برآورد تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از تصاویر ماهواره نوا و مدل درختی M5 برای شبکه‌های آبیاری - مطالعه موردی شبکه آبیاری قزوین

محمد امین مرادی و علی رحیمی‌خوب[۱*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۱۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۵/۲۳)

چکیده

تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) یکی از پارامترهای لازم برای تعیین آب مورد نیاز و برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان است. در این تحقیق، روشی ارائه شد که این پارامتر در شبکه‌های آبیاری با استفاده از تصاویر ماهواره نوا برآورد شود. در این روش، برای هر تصویر، یک پیکسل از مجموعه پیکسل‌های محدوده شبکه آبیاری با بیشترین شاخص پوشش گیاهی انتخاب شد و دمای سطح آن به همراه پارامتر تابش فرا زمینی به‌عنوان ورودی مدل تبخیر و تعرق استفاده می‌شود. مدل درختی M5 برای تبدیل دمای سطح زمین و تابش فرا زمینی به ET_0 به‌کار رفت. شبکه مورد مطالعه این تحقیق شبکه آبیاری قزوین بود. تعداد ۲۳۱ تصویر ماهواره نوا مربوط به فصل آبیاری شبکه قزوین برای یک دوره ۳ ساله استفاده شد. نتایج نشان داد که ET_0 با استفاده از مدل تدوین شده و داده‌های اختصاص داده شده برای آزمون، با ضریب تعیین (R^2)، درصد جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و درصد میانگین انحراف خطا (MBE) به‌ترتیب برابر ۰/۸۱، ۸/۵ درصد و ۲/۵ درصد برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: تصاویر ماهواره‌ای، دمای سطح زمین، تابش فرا زمینی، پنمن- مانتیث

۱. گروه مهندسی آبیاری و زه‌کشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: akhob@ut.ac.ir

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.11.0]

مقدمه

تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) یکی از پارامترهای مهم برای برآورد نیاز آبی و برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان است. اندازه‌گیری مستقیم این پارامتر به‌وسیله لایسیمتر با دقت زیادی تعیین می‌شود، ولی به‌دلیل هزینه زیاد خرید آن و آزمایش‌های زمان‌بر از معادلات و روابط مبتنی بر داده‌های هواشناسی استفاده می‌شود. براساس تحقیقات کارشناسان سازمان فائو (FAO)، معادله تبخیر و تعرق پنمن- مانتیث که براساس مفاهیم فیزیکی تدوین شده، دقیق‌ترین نتایج را برای تمام شرایط آب و هوایی ارائه می‌دهد (۲). این سازمان با توجه به خصوصیات تعریف شده برای گیاه مرجع، این معادله (با علامت FAO-PM) را برای گیاه مرجع فرموله کرده و آن را به‌عنوان معادله استاندارد برای تعیین ET_0 و واسنجی معادلات ساده تبخیر و تعرق معرفی کرده است.

برای تعیین ET_0 با استفاده از معادله FAO-PM و یا سایر معادلات تجربی نیاز به داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی است. داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و ET_0 حساب شده با استفاده از این داده‌ها از نوع مکانی نقطه‌ای هستند و به عبارتی فقط در محدوده نزدیک ایستگاه‌ها اعتبار دارند. پیشرفت فناوری سنجش از دور و نرم‌افزارهای پردازش تصاویر ماهواره‌ای، دسترسی به خصوصیات پدیده‌های زمینی را به‌صورت گسترده از نظر مکانی و زمانی فراهم کرده است. خصوصیات و ویژگی‌های سطح زمین با استفاده از باندهای مختلف سنجنده ماهواره‌ها قابل تعیین است. شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) یکی از شاخص‌هایی است که با استفاده از باندهای فوق برای تعیین تراکم پوشش گیاهی استفاده می‌شود. مقدار این شاخص از نظر تئوری بین ۱- تا ۱+ بوده که عدد منفی مؤید پوشش ابری، وجود آب یا برف است. عدد مثبت نزدیک صفر نشان دهنده اراضی بایر و فاقد پوشش گیاهی و بیشتر از ۰/۵ نشان دهنده تراکم زیاد پوشش گیاهی است (۷). دمای سطح زمین با استفاده از باندهای حرارتی ماهواره‌ها تا دقت ۲ درجه سانتی‌گراد برآورد می‌شود. تحقیقات نشان داده که پارامترهای هواشناسی و هم‌چنین تبخیر و تعرق می‌تواند با استفاده از شاخص پوشش گیاهی و دمای سطح زمین با دقت مطلوبی برآورد شوند. در تحقیقی در استان خوزستان، بیشینه دمای هوا با استفاده از داده‌های ماهواره نوا و به کمک مدل شبکه عصبی با دقت مطلوبی به‌دست آمد (۱). معادله FAO-PM برای یکی از مناطق نیمه مرطوب آرژانتین به یک معادله ساده خطی که ورودی آن دمای سطح زمین است، تبدیل شد (۱۴). ضرایب این معادله تابع پارامترهای آئیرودینامیک هوا و تابش رسیده به زمین است و برای منطقه‌ای در آرژانتین نشان داده شد که در طول سال تقریباً ثابتند و ET_0 فقط با استفاده از دمای سطح زمین با دقت ۰/۶ میلی‌متر در روز برآورد شد. پارامتر دمای سطح زمین به‌دست آمده از تصاویر مودیس به‌عنوان ورودی در سه معادله تجربی مبتنی بر دمای هوا شامل هارگریوز، تورنت وایت و بلینی - کریدل در منطقه‌ای در کنیا مورد بررسی قرار گرفت (۸). نتایج این بررسی نشان داد، وقتی دمای سطح زمین به جای دمای هوا در این مدل‌ها استفاده شود، مدل هارگریوز بهترین نتیجه را ارائه می‌دهد که در آن ET_0 با دقت ۰/۴۷ میلی‌متر در روز برآورد شد.

در سال‌های اخیر مدل‌های هوشمند به‌عنوان روش‌های جدید برای مدل‌سازی روابط پیچیده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله این مدل‌ها، شبکه‌های تصمیم‌گیری درختی است که در سایر علوم مهندسی کاربرد زیادی پیدا کرده است. درختان تصمیم‌گیری نسل جدید داده کاوی است و از آن برای کشف و استخراج دانش استفاده می‌شود. داده‌ها براساس روابط موجود در یک مجموعه داده با استفاده از شبکه درختی به گروه‌هایی تقسیم‌بندی می‌شود. مدل درختی M5، از یک معادله رگرسیون خطی برای ارتباط بین متغیرهای مدل در آخرین گروه از یک شبکه درختی استفاده می‌کند. این مدل برای تبدیل چهار پارامتر تابش خورشیدی، متوسط دمای هوا، متوسط رطوبت نسبی و متوسط سرعت باد به ET_0 در منطقه کالیفرنیا آمریکا مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مطلوبی در مقایسه با معادلات FAO-PM و هارگریوز ارائه داد (۱۱).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.11.0]

در این تحقیق، برای نخستین بار روشی ارائه شده که ET_0 با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در شبکه‌های آبیاری ایران تعیین شود. برای برآورد ET_0 در شبکه‌های آبیاری باید داده‌های ورودی آن از محدوده شبکه و برآمده از یک سطح پوشش گیاهی بدون تنش آبی باشد. پر واضح است که در زمان تصویربرداری ماهواره، به‌جز مزارع تازه آبیاری شده، بقیه مزارع در شرایط حداکثر تبخیر و تعرق نیستند. در این تحقیق، یک پیکسل از مجموعه پیکسل‌های تصویر ماهواره‌ای یک شبکه آبیاری که شرایط بدون تنش آبی را داشته باشد، به‌عنوان پیکسل مرجع انتخاب و دمای سطح پوشش آن به همراه پارامتر تابش فرازمینی (Ra) برای ورودی مدل ET_0 استفاده شدند. تابش فرا زمینی نشان دهنده مقدار انرژی است که به سطح فوقانی جو می‌رسد و تابعی از روز شمار سال و عرض جغرافیایی است و به اندازه‌گیری نیاز ندارد. با توجه به این‌که بخشی از تابش فرا زمینی که به زمین می‌رسد، انرژی لازم برای تبخیر و تعرق را فراهم می‌کند، در اغلب مدل‌های تبخیر و تعرق به‌عنوان یکی از پارامترهای ورودی استفاده می‌شود. در این تحقیق، مدل درختی M5 برای تبدیل دمای سطح زمین پیکسل مرجع و تابش فرا زمینی به ET_0 استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این تحقیق شبکه آبیاری قزوین انتخاب شده است. این شبکه یکی از مدرن‌ترین شبکه‌های موجود در کشور بوده و قدمت ۴۰ ساله دارد. شبکه آبیاری قزوین حدود ۸۰ هزار هکتار وسعت دارد و از مجموعه پیکسل‌های ماهواره نوا که در محدوده این شبکه قرار گرفته و به شرحی که خواهد آمد، پیکسل دارای شرایط حداکثر تبخیر و تعرق انتخاب شده و داده‌های آن برای تعیین ET_0 مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱ موقعیت کلی شبکه آبیاری قزوین بر روی یک تصویر ماهواره نوا را نشان می‌دهد.

داده‌های هواشناسی

ایستگاه هواشناسی قزوین در داخل شبکه آبیاری قزوین قرار گرفته و داده‌های روزانه این ایستگاه به‌مدت سه سال (از سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸) برای برآورد ET_0 با استفاده از معادله FAO-PM مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها شامل دمای حداکثر و حداقل ماکزیمم، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی هستند.

داده‌های ماهواره نوا

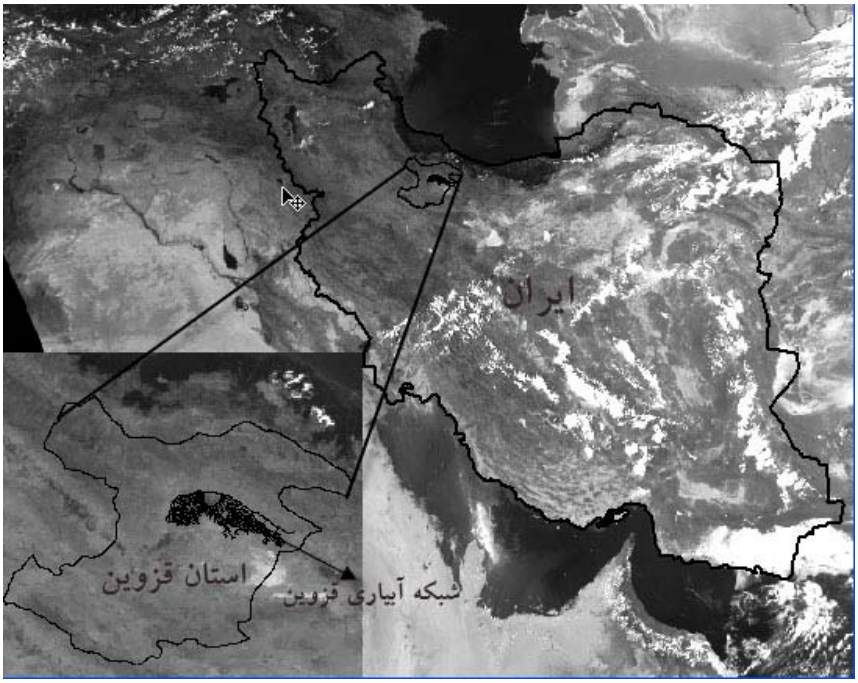
سنجنده AVHRR ماهواره نوا، تابش منعکس شده و حرارت ساطع شده از سطح زمین را در پنج باند اندازه‌گیری می‌کند. باندهای مرئی (۰/۵۸–۰/۶۸ میکرومتر)، مادون قرمز نزدیک (۰/۷۲۵– ۱/۱۰ میکرومتر)، مادون قرمز میانی (۳/۵۵– ۳/۹۸ میکرومتر) و دو تا مادون قرمز حرارتی (۱۰/۳– ۱۱/۳ میکرومتر و ۱۱/۵– ۱۲/۵ میکرومتر) ۵ باند سنجنده AVHRR را تشکیل می‌دهند. ابعاد پیکسل‌های تصویر ماهواره نوا حدود ۱ کیلومترمربع در نقطه نادیر (Nadir) برای تمام باندها است. این ماهواره یک منطقه معین را ۲ بار در هر شبانه روز (یک بار در روز و یک بار در شب) تصویربرداری می‌کند.

در این تحقیق ۲۳۱ تصویر روز و بدون پوشش ابر ماهواره نوا به‌مدت ۳ سال (۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸) از ماه‌های مه تا سپتامبر (اردیبهشت تا شهریور) از پایگاه اینترنتی www.class.ncdc.noaa.gov اخذ گردید. فصل کشاورزی، صاف و بدون ابر بودن هوا که برای مطالعات سنجش از دور ماهواره‌ای مناسب است، علت انتخاب ماه‌های فوق بوده است و لذا نتایج این بررسی برای این دوره زمانی که مصادف با ماه‌های فصل آبیاری استان قزوین است، صادق می‌باشد. زمان گذر تصاویر فوق بین ۱۲ تا ۲ بعد از ظهر به وقت ایران است.

هر فایل تصویر ماهواره نوا، شامل اعداد رقومی پیکسل‌ها، ضرایب واسنجی و یک سری مختصات نقاط کنترل زمینی و مداری ماهواره‌اند. ضرایب واسنجی برای تبدیل اعداد رقومی باندهای مرئی ۱ و ۲ به آلبیدو (برحسب درصد) و باندهای ۳،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.11.0]



شکل ۱. موقعیت شبکه آبیاری قزوین روی یک تصویر ماهواره نوا

۴ و ۵ بـه دمـا (برحـسب درجـه کلـوین) اسـتفاده مـی‌شـوند. مختصات نقاط کنترل زمینی برای تصحیحات هندسـی تـصاویر به‌کار می‌رود. مقـدار پـارامتر آلبیـدو بـستگی بـه زاویـه تـابش خورشید داشته و این زاویه در ساعات و روزهای مختلف سـال تغییر می‌کند و برای این‌که این پارامتر معـرف بازتـاب پوشـش سطح زمین باشـد، نـسبت بـه زاویـه سـمت الـرأس خورشـید (solar zenith angle) نرمـال مـی‌شـود. در ایـن تحقیـق تمـام عملیات ذکر شده بالا از قبیل واسنجی اعـداد رقـومی، تـصحیح هندسی تصاویر و نرمال سازی آلبیدو باندهای ۱ و ۲ با اسـتفاده از نرم‌افزار ENVI نسخه ۴/۲ انجام شد.

شاخص تفاضل نرمال شـده پوشـش گیـاهی (Normalized difference of vegetation index)

یکی از رایج‌ترین شاخص‌های پوشش گیاهی که بـا اسـتفاده از داده‌های تصاویرماهواره‌ای برآورد مـی‌شـود، شـاخص تفاضـل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) است که ارتباط نزدیکـی بـا درصد پوشش گیاهی و شـاخص سـطح بـرگ (LAI) دارد (۶). این شاخص به‌دلیل نرمال شـدن تفاضـل دو بانـد مـادون قرمـز نزدیک و باند قرمز، کمترین اثرات اتمـسفر را دارد و کارآمـدی آن برای پایش رشد گیاه و تغییـرات آن ثابـت شـده اسـت (۷). شاخص NDVI براساس این واقعیت است که پوشـش گیـاهی سـالم در محـدوده مرئـی امـواج الکترومغنـاطیس (۰/۴ تـا ۰/۷ میکرومتر) به‌دلیل جذب کلروفیل و سـایر رنگدانـه‌هـا بازتـاب کمی داشته ولی بازتاب زیادی در محدوده مادون قرمز (۰/۷ تـا ۱/۰۵ میکرومتر) به‌علت بافت اسفنجی مزوفیل سطح بـرگ دارد (۳). رابطه زیر برای تعیین شاخص NDVI استفاده می‌شود:

$$NDVI = \frac{ch_2 - ch_1}{ch_2 + ch_1} \qquad [1]$$

در رابطه بالا، ch1 و ch2 به‌ترتیب مقادیر واسنجی شده بازتـاب مرئـی و مـادون قرمـز بانـدهای یـک و دو سـنجنده AVHRR ماهواره نوا هستند. از نظر تئوری حدود شاخص NDVI بین ۱- تا ۱+ است و NDVI اراضی دارای پوشش گیاهی بین ۰/۱ و ۱ است و هر قدر گیاهان در یک پیکسل سبزتر و یا به عبارتی بـا تنش کمتری مواجه باشـند و هـم‌چنـین تـراکم بیـشتری داشـته باشند، مقدار NDVI بیشتر می‌شود. بر عکس در اراضـی بـدون گیـاه مثـل سـطوح آبـی بـه‌علـت جـذب بـالای تـابش امـواج

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.11.0]

الکترومغناطیس توسط آب، مقدار NDVI منفی است. مقدار شاخص NDVI در اراضی بایر کمتر از ۰/۲ بوده و در اراضی مخلوطی از بایر و پوشش گیاهی بین ۰/۲ تا ۰/۵ و در اراضی با پوشش گیاهی کامل و متراکم بیشتر از ۰/۵ می‌باشد (۷).

انتخاب پیکسل معرف گیاه مرجع

با توجه به این‌که هدف از انجام این تحقیق تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع شبکه آبیاری قزوین است و از آنجا که تمام قسمت‌های این شبکه شرایط گیاه مرجع را ندارند، لذا فرض شد در هر تصویر یکی از پیکسل‌های داخل محدوده شبکه که دارای بیشترین NDVI و مقدار آن نیز بیش از ۰/۵ باشد، معرف پیکسل گیاه مرجع باشد. در این تحقیق برای تعیین این پیکسل برای هر تصویر، با استفاده از گزینه Pixel to Table منوی Utility نرم‌افزار ERDAS IMAGINE، اطلاعات تمام پیکسل‌های داخل شبکه آبیاری قزوین به یک فایل متنی منتقل شدند. سپس شاخص NDVI برای تمام پیکسل‌ها با استفاده از باندهای یک و دو در محیط Excel برآورد و پیکسل دارای بیشترین مقدار NDVI برای هر تصویر معلوم شد. این پیکسل به‌عنوان مرجع برای تعیین ET_0 انتخاب و اطلاعات مربوط به باندهای آن برای برآورد دمای سطح زمین مورد استفاده قرار گرفت.

دمای سطح زمین در پیکسل مرجع

در این تحقیق دمای سطح زمین (T_s) در پیکسل مرجع یکی از دو پارامتر ورودی مدل درختی M5 برای برآورد ET_0 است. در سنجش از دور تصاویر ماهواره‌ای، دمای سطح زمین به‌صورت رادیومتریک با استفاده از الگوریتم‌های روزنه مجزا (Split-window) تعیین می‌شود. این الگوریتم‌ها بر مبنای تفاوت قابلیت انتقال اتمسفر در دو محدوده طیفی مجاور هم در ناحیه مادون قرمز، در نزدیکی ۱۱ و ۱۲ میکرومتر توسعه یافته‌اند. تابش ساطع شده از سطح زمین در باند مادون قرمز قبل از این‌که به سنجنده برسد به‌وسیله ذرات موجود در جو به‌ویژه بخار آب جذب می‌گردد و لذا دمای روشنایی ثبت شده در سنجنده مادون قرمز تفاوت معنی‌داری با دمای واقعی سطح زمین دارد (۱۰). اثر کاهندگی جو در باند طیفی ۱۲ میکرومتر (باند ۵ سنجنده AVHRR) بیشتر از باند ۱۱ میکرومتر (باند ۴ سنجنده AVHRR) است و با افزایش اثر کاهندگی اتمسفر (بیشتر به‌علت افزایش بخار آب)، تفاوت تابش سنجش‌شده در دو ناحیه طیفی فوق افزایش می‌یابد. بنابراین تفاوت تابش سنجش شده از یک سطح معین که به‌طور همزمان به‌وسیله دو باند ۱۱ و ۱۲ میکرومتر اندازه‌گیری می‌گردد، به‌علت تفاوت اثر کاهندگی اتمسفر در دو باند فوق است و در الگوریتم‌های روزنه مجزا از همین مغایرت برای تعیین تأثیر اتمسفر در تابش ساطع شده از سطح زمین و در نتیجه برآورد دمای سطح استفاده شده است. در این تحقیق دمای سطح زمین در پیکسل‌های مرجع شبکه آبیاری قزوین با استفاده از الگوریتم زیر برآورد شد (۱۶):

$$T_s = T_۴ + ۳/۳۳\left(T_۴ - T_۵\right) + ۴۸\left(۱ - \varepsilon\right) - ۷۵\Delta\varepsilon \qquad [۲]$$

در رابطه فوق، T_s دمای سطح زمین (^oC)، T_4 و T_5 دمای روشنایی (^oC) باندهای ۴ و ۵ سنجنده AVHRR، ε و $\Delta\varepsilon$ به‌ترتیب متوسط و تفاضل ضریب گسیل باندهای ۴ و ۵ سنجنده AVHRR هستند. ضریب گسیل هر یک از کانال‌های ۴ و ۵ براساس درصد پوشش گیاهی با استفاده از رابطه زیر تعیین شد (۱۷):

$$\varepsilon_i = \varepsilon_v P_{v+}\ \varepsilon_s\left(۱ -\ P_v\right) \qquad [۳]$$

که در آن، ε_i مقادیر ضریب گسیل باندهای ۴ یا ۵، ε_v ضریب گسیل پوشش گیاهی (برابر ۰/۹۸۵ برای هر دو کانال ۴ و ۵)، ε_s ضریب گسیل خاک لخت (برای باند ۴ برابر ۰/۹۴۹ و برای باند ۵ برابر۰/۹۶۷) و P_v بخش پوشش گیاهی (اعشاری) می‌باشند. P_v با استفاده از شاخص NDVI برآورد می‌شود (۴):

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S}\right)^۲ \qquad [۴]$$

در رابطه فوق، $NDVI_V$ و $NDVI_S$ معرف مقادیر NDVI پوشش گیاهی کامل (P_v =1) و خاک لخت (P_v = 0) هستند که برای کاربرد در مناطق وسیع به‌ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۲ در نظر گرفته

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.11.0]

می‌شود (۱۵). به منظور دست یافتن به مقادیر ثابتی از P_v، پیکسل‌هایی که مقدار NDVI آنها کمتر از $NDVI_S$ باشد، P_v آنها صفر و پیکسل‌هایی که مقدار NDVI آنها بیشتر از $NDVI_V$ باشد، P_v آنها یک منظور می‌شود.

تابش فرا زمینی (Ra)

تابش فرا زمینی معرف انرژی تابشی خورشید است که به‌صورت عمودی به سطح بالای جو می‌رسد و مقدار آن برای پیکسل مرجع هر تصویر در زمان گذر ماهواره نوا برآورد و به‌عنوان دومین پارامتر ورودی مدل درختی تدوین شده در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. این تابش از رابطه زیر برآورد شده است (۲):

$$Ra = G_{Sc} \times d_r \times \cos\theta \qquad [۵]$$

که در آن، G_{SC} ثابت خورشیدی (برابر ۱۳۶۷ وات بر مترمربع)، d_r فاصله نسبی معکوس زمین و خورشید و $\cos\ \theta$ کسینوس زاویه تلاقی خورشید هستند. پارامتر d_r با استفاده از معادله زیر محاسبه شده است (۲):

$$d_r = ۱+۰/۰۳۳\cos(۲\pi/۳۶۵\times DOY) \qquad [۶]$$

در رابطه فوق DOY روز شمار سال (شروع از اول ژانویه) و زاویه $(2\pi/365\times DOY)$ برحسب رادیان است. مقادیر d_r بین ۰/۹۷ تا ۱/۰۳ و بدون بعد می‌باشد. زاویه تلاقی خورشید، زاویه برخورد تابش خورشید به زمین است و این زاویه روی شدت تابش رسیده به زمین موثر است. رابطه زیر برای محاسبه $\cos\ \theta$ استفاده شده است (۵):

$$\cos\theta = \sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\omega \qquad [۷]$$

در رابطه فوق، δ، φ و ω به‌ترتیب زاویه میل خورشید، عرض جغرافیایی و زاویه زمانی خورشید و همگی برحسب رادیان هستند. برای تعیین δ و ω از روابط توصیه شده آلن و همکاران (۲) استفاده شده است.

مدل درختی M5

اولین بار مدل درختی M5 توسط کوئینلن (۱۲) براساس روش طبقه‌بندی درختی برای ایجاد رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته ارائه شد. این مدل بر خلاف مدل درخت تصمیم (Decision tree) که برای داده‌های کیفی (Categorical) استفاده می‌شود، برای هر دو نوع داده‌های کیفی و کمی (Quantitative) قابل استفاده است (۹، ۱۲ و ۱۳). مدل M5 مشابه توابع خطی جدا شده (Piece-wise linear functions) است که ترکیبی از مدل‌های رگرسیون خطی ورگرسیون درختی است که کاربردهای زیادی در علوم مختلف دارد (۱۸). مدل رگرسیون برای کل فضای داده‌ها یک معادله رگرسیون ارائه می‌دهد، ولی در مدل رگرسیون درختی، محدوده داده‌ها به زیر ناحیه‌هایی که برگ (Leaf) نامیده می‌شوند، تقسیم شده و به هر از این برگ‌ها یک برچسب عددی نسبت داده می‌شود. جایگزینی معادله رگرسیون خطی به جای برچسب در گره‌ها، شیوه‌ای است که در مدل M5 اجرا می‌شود که می‌تواند متغیرهای عددی پیوسته را پیش‌بینی و یا برآورد کند (۱۲). ساختار درخت تصمیم‌گیری شبیه یک درخت بوده که از ریشه (Root)، شاخه‌ها (Branches)، گره‌ها (Nodes) و برگ‌ها (Leaves) تشکیل یافته است. درخت تصمیم از بالا به پایین ترسیم می‌شود. ریشه به‌عنوان اولین گره در بالا قرار گرفته و زنجیره‌ای از شاخه‌ها و گره‌ها به برگ‌ها ختم می‌شود. هر گره مربوط به یک متغیر پیش‌بینی کننده بوده و به‌وسیله شاخه‌ها عمل انشعاب در گره انجام می‌گیرد. شاخه‌ها شامل بازه‌ای عددی است که از گره والد (Parent node) منشعب شده و به یک گره فرزند (Child node) می‌رسد. در مدل M5 از هر گره والد دو شاخه منشعب می‌شود.

ساخت مدل درخت تصمیم‌گیری در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، درخت تصمیم‌گیری با انشعاب سازی داده‌ها تشکیل می‌شود. معیار انشعاب در مدل M5، بیشینه‌سازی کاهش انحراف معیار داده‌ها در گره فرزند است. زمانی‌که امکان کاهش انحراف معیار داده‌های گره فرزند میسر نبود، گره والد آن منشعب نشده و به گره پایانی و یا برگ رسیده است. کاهش انحراف معیار از رابطه زیر برآورد می‌شود (۱۱):

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.11.0]

$$SDR = sd(T) - \sum \frac{|T_i|}{|T|} sd(T_i) \quad [8]$$

در رابطه فوق، SDR کاهش انحراف معیار در گره فرزند، T مجموعه داده‌های ورودی به گره والد، T_i زیر مجموعه از داده‌های ورودی به گره والد و sd انحراف معیار است. به‌علت فرآیند انشعاب، انحراف معیار داده‌ها در گره فرزند کمتر از گره والد بوده و لذا از همگنی بیشتری برخوردارند. در مدل M5 بعد از آزمودن تمام انشعابات ممکن از یک گره، انشعابی که بیشترین کاهش انحراف معیار را تولید کند، انتخاب می‌شود. این گونه انشعاب‌سازی در اغلب موارد منجر به ایجاد درخت بزرگی شده و امکان دارد برازش بیش از حد روی داده‌های آموزشی رخ دهد (۱۲). برازش بیش از حد باعث کاهش یافتن کلیت بخشی مدل شده به‌طوری‌که مدل فقط برای داده‌هایی که برای ساخت آن استفاده شدند، اعتبار دارد و برای داده‌های جدید از دقت لازم برخوردار نیست. بنابراین مرحله دوم طراحی مدل درختی، شامل کوچک کردن درخت بیش از حد بزرگ شده از طریق هرس‌سازی شاخه‌ها و جایگزین شدن با توابع رگرسیون خطی است. الگوریتم‌های مختلفی برای هرس کردن درخت ارائه شده است. در این تحقیق از الگوریتم کوئینلن (۱۳) استفاده شد. در این الگوریتم ابتدا به درخت اجازه داده می‌شود تا به اندازه کافی رشد کند. سپس گره‌هائی که باعث افزایش دقت دسته‌بندی نمی‌شوند، هرس میگردند. شکل ۲- الف انشعابات داده‌های ورودی X_1 و X_2 (متغیرهای مستقل) که به شش مدل رگرسیون خطی در برگ‌ها (برچسب‌های LM1 تا LM2) منتهی شده را نشان می‌دهد. فرم کلی این مدل‌ها به‌صورت $y=a_0+a_1x_1+a_2x_2$ است که در آن a_0، a_1 و a_2 ضرایب رگرسیون خطی هستند. شکل ۲- ب ارتباط انشعابات را به‌صورت دیاگرام درختی نشان می‌دهد.

در این بررسی از نرم‌افزار Weka که در دانشگاه Waikato کشور نیوزلند توسعه یافته و اسم آن از عبارت "Waikato Environment for knowledge Analysis" گرفته شده، استفاده شده است. ساخت مدل M5 با استفاده از داده‌های سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ انجام شد و داده‌های سال ۲۰۰۸ برای تست و ارزیابی استفاده شد.

معادله پنمن - مانتیث فائو (FAO- PM)

آلن و همکاران (۲) با اعمال مفروضات گیاه مرجع در معادله پنمن- مانتیث، معادله‌ای ارائه دادند که تبخیر و تعرق با استفاده از داده‌های هواشناسی برآورد می‌شود و نتایج آن به‌عنوان مبنا برای ارزیابی و واسنجی سایر معادلات توصیه شده است (۲):

$$ET_{.} - PM = \frac{0/408\Delta\,(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0/34U_2)} \quad [9]$$

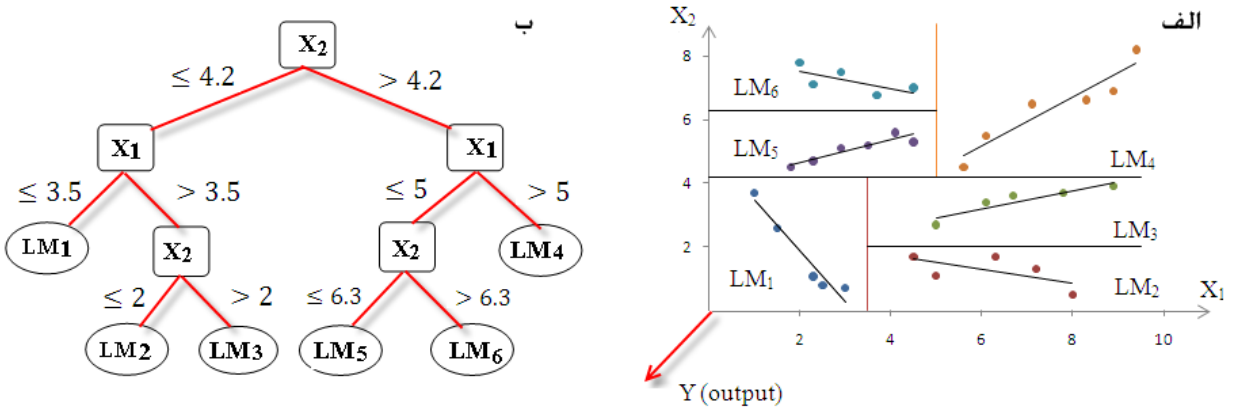
که در آن، ET_0-PM تبخیر و تعرق مرجع برآورد شده با استفاده از معادله پنمن مانتیث ($mm\ d^{-1}$)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع با دما ($Kpa\ ^oC^{-1}$)، R_n تابش خالص رسیده به زمین ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)، G شار گرمای خاک ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)، γ ثابت سایکرومتر ($Kpa\ ^oC^{-1}$)، T_a متوسط دمای روزانه هوا (^oC)، U_2 متوسط روزانه سرعت باد ($m\ s^{-1}$)، e_s فشار بخار اشباع (Kpa) و e_a فشار بخار هوا (Kpa) می‌باشند. در این تحقیق مؤلفه‌های رابطه فوق با استفاده از روابط ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو (۲) و داده‌های هواشناسی تعیین و ET_0 در روزهای مصادف با تصاویر ماهواره اخذ شده، برآورد و با نتایج مدل M5 مقایسه شدند.

شاخص‌های آماری

در این تحقیق نتایج ET_0 حاصل از معادله FAO-PM (ET-PM) به‌عنوان مقادیر مبنا (o_i) و نتایج ET_0 حاصل از مدل درختی M5 (ET-M5) به‌عنوان مقادیر برآورد شده (P_i) استفاده شدند. به منظور ارزیابی نتایج مدل درختی M5، علاوه بر ترسیم نمودارها، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، درصد ریشه میانگین مربعات خطا (PRMSE) و درصد میانگین

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.11.0]



شکل ۲. شمای کلی شبکه درختی M5

انحراف خطا (PMBE) استفاده شده است. معادلات آنها به شرح زیر است:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N}(P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}(P_i - \overline{P})^2 \sum_{i=1}^{N}(O_i - \overline{O})^2} \quad [10]$$

$$PRMSE = \frac{N^{-1}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2}{\overline{O}} \times 100 \quad [11]$$

$$PMBE = \frac{N^{-1}\sum_{i=1}^{n}P_i - O_i}{\overline{O}} \times 100 \quad [12]$$

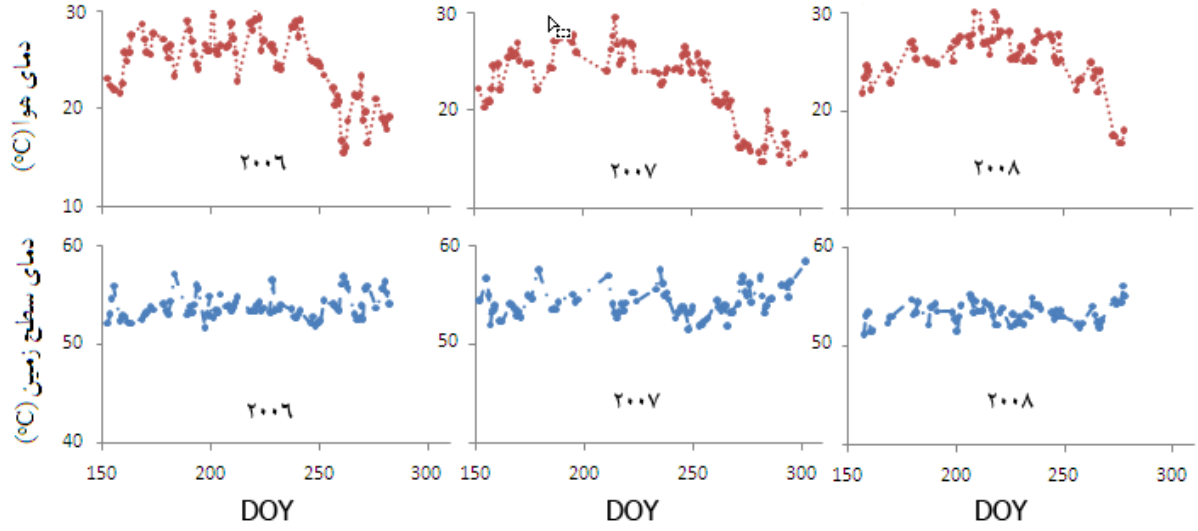
در روابط فوق، N تعداد داده‌ها، $\overline{O}$ و $\overline{P}$ به‌ترتیب میانگین مقادیر مبنا و برآورد شده هستند.

نتایج و بحث

تغییرات زمانی دمای سطح زمین در زمان گذر ماهواره نوا و متوسط دمای روزانه هوا براساس روز شمار سال (DOY) در طی ۳ سال متوالی (۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸) از اواخر بهار تا اواخر تابستان در شکل ۳ ارائه شده است. باید به این نکته توجه داشت که داده‌های دمای سطح زمین این تحقیق مربوط به پیکسل‌هایی هستند که بیشترین درصد پوشش گیاهی را در هر تصویر دارند و زمان برداشت این دما مصادف با زمان گذر ماهواره نوا است که در حدود ساعات ظهر ایران می‌باشد. از طرفی داده‌های دمای هوا معرف متوسط دمای روزانه است. دمای سطح زمین، به‌علت تابش خورشید به زمین و سپس انتقال گرما به هوا بیشتر از هوا می‌باشد و این افزایش برای پوشش گیاهی بیش از چند درجه نیست. ولی در شکل ۳ ملاحظه می‌شود که دمای سطح زمین حدود ۲ برابر دمای هوا است. دو دلیل می‌توان برای بیشتر بودن داده‌های دمای سطح زمین نسبت به دمای هوا که در این تحقیق جمع‌آوری شده، برشمرد. نخست، همان‌طورکه در بالا اشاره شد، دمای هوا معرف متوسط دمای روزانه است که از میانگین دمای بیشینه و کمینه هوا در طی روز به‌دست آمده ولی دمای سطح زمین مربوط به زمان گذر ماهواره نواست که مصادف با ساعات ظهر ایران می‌باشد. دوم این‌که دمای هوا در ایستگاه‌های هواشناسی به‌وسیله دماسنج جیوه‌ای اندازه‌گیری می‌شود که در آن میزان دما با استفاده از بالا و پایین رفتن سطح جیوه سنجش می‌شود ولی دمایی که توسط باندهای حرارتی سنجنده ماهواره‌ها به‌دست می‌آید به‌صورت رادیومتریک برآورد می‌شود. هم‌چنین در شکل۳ دیده می‌شود، دامنه تغییرات دمای سطح زمین به مراتب کمتر از دامنه تغییرات دمای هواست. به‌طوری‌که دمای هوا بین ۱۴/۶ تا ۳۳/۶ درجه سانتی‌گراد ولی دمای سطح زمین بین ۵۱/۳ تا ۵۸/۴ درجه سانتی‌گراد در طول فصل نوسان دارد. بنابراین دامنه تغییرات دمای هوا حدود ۱۹ درجه و دامنه تغییرات دمای سطح زمین حدود ۸ درجه است، به عبارتی دامنه تغییرات دمای هوا حدود ۲/۶ برابر دامنه تغییرات دمای سطح زمین است. این نتایج نشان

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.11.0]



شکل ۳. تغییرات زمانی دمای سطح زمین (در سردترین پیکسل شبکه آبیاری قزوین) و متوسط دمای هوا (در ایستگاه هواشناسی قزوین) در طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸

می‌دهد، پوشش گیاهی به‌دلیل تبخیر و تعرق اثر تعدیل‌کننده بر دمای محیط داشته و مشابه مناطق مرطوب و نزدیک دریا تغییرات دما در طی یک فصل کمتر از مناطق خشک است.

مدل شبکه درختی M5 که برای تبدیل داده‌های دمای سطح زمین و تابش فرا زمینی به ET_0 ساخته شد، در شکل ۴ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، پارامتر تابش فرا زمینی به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری تعیین شده و براساس دو گزاره شرطی در مدل شبکه درختی به دو برگ منتهی می‌شود. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، اگر تابش فرا زمینی کمتر یا مساوی ۱۰۷۹/۷۹ وات بر مترمربع باشد، مدل خطی ۱ (LM1) و در غیر این صورت مدل خطی ۲ (LM2) برای برآورد ET_0 استفاده می‌شود. شکل ۵ نحوه انشعاب داده‌های تابش فرا زمینی برای برآورد ET_0 براساس نتایج مدل درختی M5 نشان داده شده است. ضرایب تعیین برای دو شاخه انشعاب حدود ۰/۵۲ و ۰/۱۵ برآورد شده است. مقادیر این ضرایب نشان می‌دهد، زمانی‌که تابش فرا زمینی کمتر یا مساوی ۱۰۹۷/۸ وات بر مترمربع باشد، حدود ۵۲ درصد تغییرات ET_0 ناشی از تغییرات تابش فرا زمینی است ولی تأثیر این تابش بر ET_0 زمانی که مقدار آن بیشتر از ۱۰۹۷/۸ وات بر مترمربع باشد، کمتر شده و به حدود ۱۵ درصد می‌رسد.

مدل درختی مندرج در شکل ۴ برای داده‌های آموزش (داده‌های سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷) و داده‌های آزمون (داده‌های سال ۲۰۰۸) اجرا شد و پراکنش نتایج ET_0 حاصل از آن (ET-M5) با نتایج مدل پنمن- مانتیث (ET_0-PM) در شکل ۶ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، نتایج شاخص آماری مدل درختی M5 برای هر دو داده‌های واسنجی و آزمون تقریباً مشابه و تفاوت چندانی ندارند و لذا این مدل برای سایر داده‌هایی که در تدوین مدل شرکت نداشتند، قابل کاربرد است. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، درصد جذر میانگین مجذور خطا برای هر دو داده‌های واسنجی و آزمون کمتر از ۱۰ درصد برآورد شده (برای داده‌های واسنجی و آزمون به‌ترتیب برابر ۹/۹ و ۸/۵ درصد) نشان‌دهنده این است که دقت مدل درختی M5 برای تبدیل داده‌های تابش فرا زمینی و دمای سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره نوا به ET_0 قابل قبول می‌باشد. درصد میانگین انحراف خطا برای هر دو داده‌های واسنجی و آزمون کمتر از ۲/۵ درصد (برای داده‌های واسنجی و آزمون به‌ترتیب برابر ۱/۶ و ۲/۵ درصد) برآورد شده و ناچیز است و علامت مثبت این شاخص آماری نشان‌دهنده بیش برآورد ناچیز مدل M5 است. مقایسه بین ضرایب تعیین درج شده در شکل۶ نشان می‌دهد،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.11.0]

M5 pruned model tree:

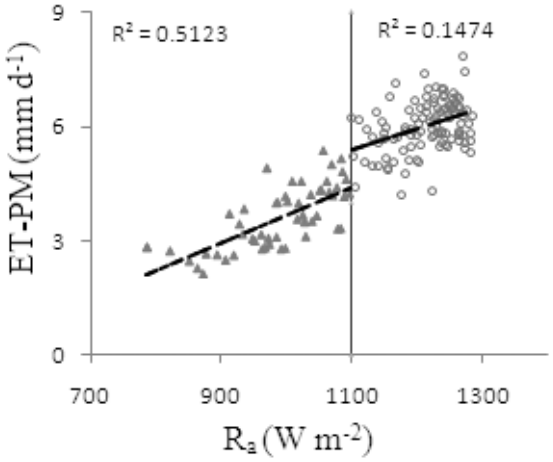
Ra <= 1097.791: LM1
Ra > 1097.791: LM2

LM num: 1
ETPM = -0.0875 * Ts + 0.0057 * Ra + 3.6978

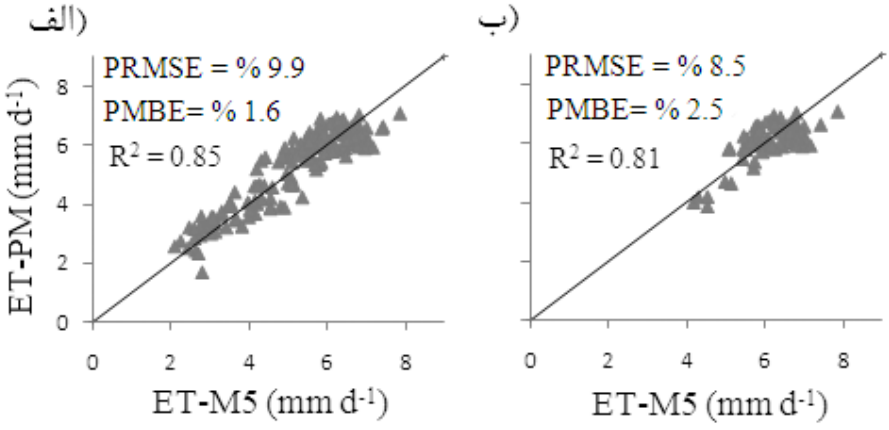
LM num: 2
ETPM = -0.1327 *Ts + 0.0061 * Ra + 6.9755

Number of Rules: 2

شکل ۴. مدل شبکه درختی M5 برای تبدیل داده‌های دمای سطح زمین و تابش فرا زمینی به ET_0



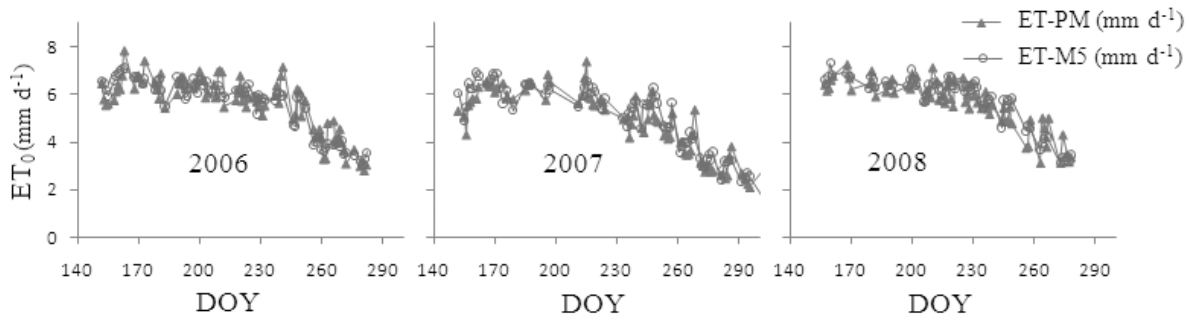
شکل ۵. انشعاب داده‌های تابش فرا زمینی برای برآورد ET_0 براساس نتایج مدل درختی M5



شکل ۶. پراکنش یک به یک نتایج ET_0 و شاخص‌های آماری مدل‌های درختی M5 و پنمن مانتیث، الف) داده‌های واسنجی و ب) داده‌های آزمون

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.11.0]



شکل ۷. روند تغییرات زمانی نتایج ET_0 مدل‌های درختی M5 و پنمن مانتیث در طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸

زمانی‌که دمای سطحی زمین در مدل‌های رگرسیون وارد شود، سبب افزایش ضریب تعیین مدل M5 برای برآورد ET_0 شده و از این رو هر دو پارامتر تابش فرا زمینی و دمای سطح زمین اثر گذار هستند.

روند تغییرات زمانی نتایج ET_0 مدل‌های درختیM5 و پنمن مانتیث در طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ در شکل ۷ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود منحنی‌های هر دو مدل روند یکسانی دارند و تقریباً روی هم افتاده‌اند و لذا تغییرات پارامترهای جوی در طول فصل آبیاری منطقه قزوین روی دقت نتایج تأثیر ندارد.

نتیجه‌گیری

با استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق، ET_0 در شبکه آبیاری قزوین با استفاده از تصاویر ماهواره نوا و بدون استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی به دقت مناسبی برآورد شد. ولی باید به نکته توجه شود که شبکه درختی و معادلات رگرسیونی که در برگ‌های این شبکه برای تبدیل دمای سطح زمین و تابش فرا زمینی ارائه شده‌اند فقط برای تصاویر ماهواره نوا و شبکه آبیاری قزوین معتبر می‌باشد. تبخیر و تعرق به غیر از دما و تابش فرا زمینی به عوامل دیگری چون سرعت باد و رطوبت نسبی بستگی دارد که این پارامترها توسط تصاویر ماهواره‌ای تعیین نمی‌شود. ولی برآیند تأثیر این پارامترها در ضرایب معادلات رگرسیون به‌طور ضمنی منعکس می‌شود. لذا برای سایر شبکه‌ها که دامنه پارامترهای فوق در آنها متفاوت از شبکه آبیاری قزوین است، باید مدل درختی مخصوص آن شبکه تدوین و ارزیابی شود. هم‌چنین ذکر این نکته ضروری است که در این تحقیق، داده‌های دمای سطح زمین و تابش فرا زمینی در زمان گذر ماهواره نوا تبدیل به ET_0 روزانه شدند. برای تبدیل داده‌های لحظه‌ای مربوط به یک زمان خاصی از روز به دوره روزانه نیاز به ضریب تبدیل است که این ضریب نیز به‌صورت ضمنی در ضرایب معادلات رگرسیون وارد شده است. محدوده زمان گذر ماهواره نوا بین ۱۲ تا ۲ بعد از ظهر به وقت ایران است، از این رو مدلی که در این تحقیق ارائه شده، نمی‌تواند برای سایر تصاویر ماهواره‌ای که زمان گذر آنها خارج از این محدوده هستند، مورد استفاده قرار گیرد. توصیه می‌شود، روش ارائه شده در این بررسی در سایر شبکه‌های آبیاری و ماهواره‌های دیگر مورد بررسی قرار گیرد.

منابع مورد استفاده

۱. رحیمی خوب، ع.، س. م. ر. بهبهانی و م. جمشیدی. ۱۳۸۸. ارزیابی دو روش تجربی و مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد تابش خورشید رسیده به زمین- مطالعه موردی در جنوب شرق تهران. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک ۱۳(۵۰): ۵۳-۶۳.

2. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56- FAO, Rome.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.11.0]

3. Cambell, J.B. 1987. Introduction to Remote Sensing. The Guilford Press, New York.
4. Carlson, T.N. and D.A. Ripley. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. Remote Sens. Environ. 62: 241−252.
5. Duffie, J.A. and W.A. Beckman. 1991. Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
6. John, G., D. Yuan, R.S. Lunetta and C.D. Elvidge. 1998. A change detection experiment using vegetation indices. Photogram. Eng. Remote Sens. 62: 143-150.
7. Julien, Y., J.A. Sobrino and W. Verhoef. 2006. Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999. Remote Sens. Environ. 103(1): 43-55.
8. Maeda, E.E., D.A. Wiberg and P.K. Pellikka. 2011. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. Appl. Geography 31: 251-258.
9. Mitchell, T.M. 1997. Machine Learning. The McGraw-Hill Comp. Press, N.Y.
10. Ouaidrari, H., S.N. Goward, K.P. Czajkowski, J.A. Sobrino and E. Vermote. 2002. Land surface temperature estimation from AVHRR thermal infrared measurements: An assessment for the AVHRR Land pathfinder II data set. Remote Sens. Environ. 81: 114-128.
11. Pal, M. and S. Deswal. 2009. M5 model tree based modelling of reference evapotranspiration. Hydrol. Process. 23: 1437–1443.
12. Quinlan, J.R. 1986. Introduction of decision trees. Machine Learning 1: 81-106.
13. Quinlan, J.R. 1992. Learning with continuous classes. Proceedings of the Fifth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, Hobart, Australia, 16-18 November, World Scientific, Singapore, pp.343–348.
14. Rivas, R. and V. Caselles. 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. Remote Sens. Environ. 93: 68-76.
15. Sobrino, J. A. and N. Raissouni. 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring. Application to Morocco. Intl. J. Remote Sens. 21: 353−366.
16. Ulivieri, C., M.M. Castronouvo, R. Francioni and A. Cardillo. 1994. A split-window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. Adv. Space Res. 14(3): 59-65.
17. Valor, E. and V. Caselles. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas. Remote Sens. Environ. 57: 167–184.
18. Witten, I.H. and E. Frank. 2005. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Technique. Morgan Kaufmann Pub., San Francisco.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.11.0]