

بررسی وضوح فضایی نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی در حوضه زاینده‌رود

مینا ارست^۱

ابوالفضل رنجبر^۲

خدایار عبدالمهی^۳

سید حجت موسوی^۴

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۱/۲۰

چکیده

تبخیر و تعرق به عنوان عامل مهم در اتلاف آب در مناطق خشک و نیمه خشک، پدیده پیچیده‌ای است که به عوامل و داده‌های زیادی بستگی دارد. بنابراین برآورد دقیق میزان آن، بسیار مشکل و پرهزینه است. هدف از این مطالعه، بررسی اثرات ریزمقیاس‌نمایی کوکریجنگ دمای سطح زمین (LST)، برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی (AET)، در ژوئن ۲۰۱۷ در حوضه زاینده‌رود است. در این راستا، در روش اول، ریزمقیاس‌نمایی کوکریجنگ به محصول LST حاصل از ماهواره MODIS اعمال شد. سپس با استفاده از سیستم بیلان انرژی سطح (SEBS)، AET روزانه با وضوح متوسط (۲۵۰ متری) به دست آمد. در روش دوم، نقشه AET به وضوح متوسط (۲۵۰ متری) ریزمقیاس‌نمایی شد. اعتبار سنجی با استفاده از محصولات حاصل از Landsat 8 صورت پذیرفت. نتایج نشان داد مقادیر میانگین AET-SEBS ریزمقیاس‌نمایی (۱۲/۵۶ mm/day) و AET مرجع (۱۳/۱۱ mm/day) دارای اختلاف ناچیز هستند. RMSE میان AET مرجع و AET ریزمقیاس‌نمایی شده برابر با ۱/۶۶ میلی‌متر/روز ($r = 0.73$) و میان LST مرجع و ریزمقیاس‌نمایی شده معادل $4/36K$ ($r = 0.78$) بود. این مطالعه نشان داد که مقادیر AET حاصله از دو روش ریزمقیاس‌نمایی، مشابه یکدیگر هستند، اما AET بدست آمده از LST ریزمقیاس‌نمایی شده، یک تغییرپذیری فضایی بالاتری را از خود نشان می‌دهد. مقایسه AET-SEBS با AET حاصل از روش پنمن - مانتیت - فائو نشان دهنده RMSE برابر با ۲/۲۶ است. بنابراین LST اثر زیادی در تولید نقشه‌های AET از روی تصاویر سنجش از دور دارد و ریزمقیاس‌نمایی کوکریجنگ برای ارائه نقشه‌های AET روزانه با وضوح فضایی متوسط مفید بوده است. در مجموع یافته‌های پژوهش نشان داد با به کارگیری روش ریزمقیاس‌نمایی و SEBS، می‌توان تبخیر و تعرق واقعی را در حوضه زاینده‌رود و برای مناطق خشک و نیمه خشک با دقت مطلوب محاسبه نمود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم SEBS، پوشش گیاهی، تبخیر و تعرق واقعی، ریزمقیاس‌نمایی، سنجش از دور.

۱- دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان Minaarast24@gmail.com
۲- دانشیار گروه بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان (نویسنده مسئول) aranjbar@kashanu.ac.ir
۳- استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد Kabdolla2010@gmail.com
۴- استادیار گروه جغرافیا و اکوتوریسم، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان hmousavi15@gmail.com

۱- مقدمه

سنجش از دور^۶ (RS) و به صورت فضایی، بیان انرژی سطح است، که اطلاعات را از منابع مختلفی چون تصاویر RS و داده‌های هواشناسی زمینی، ترکیب می‌کنند (لوپز و همکاران، ۲۰۱۹: ۶۹۳۵). این مطالعه ET را بعنوان یک متغیر فضایی بررسی می‌کند و مهم است که توزیع فضایی آن را در مقیاس‌های فضایی مختلف شناخت. به علاوه مدل‌های AET مبتنی بر RS، AET را از مقیاس‌های میدانی به مقیاس‌های منطقه‌ای در رزولوشن‌های فضایی و زمانی مختلف برآورد می‌کنند (گودا و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۲۵). در این زمینه، مدل‌های متعددی برای برآورد AET توسعه یافته‌اند مانند METRIC^۸، الگوریتم بیان انرژی سطح برای زمین^۹ (SEBAL)، بیان انرژی سطحی ساده‌سازی شده^{۱۰} (SSEBS)، سیستم بیان انرژی سطحی^{۱۱} (SEBS). همه این مدل‌ها به داده‌های حاصله از نوارهای حرارتی سنسورهای ماهواره‌ای نیاز دارند. الگوریتم بیان انرژی سطح یکی از مهمترین و پرکاربردترین روش‌های محاسبه بیان انرژی برای برآورد تبخیرتعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور است (چگ و همکاران، ۲۰۱۹: ۴۵؛ سنی و همکاران، ۲۰۰۷: ۹۸۲). نقشه‌های روزانه AET برآورد شده از داده‌های RS، بسیار درشت هستند، زیرا اندازه پیکسل‌ها معمولاً به قدری بزرگ هستند که تغییرپذیری فضایی موجود در حوضه‌های مختلف را با توجه به خطاها، به خوبی ارائه دهند (راو و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۸۸). خطاها ناشی از پیکسل‌هایی است که دارای پوشش گیاهی متنوع، شرایط زبری و مقادیر رطوبت خاک و .. مختلف هستند (زابو و همکاران، ۲۰۱۹: ۶۲۷).

تصاویر با وضوح فضایی بالا، ابزاری را برای شناسایی دقیقتر جزئیات و متغیر در فضا فراهم می‌کنند، در حالی که

ترکیب دو فرآیند جداگانه از دست رفتن آب از سطح خاک و آب‌های آزاد به صورت تبخیر و از گیاه به صورت تعرق، را تبخیرتعرق می‌نامند. تبخیر و تعرق، یکی از بخش‌های مهم در بیان چرخه آب است (زابو و همکاران، ۲۰۱۹: ۶۲۶). بیشتر مساحت ایران را مناطق خشک و نیمه خشک تشکیل می‌دهد. از طرفی میزان متوسط بارندگی در ایران حدود یک سوم متوسط بارندگی جهانی می‌باشد. این عوامل، اهمیت و ضرورت استفاده بهینه از آب و پیش‌بینی دقیق میزان تبخیرتعرق واقعی در کاربردهای مختلف از جمله کشاورزی و مدیریت منابع آب، اعم از برنامه‌ریزی آبیاری و مدل سازی رشد گیاه را نشان می‌دهد (لوپز و همکاران، ۲۰۱۹: ۶۹۳۴). بنابراین تعیین دقیق تبخیرتعرق واقعی، به دلیل اهمیت آن، همواره یکی از دغدغه‌های متخصصان است. با توجه به محدود بودن تعداد ایستگاه‌های هواشناسی و بالا بودن هزینه و زمان جمع‌آوری اطلاعات زمینی، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای، در صورت برخورداری از خروجی دقیق و مناسب، می‌تواند ابزار مناسبی برای تعیین تبخیرتعرق واقعی^۳ (AET) باشد (بریسکو و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۱۶). تولیدات ماهواره‌ای معمولاً به تصاویر با وضوح فضایی کم (دقت پایین)، متوسط و خوب (دقت بالا) تقسیم می‌شوند. تصاویر با وضوح زمانی و فضایی بالا برای ارائه نقشه‌های AET در سطح یک حوضه مفید هستند (ها و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۵۲). تولید نقشه‌های AET روزانه با رزولوشن فضایی بالا چالش‌برانگیز است، به دلیل آنکه تنها نوارهای حرارتی با وضوح ضعیف از سنسورهای ماهواره‌ای در رزولوشن زمانی مورد نیاز، در دسترس هستند (ها و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۵۳).

یکی از روش‌های برآورد AET، با استفاده از داده‌های

6- Remote Sensing

7- Gowda et al

8- Mapping evapotranspiration with internalized calibration

9- Surface Energy Balance Algorithm for Land

10- Simplified Surface Energy Balance

11- Surface Energy Balance System

12- Ochege et al

13- Senay et al

14- Rao et al

1- Szabó et al

2- Lopez et al

3- Actual Evapotranspiration

4- Brisco et al

5- Ha et al

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (س) / بررسی وضوح فضایی نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی در... / ۱۳۱

تصاویر سنجنده MODIS⁶ دارای قدرت تفکیک زمانی روزانه است، اما قدرت تفکیک مکانی پایین آن باعث شده کارایی آن برای کاربردهای محیطی محدود شود (کارولین و همکاران⁷، ۲۰۱۵: ۳۷). بنابراین پایش فرآیندهای محیطی مانند AET با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا، توسط سنجنده‌ای واحد امکان پذیر نیست. به همین دلیل روش‌های ترکیبی و استفاده از ریزمقیاس‌نمایی برای افزایش قدرت تفکیک مکانی داده‌ها مفید هستند (تکینسون⁸، ۲۰۱۳: ۱۰۸).

اولین نمونه‌ها از این روش، شامل ریزمقیاس‌نمایی باندهای حرارتی Landsat 7 بود، که با استفاده از شاخص NDVI⁹، به عنوان یک متغیر-همبسته و یکپارچه‌سازی نقشه‌برداری با وضوح فوق العاده برای ارزیابی ET در مقیاس‌های میدانی با استفاده از تلفیق تصویر بوده است (ماهور و همکاران¹⁰، ۲۰۱۵: ۳؛ رودریگوئزگالیانو و همکاران¹¹، ۲۰۱۲: ۵۱۸).

هدف از این مطالعه، بررسی اثر ریزمقیاس‌نمایی LST¹¹ با استفاده از روش کوکریجینگ در برآورد AET با استفاده از محصول SEBS در حوضه زاینده‌رود است. در این تحقیق، از ریزمقیاس‌نمایی کوکریجینگ برای افزایش وضوح باندهای حرارتی تصاویر RS استفاده می‌شود. علاوه بر این، مدل SEBS به منظور برآورد AET با استفاده از داده‌های تصویر ماهواره‌ای و اطلاعات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد و با روش پنمن-مانتیش-فائو از آمار موجود در ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه، ارزیابی و مقایسه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

حوضه زاینده‌رود بین طول و عرض جغرافیایی ۲۴° ۵۳'- ۵۰° ۰۲' شرقی و ۳۱° ۱۲'- ۳۳° ۴۲' شمالی در مرکز ایران قرار دارد (نگاره ۱). این حوضه با مساحتی برابر با ۴۱۵۱۸ km² در

تصاویر با وضوح زمانی بالا کمک می‌کنند تا تغییرات AET را در طول زمان و برای مقیاس‌های میدانی مختلف درک کنیم. در ژئواستاتیک، مقیاس، معادل با اندازه پشتیبانی است و انتقال مقیاس، به معنای تغییر پشتیبانی است. پشتیبانی برای تصاویر RS معادل با ردپای پیکسل است (ماهور و همکاران¹⁰، ۲۰۱۷: ۵۹).

ریزمقیاس‌نمایی، اندازه پشتیبانی مساحت پیکسل را کاهش می‌دهد، در نتیجه رزولوشن فضایی یک تصویر را افزایش می‌دهد که نوعی تفکیک‌شدگی است (تنگ و همکاران²، ۲۰۱۵: ۱۷۶). روش‌های تفکیک، به دو گروه روش‌های ریزمقیاس‌نمایی مبتنی بر مقیاس سنتی و روش‌های تلفیق تصویر، دسته‌بندی می‌شوند و هدف هر دو روش افزایش خواص طیفی و وضوح فضایی تصاویر، می‌باشد (ها و همکاران¹⁰، ۲۰۱۲: ۱۵۳). روش‌های ریزمقیاس‌نمایی با حفظ خواص رادیومتری تصویر، بوسیله مدل‌های زمین‌شناسی، یک تصویر با وضوح فضایی درشت را به تصویر با وضوح فضایی ریزتر، تبدیل می‌کنند. در روش تلفیق تصویر، از دو یا چند تصویر استفاده می‌شود، تا به طور همزمان، به تصاویر با وضوح فضایی و طیفی بالا دست یابد (ها و همکاران¹⁰، ۲۰۱۳: ۱۳۴). بسیاری از ماهواره‌هایی که قدرت تفکیک مکانی بالایی دارند در مقایسه با ماهواره‌هایی که قدرت تفکیک زمانی دارند، دارای طیفی پایین‌تر هستند (املیانو و همکاران²، ۲۰۱۳: ۲۰۶). به طور مثال تصاویر ماهواره‌ی لندست، با توجه به قدرت تفکیک مکانی بالا در بسیاری از کاربردهای محیطی همچون تهیه نقشه‌های تبخیر تعرق استفاده می‌شود. با توجه به قدرت تفکیک زمانی ۱۶ روزه و احتمال پوشش ابر در تصاویر لندست، در استفاده از این تصاویر به منظور پایش تغییرات دینامیکی از سطح زمین محدودیت وجود دارد (گانو و همکاران⁴، ۲۰۰۶: ۲۲۰۹؛ روی و همکاران⁵، ۲۰۰۸: ۳۱۱۸). به علاوه

6- The Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer

7- Caroline et al

8- Atkinson

9- Normalized Difference Vegetation Index

10- Rodriguez-Galiano et al

11- Land Surface Temperature

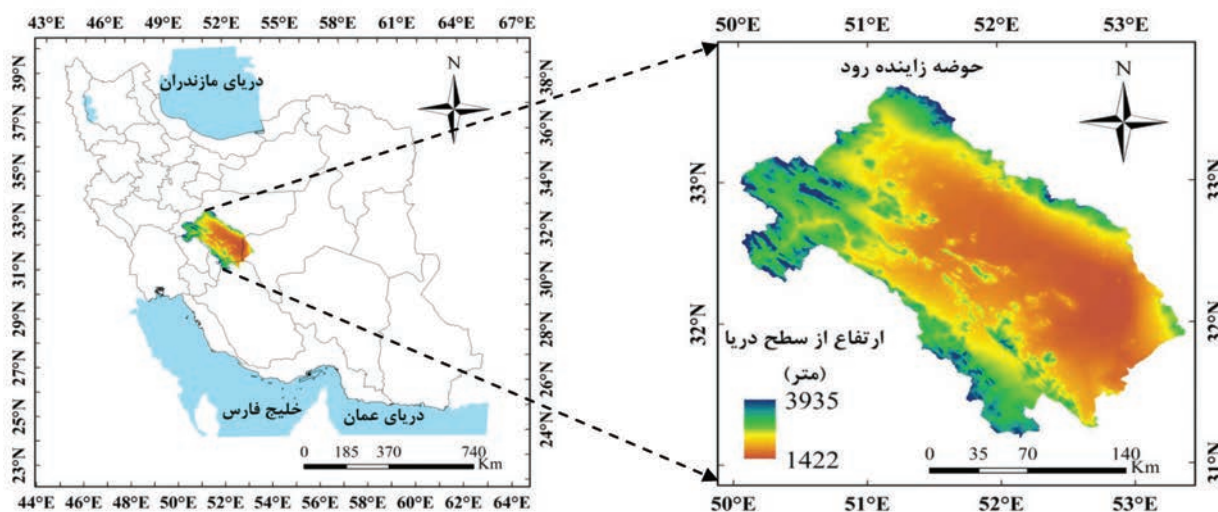
1- Mahour et al

2- Tang et al

3- Emelyanova et al

4- Gao et al

5- Roy et al



نگاره ۱: محدوده حوضه زاینده رود در ایران (چپ)، نقشه خطوط ارتفاعی حوضه زاینده رود (راست)

استان اصفهان و بخشی از استان‌های چهارمحال بختیاری، یزد و فارس قرار گرفته است. این حوضه وسیع دارای ارتفاع ۴۰۰۰ - ۱۱۰۰ متر از سطح دریا و دارای اقلیم فراخشک تا نیمه مرطوب با بارشی در حدود ۲۷۴ - ۹۵ میلیمتر است. حداقل و حداکثر دمای هوای آن به ترتیب برابر با ۱۰ و ۱۷ درجه سانتیگراد است.

۲-۲ تصاویر سنجنش از دور

تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این مطالعه از سنجنده‌ی MODIS (روزانه) تهیه شد. MODIS یکی از سنجنده‌های اپتیکال نصب شده بر روی ماهواره‌های Terra و Aqua با وضوح فضایی ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ متری است. در این مطالعه، چند محصول از این سنجنده مانند (MOD11A2)LST - وضوح ۱۰۰۰ متر) و شاخص NDVI (-MOD13Q1) - وضوح ۲۵۰ متر) مورد استفاده قرار گرفته است.

علاوه بر سنجنده MODIS، از تصاویر لندست ۸ (هر ۱۶ روز) نیز استفاده شد. این ماهواره، تصاویر حسگر چندطیفی با وضوح فضایی ۳۰ متر، تصویر حسگر پان‌کروماتیک با وضوح فضایی ۱۵ متر و دو کانال حرارتی با وضوح فضایی ۳۰ متر را ارائه می‌کند. تصاویر هر دو ماهواره در ماه ژوئن ۲۰۱۷ جمع آوری شد.

۳-۲ روش‌ها

روش مورد مطالعه در این تحقیق شامل سه مرحله است. اولین گام اعمال ریزمقیاس‌نمایی کوکریجینگ شده روی محصول MODIS LST رزولوشن درشت، برای برآورد AET رزولوشن متوسط روزانه با استفاده از SEBS می‌باشد. گام دوم ریزمقیاس‌نمایی AET رزولوشن درشت در وضوح فضایی ۲۵۰ متری است. محصول MODIS NDVI به عنوان یک متغیر-همبسته در هر دو مرحله استفاده می‌شود. مرحله سوم، شامل اعتبارسنجی با استفاده از LST و AET تهیه شده از تصاویر Landsat 8، است و در نهایت تبخیرتعلق شبیه‌سازی شده با تبخیرتعلق حاصل از روش پنمن-مانتیت-فائو مقایسه می‌شود.

۳-۳-۱ ریزمقیاس‌نمایی کوکریجینگ

هدف ریزمقیاس‌نمایی کوکریجینگ، ادغام مجموعه داده‌ها با وضوح فضایی متفاوت می‌باشد. تصویر کوکریجینگ شده با وضوح فضایی ریز به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود (رودریگوئزگالیانو و همکاران، ۲۰۱۲: ۵۱۹):

$$(1) \quad Z_{u0}^{k0}(s_0) = \sum_{i=1}^M \alpha_i Z_u^k(s_i) + \sum_{j=1}^N \beta_j Z_v^l(s_j)$$

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (SID)
 بررسی وضوح فضایی نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی در... / ۱۳۳

در رابطه (۲)، ماتریس معکوس C نشان دهنده واریوگرام‌ها و کراس واریوگرام‌ها میان دو RV در رابطه (۱) می‌باشد، که واریوگرام‌های تصاویر فضایی، Z_v^k پایین و Z_v^l بالا و کراس واریوگرام‌های بین آنها هستند. واریوگرام‌های تصاویر با رزولوشن فضایی بالا و پایین، به ترتیب با C_{uv}^{kk} و C_{uv}^{ll} نشان داده می‌شود. C_{vu}^{lk} یک کراس واریوگرام بین $Z_v^l(s)$ و $Z_v^k(s')$ است. h فاصله اقلیدسی فضایی بین مرکزوار s و s' از دو پیکسل می‌باشد (تکینسون و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۲۱).

دو واریوگرام $C_{u_0v}^{k_0k}(h)$ و $C_{u_0v}^{k_0l}(h)$ با استفاده از نظریه سیستم خطی بدست می‌آید، که به عنوان نقاط انتگرال‌گیری یا میانگین‌گیری درون یک پیکسل شناخته شده، می‌باشد (مدرون، ۱۹۶۳: ۱۱۴؛ پاپولیس و پیلای، ۲۰۰۲: ۲۱۵) (۳):

$$Z_{u_0}^{k_0}(s_0) = \frac{1}{|u_0(s_0)|} \int_{u_0(s_0)} Z_{\cdot}^{k_0}(y) dy$$

که در آن $Z_{\cdot}^{k_0}$ یک تابع تصادفی (RF) از نوار طیفی k_0 در مختصات مرکزی y در نقطه پشتیبانی \bullet است.

میانگین‌گیری یا انتگرال‌گیری در رابطه (۳) می‌تواند به عنوان یک کانولوشن مورد استفاده قرار گیرد که به پشتیبانی نقطه‌ای از RF و تابع پخش نقطه‌ای (PSF) در آن پیکسل مربوط می‌شود (رابطه ۴):

$$(4)$$

$$l_{u_0} = \begin{cases} \frac{1}{|u_0(s_0)|}, & y \in u_0(s_0) \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases}$$

$l_{u_0}(y)$ بعنوان تابع پاسخ می‌تواند ثابت یا غیر ثابت باشد و در این مطالعه از تابع ثابت استفاده می‌شود. PSF می‌تواند با پشتیبانی u و v ، بوسیله $l_{u_0}(y)$ ، به پیکسل از تصویر، اعمال شود.

واریوگرام پشتیبانی نقطه‌ای $C_{\cdot\cdot}^{k_0k}(h)$ و کراس واریوگرام $C_{\cdot\cdot}^{k_0l}(h)$ را می‌توان با استفاده از کانولوشن و

یک متغیر تصادفی (RV) پیش‌بینی کوکریجینگ شده - ریزمقیاس‌نمایی شده است که نشان دهنده مقدار پیکسل در مکان مرکزوار s_0 با پشتیبانی u_0 و باند طیفی k_0 می‌باشد.

در RV ، $Z_u^k(s_i)$ پیکسل‌هایی با پشتیبانی \bar{o} از تصویر با وضوح فضایی درشت و باند طیفی k می‌باشد و از N پیکسل استفاده می‌شود.

یک $Z_v^l(s_j)$ در RV در پیکسل‌هایی با پشتیبانی v از تصویر با وضوح فضایی ریز و باند طیفی l است و از M پیکسل استفاده می‌شود (رودریگوئزگالیانو و همکاران، ۲۰۱۲: ۵۱۹).

در این مطالعه، پیکسل‌های مربوط به محصول LST MODIS رزولوشن درشت، به عنوان RV استفاده شده است، که با استفاده از پیش‌بینی کننده کوکریجینگ شده، ریزمقیاس‌نمایی شده است. k_0 بیانگر تصویر LST ریزمقیاس‌نمایی شده با پشتیبانی u_0 که معادل 250m است، k نشان دهنده یک محصول رزولوشن درشت LST MODIS با پشتیبانی v برابر ۱۰۰۰ متری، و l نشان دهنده محصول MODIS NDVI رزولوشن فضایی بالا، با پشتیبانی v برابر 250 m می‌باشد.

پارامترهای α_i و β_j به عنوان دو مجموعه بهینه از وزن‌های برآورد شده‌اند، که دارای حداقل واریانس خطای پیش‌بینی هستند $E\{[Z_{u_0}^{k_0}(s_0) - Z_u^k(s_i)]^2\}$. این وزن‌ها با حل سیستم کوکریجینگ برای برآورد مقدار پیکسل $Z_{u_0}^{k_0}(s_0)$ حاصل می‌گردند تا یک برآوردگر بدون

تأثیر را ارائه دهند $E\{Z_{u_0}^{k_0}(s_0) - Z_v^l(s_j)\} = 0$

سیستم کوکریجینگ توسط معادله ماتریس $CX = B$ ارائه می‌شود (رابطه ۲):

$$C = \begin{bmatrix} C_{uv}^{kk}(h_{MM}) & C_{vv}^{kl}(h_{MN}) & 1 & 0 \\ C_{vu}^{lk}(h_{NM}) & C_{ww}^{kl}(h_{NN}) & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} C_{u_0v}^{k_0k}h_{01} \\ \vdots \\ C_{u_0v}^{k_0k}h_{0M} \\ C_{u_0v}^{k_0l}h_{01} \\ \vdots \\ C_{u_0v}^{k_0l}h_{0N} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_M \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_N \end{bmatrix}$$

1- Matheron
 2- Papoulis and Pillai

Rn شار تابش خالص، G شار گرمای خاک، H شار گرمای محسوس و λE شار گرمای نهان

اطلاعات ورودی به مدل SEBS از سه مجموعه تشکیل شده است: مجموعه اول شامل آلبیدوی سطح زمین، گسیلندگی، دما، کسر پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ گیاه و ارتفاع زبری. در صورت عدم دسترسی به اطلاعات گیاه، می توان NDVI را جایگزین کرد. مجموعه دوم شامل فشار بخار، دما، رطوبت و سرعت باد در ارتفاع مرجع است. سومین مجموعه شامل تابش خورشیدی ورودی و تابش طول موج بلند ورودی که به طور مستقیم می تواند اندازه گیری شود و یا به صورت خروجی مدل، پارامترسازی شود. پس از محاسبه جداگانه اجزای بیلان انرژی در رابطه، شار گرمای نهان برآورد می شود که در نهایت میزان تبخیر تعرق به دست می آید. اطلاعات ورودی به این مدل از سازمان هواشناسی کشور و تصاویر MODIS تهیه شد.

۲-۳-۴- محاسبه تبخیر و تعرق به روش پنمن-مونثیت-فائو

روش پنمن-مانثیت-فائو یک روش ترکیبی برای تبخیر تعرق می باشد و بر مبنای اطلاعات اقلیمی تهیه شده و از رابطه (۹) تعیین می گردد (عظیمی و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۶):

$$ET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[890/(T+273)]U_2(e_a - e_d)}{\Delta + (1 + 0.34U_2)}$$

ET: تبخیر تعرق گیاه مرجع (mm/d)
 R_n : تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (MJm⁻²d⁻¹)
 T : میانگین دمای هوا (°C)
 U_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (ms⁻¹)
 $e_a - e_d$: کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (KPa)
 γ : ضریب رطوبتی (KPa °C⁻¹)
 Δ : شیب منحنی فشار بخار (KPa °C⁻¹)
 G : شار گرما به داخل خاک (MJm⁻²d⁻¹)

تابع پاسخ ضربه محاسبه کرد (مدرون، ۱۹۶۳: ۱۱۴؛ پاپولیس و پیلائی، ۲۰۰۲: ۲۱۵) (رابطه ۵ و ۶):

$$C_{u_0 v}^{k_0 k} = C_{..}^{k_0 k}(h) * l_{u_0} * l_v(h) \quad (5)$$

$$C_{u_0 v}^{k_0 l} = C_{..}^{k_0 l}(h) * l_{u_0} * l_v(h) \quad (6)$$

* بیانگر عملگر کانولوشن است.

۲-۳-۲- بازیابی LST

در مطالعه حاضر، LST از کانال های حرارتی Landsat 8 با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا^۳ (SW) بازیابی می شود (جیمز مونوز و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۸۴۲) (رابطه ۷):

$$T_s = T_i + c_1(T_i - T_j) + c_2(T_i - T_j)^2 + c_0 + (c_3 + c_4w)(1 - \epsilon) + (c_5 + c_6w)\Delta\epsilon$$

که در آن T_i و T_j دماهای درخشندگی در Landsat 8، به ترتیب در باند حرارتی ۱۰ و ۱۱ (کلوین)، ϵ میانگین قابلیت نشر در دو باند حرارتی و $\Delta\epsilon$ اختلاف نشر میان باند ۱۰ و باند ۱۱ است. ϵ ، گسیلندگی، که بر اساس روش آستانه ای NDVI برآورد می شود (2014 Yu et al.). ضرایب c_0 به c_6 داده های شبیه سازی شده (جیمز مونوز و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۸۴۲) و w مقدار بخار آب جو (رن و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۰۴۶) است.

۲-۳-۳- محاسبه تبخیر تعرق بیلان انرژی سطح

پایه اصلی الگوریتم های سنجش از دور برای محاسبه تبخیر تعرق، معادله بیلان انرژی است. مبنای محاسبات مدل SEBS توسط سو^۶ (۲۰۰۲) شرح داده شده است. معادله کامل بیلان انرژی به صورت ذیل بیان می شود (سو، ۲۰۰۲: ۱۸۲) (رابطه ۸):

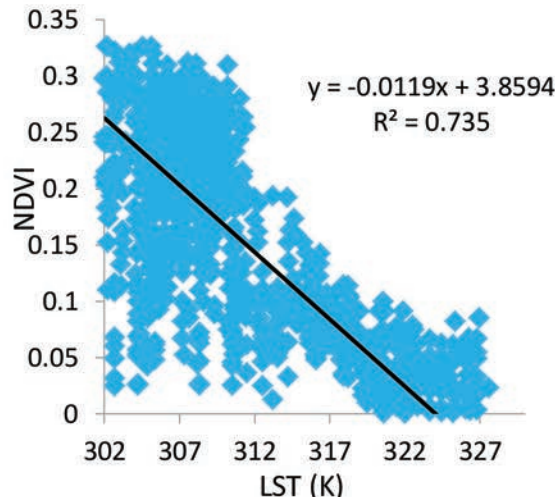
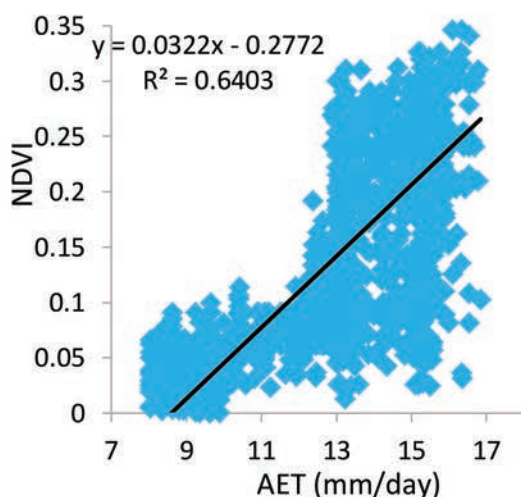
$$R_n = G_0 + H + \lambda E$$

- 1- Matheron
- 2- Papoulis and Pillai
- 3- Split Window algorithm
- 4- Jimenez-Munoz et al
- 5- Ren et al
- 6- Su

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (SID)
 بررسی وضوح فضایی نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی در... / ۱۳۵

جدول ۱: معیارهای آماری برای مقایسه‌ی نتایج خروجی مدل

پارامتر آماری	توصیف	رابطه
Δ_i	درصد خطای برآورد مدل برای روز i ام	$\frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100$
MAPD ¹	میانگین درصد اختلاف مطلق	$\frac{100}{O} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i \right]$
RMSD ²	ریشه‌ی میانگین مربع اختلافات	$\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$



نگاره ۲: رابطه پراکنش متغیرهای LST و AET با NDVI (وضوح ۲۵۰ متری)

ممکاران، ۱۳۹۶: ۱۱۵۰). در این جدول، P_i مقادیر خروجی مدل، O_i مقادیر مشاهداتی، n تعداد مشاهدات و $O = \ln O_i$ است.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- ریزمقیاس‌نمایی LST و AET

در مطالعه حاضر، میانگین LST برابر ۳۱۲/۵ کلوین (SD = 1.74) و متوسط AET روزانه برابر با ۱۲/۵ میلی‌متر/روز (SD = 0.86) است. برای ریزمقیاس‌نمایی، رابطه متغیرهای LST و AET را با NDVI، به عنوان یک متغیر-همبسته بررسی کردیم. همچنین برای بررسی رابطه بین متغیرهای وضوح بزرگ با NDVI، هر دو متغیر LST و AET، از وضوح ۱۰۰۰

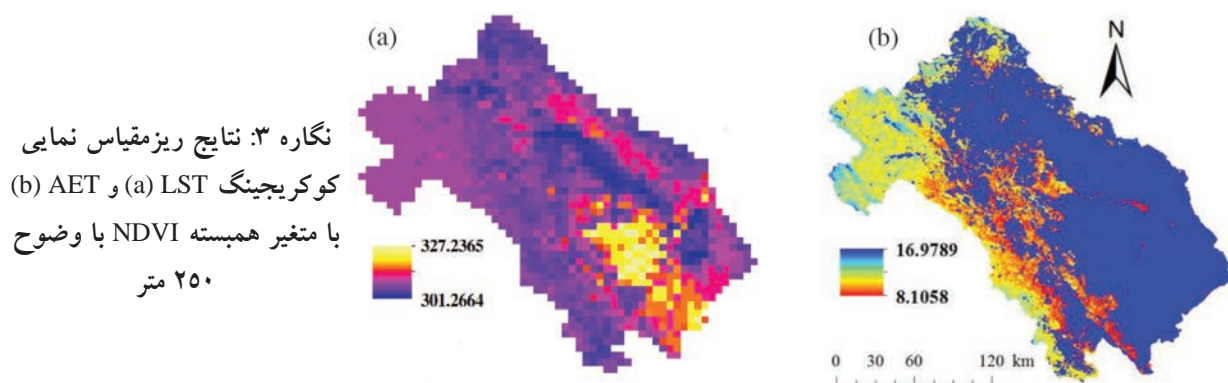
۲-۴- ارزیابی آماری و اعتبارسنجی

نتایج کوکریجینگ LST و AET ریزمقیاس‌نمایی، را با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 8 اعتبارسنجی نمودیم. با استفاده از کانال‌های حرارتی لندست ۸، یک LST مرجع با وضوح فضایی ۳۰ متری برآورد گردید. از الگوریتم SEBS به منظور تعیین AET از تصاویر Landsat 8 با وضوح فضایی ۳۰ متری استفاده شد. صحت داده‌های AET ریزمقیاس‌نمایی شده، با مقایسه‌ی LST و AET بزرگ مقیاس‌نمایی شده (وضوح ۲۵۰ متر) از Landsat 8، مورد ارزیابی قرار گرفت.

از معیارهای آماری جدول (۱) به عنوان شاخص‌های ارزیابی استفاده شد که مبین خطای برآورد مدل هستند (محمد/براهیم و

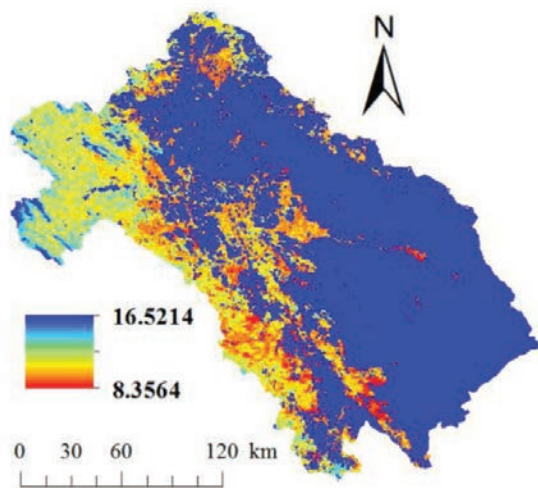
1- Mean Absolute Percent Difference

2- Root - Mean -Square Difference



نگاره ۳: نتایج ریزمقیاس نمایی کوکریجینگ LST (a) و AET (b) با متغیر همبسته NDVI با وضوح ۲۵۰ متر

پیکسل‌های اختلاطی که حاوی داده‌های خاک و پوشش گیاهی هستند، تغییر یافته است. همچنین مناطق با شدت بالای پوشش گیاهی که دارای LST پایین بوده‌اند، نسبت به سایر روش‌های ریزمقیاس‌نمایی تنها اندکی تغییر کرده‌اند (نگاره ۳ α).



نگاره ۴: تبخیرتغرق واقعی SEBS با استفاده از LST ریزمقیاس‌نمایی شده (وضوح ۲۵۰ متر)

۲-۳- مقایسه LST و AET ریزمقیاس‌نمایی شده با مقادیر حاصل از تصاویر Landsat 8

به منظور اعتبارسنجی نتایج LST و AET ریزمقیاس‌نمایی شده، از داده‌های LST بدست آمده از Landsat 8 (LST مرجع) استفاده شد.

نگاره ۵ نمودار پراکنش LST مرجع با استفاده از الگوریتم Landsat 8 و SW، با وضوح ۳۰ متر را نشان می‌دهد. در این نگاره برای مقایسه LST مرجع، با LST ریزمقیاس‌نمایی

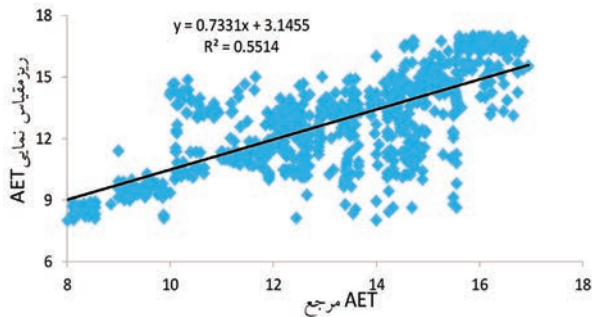
متری به ۲۵۰ متری دوباره نمونه‌برداری کردیم (نگاره ۲). در نگاره (۲) با وضوح 250m، یک رابطه منفی خطی ($r = -0.85$) بین LST و NDVI و یک رابطه مثبت ($r = 0.80$) بین NDVI و ET وجود دارد. براساس این شکل، LST پایین ($>305k$)، نشانگر منطقه‌ی دارای پوشش گیاهی بیشتر ($NDVI > 0.3$) است و در نقاطی که LST بالاتر است، NDVI کم و یا فقدان پوشش گیاهی مشاهده می‌شود. در نتیجه، در نقاط با AET بالاتر ($>12mm/day$)، پوشش گیاهی بیشتری مشاهده می‌شود.

نگاره ۳، LST و AET ریزمقیاس‌نمایی شده با NDVI (متغیر-همبسته) را نشان می‌دهد. برای بررسی انطباق نتایج حاصل از ریزمقیاس‌نمایی کوکریجینگ، تصاویر LST و AET ریزمقیاس‌نمایی شده را با وضوح اصلی (۲۵۰ متر) مجدداً نمونه‌برداری کردیم. نتایج نشان داد که انحراف استاندارد مشاهداتی LST ریزمقیاس‌نمایی شده، از $7/64k$ به $8/11k$ و برای AET از $2/14mm/day$ تا $2/53mm/day$ متغیر بود. این تغییر کم، نشان می‌دهد تصاویر ریزمقیاس‌نمایی شده از نظر تغییرپذیری، به داده‌های اصلی شباهت قابل قبولی دارند.

نگاره ۴ نتایج حاصله از تبخیرتغرق واقعی SEBS (AET-SEBS) را، با استفاده از LST ریزمقیاس‌نمایی شده (به عنوان ورودی الگوریتم SEBS) نشان می‌دهد. نتایج حاصل از AET-SEBS در مقایسه با AET ریزمقیاس‌نمایی شده، مشابه است، اما تغییرپذیری بیشتری برای AET-SEBS مشاهده شد. دلیل آن استفاده از LST ریزمقیاس‌نمایی شده در این الگوریتم است و نقشه AET-SEBS با توجه به مناطق

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (SID)
 بررسی وضوح فضایی نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی در... / ۱۳۷

حاصل از الگوریتم SW و Landsat 8 (وضوح ۲۵۰ متر)

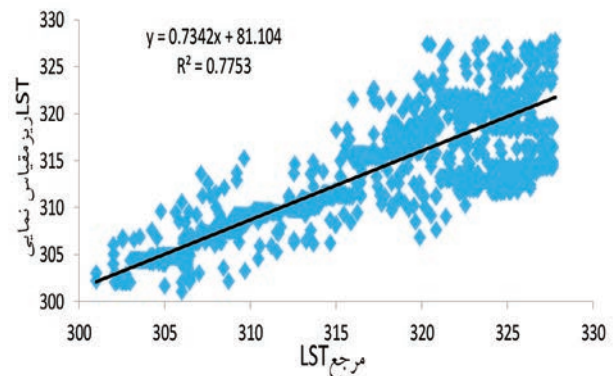


نگاره ۶: تفاوت میان AET ریزمقیاس‌نمایی شده و AET مرجع حاصل از Landsat 8 (وضوح ۲۵۰ متر)

۳-۳- بررسی قطعیت برآورد LST و AET دریافتی از Landsat 8

در مقاله حاضر، محصولات LST و ET دریافتی از MODIS، با وضوح ۱۰۰۰ متر به ۲۵۰ متر، ریزمقیاس‌نمایی و محصولات LST و AET دریافتی از داده‌های Landsat 8 نیز با همان وضوح بزرگ مقیاس‌نمایی شدند. سپس محصولات ریزمقیاس‌نمایی MODIS با محصولات بزرگ مقیاس‌نمایی Landsat 8 (مرجع) اعتبارسنجی شدند. نمودارهای پراکنشی LST و ET ارتباط قوی بین محصولات هر دو ماهواره MODIS ($r = 0/91$) و Landsat 8 ($r = 0/90$) را نشان می‌دهند (نگاره ۷). در نگاره ۷، LST به شدت به ET واقعی مرتبط است و میانگین‌گیری نشان می‌دهد که متوسط مقادیر LST و AET ریزمقیاس‌نمایی شده و مرجع نزدیک

شده، رزلوشن LST مرجع، بوسیله کوکریجینگ از ۳۰ متر به ۲۵۰ متری بزرگ مقیاس‌نمایی شد. نتایج تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که LST میانگین در هر دو داده مشاهداتی و مرجع شبیه یکدیگر است، اما انحراف استاندارد آنها متفاوت است: برای LST ریزمقیاس‌نمایی شده، برابر با $7/64$ ، در حالی که برای داده‌های LST مرجع برابر با $6/23$ است. علت آن، اختلافات کوچک بین مقادیر محدودده‌ای آنها است. AET ریزمقیاس‌نمایی و مقادیر AET مرجع در تمام اطلاعات آماری بررسی شده، شبیه یکدیگر است و همبستگی معنی‌دار داشتند. مقادیر میانگین AET ریزمقیاس‌نمایی ($12/56$ mm/day) و AET مرجع ($13/11$ mm/day) دارای اختلاف ناچیز هستند (نگاره ۶)، که این اختلاف ناشی از AET پایین‌تر با LST بالاتر دریافتی از سنسور Landsat 8 است.



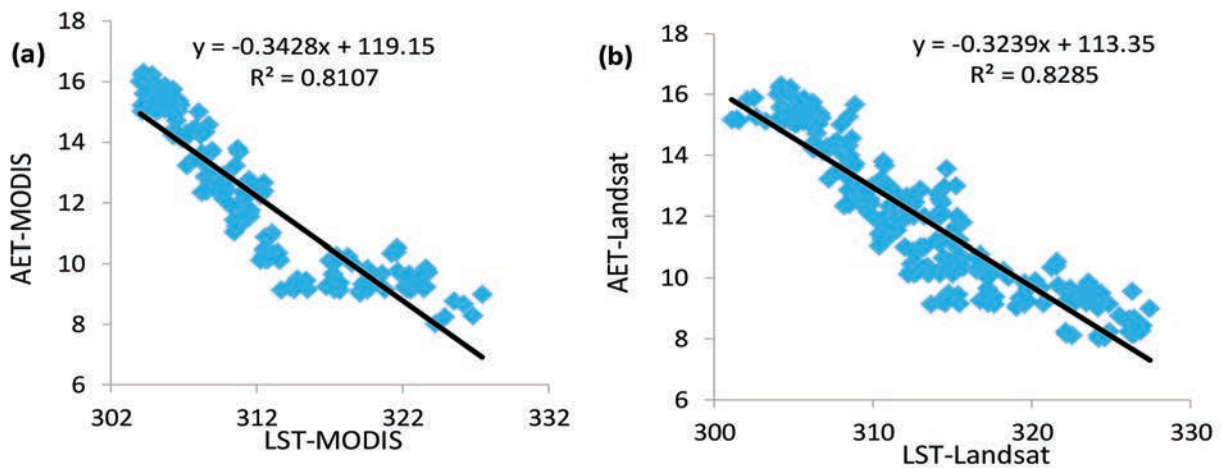
نگاره ۵: تفاوت میان LST ریزمقیاس‌نمایی شده و LST مرجع

جدول ۲- مقایسه بین LST ریزمقیاس‌نمایی (MODIS) با LST مرجع (Landsat 8)

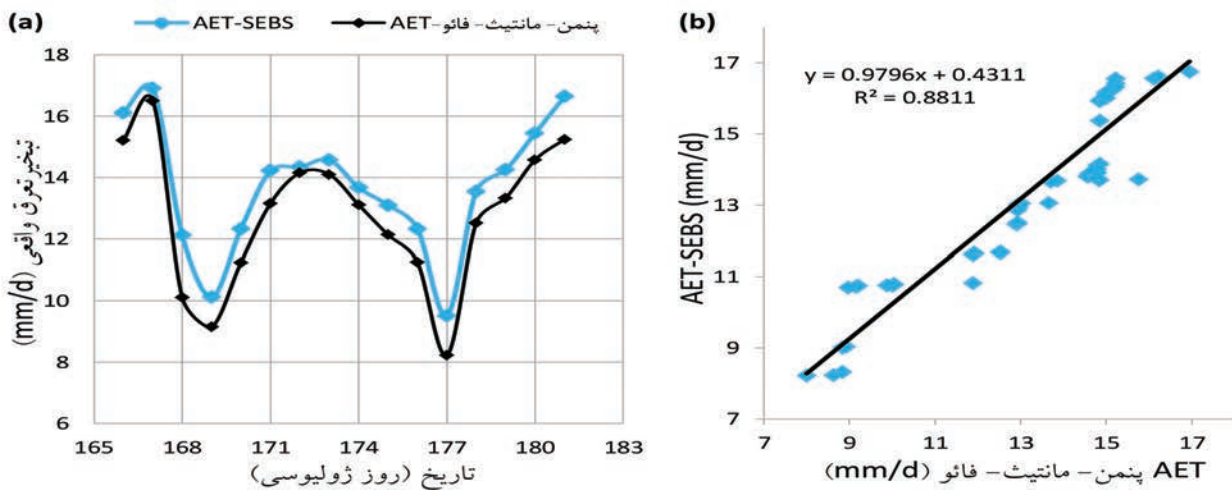
k: واحد	Min	Max	Mean	Sd	RMSE	r
LST ریزمقیاس‌نمایی	۳۰۱/۱۱	۳۲۷/۸۶	۳۱۵/۲۸۱	۷/۶۴	۴/۴۳۶	۰/۷۸۲
LST مرجع	۳۰۱/۰۰۲	۳۲۷/۳۱	۳۱۲/۵۸۲	۶/۲۳		

جدول ۳- مقایسه بین AET ریزمقیاس‌نمایی (MODIS) با AET مرجع (Landsat 8)

(mm/day): واحد	Min	Max	Mean	Sd	RMSE	r
AET ریزمقیاس‌نمایی	۸/۰۱	۱۶/۹۹	۱۲/۵۶	۲/۱۴	۱/۶۶۶	۰/۷۳۱
AET مرجع	۸/۰۰	۱۶/۷۵	۱۳/۱۱	۲/۳۳		



نگاره ۷: مقایسه بین (a): LST و AET تهیه شده از MODIS از وضوح ۱۰۰۰ متر و (b): LST و AET حاصل از Landsat 8 از وضوح ۲۵۰ متر



نگاره ۸: (a): مقایسه مقادیر تبخیرتغرق روزانه حاصل از SEBS و روش پنمن-مانتیت-فائو و (b): همبستگی میان تبخیرتغرق حاصل از نتایج شبیه‌سازی با الگوریتم SEBS و تبخیرتغرق حاصل از روش پنمن-مانتیت-فائو

شبیه‌سازی و تبخیرتغرق حاصل از شبیه‌سازی Landsat 8 برای ۱۶ روز مختلف نشان دهنده انطباق خوب بین مقادیر بدست آمده از تصاویر شبیه‌سازی شده و مقادیر حاصل از روش پنمن-مانتیت-فائو است. صالحی و همکاران (۱۳۹۷) نیز در بررسی امکان سنجی تولید نقشه‌های تبخیرتغرق به کمک الگوریتم بیلان انرژی سطح و تصاویر MODIS با قدرت تفکیک تصویر Landsat 8 دریافتند که نتایج شبیه‌سازی تبخیرتغرق با نتایج حاصل از روش پنمن-

به یکدیگر هستند (جدول‌های ۲ و ۳).
 نگاره ۶، نشان دهنده همبستگی بالای موجود، بین داده‌های تبخیرتغرق حاصل از دو تصویر شبیه‌سازی شده و اصلی Landsat 8 برای دوره‌ی مطالعاتی است. همچنین مقدار RMSE تبخیرتغرق حاصل از باندهای شبیه‌سازی شده در مقایسه با تبخیرتغرق حاصل از روش پنمن-مانتیت-فائو برابر ۲/۲۶ میلی‌متر برروز محاسبه شد. بر اساس هر دو نمودار در نگاره ۸، مقایسه نتایج تبخیرتغرق حاصل از

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (س) /
بررسی وضوح فضایی نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی در... / ۱۳۹

استفاده از الگوریتم‌های SADFDT و "STARFM". سنجش از دور و GIS ایران. ۱۰(۳): ۱۴۰-۱۲۳.

۲. عظیمی، ع.، رنگزن، ک.، کابلی زاده، م.، خرمیان، م. ۱۳۹۴. "برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از سنجش از دور، شبکه‌های عصبی مصنوعی و مقایسه نتایج آن با روش پنمن - مانیت - فائو در باغات مرکبات شمال خوزستان". سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. ۶(۴): ۷۵-۶۱.

۳. محمد ابراهیم، مهدی، محمدرضاپور، احمد، اکبرزاده مقدم سه قلعه، هادی، ۱۳۹۶. "ارزیابی مدل سبس در برآورد تبخیر تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در مقیاس منطقه‌ای (مطالعه موردی: دشت سیستان)". مجله اکوهیدرولوژی، ۴(۴): ۱۱۵۰-۱۱۴۱.

4. Atkinson, P.M. 2013. "Downscaling in remote sensing," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 22:106-114. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.04.012>

5. Brisco, B., R.J. Brown., T. Hirose., H. McNairn., K. Staenz. 2014 "Precision agriculture and the role of remote sensing: a review." *Can. J. Rem. Sens*, 24:315-327. <http://dx.doi.org/10.1080/07038992.1998.10855254>

6. Caroline, M., F.Gevaert., J. Gercia-Haro. 2015. "A comparison of STARFM and an unmixing based algorithm for Landsat and MODIS data fusion." *Remote Sensing of Environment*, 156:34-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.012>

7. Emelyanova, I.V., T.R. McVicar., T.G. Van Niel., L.T. Li., A.I.J. Van Dijk. 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.007>

8. Gao, F., J. Masek., M. Schwaller., F. Hall. 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. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2006.872081>

9. Gowda, P.H., J.L. Chavez., P.D. Colaizzi., S.R. Evett., T.A. Howell., J.A. Tolk. 2007. "ET mapping for agricultural water management: present status

مانیت - فائو انطباق نسبتاً خوبی داشته است.

۴- نتیجه گیری

بررسی اثرات ریزمقیاس‌نمایی کوکریجینگ دمای سطح زمین، در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه زاینده‌رود، نشان داد که، ریزمقیاس‌نمایی کوکریجینگ، به خوبی بر تصاویر سنجنده‌ی MODIS اعمال شد و نقشه‌ی LST هموار را تحت تأثیر اطلاعات نسبتاً هموار NDVI تولید نمود. روش کوکریجینگ با مدل واریوگرام و کراس واریوگرام‌ها از نظر میزان معیارهای خطا نتایج قابل قبول و مناسبی ارائه داد. همچنین روش ریزمقیاس‌نمایی کوکریجینگ، بر سایر محصولات تصویری ماهواره‌ای که در آن یک رابطه قوی بین یک متغیر قابل پیش‌بینی و یک متغیر-همبسته وجود دارد، نیز قابل اعمال است. روش AET-SEBS در مقیاسه با AET ریزمقیاس‌نمایی شده، نتایج قابل قبولی دارد، اما AET حاصل از الگوریتم SEBS، به دلیل استفاده از LST ریزمقیاس‌نمایی شده، تغییرپذیری بیشتری دارد. به علاوه نقشه‌های AET-SEBS تحت تأثیر داده‌های خاک، پوشش گیاهی و هواشناسی، تغییر می‌کند. در نقشه AET-SEBS، مناطق با شدت بالای پوشش گیاهی که دارای LST پایین بوده‌اند، نسبت به سایر روش‌های ریزمقیاس‌نمایی تنها اندکی تغییر کرده‌اند. بنابراین می‌توان اذعان داشت که، نتایج تخمین و ریزمقیاس‌نمایی تبخیر و تعرق با روش کوکریجینگ تفاوت فاحشی با محصول SEBS ندارند و تقریباً نزدیک به هم هستند. استفاده از الگوریتم SEBS و کوکریجینگ برای تولید تبخیر تعرق‌های روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر برای مناطق همگن توصیه می‌شود. همچنین برای اهداف مدیریتی مرتبط با تعیین نقشه‌های AET روزانه در رزولوشن‌های فضایی ریزتر که هر روزه در دسترس هستند، نیازمند پیشرفت‌های بیشتری است.

منابع و مآخذ

۱. صالحی، ح.، شمس‌الدینی، ع.، میرلطیفی، س.م. ۱۳۹۷. "ریزمقیاس‌نمایی تصویری مادیس به منظور تهیه نقشه تبخیر تعرق روزانه با قدرت تفکیک تصویری لندست با

- 019.1643531
18. Papoulis, A., Pillai, S.U., 2002. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes.
19. Rao, M, Z. Silber-Coats., S. Powers., L. Fox III & A. Ghulam. 2017. "Mapping drought-impacted vegetation stress in California using remote sensing." *GIScience & Remote Sensing*, 54:2, 185-201, DOI: 10.1080/15481603.2017.1287397
20. Ren, H., C. Du, Q. Qin., R. Liu., J. Meng., J. Li. 2014 "Atmospheric water vapor retrieval from Landsat 8 and its validation. In: 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium." *IEEE*, 3045–3048. <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947119>.
21. Rodriguez-Galiano, V., E. Pardo-Iguzquiza., M. Sanchez-Castillo., M. Chica-Olmo., M. Chica-Rivas. 2012. "Downscaling Landsat 7 ETM+ thermal imagery using land surface temperature and NDVI images." *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf*, 18:515– 527. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2011.10.002>.
22. Roy, D.P., Ju, J., Lewis, P., Schaaf, C., Gao, F., Hansen, M., 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.009>
23. Senay, G.B., Budde, M., Verdin, J.P., Melesse, A.M., 2007. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. *Sensors* 7, 979–1000. <http://dx.doi.org/10.3390/s7060979>.
24. Su, Z. 2002. "The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 6:85–100. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>.
25. Szabó, S., L. Elemér., Z. Kovács., Z. Püspöki., A. Kertész., S. Kumar Singh & B. Balázs. 2019. "NDVI dynamics as reflected in climatic variables: spatial and temporal trends – a case study of Hungary." *GIScience & Remote Sensing*, 56:4, 624-644, <http://dx.doi.org/10.1080/15481603.2018.1560686>
26. Tang, Y., P.M. Atkinson., J. Zhang. 2015. "Downscaling remotely sensed imagery using area-to-point cokriging and multiple-point geostatistical simulation." *ISPRS J. Photogramm. Rem. Sens*, 101:174–185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.12.016> and challenges." *Irrig. Sci*, 26:223–237. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-007-0088-6>
10. Ha, W., P.H. Gowda., T.A. Howell. 2013 "A review of downscaling methods for remote sensing-based irrigation management." *Journal of Irrigation Science*, 31: 831-850. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-012-0331-7>
11. Ha, W., H. Prasanna., P.H. Gowda., A. Terry., T.A. Howell. 2013. "Downscaling of Land Surface Temperature Maps in the Texas High Plains with the TsHARP Method." *GIScience & Remote Sensing*, 48(4):583-599. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.48.4.583>
12. Ha, W., P.H. Gowda., T.A. Howell. 2012. "A review of potential image fusion methods for remote sensing-based irrigation management: part II." *Irrig. Sci*, 31:851–869. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-012-0340-6>
13. Jimenez-Munoz, J.C., J.A. Sobrino., D. Skokovic., C. Mattar., J. Cristobal. 2014 "Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data." *IEEE Geosci. Rem. Sens. Lett*, 11:1840–1843. <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>.
14. Lopes, J.D., L.N. Rodrigues., H.M. Acioli Imbuzeiro & F.F. Pruski. 2019. "Performance of SSEBop model for estimating wheat actual evapotranspiration in the Brazilian Savannah region." *International Journal of Remote Sensing*, 40:18, 6930-6947. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2019.1597304>
15. Mahour, M., V. Tolpekin., A. Stein., A. Sharifi. 2017 "A comparison of two downscaling procedures to increase the spatial resolution of mapping actual evapotranspiration." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 126:56-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.02.004>
16. Mahour, M., A. Stein., A. Sharifi., V. Tolpekin. 2015. "Integrating super resolution mapping and SEBS modeling for evapotranspiration mapping at the field scale." *Precis. Agric*, 1–28. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-015-9395-8>. Matheron, G., 1963. Principles of geostatistics. *Econ. Geol.* 58, 1246–1266. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>.
17. Ochege, F.U., L. G. Luo., M.C. Obeta., G. Owusu., E. Duulatov., L. Cao. 2019. "Mapping evapotranspiration variability over a complex oasis-desert ecosystem based on automated calibration of Landsat 7 ETM+ data in SEBAL." *GIScience & Remote Sensing* Published online: 16 Jul 2019. <https://doi.org/10.1080/15481603.2>