین در بعضی از باندهای ریزمقیاس شده وجود ندارد. در تحقیقی که توسط صالحی و همکاران (۱۳۹۷) انجام شده است نیز کمترین مقدار همبستگی مربوط به باند ۵ ریزمقیاس نمایی شده تصاویر لندست ۸ گزارش شده است.



همچنین دستیابی به نتایج ضعیف‌تر برای ریزمقیاس‌نمایی باند مادون قرمز نزدیک در رابطه با ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مادیس با استفاده از داده‌های سنتینل ۲ نیز گزارش شده است (صالحی و شمس‌الدینی، ۱۳۹۹). اگر چه با وجود عوامل عدم قطعیت مختلف در فرایند ریزمقیاس‌نمایی، یافتن علت اصلی کاهش ضریب تعیین برای این باند مشکل است (صالحی و همکاران، ۱۳۹۷)، یکی از دلایل این موضوع می‌تواند حساسیت بالای باند مادون قرمز نزدیک به تغییرات گیاهی موجود در منطقه مورد مطالعه باشد (صالحی و شمس‌الدینی، ۱۳۹۹). حساسیت بالای باند مادون قرمز نزدیک به تغییرات کلروفیل پوشش گیاهی (Mancino et al., 2020) باعث می‌شود که در یک پوشش کشاورزی، در این باند خصوصاً در قدرت تفکیک مکانی بالا، پیکسل‌هایی با مقادیر متفاوت بازتابندگی ایجاد شود. در صورتی که در باندهای دیگر، مخصوصاً باندهای مرئی، تغییرپذیری پیکسل‌ها کمتر است و در ریزمقیاس‌نمایی، تغییرات زیاد باند مادون قرمز نزدیک نمی‌تواند به خوبی سایر باندهایی که دارای تغییرپذیری کمتری در محیط پوشش گیاهی است، در باند ریزمقیاس‌شده مادون قرمز نزدیک نشان داده شود (صالحی و شمس‌الدینی، ۱۳۹۹).

به طور کلی همه روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده‌شده در این تحقیق، دارای عملکرد قابل قبول و نتایج خوبی است، با این حال روش‌های ریزمقیاس‌نمایی مورد استفاده برای باندهای بازتابندگی، نسبت به روش‌های مورد استفاده برای باندهای حرارتی عملکرد بهتری دارد. در تصاویر ماهواره‌ای، قدرت تفکیک مکانی باندهای بازتابندگی نسبت به باندهای حرارتی بهتر است و خطای ناشی از عدم تطابق قدرت تفکیک مکانی باندهای حرارتی و بازتابندگی، می‌تواند باعث ایجاد خطا در برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از این تصاویر شود (اکبری و همکاران، ۱۳۸۷).

در میان روش‌های ریزمقیاس‌نمایی باندهای حرارتی، روش SADFAT بهترین عملکرد، روش Cokriging عملکرد متوسط و روش Regression به عنوان ضعیف‌ترین روش عمل کرده است. با مقایسه روش ریزمقیاس‌نمایی در باندهای بازتابندگی، الگوریتم STARFM بهترین عملکرد، روش ESTARFM با اختلاف کمی از روش قبل، نتیجه خوب و Regression ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. کارایی خوب الگوریتم STARFM در ریزمقیاس‌نمایی باندهای بازتابندگی لندست در تحقیقات قبلی تأیید شده است که از جمله می‌توان به تحقیقات گائو و همکاران (۲۰۰۶)، هیلکر و همکاران (۲۰۰۹)، بهاندی و همکاران (۲۰۱۲) و صالحی و همکاران (۱۳۹۷) اشاره کرد. الگوریتم STARFM وابستگی زیادی به یکنواختی ناحیه مورد مطالعه دارد و همگن نبودن یا وجود تناوب زیاد پوشش در منطقه، می‌تواند نتایج حاصل از

اعمال این الگوریتم را تحت تأثیر قرار دهد (گائو و همکاران، ۲۰۰۶)؛ لذا یکی از دلایل مهم برای دستیابی به صحت مناسب باندهای ریزمقیاس شده در این تحقیق را می توان ناشی از یکنواختی منطقه مورد مطالعه دانست. با توجه به اینکه الگوریتم STARFM در مطالعات پیشین مناطق همگن نیز عملکرد خوبی داشته است و الگوریتم ESTARFM در واقع جهت بهبود عملکرد روش STARFM در مناطق ناهمگن توسعه یافته است و منطقه کشت و صنعت امیرکبیر نیز منطقه ای یکنواخت از پوشش گیاهی کشاورزی است، STARFM نسبت به ESTARFM در دستیابی به صحت مناسب باندهای ریزمقیاس شده، عملکرد بهتری دارد. از آنجا که الگوریتم های STARFM، ESTARFM و SADFAT از پنجره متحرک برای محاسبه تابش پیکسل مرکزی استفاده می کند و روش Regression از یک رابطه برای تمام پیکسل ها استفاده می کند، می توان گفت به همین علت روش Regression نسبت به سایر روش ها عملکرد ضعیف تری دارد.

تبخیر- تعرق برآورد شده از خروجی روش های ریزمقیاس نمایی، از صحت کافی برخوردار است که با توجه به عملکرد خوب روش ها در ریزمقیاس نمایی، مورد انتظار بود. روش های ESTARFM و STARFM در ریزمقیاس نمایی نتایج بهتری داشته است و در نتیجه در برآورد تبخیر- تعرق نیز خروجی های حاصل از این روش ها، نتایج بهتری به همراه داشته است.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق از الگوریتم های STARFM، ESTARFM و Regression برای باندهای بازتابندگی و از الگوریتم های SADFAT، Regression و Cokriging جهت باندهای حرارتی برای ریزمقیاس نمایی تصاویر مادیس به لندست و از الگوریتم سبال برای برآورد تبخیر- تعرق استفاده شده است و در نهایت نتایج حاصل از مطالعه را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- همه الگوریتم های ریزمقیاس نمایی مورد استفاده در این تحقیق در شبیه سازی باندهای لندست با اختلاف کم، عملکرد خوب و قابل قبولی داشته است.
- عملکرد هر کدام از روش های ریزمقیاس نمایی، در باندهای مختلف متفاوت است.
- باند ۵ به طور مشترک در تمام روش های ریزمقیاس نمایی از ضعیف ترین عملکرد برخوردار بوده است و باندهای ۲ و ۳ بهترین عملکرد را داشته است.
- در میان روش های باندهای بازتابندگی، به ترتیب STARFM از بهترین عملکرد و ESTARFM و Regression از عملکرد خوبی برخوردار بوده است.



- در میان روش‌های باندهای حرارتی، الگوریتم SADFAT بهترین عملکرد و Cokriging و Regression عملکرد خوبی داشته است.
- استفاده از الگوریتم STARFM برای باندهای بازتابندگی، و الگوریتم SADFAT برای باندهای حرارتی در مناطق مشابه (همگن) پیشنهاد می‌شود.
- اختلاف بین ترکیب‌های مختلف روش‌ها برای برآورد تبخیر- تعرق واقعی کم است.

منابع

- ارست، مینا؛ رنجبر، ابوالفضل؛ عبدالهی، خدایار و موسوی، حجت، «بررسی وضوح فضایی نقشه‌های تبخیر- تعرق واقعی در حوضه زاینده رود»، *اطلاعات جغرافیایی*، د ۲۹، ش ۱۱۳، ۱۳۹۹.
- اکبری، مهدی؛ دهقانی سانجی، حسین و حیدری، نادر، «کاربرد سنجش از دور در برآورد سطح زیر کشت، تبخیر- تعرق و مدیریت شبکه‌های آبیاری»، *آبیاری و زهکشی ایران*، ج ۲، ش ۱، ۱۳۸۷.
- رحیم‌پور، مرتضی؛ کریمی، نعمت‌الله؛ روزبهانی، رضا و رضایی، عبدالعلی، «ترکیب تصاویر سنجنده‌های OLI و MODIS به منظور تهیه داده‌های بازتابندگی سطحی در مقیاس روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در مناطق دارای تنوع کاربری متفاوت»، *سنجش از دور و GIS ایران*، ش ۳ (۳۵)، ۱۳۹۶.
- رخس ماهپور، علی؛ شاد، روزبه و فریدحسینی، علیرضا، «ارزیابی روش‌های طبقه‌بندی تصویر بر عملکرد الگوریتم STARFM»، *کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی*، د ۳، ۱۳۹۵.
- صالحی، حمید و شمس‌الدینی، علی، «ترکیب تصاویر مادیس و سنتینل-۲ به منظور تهیه نقشه‌های تبخیر- تعرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر»، *آبیاری و زهکشی ایران*، ج ۱۴، ش ۶، صص ۱۸۸۱-۱۸۹۲، ۱۳۹۹.
- صالحی، حمید؛ شمس‌الدینی، علی و میرلطیفی، مجید، «ریزمقیاس‌نمایی تصویر مادیس به منظور تهیه نقشه تبخیر- تعرق روزانه با قدرت تفکیک تصویر لندست با استفاده از الگوریتم‌های SADFAT و STARFM»، *سنجش از دور و GIS ایران*، س ۱۰، ش ۳ (۳۹)، ۱۳۹۷.

- «بهبود قدرت تفکیک زمانی- مکانی داده های تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از ترکیب داده های مادیس و لندست-۸»، تحقیقات منابع آب ایران، س ۱۶، ش ۱، ۱۳۹۹.
- محمدی زاده، پریسا؛ حمزه، سعید؛ کیاورزمقدم، مجید و درویشی بلورانی، علی، «استخراج تصاویر روزانه دمای سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی بالا با استفاده از تلفیق تصاویر لندست و مادیس». مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، د ۶، ش ۱، ۱۳۹۷.
- Adams. J. B, Smith. M. O, and Johnson. P. E, "Spectral mixture modeling: A new analysis of rock & soil types at the Viking Lander 1 site", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 91, pp. 8098-8112, 1986. (doi:[10.1029/JB091iB08p08098](https://doi.org/10.1029/JB091iB08p08098))
- Almhab, Ayoub Ahmed and Ibrahim Busu. "Estimation of Evapotranspiration with Modified SEBAL Model Using Landsat-TM and NOAA-AVHRR Images in Arid Mountains Area.", *Second Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS)* : 350-355,2008. (doi: [10.1109/AMS.2008.42](https://doi.org/10.1109/AMS.2008.42))
- Allen, Richard G., Masahiro Tasumi and Ricardo Trezza. "Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-asce* 133: 380-394..., 2007. (doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)))
- Anderson, M., Kustas, W., Norman, J., Hain, C., Mecikalski, J., Schultz, L., et al., "Mapping daily evapotranspiration at field to global scales using geostationary & polar orbiting satellite imagery", *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 7 (4), 5957-5990, 2010. (doi: [10.5194/hessd-7-5957-2010](https://doi.org/10.5194/hessd-7-5957-2010))
- Arest M, Ranjbar A, Abdollahi K, Mousavi H., "Investigation of spatial resolution of real evapotranspiration maps in Zayandehrud basin", *Geographic information*, 29 (113), 1399. [In Persian]
- Bastiaanssen, W.G.M. "SEBAL-Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey". *Journal of Hydrology*, 229, 87-100.,2000. (doi: [10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4))
- Bastiaanssen, Wim G. M. and Lalith Chandrapala. "Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water



use.” *Agricultural Water Management* 58: 171-192. 2003 . (doi: [10.1016/S0378-3774\(02\)00128-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00128-2))

- Bastiaanssen, W., Menenti, M., Feddes, R. and Holtslag, A. 1998a. “A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL)”. Part 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212: 198-212. . (doi: [10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6))

- Bastiaanssen, W.G.M., Waters, R., Allen, R., Tasumi, M and Terzza, R.. Advanced Training and User's Manual of Surface Energy Balance Algorithms for Land. *Nasa EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company through the Idaho Department of water Resources*.1:1-98. 2002.

- Emelyanova. I. V, McVicar. T. R, Van Niel. T. G, Li. L. T, & van Dijk. A. I. J. M, "Assessing the accuracy of blending Landsat-MODIS surface reflectances in two landscapes with contrasting spatial & temporal dynamics: A framework for algorithm selection," (in English), *Remote Sensing of Environment*, vol. 133, pp. 193- 209, Jun 15 2013. (doi: [10.1016/j.rse.2013.02.007](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.007))

- Bhandari, S., Phinn, S., Gill, T. “Preparing Landsat Image Time Series (LITS) for Monitoring Changes in Vegetation Phenology in Queensland, Australia”. *Remote Sensing*, 4(6), 1856-1886. 2012,(doi: [10.3390/rs4061856](https://doi.org/10.3390/rs4061856))

- Hafeez, Moshin, Yann H. Chemin, Nick van de Giesen and B. A. M. Bouman. “Estimation of crop water deficit through remote sensing in Central Luzon, Philippines.” *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* 5: 2778-2780 vol.5. . 2002 (doi: [10.1109/IGARSS.2002.1026772](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026772))

- Hilker, T.; Wulder, M.A.; Coops, N.C.; Seitz, N.; White, J.C.; Feng, G.; Masek, J.G.; Stenhouse, G. “Generation of dense time series synthetic Landsat data through data blending with MODIS using a spatial and temporal adaptive reflectance fusion model”. *Remote Sensing Environment*, volume113, 1988–1999. 2009 . (doi: [10.1016/J.RSE.2009.05.011](https://doi.org/10.1016/J.RSE.2009.05.011))

- Lee, T.; Jeong, C., “Nonparametric statistical temporal downscaling of daily precipitation to hourly precipitation & implications for climate change scenarios”, *Journal of Hydrology*, vol. 510, pp. 182–196, 2014. (doi: [10.1016/j.jhydrol.2013.12.027](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.027))

- Li, H., Zheng, L., Lei, Y., Li, C., Liu, Z. and Zhang, S. "Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology". *Agricultural Water Management*, 95: 1271-1278. 2008. (doi: [10.1016/J.AGWAT.2008.05.003](https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2008.05.003))
- Mancino, G., Ferrara, A., Padula, A., and Nole, A. "Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment", *Remote Sens.* 12(2): 291. 2020. . (doi: [10.3390/rs12020291](https://doi.org/10.3390/rs12020291))
- Mardia, K. V; Kent, J. T.; Bibby, J. M., "Multivariate Analysis". *Academic Press*. ISBN 0-12-471252-5, 1979. (doi: [10.1002/zamm.19810610315](https://doi.org/10.1002/zamm.19810610315))
- Mohammadzadeh P, Hamzeh S, Kiavarz Moghaddam M, Darvishi Blourani A, "Extraction of daily images of surface temperature with high spatial resolution using a combination of Landsat & Modis images", *Spatial Information Technology Engineering*, 6 (1), 1397. [In Persian]
- Pohl, C., Van Genderen, J. L.. "multisensory image fusion in remote sensing: Concepts, method and applications", *International Journal of Remote Sensing*, 19:5, 823-854. , 1998. (doi: [10.1080/014311698215748](https://doi.org/10.1080/014311698215748))
- Myers, D.E., "Spatial interpolation: an overview", *Geoderma*, 62(1): 17-28, 1994.
- Raty, M. & Kangas, A., "Comparison of k-MSN & kriging in local prediction", *Forest Ecology & Management*, 263: 47-56, 2012. (doi: [10.1016/j.foreco.2011.09.026](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.026))
- Gao, F, Masek J, Schwaller. M , & Hall. F, "On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance," (in English), *Ieee Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, vol. 44, no. 8, pp. 2207-2218, Aug 2006. (doi: [10.1109/TGRS.2006.872081](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872081))
- Rahimpour M, Karimi N, Roozbehani R, Rezaei A, "Combining images of OLI and MODIS sensors in order to provide surface reflectance data on a daily scale with a spatial resolution of 30 meters in areas with different land use diversity", *Journal of Remote Sensing And GIS of Iran* (35 consecutive), Fall 2017, No. 3 [In Persian]



- Rakhsh M, Shad R, Farid H, “Evaluation of Image Classification Methods on STARFM Algorithm Performance”, *Conference: International Conference on Research in Science & Technology*, Volume 3, 2016. [In Persian]
- Ramosa, J.G., Cratchley, c., Kay, J.A., Casterad, M.A., Martinez-Cob, A., and Dominguez, Z.. “Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using groundmeteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of N.E., Spain”. *J. Agric. Water Manage. AGWAT-2701:15-26*. 2008 . (doi: [10.1016/J.AGWAT.2008.10.001](https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2008.10.001))
- Rodriguez- Galiano, V, E., Pardo- Iguzquiza , M., Sanchez- Castillo . M., Chica-Olmo. M., Chica- Rivas,”Downscaling Landsat 7 ETM + thermal imagery using land surface temperature & NDVI images.” *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf*,18: 515–527, 2012. (doi: [10.1016/j.jag.2011.10.002](https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.10.002))
- Roy, D. P., Ju, J., Lewis, P., Schaaf, C., Gao, F., Hansen, M., et al. “ 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. 2008 . (doi: [10.1016/J.RSE.2008.03.009](https://doi.org/10.1016/J.RSE.2008.03.009))
- Salehi H, Shamsoddini A, Mir Latifi M, “Micro-image microscale for preparing daily evapotranspiration map with Landsat image resolution using SADFDT & STARFM algorithms”, *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 10th year 1397 No. 3 (39 consecutive) [In Persian]
- Salehi H, Shamsoddini A, “Combination of Modis & Sentinel-2 images in order to prepare daily evapotranspiration maps with a spatial resolution of 10 meters”, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, No. 6, Vol. 14, pp. 1892-1881, February-March 2016. [In Persian]
- Senay, Gabriel B., Michael E. Budde, James P. Verdin and Assefa M. Melesse. “A Coupled Remote Sensing and Simplified Surface Energy Balance Approach to Estimate Actual Evapotranspiration from Irrigated Fields.” *Sensors (Basel, Switzerland)* 7: 979 - 1000. . 2007 (doi: [10.3390/S7060979](https://doi.org/10.3390/S7060979))

- Su, Z.: "The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 6, 85–100, 2002. . (doi: [10.5194/HESS-6-85-2002](https://doi.org/10.5194/HESS-6-85-2002))
- Salehi H, Shamsoddini A, Mir Latifi M, "Improving the temporal-spatial resolution of evaporation data - actual transpiration using a combination of Modis & Landsat-8 data", *Iran Water Resources Research*, Y. 16, vol. 1, Spring 2016. [In Persian]
- Weng .Q, Fu.P, & Gao.F , "Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat & MODIS data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 145, pp. 55-67, 2014. (doi: [10.1016/j.rse.2014.02.003](https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.003))
- Wu C., Wu J., Luo Y., Zhang L., & DeGloria S.D., "Spatial prediction of soil organic matter content using cokriging with remotely sensed data". *Soil Science Society of America Journal* 73(4), 1202-1208, 2009. (doi: [10.2136/sssaj2008.0045](https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0045))
- Zhang, W., Li, A., Jin, H., Bian, J., Zhang, Z., Lei, G., & Huang, C., "Article An Enhanced Spatial & Temporal Data Fusion Model for Fusing Landsat & MODIS Surface Reflectance to Generate High Temporal Landsat-Like Data", 2013. (doi: [10.3390/rs5105346](https://doi.org/10.3390/rs5105346))
- Zhu .X, Chen. J, Gao .F, Chen. X, & Masek. J. G, "An enhanced spatial & temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions," *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, pp. 2610-2623, 2010. (doi: [10.1016/j.rse.2010.05.032](https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.032))