

ارزیابی مدل موجک جهت برآورد تبخیر تعرق با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای (ایستگاه‌های انار، کرمان، رفسنجان و شهرابک)

جابر سلطانی^۱

مسعود احمدی نیک^۲

احمد احمدی نیک^۳

چکیده

تبخیر تعرق مرجع یکی از پارامترهای لازم جهت تعیین نیاز آبی گیاه و برنامه‌ریزی آبیاری است. داشتن برآورد دقیق از این پارامتر برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی امری ضروری است. مدل‌های تجربی مختلفی بمنظور برآورد تبخیر تعرق ارائه شده است. با توجه به تغییرات مکانی پارامترهای هواشناسی، استفاده از روش‌های مبتنی بر سنجش از دور که این تغییرات را در نظر می‌گیرد بسیار مطلوب است. از مدل‌هایی که می‌تواند دقت بالایی در برآورد تبخیر تعرق با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای داشته باشد، می‌توان به مدل موجک اشاره کرد. در این راستا هدف طرح حاضر، ارزیابی دقت مدل موجک جهت برآورد تبخیر تعرق مرجع با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (سنجنده مودیس) شامل دمای سطح زمین و مقدار بخار آب موجود در جو در ایستگاه‌های مطالعاتی می‌باشد. در این تحقیق، داده‌های سینوپتیک و تصاویر ماهواره‌ای ایستگاه‌های انار، کرمان، رفسنجان و شهرابک جهت توسعه و ارزیابی مدل موجک مورد استفاده قرار گرفت. در سناریوی اول میانگین دمای سطح زمین، در سناریوی دوم مقدار بخار آب موجود در

^۱ استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، (نویسنده مسئول)
Email: jsoltani@ut.ac.ir

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه زابل

^۳ دانش‌آموخته دکتری تخصصی گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

جو و در سناریوی سوم از هر دو پارامتر بطور همزمان بعنوان ورودی مدل استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد علیرغم دقت بالای مدل در سناریوهای مختلف، مدل موجک با استفاده همزمان از هر دو پارامتر بخار و دما (سناریوی سوم) با ضریب تبیین ۹۰ درصد نسبت به سایر مدل‌ها دارای دقت بالاتری بود.

واژگان کلیدی: بخار آب جو، دما، سنجنده مودیس، ماهواره ترا، نیاز آبی گیاه.

مقدمه

تبخیر تعرق فرآیندی است که توسط آن، آب از سطح زمین و گیاه به اتمسفر انتقال پیدا می‌کند. (علیزاده، ۱۳۸۹: ۱۵۲) شناخت و آگاهی مناسب از تبخیر تعرق می‌تواند مدیریت منابع آب در مقیاس‌های مختلف را بهبود بخشد؛ بخصوص برآورد دقیق تبخیر تعرق در مناطق کشاورزی، می‌تواند در تشخیص تنش‌های آبی و برنامه‌ریزی آبیاری مؤثر باشد (French et al., 2015:282).

تبخیر تعرق می‌تواند بطور مستقیم توسط لایسیمتر یا روش بیلان آب اندازه‌گیری شود و یا بطور غیرمستقیم با استفاده از داده‌های هواشناسی یا داده‌های استخراجی از تصاویر ماهواره‌ای برآورد گردد. با این وجود امکان استفاده از لایسیمتر برای اندازه‌گیری تبخیر تعرق همواره میسر نخواهد بود زیرا نیازمند صرف زمان و هزینه می‌باشد. در این راستا استفاده از محصولات تصاویر ماهواره‌ای جهت برآورد این پارامتر، روشی آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر می‌باشد. تصاویر ماهواره‌ای این مزیت را دارند که سطح وسیعی را پوشش داده و تغییرات مکانی پدیده‌ها در آن قابل بررسی است. همچنین بعلت پوشش زمانی و مکانی بیشتر، دقت بالاتری در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی دارند (اصغرزاده، ۱۳۸۵:۱).

از آنجا که پارامتر تبخیر تعرق بطور مستقیم از تصاویر ماهواره‌ای قابل دستیابی نمی‌باشد، لذا می‌توان از سایر اطلاعات خروجی از این تصاویر، در مدل‌های مختلف جهت

برآورد تبخیر تعرق استفاده نمود. مدل موجک^۱ یکی از مدل‌های ریاضی پیشرفته است که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بعنوان داده‌های ورودی این مدل، جهت برآورد پارامتر تبخیر تعرق قابل استفاده است (علی حسینی، ۲۰۱۳:۹۱).

مطالعات فراوانی در زمینه برآورد تبخیر تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای صورت پذیرفته است:

محمدابراهیم و همکاران (۱۱۴۱:۱۳۹۶) به ارزیابی مدل SEBS در برآورد تبخیر تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مودیس^۲ در دشت سیستان پرداختند. نتایج نشان داد مدل مورد نظر با ضریب همبستگی برابر ۰/۸۹ دارای عملکرد مناسبی برای تعیین تبخیر تعرق واقعی می‌باشد. بیزگرت^۳ و همکاران (۲۰۱۶:۴۳۲) به برآورد تبخیر تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره مودیس با مدل STSEB پرداختند و نتایج مطالعه ایشان نشان داد پارامتر دمای سطح زمین (LST)^۴ بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای، جهت برآورد تبخیر تعرق در مناطق ناهمگن قابل کاربرد می‌باشد.

کاملری^۵ و همکاران (۲۰۱۴:۱) به ارزیابی مدل STARFM^۶ در زمینه تبخیر تعرق روزانه با استفاده از اطلاعات سنسورهای مادون قرمز حرارتی (TIR)^۷ در اراضی آبی و دیم پرداختند. همچنین سیمنز^۸ و همکاران (۲۰۱۶:۱۵۵) این روش را در دوره‌های زمانی روزانه با استفاده از داده‌های زمینی در دو تاستان اعتبارسنجی کردند.

ولیزاده (۱۳۹۳:۳۱۷) از معادله استفتنر جهت برآورد تبخیر تعرق پتانسیل استفاده نمودند و در نهایت، نقشه نهایی تبخیر تعرق پتانسیل در منطقه آذربایجان شرقی را تهیه نمودند. بهرامی (۱:۱۳۹۲) در مطالعه‌ای به ارزیابی مدل ماشین‌بردار در تخمین تبخیر تعرق با

¹ Wavelet

² MODIS

³ Bisquert

⁴ Land Surface Temperature

⁵ Cammalleri

⁶ Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model

⁷ Thermal Infrared

⁸ Semmens

استفاده از پارامترهای دما و بخار حاصل از تصاویر ماهواره‌ای پرداخت که نتایج این مطالعه نشان داد مدل تورک که از هر دو پارامتر دما و بخار بعنوان پارامتر ورودی استفاده می‌نماید نسبت به مدل‌های هارگریوس سامانی و جنسن هیز که تنها از پارامتر دما استفاده می‌کنند دارای دقت بالاتری می‌باشد.

الهاگ^۱ و همکارانش (۲۰۱۱: ۲۷۳۱) جهت برآورد تبخیر تعرق از طریق سنجش از دور در دلتای رودخانه نیل از مدل SEBS استفاده کردند که نتایج برآورد در این تحقیق از دقت قابل قبولی برخوردار بود. جهانبخش و همکاران (۱۳۹۰: ۱۹) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، جهت دستیابی به دمای سطح زمین از الگوریتم سبال و طبقه‌بندی از نوع درخت تصمیم‌گیری استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند برآورد دمای سطح زمین از طریق سنجش از دور قابل کاربرد در مطالعات و تحقیقات علوم زمین و محیط زیست می‌باشد. نوری و همکاران (۲۳: ۱۳۸۹) در پژوهشی، از تصاویر سنجنده مودیس جهت برآورد دمای سطح زمین استفاده کردند. این تحقیق نشان داد که نتایج حاصل از کاربرد تصاویر سنجنده مودیس نسبت به نتایج حاصل از ایستگاه‌ها دارای خطای کمتری است. عاملی و ثنایی‌نژاد (۱۳۸۹) در تحقیقی بر روی مدل‌سازی داده‌های بارندگی از تبدیل موجک استفاده کردند. آن‌ها با بهره‌گیری از تبدیلات موجک بارندگی دشت مشهد را مدل‌سازی کردند. ثنایی‌نژاد و همکاران (۵۴۰: ۱۳۸۹) با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس و الگوریتم سبال به بررسی توزیع مکانی تبخیر تعرق روزانه در زیرحوضه آبریز مشهد پرداختند. نتایج این تحقیق حاکی از دقت مناسب این الگوریتم داشت.

اپکو و همکاران^۲ (۲۷۳۶: ۲۰۰۸) کارایی سنجنده مودیس و استر^۳ جهت برآورد تبخیر تعرق در غرب آفریقا را مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان داد این دو سنجنده برای برآورد تبخیر تعرق در مناطق بزرگ و ناهموار قابلیت خوبی دارند. همچنین کرشمن^۴ و همکاران (۹۲۸: ۲۰۰۸) یک الگوریتم جدید برای تخمین تبخیر تعرق واقعی ماهانه بر اساس

^۱ Elhag

^۲ Opoku

^۳ ASTER

^۴ Guerschman

شاخص 1 EVI و 2 GVMI بدست آمده از تصاویر سنجنده مودیس ماهواره ترا و داده‌های اقلیمی درون‌یابی شده را در استرالیا توسعه دادند و توانستند الگوهای مکانی و زمانی تبخیر تعرق واقعی ماهانه را در منطقه مطالعاتی تهیه نمایند.

سنتوس^۳ و همکاران (۱۴۵:۲۰۰۱) طی تحقیقی داده‌های بارندگی شهر ماتسویا^۴ را تحلیل کردند و از موجک مورلت برای تحلیل بارندگی ماهانه استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که طیف توانی موجک یک تمرکز توانی زیاد را در محدوده ماه‌های مشخصی نشان داده است.

نتایج مطالعات پیشین حاکی از آن است که استفاده از داده‌های تصاویر ماهواری، بدلیل گستردگی و پوشش زمانی و مکانی، دقت بالایی در برآورد تبخیر و تعرق دارند. لذا با توجه به این که سنجنده مودیس دمای سطح زمین و بخار آب موجود در جو را برداشت می‌کند، می‌توان از مدل پیشرفته موجک برای برآورد تبخیر تعرق استفاده کرد. نکته قابل توجه این است که تاکنون پژوهشی با ورودی بخار آب موجود در جو در مدل موجک جهت برآورد تبخیر تعرق صورت نپذیرفته است که در این تحقیق سعی بر این است که تأثیر پارامتر بخار آب جو در مدل موجک جهت برآورد تبخیر تعرق، ارزیابی شده و میزان دقت مدل موجک در قالب سه سناریو برای هر یک از متغیرهای دمای سطح زمین و بخار آب جو و هر دو پارامتر بطور همزمان، بعنوان ورودی مدل موجک در چهار ایستگاه سینوپتیک استان کرمان ارزیابی گردد.

داده و روش‌ها

در این تحقیق از دو محصول دمای سطح زمین و بخار آب جو این سنجنده استفاده شده است.

¹ Enhanced Vegetation Index

² Global Vegetation Moisture Index

³ Santos

⁴ Matsuyama

دمای سطح زمین: جهت دریافت داده‌های دمای سطح زمین از سنجنده مودیس، از سطح L^3 استفاده شده است که دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر و قدرت تفکیک زمانی روزانه است. داده‌های روزانه دمای سطح زمین و گسیلندگی در پیکسل‌های یک کیلومتری بوسیله الگوریتم تعمیم یافته پنجره مجزا^۱ و همچنین در گریدهای ۶ کیلومتری به صورت الگوریتم‌های شب و روز، قابل دریافت هستند. برای محاسبه دمای سطح زمین از الگوریتم مشخصی استفاده می‌شود که به قرار زیر است:

$$(۱) LST = a + b((T^{11} - T^{12}))^{p(\theta)} + (b+c)T^{12}$$

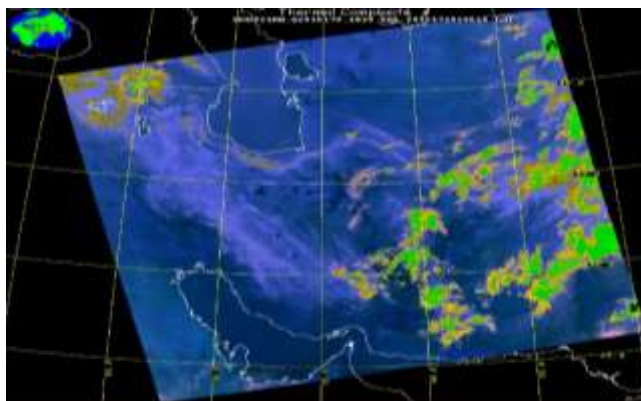
در معادله (۱) a ، b و c ضرایب بازتابی است که به پوشش گیاهی و شرایط سطح زمین بستگی دارد و $p(\theta)$ ضریبی است که به فصل بستگی دارد. دمای روشنایی $T^{12} = 12 \mu m$ و دمای روشنایی $T^{11} = 11 \mu m$ است.

بخار آب جو: مقدار بخار آب جو، عمق آب در ستون اتمسفر است. داده‌های بخار آب جو در سطح L^2 قرار دارد که دارای دقت مکانی ۱ کیلومتر و قدرت تفکیک زمانی روزانه می‌باشد. الگوریتم ستون بخار آب جو با استفاده از تقسیم پنجره‌ای دمای روشنایی و زاویه دید سنجنده مودیس بصورت زیر بدست می‌آید:

$$(۲) PWV = A(T^{11} - T^{12}) \cos \theta$$

در این معادله $A = 19.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ، θ : زاویه دید سنجنده و PWV الگوریتم ستون بخار آب می‌باشد.

¹ Split- window



شکل ۱- نمونه‌ای از عکس ماهواره ترا برای محصول بخار آب جو

تصاویر دریافتی از سنجنده مودیس به صورت سیستم تصویر سینوسی^۱ بوده است. در ابتدا با استفاده از نرم افزار^۲ ENVI 4/7 سیستم مختصات تصاویر از سینوسی به سیستم مختصات جغرافیایی تبدیل و فرمت تصاویر از hdf به img تغییر گردید. در نهایت تصاویر تصحیح شده با فرمت img جهت استخراج مقادیر دمای سطح زمین ذخیره و ادامه مراحل کار در محیط نرم افزاری ARCGIS 10 انجام گردید.

مدل موجک: نظریه موجک در سال‌های پایانی دهه ۱۹۸۹ توسط میر، دابشیز و مالات معرفی و توسعه یافت. موجک‌ها توابع ریاضی هستند که داده‌ها را به اجزای فراوان فرکانس تفکیک کرده و هر جزء را با نمایش متناسب با مقیاس آن جز مطالعه می‌کنند. موجک‌ها دسته‌ای از توابع ریاضی‌اند که برای تجزیه سیگنال‌ها به مؤلفه‌های فرکانسی آن بکار می‌روند به این صورت که ابتدا سیگنال‌ها را تجزیه و سپس بازسازی می‌کنند. تبدیل موجک از دو تابع پدر (φ) و مادر (ψ) تشکیل شده است.

$$(۳) f(x) = \sum_k \alpha_k \varphi(x) + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_k \beta_k(x) \psi$$

^۱ - Sinusoidal (SIN) projection

^۲ - The Environment for Visualizing Images (ENVI)

$$(۴) \alpha_k = \int f(x) \phi \bar{d}x$$

$$(۵) \beta_k = \int f(x) \psi \bar{d}x$$

موجک پدر و موجک مادر بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$(۶) \varphi_{j,k}(t) = s^{-(j/2)} \cdot \varphi(t - s^j k / s^j)$$

$$(۷) \psi_{j,k}(t) = s^{-(j/2)} \cdot \psi(t - s^j k / s^j)$$

همانطور که ملاحظه می‌گردد پارامتر S نقش تحلیل موجک را از تحلیل فوریه متمایز می‌سازد. تغییر J دامنه دید را تغییر داده و می‌تواند تحلیل را از کلی به موضعی و برعکس تغییر دهد. مدل موجک به دو دسته موجک پیوسته و گسسته تبدیل می‌شود. در این پژوهش مدل WGRN که ترکیب دو روش DWT و GRNN است مورد استفاده قرار گرفته است. تبدیل گسسته موجک جهت پیش پردازش و تحلیل سری‌های زمانی مناسب‌تر از تبدیل پیوسته موجک می‌باشد زیرا داده‌ها اجزای اضافی نداشته و بنابراین تبدیل معکوس DWT تبدیل یافته را می‌توان برای هر دسته از داده‌های زمان بسامد بکار برد

در این مطالعه، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی (دما، رطوبت، ساعت آفتابی و سرعت باد) چهار ایستگاه سینوپتیک شهرستان‌های کرمان، رفسنجان، انار و شهر بابک برای چهار ماه گرم سال (ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر) در یک دوره سه ساله (۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵) جمع‌آوری گردید. به منظور ارزیابی و مقایسه نتایج مدل موجک، مقدار تبخیر تفرق مرجع توسط مدل پنمن مونتیث با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک، محاسبه گردید.



شکل ۲- موقعیت شهرستان های مورد مطالعه در این تحقیق

در مدل موجک داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای (دمای سطح زمین و بخار آب موجود در جو) سال ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ بعنوان داده‌های آموزش و سال ۲۰۰۵ بعنوان داده‌های آزمون، مورد استفاده قرار گرفت. هدف این تحقیق ارزیابی و مقایسه میزان دقت مدل موجک با استفاده از پارامترهای ورودی دمای سطح زمین و مقدار بخار آب موجود در جو در ایستگاه‌های مطالعاتی می‌باشد که در مطالعه حاضر، در قالب سه سناریو مورد بررسی قرار گرفت که در سناریوی اول میانگین دمای روز و شب سطح زمین، در سناریوی دوم بخار آب موجود در جو و در سناریوی سوم میانگین دمای روز و شب سطح زمین و بخار آب موجود در جو بطور همزمان، بعنوان ورودی مدل موجک در نظر گرفته شدند.

جهت ارزیابی نتایج در این مطالعه از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین انحراف خطا (MBE) استفاده گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در مطالعه حاضر در بررسی عوامل جوی تأثیرگذار بر میزان تبخیر تعرق روزانه، دو پارامتر دمای محیط و رطوبت هوا مدنظر قرار گرفته است. در ابتدا جهت بررسی روابط بین پارامترهای میانگین دمای روز و شب و سطح زمین، مقدار بخار آب موجود در جو و پارامتر تبخیر تعرق روزانه از آنالیز همبستگی استفاده گردید. در بررسی همبستگی بین پارامترهای مذکور از نرم افزار SAS استفاده شد که ضرایب همبستگی پارامترها در جدول ۱ ارائه گردیده است:

جدول ۱- ضرایب همبستگی بین متغیرها

Variable	ET	T	V
ET	۱/۰۰۰۰۰	۰/۷۱ **<۰/۰۰۰۱	۰/۳۳ **<۰/۰۰۰۱
T	۰/۷۱ **<۰/۰۰۰۱	۱/۰۰۰۰۰	۰/۲۶ **<۰/۰۰۰۱
V	۰/۳۳ **<۰/۰۰۰۱	۰/۲۶ **<۰/۰۰۰۱	۱/۰۰۰۰۰

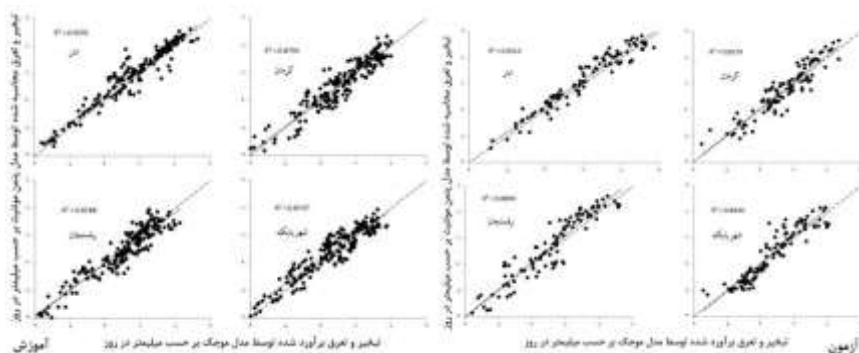
- ** اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ را نشان می‌دهد.

- V: بخار آب موجود در جو، T: دمای روز و شب سطح زمین و ET: تبخیر و تعرق

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل همبستگی که در جدول ۱ ارائه شده است میزان تبخیر تعرق روزانه در مقابل میانگین دمای روز و شب سطح زمین دارای ضریب همبستگی بالاتری ($R=۰/۷۱$) نسبت به پارامتر بخار آب موجود در جو ($R=۰/۳۳$) می‌باشد که این موضوع مؤید این است که روند داده‌های تبخیر تعرق روزانه در مقابل پارامتر میانگین دمای روز و شب سطح زمین از الگوی مشخص‌تر و ضریب تبیین بالاتری نسبت به پارامتر بخار آب موجود در جو تبعیت می‌کند.

در ادامه، جهت بررسی دقت مدل مویک در برآورد تبخیر و تعرق، متغیرهای میانگین دمای روز و شب سطح زمین مقدار بخار آب موجود در جو در قالب سه سناریو مورد بررسی قرار گرفتند که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است.

سناریوی اول: در این سناریو برآورد پارامتر تبخیر تعرق مرجع توسط مدل موجک با استفاده از پارامتر میانگین دمای روز و شب سطح زمین صورت پذیرفته است که مقدار تبخیر تعرق برآورد شده توسط مدل موجک و مقدار تبخیر تعرق محاسبه شده با مدل پنمن موتیث مورد مقایسه قرار گرفته است که نمودار پراکنش داده‌های آموزش و آزمون در شکل ۳ ارائه گردیده است:



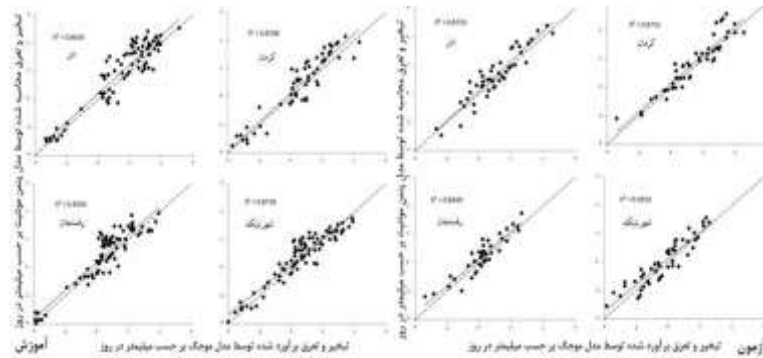
شکل ۳- نمودار پراکنش تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط مدل پنمن موتیث و برآورد شده توسط مدل موجک تحت سناریوی اول

همانگونه که در نمودار پراکنش داده‌های آموزش و آزمون برای هر یک از ایستگاه‌های مطالعاتی مشاهده می‌شود مدل موجک تدوین شده با ورودی دما با ضریب تبیین بالایی میزان تبخیر و تعرق روزانه را برآورد نموده است. در جدول ۲ خلاصه نتایج آماری هر یک از مدل‌های تدوین شده ایستگاه‌های مطالعاتی ارائه گردیده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مدل تدوین شده برای داده‌های آموزش و آزمون ایستگاه انار با استفاده از پارامتر ورودی میانگین دمای روز و شب سطح زمین، دارای ضریب تبیین بالاتر و مقدار خطای کمتری نسبت به مدل‌های ایستگاه‌های دیگر است.

جدول ۲- نتایج آماری برآورد مدل موجک تحت سناریوی اول به تفکیک ایستگاه

داده‌های آموزش				داده‌های آزمون				ایستگاه
MAE (درصد)	MBE (درصد)	RMSE (درصد)	R^2	MAE (درصد)	MBE (درصد)	RMSE (درصد)	R^2	
۲۳/۰۶	-۱۴/۸۷	۳۰/۵۳	۰/۹۲	۲۶/۳۶	-۱۴/۷۵	۳۱/۵۶	۰/۹۳	انار
۲۶/۶۰	-۳/۹۸	۳۱/۷۳	۰/۸۸	۳۶/۴۰	-۶/۰۶	۳۴/۸۲	۰/۸۶	کرمان
۲۵/۹۵	۶/۵۰	۳۱/۹۰	۰/۸۸	۳۵/۵۷	-۱۲/۷۸	۴۱/۵۴	۰/۸۹	رفسنجان
۲۷/۴۹	-۹/۰۲	۳۲/۴۵	۰/۸۷	۲۸/۳۱	-۲/۸۳	۳۵/۹۸	۰/۸۶	شهر بابک
۲۵/۷۷	۸/۵۹	۳۱/۶۵	۰/۸۸	۳۱/۶۶	۹/۱۰	۳۵/۹۷	۰/۸۹	میانگین

سناریوی دوم: مدل موجک تدوین شده در سناریوی دوم جهت برآورد پارامتر تبخیر تعرق مرجع از پارامتر بخار آب موجود در جو بعنوان داده ورودی استفاده می‌نماید. در شکل ۴ نمودار پراکنش داده‌های آموزش و آزمون نتایج حاصل از برآورد تبخیر تعرق مرجع توسط مدل موجک و تبخیر تعرق محاسبه شده با مدل پنمن مونتیث نمایش داده شده است:



شکل ۴- نمودار پراکنش تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط مدل پنمن مونتیث و برآورد شده توسط مدل موجک تحت سناریوی دوم

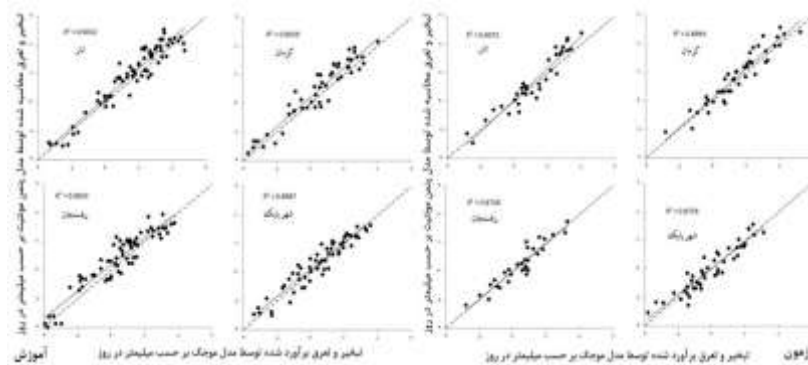
با توجه به نمودارهای پراکنش ارائه شده، مدل موجک تدوین شده با ورودی بخار آب با ضریب تبیین پایین تری نسبت به پارامتر میانگین دما، میزان تبخیر تعرق را برآورد نموده است. در جدول ۳ خلاصه نتایج آماری مدل‌های تدوین شده هر یک از ایستگاه‌های مطالعاتی ارائه گردیده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مدل تدوین شده با استفاده از پارامتر ورودی بخار آب موجود در جو ایستگاه‌های کرمان و شهر بابک دارای ضریب تبیین بالاتر و مقدار خطای کمتری نسبت به مدل‌های سایر ایستگاه‌ها می‌باشند.

جدول ۳- نتایج آماری برآورد مدل موجک تحت سناریوی دوم به تفکیک ایستگاه

داده‌های آزمون				داده‌های آموزش				ایستگاه
MAE (درصد)	MBE (درصد)	RMSE (درصد)	R^2	MAE (درصد)	MBE (درصد)	RMSE (درصد)	R^2	
۳۹/۳۲	-۱۲/۲۸	۲۲/۸۷	۰/۸۷	۳۷/۶۱	-۲۳/۲۸	۲۹/۷۰	۰/۸۶	انار
۲۶/۱۴	-۱۳/۲۹	۲۳/۱۴	۰/۸۷	۳۴/۵۵	-۱۵/۳۷	۲۱/۴۹	۰/۸۸	کرمان
۲۵/۲۷	-۱۲/۷۰	۱۷/۸۵	۰/۸۵	۳۳/۱۹	-۱۸/۳۰	۲۶/۱۶	۰/۸۵	رفسنجان
۱۷/۸۳	-۷/۹۳	۲۲/۱۱	۰/۸۵	۲۷/۲۱	-۷/۱۰	۲۰/۸۶	۰/۸۸	شهر بابک
۲۷/۱۴	۱۱/۵۵	۲۱/۴۹	۰/۸۶	۳۳/۱۴	۱۶/۰۱	۲۴/۵۵	۰/۸۷	میانگین

سناریوی سوم: در سناریوی سوم از داده‌های میانگین دمای روز و شب سطح زمین و بخار آب موجود در جو بطور همزمان جهت برآورد تبخیر تعرق مرجع توسط مدل موجک استفاده شده است. در شکل ۵ نمودار پراکنش تبخیر تعرق مرجع برآورد شده تحت سناریوی سوم و تبخیر تعرق مرجع محاسبه شده با مدل پنمن مونتیث برای هر یک از ایستگاه‌های مطالعاتی نمایش داده شده است.

پراکنش تبخیر تعرق برآورد شده توسط مدل موجک با ورودی پارامترهای دما و بخار آب در مقابل مقادیر متناظر محاسبه شده با مدل پنمن مونتیث، نشان‌دهنده دقت بالای مدل موجک در برآورد پارامتر خروجی می‌باشد. همانگونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود بترتیب مدل‌های ایستگاه انار، کرمان، شهر بابک و رفسنجان از دقت بالاتری در برآورد تبخیر تعرق روزانه مرجع برخوردار می‌باشند.



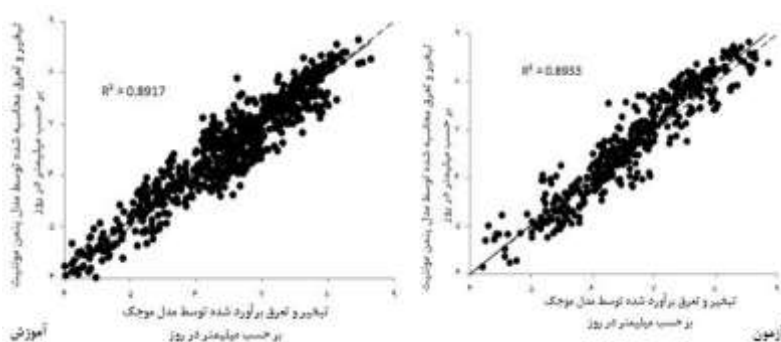
شکل ۵- نمودار پراکنش تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط مدل پنمن موتیث و برآورد شده توسط مدل موجک تحت سناریوی سوم

جدول ۴- نتایج آماری برآورد مدل موجک تحت سناریوی سوم به تفکیک ایستگاه

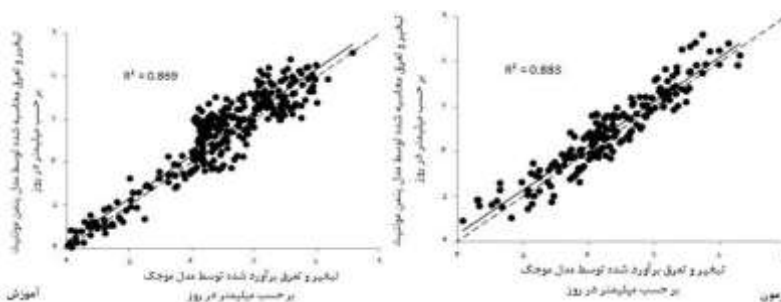
داده‌های آزمون				داده‌های آموزش				ایستگاه
MAE (درصد)	MBE (درصد)	RMSE (درصد)	R^2	MAE (درصد)	MBE (درصد)	RMSE (درصد)	R^2	
۲۸/۰۹	-۱۰/۴۶	۱۸/۶۳	۰/۹۱	۳۱/۵۰	-۱۷/۶۱	۲۲/۰۰	۰/۹۰	انار
۲۶/۶۹	-۱۱/۶۹	۲۰/۰۰	۰/۹۰	۳۱/۷۰	-۲۰/۷۷	۱۸/۶۴	۰/۹۰	کرمان
۲۱/۴۵	۱/۰۷	۱۳/۶۵	۰/۸۷	۳۲/۷۷	-۱۷/۴۴	۲۲/۳۱	۰/۸۸	رفسنجان
۲۵/۱۴	۱/۱۷	۱۸/۶۶	۰/۸۸	۲۳/۹۸	-۶/۸۰	۱۵/۳۵	۰/۹۰	شهر بابک
۲۵/۳۴	۶/۱۰	۱۷/۷۳	۰/۸۹	۲۹/۹۹	۱۵/۶۵	۱۹/۵۷	۰/۸۹	میانگین

با مقایسه نتایج برآورد مدل تدوین شده تحت سناریوهای مختلف در هر یک از ایستگاه‌های مطالعاتی، مشاهده می‌شود در ایستگاه‌هایی مانند کرمان که مدل تدوین شده تحت سناریوهای اول و دوم در این ایستگاه، از دقت بالایی برخوردار است، استفاده همزمان از هر دو پارامتر دما و بخار تحت سناریو سوم نیز سبب دستیابی به دقت بالایی از مدل موجک جهت برآورد تبخیر تعرق مرجع نسبت به سایر ایستگاه‌ها می‌گردد.

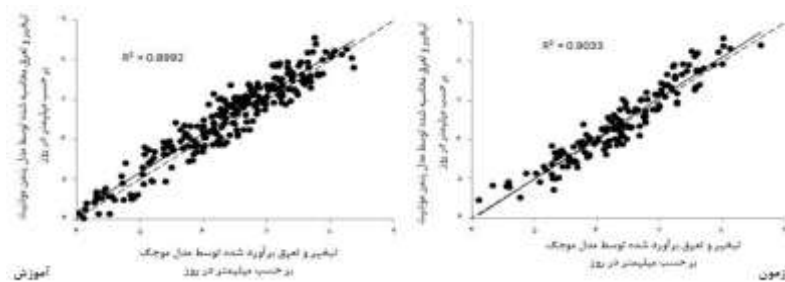
تدوین مدل موجک بر پایه داده‌های تلفیقی ایستگاه‌های مطالعاتی: در این بخش از تمامی داده‌های ایستگاه‌های مطالعاتی بصورت تلفیقی و تصادفی در قالب داده‌های آموزش و آزمون استفاده شده است و مدل موجک تحت سه سناریوی مذکور، بر پایه این اطلاعات تدوین گردیده است. در شکل‌های ۶ الی ۸ نمودار پراکنش مدل موجک تدوین شده با ورودی پارامتر میانگین دمای روز و شب سطح زمین، ورودی پارامتر بخار آب موجود در جو و با ورودی پارامترهای میانگین دما و بخار آب نمایش داده شده است:



شکل ۶- نمودار پراکنش تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط مدل پنمن مونتیث و برآورد شده توسط مدل موجک تحت سناریوی اول



شکل ۷- نمودار پراکنش تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط مدل پنمن مونتیث و برآورد شده توسط مدل موجک تحت سناریوی دوم



شکل ۸- نمودار پراکنش تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط مدل پنمن موتیث و برآورد شده توسط مدل موجک تحت سناریوی سوم

نتایج بررسی و آنالیز مدل‌های موجک تدوین شده بر پایه داده‌های تلفیقی ایستگاه‌های مطالعاتی تحت سناریوهای مختلف در جدول ۵ ارائه گردیده است:

جدول ۵- خلاصه نتایج آماری برآورد مدل موجک بر پایه داده‌های تلفیقی ایستگاه‌های مطالعاتی تحت سناریوهای مختلف

داده‌های آموزش				داده‌های آزمون				سناریو
MAE (درصد)	MBE (درصد)	RMSE (درصد)	R^2	MAE (درصد)	MBE (درصد)	RMSE (درصد)	R^2	
۲۹/۷۳	-۸/۹۸	۲۹/۸۳	۰/۸۹	۲۵/۷۵	-۵/۳۹	۳۰/۷۸	۰/۸۹	سناریوی اول
۲۷/۷۸	-۱۲/۹۱	۱۷/۸۸	۰/۸۸	۳۳/۰۷	-۱۶/۸۵	۲۸/۷۲	۰/۸۷	سناریوی دوم
۲۵/۵۱	-۵/۷۷	۱۴/۸۴	۰/۹۰	۳۰/۱۸	-۱۵/۶۱	۲۲/۸۹	۰/۹۰	سناریوی سوم

در بررسی نتایج آماری مدل‌های مختلف که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، کاربرد همزمان پارامترهای میانگین دمای روز و شب سطح زمین و بخار آب موجود در جو بعنوان پارامترهای ورودی مدل موجک در سناریوی سوم، بیشترین ضریب تبیین ($R^2=0.90$) در بین سه سناریو را به خود اختصاص داده است که نشان‌دهنده کارایی مناسب‌تر مدل موجک با ورودی همزمان این دو پارامتر می‌باشد. همچنین مدل موجک در سناریوی اول با استفاده از پارامتر میانگین دمای روز و شب سطح زمین دارای ضریب تبیین بالاتری نسبت به مدل موجک در سناریوی دوم با استفاده از پارامتر بخار آب موجود در

جو برخوردار است که این موضوع با توجه به همبستگی بیشتر پارامتر تبخیر و تعرق مرجع از پارامتر دما نسبت به پارامتر بخار آب که در جدول ۱ ارائه گردید، قابل توجیه می‌باشد.

بحث و بررسی

نتایج مطالعه حاضر مطابق با نتایج مطالعات پیشین (محمدابراهیم و همکاران (۱۳۹۶)، بیزگرت و همکاران (۲۰۱۶)، ثنایی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۹)، اپکو و همکاران (۲۰۰۸)، کرشمن و همکاران (۲۰۰۸) و مباشری و همکاران (۱۳۸۴)) حاکی از دقت بالای برآورد پارامتر تبخیر تعرق مرجع با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشند.

نتایج این مطالعه نشان داد علیرغم دقت بالای مدل موجک ($R^2=0.89$) در سناریوی اول با استفاده از پارامتر میانگین دمای روز و شب سطح زمین نسبت به مدل موجک در سناریوی دوم با استفاده از پارامتر بخار آب موجود در جو، مدل موجک با استفاده همزمان از پارامترهای دمای سطح زمین و بخار آب موجود در جو در سناریوی سوم از دقت بالاتری ($R^2=0.90$) نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده افزایش دقت برآورد پارامتر تبخیر تعرق مرجع توسط مدل موجک با استفاده همزمان از ورودی دما و بخار آب می‌باشد.

نتیجه‌گیری

تصاویر ماهواره‌ای با پوشش مکانی و زمانی مناسب دارای اطلاعات گسترده‌ای جهت اندازه‌گیری تبخیر تعرق در شرایط کمبود داده می‌باشند و همچنین مدل موجک با کاربرد محصولات استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند کارایی مناسبی در برآورد پارامتر تبخیر تعرق مرجع داشته باشد. در راستای اهداف طرح حاضر مبنی بر ارزیابی و مقایسه دقت مدل موجک با استفاده از پارامترهای ورودی دما و بخار آب، نتایج نشان داد که مدل موجک با استفاده همزمان از این دو پارامتر از دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار می‌باشد. در این راستا می‌توان گفت بطور کلی، استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای مانند دمای سطح زمین و بخار آب موجود در جو، جایگزین مناسبی برای داده‌های هواشناسی در نبود ایستگاه‌های سینوپتیک می‌باشند و در برآورد تبخیر تعرق مرجع توسط مدل موجک با این

اطلاعات می‌توان به برآوردهای مطلوبی دست یافت. در تحقیق بهرامی (۱۳۹۲) در ارزیابی مدل ماشین‌بردار در تخمین تبخیر تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، مدل تورک که از هر دو پارامتر دما و بخار بعنوان پارامتر ورودی استفاده می‌نماید نسبت به مدل‌های هارگریوس سامانی و جنسن هیز که تنها از پارامتر دما استفاده می‌کنند دارای دقت بالاتری می‌باشد که با نتایج طرح حاضر مطابقت و هم‌خوانی دارد.

منابع

- اصغر زاده، حسنعلی؛ ثنایی نژاد، سید حسین (۱۳۸۵)، تخمین تبخیر و تعرق گیاهان با استفاده از داده های سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوزه آبخیز تنگ کنشت کرمانشاه، اولین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- بهرامی، آرزو (۱۳۹۲)، ارزیابی پیش بینی تبخیر تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره ای در مدل ماشین بردار پشتیبان در شرایط کمبود داده، پایان نامه کارشناسی ارشد، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، ۱۴۱ صفحه.
- ثنایی نژاد، سید حسین؛ نوری، سمیرا؛ هاشمی نیا، سید مجید (۱۳۸۹)، برآورد تبخیر- تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره ای در منطقه مشهد، *نشریه آب و خاک*. ۲۵(۳): ۵۴۰-۵۴۷.
- جهانبخش، سعید؛ زاهدی، مجید؛ ولیزاده، خلیل (۱۳۹۰)، محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از روش سبال و درخت تصمیم گیری در محیط GIS و RS در بخش مرکزی منطقه مراغه، *نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی*، ۱۶(۳۸)، ۱۹-۴۲.
- زینلی زاده، کامران؛ خان محمدی، ندا (۱۳۹۵)، مقایسه کارایی مدل های سری زمانی خطی و غیرخطی در شبیه سازی و پیش بینی تبخیر- تعرق مرجع، *نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی*، ۱۸(۴۹)، ۳۱۷-۳۳۴، *نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی*، ۲۲(۶۳)، ۱۶-۱۳۹.
- عاملی، سمانه؛ ثنایی نژاد، سید حسین (۱۳۸۹)، مدل سازی داده های بارندگی در دشت مشهد با استفاده از تبدیلات موجک، کنفرانس بین المللی مدل سازی گیاه، آب، خاک و هوا، مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، کرمان.
- علیزاده، امین (۱۳۸۹)، *طراحی سیستم های آبیاری*، چاپ ششم، انتشارات دانشگاه امام رضا(ع).
- علی حسینی، مریم (۱۳۹۱)، واسنجی معادله هارگریوس برای برآورد تابش خورشیدی رسیده به زمین با استفاده از تصاویر ماهواره مودیس، پایان نامه کارشناسی ارشد، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ۷۳ صفحه.
- فاطمی، باقر؛ رضایی، یوسف (۱۳۸۹)، *مبانی سنجنش از دور*. انتشارات آزاده.

- مباحثی، محمدرضا؛ خاوریان، حسن؛ ضیائیان، پرویز؛ کمالی، غلامعلی (۱۳۸۴)، برآورد تبخیر تعرق واقعی با استفاده از تصاویر مودیس و الگوریتم سبال. همایش ژئوماتیک، سازمان نقشه‌برداری، تهران.
- محمدابراهیم، مسعود؛ محمدرضاپور، ام‌البنی؛ اکبرزاده‌مقدم‌سه‌قلعه، هادی (۱۳۹۶)، ارزیابی مدل SEBS در برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در مقیاس منطقه‌ای (مطالعه موردی: دشت سیستان)، نشریه اکوهیدرولوژی، ۱۱۴۱:۱۱۵۰.
- نوری، سمیرا؛ ثنایی نژاد، سید حسین؛ هاشمی نیا، سید مجید (۱۳۸۹)، برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در زیر حوضه آبریز مشهد، کنفرانس بین‌المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، کرمان.
- ولیزاده کامران، خلیل (۱۳۹۳) برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در آذربایجان شرقی به روش استنز استفاده از GIS، نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۸(۴۹)، ۳۱۷-۳۳۴.
- ولیزاده کامران، خلیل؛ لنگ باف، مریم (۱۳۹۴) برآورد تبخیر-تعرق واقعی ررت با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و مدل سبال در منطقه خوزستان، نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۲(۶۵)، ۱-۱۳.
- Bisquert, M. Sánchez, J.M. López-Urrea, R. Caselles, V. (2016), Estimating high resolution evapotranspiration from disaggregated thermal images, *Remote Sensing of Environment*, Volume 187, Pages 423-433.
- Cammalleri, C. Anderson, M.C. Gao, F. (2014), Mapping daily evapotranspiration at field scales over rainfed and irrigated agricultural areas using remote sensing data fusion, *Agricultural and Forest Meteorology*, 186:1-11.
- Elhag, M. Psilovikos, A. Mankos, I. Perakis, K. (2011), 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*, 25(11): 2731-2742.
- French, A.N. Hunsaker, D.J. Thorp, K.R. (2015), Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models, *Remote Sens, Environ.* 158:281-294.

- Guerschman, j.p. Michael, J.H. Luigi, J.R. Damian, J.B. Alan, S.M. Elizabeth, J.B. (2008), Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors, Remote Sensing of Environment, 928-945.
- Opoku-Duah, S. Donoghue, D.N.M. Burt, T.P. (2008), Intercomparison of evapotranspiration over the savannah Volta basin in West Africa using remote sensing data, SENSORS, 8(4): 2736-2761.
- Santos, A.G. Galvao, C.O. Suzuki, K. Trigo, R.M. (2001), Matsuyama city rainfall data analysis using wavelet transform, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE. 8(3):145-169.
- Semmens, K.A. Anderson, M.C. Kustas, W.P. (2016), Monitoring daily evapotranspiration over two California vineyards using Landsat 8 in a multi-sensor data fusion approach, Remote Sensing of Environment, 185: 155–170.