

## ارزیابی مدل SEBS در برآورد تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در مقیاس منطقه‌ای (مطالعه موردی: دشت سیستان)

مسعود محمدابراهیم<sup>۱</sup>، ام‌البنی محمدرضا پور<sup>۲\*</sup>، هادی اکبرزاده مقدم سه‌قلعه<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه زابل

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۱/۲۳؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۳/۳۰)

### چکیده

هدف از انجام این پژوهش، برآورد تبخیر و تعرق واقعی دشت سیستان با استفاده از فناوری سنجنش از راه دور و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس و بررسی کارایی مدل بیان انرژی سطحی SEBS در برآورد تبخیر و تعرق واقعی روی محدوده مطالعه شده است. برای این منظور شارهای سطحی بیان انرژی برای هر پیکسل تصویر محاسبه و مقدار تبخیر و تعرق واقعی به صورت باقی مانده معادله توازن انرژی در سطح برآورد شد. سپس نتایج برآورد شده با نتایج اطلاعات زمینی دو نقطه شامل ایستگاه‌های سینوپتیک زهک و ایستگاه مخزن چاه نیمه ۱ مقایسه شد. نتایج نشان داد مطابق نقشه توزیع مکانی تبخیر- تعرق لحظه‌ای، بیشترین میزان تبخیر برای سطح پیکره‌های آبی از جمله مخازن چاه نیمه و قسمتی از تالاب هامون است. این میزان برابر ۱/۱۳ میلی‌متر بر ساعت است. مناطق کشاورزی دشت سیستان نیز با داشتن توزیع میزان تبخیر بین ۰/۵ تا ۱ سهم زیادی در تبخیر- تعرق منطقه دارد. مقایسه و ارزیابی نتایج مدل SEBS با دو نقطه زمینی با معیارهایی مانند میانگین درصد اختلاف مطلق، ریشه میانگین مربع اختلافات و معیار ضریب همبستگی نشان می‌دهد مدل SEBS عملکرد خوبی در سطح زمین و آب دارد.

**کلیدواژگان:** پنمن مانیت، تبخیر- تعرق، دشت سیستان، سنجنش از دور، SEBS.

## مقدمه

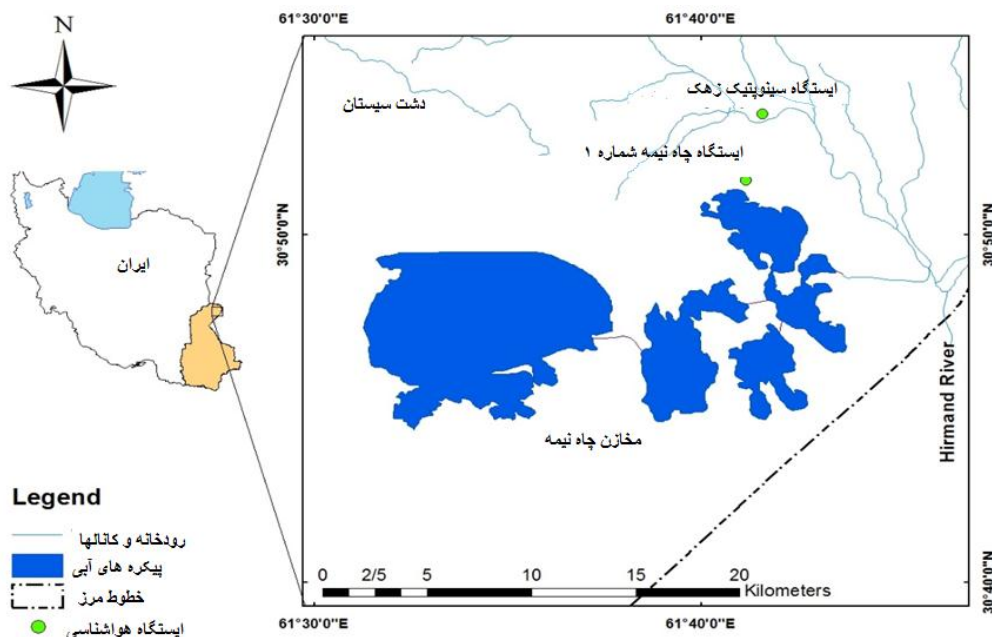
تبخیر- تعرق (ET) یک فرایند بسیار پیچیده است که شامل تعاملات طیف وسیعی از متغیرهای زمینی و جوی، از جمله دمای سطح زمین، دمای هوا، سرعت باد، رطوبت و همچنین ارتفاع و تراکم پوشش گیاهی است [۱]. روش‌های اقلیمی یا هواشناسی مبتنی بر داده‌های نقطه‌ای، نمی‌توانند تخمین خوبی از تبخیر و تعرق در سطح بزرگ داشته باشند [۲]. از طرفی نیز روش بیلان آب می‌تواند تبخیر- تعرق را فقط در مقیاس حوضه و در درازمدت آن هم به‌طور کلی برآورد کند و به‌شکل سالیانه به‌کار رود که این هم نمی‌تواند الزامات مطالعات کوتاه‌مدت را برآورده سازد [۳]. با مشاهده این مسائل، یک روش کاربردی برای برآورد توزیع شارهای حرارت فضایی در دو مقیاس میدانی و حوضه‌ای از طریق استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور وجود دارد [۴ و ۵]. روش‌های مبتنی بر سنجش از دور می‌توانند برای برآورد تبخیر- تعرق واقعی به کار روند، به‌طوری که میزان تبخیر- تعرق را در مقیاس پیکسل در پیکسل برای دوره‌های زمانی کوتاه در یک سطح فضایی بزرگ فراهم کند [۶ و ۷]. تعدادی از مدل‌های تبخیر و تعرق سنجش از راه دور مانند SEBS [۸]، SEBAL [۹] و METRIC [۱۰] با اعتبارسنجی موفق در مقیاس مکانی از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح خوب (به‌طور مثال، لندست و سنجنده ASTER) توسعه یافتند [۹-۱۲]. مطالعات موردی متعددی با استفاده از این مدل‌ها صورت گرفته است که به چند نمونه اشاره می‌شود: Evans و همکارانش در سال ۲۰۰۹ با انجام تحقیقی روی منطقه مینده استرالیا مدل SEBAL را برای اراضی کشاورزی به‌صورت موفق ارائه دادند [۱۳]. JIN و همکارانش در سال ۲۰۰۵ در مقیاس منطقه‌ای روی حوضه تیوان کشور چین از مدل SEBS برای برآورد نیاز آبی گیاهان استفاده کردند [۱۴]. Jia و همکارانش طی تحقیقی در سال ۲۰۰۹ مقدار تبخیر- تعرق روزانه و سالیانه را با استفاده از داده‌های مودیس در دلتای رودخانه زرد در چین تخمین زدند [۱۵]. Muthuwatta و همکارانش در سال ۲۰۱۰ برای ارزیابی میزان آب در دسترس حوضه رودخانه کرخه از ۱۹ تصویر خالی از ابر سنجنده MODIS و الگوریتم SEBS در یک دوره یک‌ساله استفاده کردند [۱۶]. Elhag و همکارانش در سال ۲۰۱۱ با انجام تحقیقی روی دلتای رودخانه نیل برای برآورد تبخیر- تعرق از مدل SEBS استفاده کردند. در این

تحقیق برای صحت‌سنجی مدل از یک شبکه نقاط اندازه‌گیری واقعی با ۹۲ نقطه در منطقه مطالعاتی استفاده شد که نتایج مدل SEBS در مقایسه با این مقادیر سطح دقت قابل قبولی داشت، از این‌رو کارایی مدل SEBS در برآورد تبخیر- تعرق اثبات شد [۱۷]. سیمایی و همکارانش در سال ۱۳۹۲ مدل SEBAL را برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در بخشی از حوضه آبریز زنگان‌رود، که اقلیم نیمه‌خشک دارد، ارزیابی کردند. همچنین مقایسه نتایج مدل SEBAL با تشتک تبخیر نشان داد این مدل می‌تواند تبخیر و تعرق واقعی را با دقت مناسبی برآورد کند [۱۸]. نصرتی و همکارانش در سال ۱۳۹۴ با استفاده از مدل SEBAL اصلاح‌شده تبخیر- تعرق واقعی مناطق کوهستانی حوضه آبخیز طالقان را برآورد کردند. آنها نتایج خود را با داده‌های لایسیمتر مقایسه کردند که نتایج نشان‌دهنده همبستگی زیاد مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط لایسیمتر و برآوردشده با مدل SEBAL بود [۱۹]. در این تحقیق دو هدف عمده برآورد تبخیر- تعرق واقعی یا استفاده از مدل SEBS و تصاویر سنجنده MODIS در منطقه مطالعاتی سیستان به عنوان یک منطقه نیمه‌خشک با توجه به تغییرات جغرافیایی و پوشش گیاهی منطقه و مقایسه تکنیک سنجش از دور با روش‌های مبتنی بر اطلاعات زمینی (ایستگاه سینوپتیک زهک و مخازن چاه نیمه ۱) است.

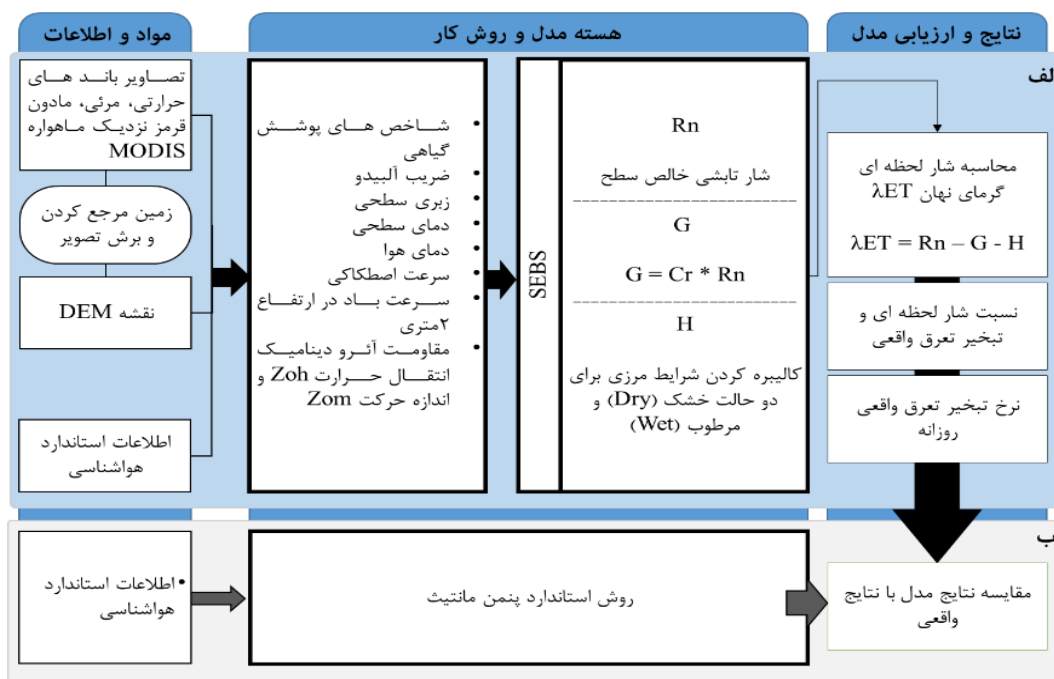
## مواد و روش‌ها

## منطقه مطالعاتی

دشت سیستان در قسمت شمال استان سیستان و بلوچستان در شرق ایران در محدوده جغرافیایی "۳۰°۱۸' و "۳۱°۲۰' شمالی و "۱۰°۶۱' و "۵۰°۶۱' شرقی واقع شده است. این منطقه با ارتفاع بین ۴۷۰ تا ۵۰۰ متر از سطح دریا اقلیم گرم و خشک دارد. میانگین بارش سالانه آن ۵۹/۶ میلی‌متر است و دمای آن از ۹/۵- تا ۴۹ درجه سانتی‌گراد متغیر است. به‌طور متوسط وسعت این ناحیه، ۱۵۶۱۱۵ هکتار است. همچنین دشت سیستان یکی از دشت‌های داخلی فلات ایران است که با آبرفت‌های دلتای قدیمی و فعلی رودخانه هیرمند و سیلاب‌های تاریخی زیر پوشش قرار گرفته است. در انتخاب منطقه مطالعاتی وجود اراضی کشاورزی وسیع و همواربودن منطقه و نیز تنوع گیاهی منطقه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی دشت سیستان



شکل ۲. فلوچارت روند محاسباتی تحقیق

ابتدا برای مدل‌سازی مدل‌های بیلان انرژی اطلاعات استاندارد هواشناسی مانند سرعت باد، ساعات آفتابی و دماهای بیشینه، کمینه و نقطه شبنم به‌عنوان اطلاعات زمینی مدل استفاده می‌شود. طبق مطالعات انجام‌شده و توصیه دستورالعمل استاندارد مدل‌های بیلان انرژی سطحی زمین

مراحل اجرای تحقیق و داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی به‌منظور برآورد میزان تبخیر- تعرق واقعی روزانه از روش بیلان انرژی، روند محاسباتی ترسیم‌شده در شکل ۲ به‌کار رفته است.

منطقه به دست آید. مجموعه دوم شامل فشار بخار، دما، رطوبت و سرعت باد در ارتفاع مرجع است. ارتفاع مرجع همان ارتفاع اندازه‌گیری شده در نقطه کاربردی (PBL (لایه مرزی سیاره‌ای) برای منطقه مطالعه شده است. سومین مجموعه شامل تابش خورشیدی ورودی و تابش طول موج بلند ورودی که به طور مستقیم می‌تواند اندازه‌گیری شود یا به صورت خروجی مدل، پارامترسازی شود. برای برآورد شارهای آشفته لازم است اجزای بیلان انرژی به‌طور جداگانه ( $R_n$ ,  $G$  و  $H$ ) در رابطه محاسبه و سپس شار گرمای نهان ( $\lambda ET$ ) برآورد شده که در نهایت به میزان تبخیر و تعرق ( $ET$ ) تبدیل شود.

#### برآورد تبخیر و تعرق واقعی روزانه

برای برآورد تبخیر و تعرق روزانه ماهواره از مقدار لحظه‌ای آن، از نسبت تبخیر و تعرق گیاه مرجع روزانه به ساعتی استفاده شد. به این منظور تبخیر و تعرق گیاه مرجع (حاصل از روش پنمن-مانتیت-فائو [۱۰] در مقیاس ساعتی (میلی‌متر در ساعت) در لحظه گذر ماهواره ( $ET_{r-inst}$ ) و همچنین میزان آن در مقیاس روزانه بر حسب میلی‌متر در روز ( $ET_{r-24}$ ) برای ایستگاه هواشناسی معرف منطقه (ایستگاه سینوپتیک زهک) محاسبه شد. سپس از رابطه ۲ میزان تبخیر و تعرق واقعی روزانه مدل‌های ماهواره‌ای ( $ET_{act-24}$ ) بر حسب میلی‌متر در روز برآورد شد [۹].

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} \frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}} \quad (2)$$

به این منظور برای هر روز یک نسبت به دست می‌آید که با ضرب کردن در مقادیر روزانه تبخیر و تعرق پتانسیل، مقادیر روزانه تبخیر و تعرق واقعی برای آن روز حاصل می‌شود.

#### یافته‌ها

نتایج این تحقیق در دو بخش الف) نقشه‌های شاخص‌های بیلان انرژی به صورت منطقه‌ای و نتایجی که در برآورد تبخیر و تعرق واقعی به کار رفته است و ب) تحلیل و بحث محاسبات الگوریتم و نتایج تبخیر و تعرق واقعی به دست آمده از مدل SEBS ارائه شد. ارزیابی و مقایسه نتایج محاسبه شده مدل SEBS با نتایج به دست آمده از روش نقطه‌ای پنمن مانیتیت و تشتک تبخیر در دو نقطه

فاصله ایستگاه اندازه‌گیری اطلاعات زمینی نباید از ۲۰ کیلومتر بیشتر باشد [۹]. از این رو، ایستگاه سینوپتیک زهک واقع در محدوده جغرافیایی  $31^{\circ} 41'$  شرقی و  $30^{\circ} 54'$  شمالی با ویژگی مرکزیت در منطقه مطالعاتی، انتخاب شد. کشت غالب اراضی کشاورزی حاشیه ایستگاه سینوپتیک در فصل تابستان علوفه است. به دلایل متعددی همچون وسعت زیاد منطقه مطالعاتی و همچنین نیاز به تصاویر با فاصله زمانی کم از تصاویر سنجنده مودیس استفاده شد. کلیه تصاویر مورد نیاز این تحقیق نه باند سنجنده مودیس است که باندهای ۱ و ۲ (۲۵۰ متر)، ۳ تا ۷ (۵۰۰ متر) و باندهای حرارتی ۳۱ و ۳۲ (۱۰۰۰ متر) را شامل می‌شوند. ۵۶ مجموعه تصویر در سه دامنه طیفی تهیه و زمین مرجع شد. با توجه به وجود کشیدگی و میزان ابر و گردوغبار شدید در منطقه بهترین تصاویر گزینش شد که در نهایت، تعداد ۱۳ تصویر برای دوره زمانی مطالعه شده (۲۰۱۲/۰۶/۱۸ تا ۲۰۱۲/۰۹/۲۴) به‌طور متوسط در هر ۱۰ روز یک تصویر انتخاب شد.

#### مدل SEBS

اساس نظری و محاسباتی مدل SEBS توسط پروفیسور سو در سال ۲۰۰۲ شرح داده شده است. به طور کلی، در مدل SEBS، مقدار تبخیر و تعرق از تصاویر ماهواره‌ای با به کارگیری یک بیلان انرژی در سطح تعیین می‌شود. جایی که انرژی مصرف شده توسط تبخیر-تعرق به‌عنوان یک باقی‌مانده از معادله انرژی سطحی محاسبه می‌شود:

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

در معادله یادشده،  $LE$  شار گرمای نهان،  $R_n$  شار تابش خالص،  $G$  شار گرمای خاک و  $H$  شار گرمای محسوس است. مؤلفه‌ها و پارامترهای جزئی در معادله ۱ بر حسب وات بر مترمربع بیان می‌شوند.

#### اطلاعات ورودی مدل SEBS

اطلاعات ورودی مدل SEBS شامل سه مجموعه به شرح زیر است:

مجموعه اول شامل آلبیدوی سطح زمین، گسیلندگی، دما، کسر پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ LAI و ارتفاع گیاه (یا ارتفاع زبری). وقتی اطلاعات گیاه در دسترس نباشد، شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی NDVI به‌عنوان جایگزین استفاده می‌شود. این مجموعه می‌تواند از داده‌های سنجش از راه دور با دیگر اطلاعات سطحی

مشاهده می‌شود. مقایسه شکل‌های (a-۳)، (b-۳)، (c-۳) و (d-۳) نیز بیان‌کننده همین موضوع‌اند.

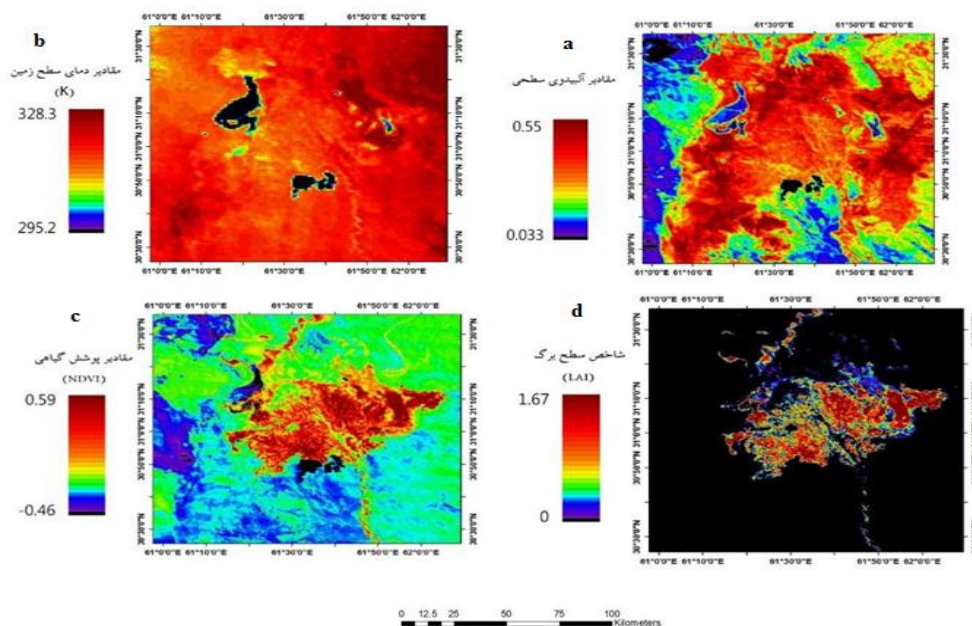
توزیع شاخص NDVI در محدوده ۰/۴۶- تا ۰/۵۹ (بی‌بعد) متغیر است و این در حالی است که توزیع دمای سطحی Ts بین ۲۹۶ تا ۳۱۸ درجه کلوین متغیر است. شاخص گیاهی برای سطح خشکی حدود صفر تا ۰/۵۹ است که مقدار متوسط این شاخص به دلیل زمان تصویر و داشت محصول غالب منطقه (علوفه)، پراکنده بودن پوشش گیاهی در منطقه را نشان می‌دهد و نیز مقادیر منفی NDVI برای سطح آب است که به‌عنوان شاخص‌های جداسازی سطح آب و خاک نیز استفاده شد. شکل ۴ توزیع پراکندگی این پارامترها را برای روز جولای ۱۷۰ به‌طور نمونه در سطح اراضی نزدیک ایستگاه سینوپتیک زهک را نشان می‌دهد.

بر اساس شکل ۴ و بسته به اندازه NDVI و یا تراکم پوشش گیاهی در سطح پیکسل، رابطه دما و NDVI متفاوت است [۲۴]. در منطقه مطالعاتی در مقادیر NDVI کم، بین صفر تا ۰/۱ این رابطه مستقیم است و در بیش از این حدود این رابطه معکوس است. در شکل ۵ مقادیر مؤلفه‌های بیلان انرژی واقع در محدوده اراضی کشاورزی ایستگاه سینوپتیک زهک، نشان داده شده است.

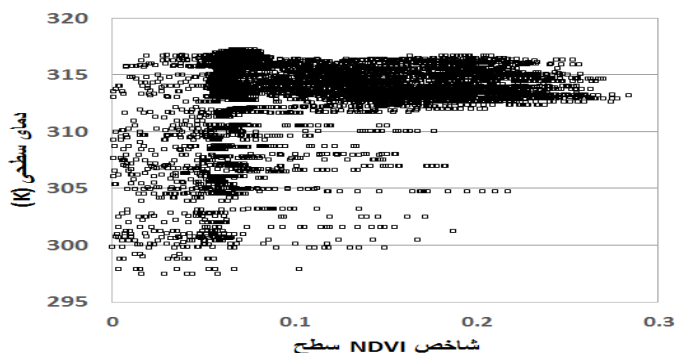
اراضی کشت‌شده علوفه در حاشیه ایستگاه سینوپتیک زهک و دوم سطح آب مخزن چاه نیمه ۱ انجام شد.

استخراج داده‌های مورد نیاز از تصاویر ماهواره‌ای منطقه در شکل ۳ مقادیر شاخص‌های مشترک بیلان انرژی واقع در محدوده اراضی کشاورزی ایستگاه سینوپتیک زهک، شامل مقادیر آلبیدو، مقادیر دمای سطحی خاک (K)، شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و (LAI) نشان داده شده است.

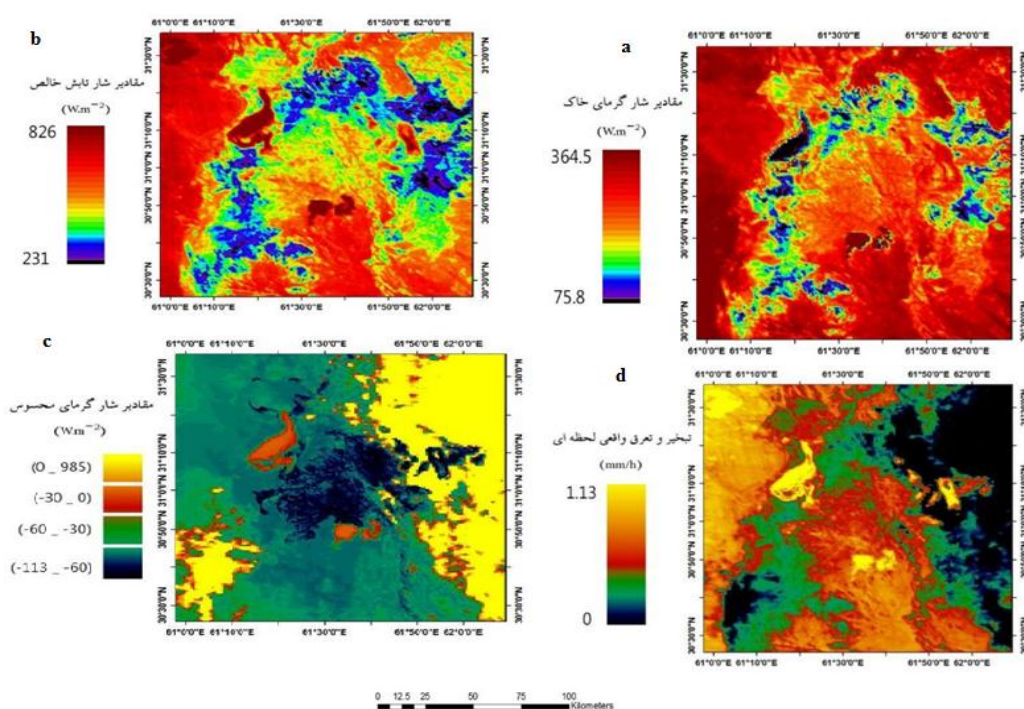
درصد بازتاب تابش خورشیدی توسط زمین یا آلبیدو بسته به نوع گیاه، کیفیت و عمق آب و نیز نوع خاک فرق دارد و حتی برای یک گیاه نیز طی فصل رشد تغییر می‌کند. در منطقه مطالعه‌شده کمینه آلبیدوی سطحی برابر ۰/۰۳۳- که اغلب روی پیکره‌های آبی به‌وجود آمده است و بیشینه مقدار این پارامتر برابر ۰/۵۵ است که برای سطح دشت در مناطق اراضی بایر و خشک به‌دست آمده است. همچنین با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که مناطق کشاورزی با مقدار پوشش گیاهی زیاد مقادیر نسبتاً کمتر آلبیدو و دما را دارند و شار تابش خالص در این مناطق مقدار قابل توجهی دارد. این امر نشان می‌دهد بخش اعظم انرژی در دسترس در این مناطق صرف فرایند تبخیر و تعرق شود و در نتیجه کاهش دما در این نواحی



شکل ۳. مقادیر شاخص‌های مشترک بیلان انرژی واقع در محدوده اراضی کشاورزی ایستگاه سینوپتیک زهک، آلبیدوی سطحی (a)، دمای سطحی زمین (Ts) (b)، پوشش گیاهی (NDVI) (c)، سطح برگ (LAI) (d)



شکل ۴. توزیع شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، دمای سطح زمین (Ts) برای روز جولایی ۱۷۰ در سطح اراضی نزدیک ایستگاه سینوپتیک زهک



شکل ۵. مقادیر مؤلفه‌های بیلان انرژی واقع در محدوده اراضی کشاورزی ایستگاه سینوپتیک زهک، شار تابش خالص (Rn) a، شار گرمای خاک (G) b، شار گرمای محسوس (H) c، تبخیر- تعرق لحظه‌ای (LE) d

میزان برابر ۱/۱۳ میلی‌متر بر ساعت است. مناطق کشاورزی دشت سیستان نیز با داشتن توزیع نرخ تبخیر بین ۰/۵ تا ۱ سهم زیادی در تبخیر- تعرق منطقه دارد.

#### نتایج ارزیابی مدل

برای ارزیابی مدل از اطلاعات زمینی دو نقطه محل ایستگاه سینوپتیک زهک و سطح آبی چاه نیمه ۱ در تاریخ تصویربرداری، با توجه به کمبود داده‌های لایسیمتر استفاده شد. از معیارهای آماری جدول ۱ نیز به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی استفاده شد که مبین میزان خطای برآورد مدل‌اند.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود مقدار تابش خورشیدی ( $R_p$ ) برای پیکره‌های آبی بیشتر از اراضی کشاورزی است. تابش خالص برای سطح خشکی منطقه بین ۳۵۰ تا ۵۸۰ متغیر است، اما برای سطح آب این مقدار تا ۸۲۰ متغیر است. در شکل ۵-d مقادیر تبخیر- تعرق واقعی در لحظه تصویر برای مکان‌های مطالعه‌شده نمایش داده شده است. مطابق نقشه توزیع مکانی تبخیر و تعرق لحظه‌ای، بیشترین نرخ تبخیر برای سطح پیکره‌های آبی از جمله مخازن چاه نیمه و قسمتی از تالاب هامون است. این

و کمترین مقدار خطا به ترتیب برابر ۱۵/۲ و ۰/۹ برای روزهای ۲۶۲ و ۱۹۳ است. از طرفی، شاخص همبستگی مقادیر برآورد شده و مقادیر مبتنی بر داده‌های زمینی در شکل‌های ۶ (a و b) نشان داده شده است. ضریب همبستگی در دو نقطه مقایسه در سطح قابل قبولی قرار دارد که مؤید عملکرد و نتایج خوب مدل برای منطقه مطالعاتی در دو سطح مجزای آب و خشکی است. بنابراین، عملکرد مدل SEBS با توجه به نتایج مطلوب، قابلیت راحت‌تر به کارگیری و از طرفی، دردسترس بودن داده‌های ورودی آن، با بهره‌برداری از فناوری سنجنش از دور به‌عنوان یک روش کاربردی برای منطقه مطالعاتی اثبات شد.

در جدول یادشده،  $P_i$  مقادیر خروجی مدل،  $O_i$  مقادیر مشاهداتی،  $n$  تعداد مشاهدات و  $O = \sum O_i$  است. نتایج معیارهای آماری یادشده، در جدول ۲ شده است.

مطابق جدول ۲ مقادیر به‌دست‌آمده از مدل SEBS با مقادیر دو نقطه زمینی مقایسه شد. بیشترین و کمترین درصد خطای برآورد مدل در مقایسه با سطح اراضی کشت‌شده به ترتیب برابر ۲۷ و ۳/۷ درصد برای روزهای ۱۷۷ و ۲۴۱ جولایی است. میزان میانگین مربعات خطا نیز در کل برابر ۱/۰۵ میلی‌متر است. در مقایسه نتایج مدل SEBS با سطح آب نیز در محل مخزن چاه نیمه ۱ بیشترین

جدول ۱. معیارهای آماری برای مقایسه نتایج خروجی مدل‌ها

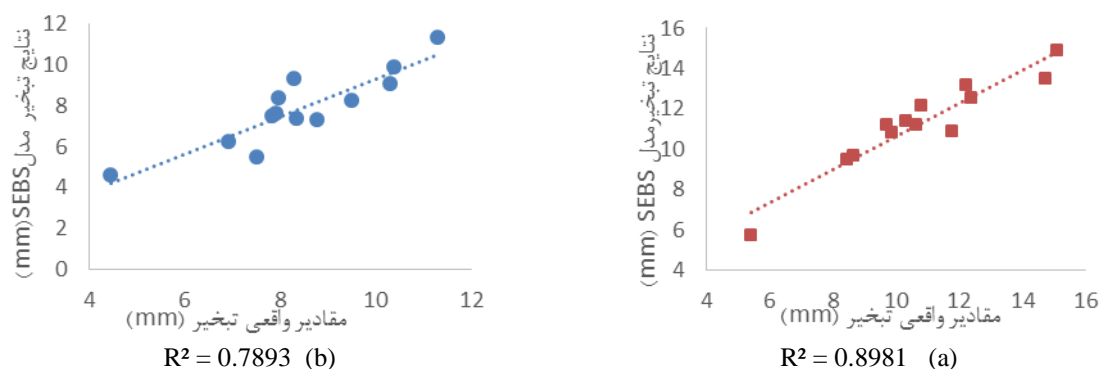
پارامتر آماری	توصیف	رابطه
$\Delta_i$	درصد خطای برآورد مدل برای روز $i$ ام	$\frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100$
MAPD <sup>۱</sup>	میانگین درصد اختلاف مطلق	$\frac{100}{O} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i  \right]$
RMSD <sup>۲</sup>	ریشه میانگین مربع اختلافات	$\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2}$

جدول ۲. مقادیر معیارهای آماری برای مقایسه مدل‌های شار انرژی در برآورد تبخیر تعرق واقعی در دوره اندازه‌گیری برای دو نقطه

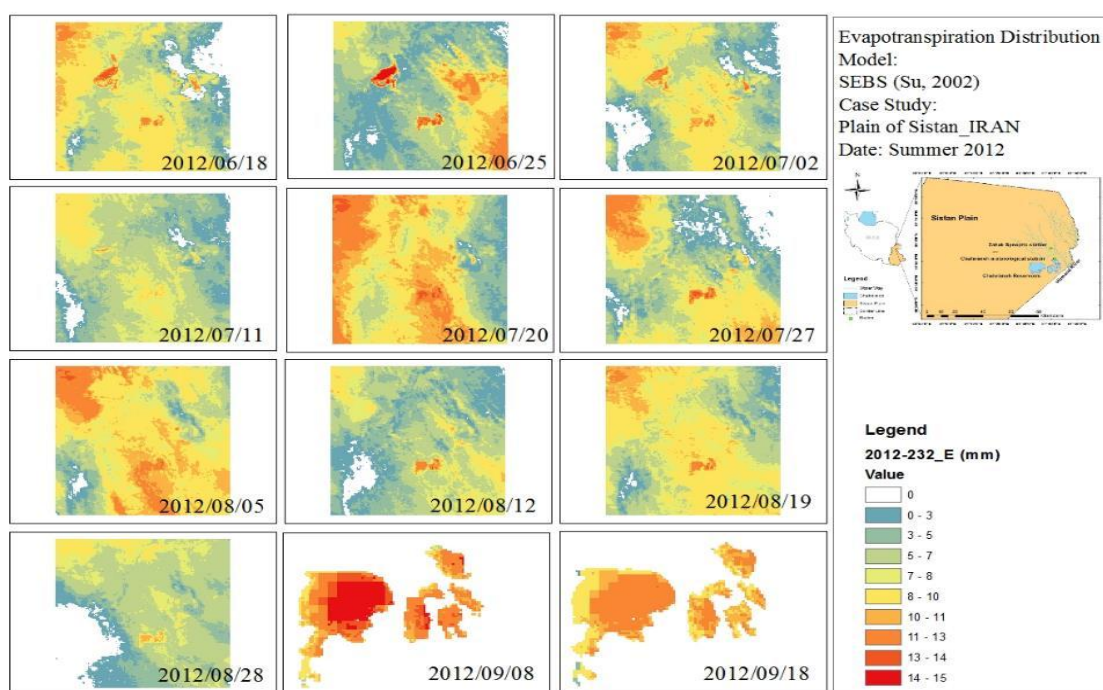
E pan (mm)	SEBS (سطح چاه نیمه ۱)		Eta PenmanFAO (mm)	SEBS (ایستگاه سینوپتیک)		روز جولایی	تاریخ تصویر
	درصد خطا	ET		درصد خطا	Eta		
۱۰/۶۴	۵/۳	۱۱/۲	۷/۹۶	۱۰/۵	۸/۳۷	۱۷۰	۱۸/۰۶/۲۰۱۲
۱۵/۱۲	۱/۵	۱۴/۹	۷/۵	۲۷/۵	۵/۴۴	۱۷۷	۲۵/۰۶/۲۰۱۲
۱۱/۸	۸	۱۰/۸۵۵	۸/۳	۴	۹/۲۸	۱۸۴	۰۲/۰۷/۲۰۱۲
۱۲/۳۹	۰/۹	۱۲/۵	۷/۸۵	۱۲/۴	۷/۵	۱۹۳	۱۱/۰۷/۲۰۱۲
۱۴/۷۵	۸/۵	۱۳/۵	۱۱/۳	۱۱/۵	۱۱/۲۹	۲۰۲	۲۰/۰۷/۲۰۱۲
۱۲/۲۲	۷/۷	۱۳/۱۶	۹/۵	۵/۵	۸/۲۵	۲۰۹	۲۷/۰۷/۲۰۱۲
۱۰/۸۱	۱۲/۶	۱۲/۱۷۵	۱۰/۴	۲۰/۲	۹/۸۷	۲۱۸	۰۵/۰۸/۲۰۱۲
۱۰/۳۴	۱۰/۲	۱۱/۳۹۵	۷/۹	۴	۷/۶۱	۲۲۵	۱۲/۰۸/۲۰۱۲
۹/۸۷	۹/۴	۱۰/۸	۱۰/۳	۱۰/۱	۹/۰۳	۲۳۲	۱۹/۰۸/۲۰۱۲
۸/۴۶	۱۲/۳	۹/۵	۸/۷	۳/۷	۷/۳۲	۲۴۱	۲۸/۰۸/۲۰۱۲
۸/۶۴	۱۱/۷	۹/۶۵	۶/۹۳	۱۲/۹	۶/۲	۲۵۲	۰۸/۰۹/۲۰۱۲
۹/۷۲	۱۵/۲	۱۱/۲	۸/۳	۶	۷/۳۷	۲۶۲	۱۸/۰۹/۲۰۱۲
۵/۴	۵/۶	۵/۷	۴/۴۶	۹/۸	۴/۶	۲۶۸	۲۴/۰۹/۲۰۱۲
	۷/۹			۹/۷			MAPD (%)
	۰/۹۵			۱/۰۵			RMSD (mm)

1. Mean absolute percent difference  
2. Root-mean-square difference





شکل ۶. مقایسه مقادیر مشاهداتی تبخیر و تعرق واقعی با نتایج مدل SEBS، در سطح آب چاه نیمه a و ایستگاه سینوپتیک زهک b



شکل ۷. مقادیر روزانه تبخیر- تعرق به دست آمده از مدل SEBS

برای نمایش بهتر جزئیات در سطح پیکره آبی مخازن چاه نیمه، تصاویر تبخیر- تعرق به عنوان نمونه در روزهای ۱۸ و ۲۸ شهریورماه ۱۳۹۱ برای سطح آب برش خورده است. بررسی توزیع مکانی تبخیر- تعرق از امتیازات منحصر به فرد تکنیک‌های مبتنی بر سنجش از راه دور است.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره مودیس و مدل SEBS به برآورد تبخیر و تعرق واقعی دشت سیستان پرداخته شده است. به این منظور از ۱۳ تصویر در روزهای صاف و بدون غبار از تاریخ ۲۰۱۲/۰۶/۱۸ تا ۲۰۱۲/۰۹/۲۴ استفاده شده

نتایج تبخیر- تعرق به روش SEBS برای منطقه مطالعاتی نتایج تبخیر- تعرق واقعی مدل SEBS به صورت روزانه و برای دوره زمانی یادشده در منطقه مطالعاتی بر حسب میلی‌متر در روز برای منطقه به صورت نقشه توزیع مکانی تبخیر- تعرق در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

روند متفاوت تبخیر- تعرق با توجه به نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد متوسط تبخیر روزانه طی دوره زمانی ۲۹ خرداد تا ۲۸ شهریور ۱۳۹۱ روند کم و بیش افزایشی داشته و بعد از آن با کاهش روبه‌رو بوده است که این روند مطابق با روند مشاهداتی داده‌های دما و سرعت باد به عنوان مؤلفه‌های اصلی تبخیر- تعرق در منطقه است.



- [2].Sun Z, Wei B, Su W, Shen W, Wang C, You D, Liu Z. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modelling*.2011. 54(3): 1086-1092.
- [3].Liu S, Sun R, Sun Z, Li X, Liu C. Evaluation of three complementary relationship approaches for evapotranspiration over the Yellow River basin. *Hydrological processes*, 2006.20(11): 2347-2361.
- [4].McCabe M.F, Wood E.F. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 2006. 105(4): 271-285.
- [5].Brunsell N.A. 2011. Characterizing the multi-scale spatial structure of remotely sensed evapotranspiration with information theory.
- [6].Batra N, Islam S, Venturini V, Bisht, G Jiang, L. Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains. *Remote Sensing of Environment*. 2006. 103(1): 1-15.
- [7].Kustas WP, Choudhury BJ, Moran MS, Reginato RJ, Jackson RD, Gay LW, Weaver, H.L. Determination of sensible heat flux over sparse canopy using thermal infrared data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1989. 44(3): 197-216.
- [8].Su ZB. 2002. *A Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes from point to continental scale*. Paper presented at the Spectra Workshop.
- [9].Bastiaanssen W, Pelgrum H, Wang J, Ma Y, Moreno J, Roerink G, Van der Wal T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. *Journal of hydrology*. 1998. 212: 213-229.
- [10]. Allen RG, Tasumi M, Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 2007.133(4): 380-394.
- [11]. Tasumi M, Allen RG. Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development. *Agricultural Water Management*. 2007. 88(1): 54-62.
- [12]. Van der Kwast J, Timmermans W, Gieske A, Su Z, Olioso A, Jia L, Elbers J, Karssenberd D, De Jong S, de Jong S. Evaluation of the Surface Energy Balance System (SEBS) applied to ASTER imagery with flux-measurements at the SPARC 2004 site (Barrax, Spain). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*.2009. 6(1): 1165-1196.

است. برای زمین مرجع کردن تصاویر ماهواره‌ای از داده‌های ایستگاه سینوپتیک زهک استفاده شده است. برای برآورد تبخیر و تعرق روزانه ماهواره از مقدار لحظه‌ای آن، از نسبت تبخیر و تعرق گیاه مرجع روزانه به ساعتی استفاده شد. همچنین برای ارزیابی نتایج مدل SEBS از داده‌های دو نقطه زمینی شامل ایستگاه سینوپتیک زهک و مخازن چاه نیمه ۱ استفاده شده است. نتایج کلی تحقیق اعم از شاخص‌های بیلان انرژی و شارهای آشفته به‌طور خلاصه ارائه شده است: در منطقه مطالعه شده کمینه آلبیدوی سطحی برابر ۰/۰۳۳- که اغلب روی پیکره‌های آبی به‌وجود آمده است و بیشینه مقدار این پارامتر برابر ۰/۵۵ است که برای سطح دشت در مناطق اراضی بایر و خشک به‌دست آمده است. شاخص گیاهی برای سطح خشکی حدود صفر تا ۰/۵۵ است که مقدار متوسط این شاخص به‌دلیل زمان تصویر و داشت محصول غالب منطقه (علوفه)، پراکنده‌بودن پوشش گیاهی در منطقه را نشان می‌دهد و همچنین مقادیر منفی NDVI برای سطح آب است که به‌عنوان شاخص‌های جداسازی سطح آب و خاک نیز استفاده شد. تابش خالص برای سطح خشکی منطقه بین ۳۵۰ تا ۵۸۰ متغیر است، اما برای سطح آب این مقدار تا ۸۲۰ متغیر است. همچنین مطابق نقشه توزیع مکانی تبخیر و تعرق لحظه‌ای، بیشترین نرخ تبخیر برای سطح پیکره‌های آبی از جمله مخازن چاه نیمه و قسمتی از تالاب هامون است. این میزان برابر ۱/۱۳ میلی‌متر بر ساعت است. مناطق کشاورزی دشت سیستان نیز با داشتن توزیع نرخ تبخیر بین ۰/۵ تا ۱ سهم زیادی در تبخیر- تعرق منطقه دارد. مقایسه و ارزیابی نتایج مدل SEBS با دو نقطه زمینی با معیارهایی مانند درصد خطای برآورد مدل برای روز آام، میانگین درصد اختلاف مطلق، ریشه میانگین مربع اختلافات و ضریب همبستگی  $R^2$  برابر ۰/۸۹ و ۰/۷۸ نشان می‌دهد مدل SEBS عملکرد خوبی دارد. این نتایج با نتایج JIN و همکارانش (۲۰۰۵) و Muthuwatta (۲۰۰۹) و همکارانش (۲۰۱۰) و Elhag و همکارانش (۲۰۱۱) همخوانی دارد که همگی کارایی مدل SEBS را در برآورد تبخیر- تعرق واقعی تأیید کردند.

## منابع

- [1].Brutsaert W. *Hydrology: an introduction*: Cambridge University Press.2005.

- [13]. Evans R, Hulbert S, Murrhy E, Bastiaanssen, W Molloy R. *Using satellite imagery to measure evaporation from storages—solving the great unknown in water accounting*. Paper presented at the Irrigation and Drainage Conference 2009.
- [14]. Jin X, Wan L, Su Z. Research on evaporation of Taiyuan basin area by using remote sensing. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 2005. 2(1): 209-227.
- [15]. Jia L, Xi G, Liu S, Huang C, Yan Y, Liu G. Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland. *Hydrology and earth system sciences*. 2009. 13(10): 1775-1787.
- [16]. Muthuwatta LP, Bos M, Rientjes T. Assessment of water availability and consumption in the Karkheh River Basin, Iran—using remote sensing and geo-statistics. *Water Resources Management*. 2010. 24(3): 459-484.
- [17]. Elhag M, Psilovikos A, Manakos I, Perakis K. Application of the SEBS water balance model in estimating daily evapotranspiration and evaporative fraction from remote sensing data over the Nile Delta. *Water Resources Management*. 2011. 25(11): 2731-2742.
- [18]. Akbarzadeh H, Haghightago P, Bagheri M.H. Estimates of Evaporation from Surface Water Bodies with SEBAL Algorithm using Remote Sensing Techniques (Case Study: Chahnimeh's Fresh Water Reservoirs of Sistan). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2015. 3( 9): 511-522.
- [19]. Noroozi AA, Jalali N, Miri M, Abbasi M. Estimating rice leaf area index at North Iran. *Journal of water and Soil Resources Conservation*. 2012. 3(2): 29-40.
- [20]. Monteith JL. *Principles of environmental physics*. Edward Arnold Press. Fourth Edition, 2014. 403 pp.
- [21]. Timmermans WJ, Kustas WP, Anderson, MC, French AN. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes. *Remote Sensing of Environment*. 2007. 108(4): 369-384.