

# برآورد بهینه پارامتر تبخیر تعرق بالقوه با استفاده از مشاهدات سیستم تعیین موقعیت جهانی

سعید ابراهیمی<sup>۱</sup>، یزدان عامریان<sup>۲\*</sup>، سعید حاجی آفاجانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی  
s.ebrahimi@email.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی  
amerian@kntu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار مؤسسه ژئودزی و ژئوفورماتیک - دانشگاه علوم زیست محیطی و راتسواف - لهستان  
saeid.haji-aghajany@upwr.edu.pl

(دریافت: آبان ۱۴۰۳، تصویب: دی ۱۴۰۴)

## چکیده

تبخیر تعرق بالقوه (PET) یکی از اجزای مهم چرخه آب و تعادل انرژی است. معمولاً مدل‌های تجربی تورنت‌وایت (TH) و پنمن‌مانتیت (PM) برای محاسبه PET به کار می‌روند. از آن جایی که مدل TH تنها متغیر دما را به عنوان ورودی در نظر می‌گیرد، دقت پایینی دارد، در حالی که مدل PM به دلیل استفاده از پارامترهای هواشناسی فراوان بسیار دقیق است. PET حاصل از این دو روش دارای وضوح مکانی پایین بوده و تنها در یک نقطه به دست می‌آید. بنابراین، در این مقاله با هدف دستیابی به برآورد دقیق‌تر PET، مدلی بهینه و با وضوح مکانی بالاتر (KPET) توسعه داده شد که با بهره‌گیری از حداقل پارامترهای هواشناسی و استفاده از بخار آب قابل بارش (PWV) استخراج‌شده از سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS)، دقت بالایی را در برآورد PET فراهم می‌کند. بدین منظور، ابتدا اختلاف بین PET بدست‌آمده از مدل‌های TH و PM، یعنی مقدار (DPET) محاسبه شد، سپس با تحلیل رابطه بین DPET و پارامترهای PWV، دما، فشار، موقعیت و زمان یک مدل رگرسیون چندجمله‌ای درجه دو انتخاب شد، و مدل جدید با افزودن DPET برازش شده به مقدار اولیه PET حاصل از مدل TH ایجاد شد. نتایج به‌کارگیری مدل پیشنهادی در منطقه مطالعاتی لس‌آنجلس، عملکرد رضایت‌بخش مدل KPET را نشان داد. از معیارهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و ضریب همبستگی برای ارزیابی مدل‌های TH و KPET، نسبت به مدل PM استفاده و نتایج ارزیابی با یکدیگر مقایسه شد. نتایج آماری به صورت میانگین در تمامی ایستگاه‌های کنترل، عملکرد برتر مدل KPET را با RMSE برابر ۰/۴۲ میلی‌متر، MAE برابر ۰/۳۳ میلی‌متر و ضریب همبستگی برابر ۰/۹۸، در مقایسه با مدل TH که دارای RMSE برابر ۱/۸۴ میلی‌متر، MAE برابر ۱/۷۱ میلی‌متر و ضریب همبستگی برابر ۰/۹۲ بود، نشان داد. میزان بهبود RMSE در ایستگاه‌های کنترل به ترتیب ۰/۷۲/۲۵٪، ۰/۸۲/۶٪، ۰/۷۹/۷٪، ۰/۷۸/۹۵٪ و ۰/۶۲/۷۲٪ به دست آمد. این نتایج بیانگر آن است که مدل KPET توسعه‌یافته در این مطالعه می‌تواند با دقت و اطمینان بالا PET را با استفاده از داده‌های هواشناسی محدود در منطقه، محاسبه کند.

**واژگان کلیدی:** تبخیر تعرق بالقوه، سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی، بخار آب قابل بارش، روش پنمن‌مانتیت، روش تورنت‌وایت

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

تبخیر تعرق<sup>۱</sup> (ET) یکی از اجزای اساسی چرخه آب است که ترکیبی از دو فرآیند تبخیر و تعرق است [۱، ۲]. تبخیر شامل تبدیل آب مایع به بخار آب و حذف از سطح تبخیر است و تعرق شامل تبخیر آب مایع درون گیاه و از دست دادن آب به صورت بخار از طریق روزنه‌های برگ است [۳]. بین میزان آبی که واقعاً تبخیر و تعرق می‌شود و آنچه که در صورت در دسترس بودن، تبخیر و تعرق می‌شد، تفاوت وجود دارد [۴]. به عنوان یک پارامتر مهم هواشناسی، تبخیر تعرق بالقوه<sup>۲</sup> (PET) نشان دهنده حداکثر مقدار آبی است که در صورت موجود بودن منبع آب کافی در سطح، تبخیر و تعرق می‌شود [۵]. بر اساس آمار، میانگین بارش سالانه جهانی حدود ۹۷۳ میلی‌متر است و حدود ۶۴٪ از آب سطحی از طریق PET از دست می‌رود [۶]. بنابراین PET بعنوان یک پارامتر ضروری در برنامه‌ریزی منابع آب، تغذیه آب زیرزمینی، مطالعات هیدرولوژیکی، ارزیابی تأثیرات زیست محیطی، محاسبه تقاضای آب محصولات کشاورزی و پایش عملیاتی خشکسالی در نظر گرفته می‌شود [۵، ۶]. اگرچه PET را می‌توان با استفاده از دستگاه‌هایی مانند لایسیمترها<sup>۳</sup> اندازه‌گیری کرد، تخمین PET با استفاده از معادلات تحلیلی و تجربی معمول است زیرا روش‌های اندازه‌گیری گران و وقت‌گیر هستند [۱]. تعداد زیادی از روش‌های تجربی برای برآورد PET از متغیرهای اقلیمی مختلف طی ۵۰ سال گذشته توسعه یافته‌اند که با توجه به نیاز داده، روش‌های ساده تا پیچیده را شامل می‌شوند [۲]. این روش‌ها شامل روش موازنه انرژی، موازنه آب خاک، روش‌های مبتنی بر تابش، روش‌های مبتنی بر دما و روش‌های ترکیبی هستند [۶]. از مشهورترین و پرکاربردترین مدل‌های برآورد PET می‌توان به مدل ترکیبی مبتنی بر اصول فیزیکی پنمن‌مانتیت<sup>۴</sup> (PM) و مدل تجربی مبتنی بر دمای تورنت‌وایت<sup>۵</sup> (TH) اشاره داشت. به عنوان یک مدل مبتنی بر دما، مدل TH تنها با استفاده از متغیر اقلیمی دما و عرض جغرافیایی قابل اجرا است [۷]. از آن جایی که PET تحت تأثیر پارامترهای دیگری علاوه بر دما است و مدل TH فقط دما را در نظر می‌گیرد، فیزیک صحیح حاکم بر فرآیند PET

را به خوبی منعکس نمی‌کند و منجر به برآوردهای PET با دقت کم می‌شود [۸]. علاوه بر این، روش TH در دماهای پایین‌تر از نقطه انجماد PET را برآورد نمی‌کند، در اقلیم‌های مرطوب آن را بیش از حد تخمین و در اقلیم‌های خشک کمتر از حد تخمین می‌زند [۹، ۱۰]. یکی دیگر از مدل‌های رایج مبتنی بر دما، مدل هارگریوز سامانی<sup>۶</sup> است. تحقیقات نشان می‌دهد که مدل هارگریوز سامانی به طور کلی از سایر مدل‌های مبتنی بر دما، از جمله مدل TH، به ویژه در شرایط جغرافیایی و اقلیمی خاص، بهتر عمل می‌کند [۱۱]. دقیق‌ترین روش برای محاسبه PET روش PM می‌باشد. مدل PM به عنوان روش استاندارد برآورد PET توسط فائو<sup>۷</sup> در سال ۱۹۹۸ معرفی شد. این مدل مبتنی بر اصول فیزیکی بوده، کلیه متغیرهای اقلیمی را در نظر می‌گیرد و به عنوان معیاری برای ارزیابی مدل‌های دیگر در نظر گرفته می‌شود [۱، ۱۲]. در عمل با اینکه مقادیر دقیق‌تری از PET را می‌توان با استفاده از مدل PM به دست آورد، این مدل به پارامترهای هواشناسی بسیاری نیاز دارد [۱۳]. به طور کلی، داده‌های هواشناسی مورد استفاده در مدل PM در استفاده‌های بزرگ مقیاس نمی‌توانند بدست آیند و در نتیجه مقدار PET دقیق در بیشتر مناطق جهان در دسترس نیست و رابطه TH نیز دقت کافی را تامین نمی‌کند [۱۰]. صرف نظر از دیگر متغیرهای هواشناسی رایج، بخار آب قابل بارش<sup>۸</sup> (PWV) برآورد شده از مشاهدات سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی<sup>۹</sup> (GNSS) با دقت بالا و وضوح مکانی و زمانی مناسب، عملکرد ۲۴ ساعته پایدار در تمامی شرایط آب و هوایی دارد و می‌تواند برای برآورد دقیق PET مورد استفاده قرار گیرد [۵، ۱۴].

اخیراً، PWV به‌دست آمده از GNSS برای بهبود روش دستیابی به PET برای محاسبه شاخص نظارت بر خشکسالی مانند شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر تعرق<sup>۱۰</sup> (SPEI) استفاده شده است [۱۴]. مطالعات قبلی مدلهایی برای افزایش دقت PET با استفاده از تفاوت مدل‌های TH و PM و داده‌های دما و PWV پیشنهاد کرده‌اند. برای نمونه، موری و همکاران در سال ۲۰۰۷ روشی جدید برای برآورد PET با استفاده از داده‌های PWV و دمای سطحی برای کشور ژاپن

۶ Hargreaves-Samani

۷ Food and Agriculture Organization

۸ Precipitable Water Vapor

۹ Global Navigation Satellites System

۱۰ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

۱ Evapotranspiration

۲ Lysimeters

۳ Potential Evapotranspiration

۴ Penman-Monteith

۵ Thornthwaite

پیشنهاد دادند که نتایج استخراج شده همخوانی خوبی با روش PM داشت [۱۵]. ژائو و همکاران در سال ۲۰۱۹ در مطالعه‌ای در منطقه فلات لوئس چین<sup>۱</sup>، به منظور محاسبه دقیق شاخص‌های خشکسالی، PET را با استفاده از متغیر مدلسازی کردند، اما مدل ارائه‌شده تغییرات مکانی PET را در نظر نمی‌گرفت [۱۶]. در ادامه، ژائو و همکاران در سال ۲۰۲۱ با بهره‌گیری از روشی بهینه، مدل دیگری را در کل منطقه مطالعاتی توسعه دادند. این روش تغییرات مکانی را نیز در برآورد PET لحاظ می‌کرد [۱۰]. ما و همکاران در سال ۲۰۲۱ با هدف محاسبه دقیق شاخص‌های خشکسالی، روش‌های مختلف مدلسازی PET بر مبنای داده‌های PWV را برای کل کشور چین مورد توسعه و ارزیابی قرار دادند [۱۷]. پیپاتسی و همکاران در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی در کشور تایلند به مدلسازی PET حاصل از روش پنمن مانیتیت با استفاده از PWV پرداختند [۱۸]. در این مقاله، به منظور بهبود دقت برآورد PET با استفاده از تعداد محدودی از پارامترهای هواشناسی، یک مدل رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم توسعه داده شد، که برای نخستین بار متغیرهای PWV، دما، فشار، پارامترهای موقعیت مکانی و پارامتر زمان را در یک ساختار یکپارچه ادغام می‌کند. این رویکرد، امکان ارائه تخمین‌های دقیق PET در نقاط مختلف جغرافیایی را فراهم می‌کند، در حالی که نیاز به پارامترهای هواشناسی پیچیده را به حداقل می‌رساند و دقت مدل را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

## ۲- روش تحقیق

در این بخش در ابتدا به بحث درباره معادلات دو روش معروف PM و TH برای محاسبه PET پرداخته می‌شود. سپس نحوه دستیابی به PWV مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه فرایند مدلسازی KPET با استفاده از پارامترهای هواشناسی و PWV به طور کامل بیان می‌گردد. در نهایت معیارهای آماری جهت ارزیابی مدل‌های مورد مطالعه ارائه می‌گردد.

### ۲-۱- روش تورنت وایت

معادله TH یک روش تجربی مشهور است که توسط تورنت‌وایت برای تخمین PET در سال ۱۹۴۸ توسعه یافت

[۴] [۳]. این روش تنها از متغیر دما به عنوان ورودی استفاده می‌کند. لازم به ذکر است که معادله TH تنها در شرایطی قابلیت برآورد PET را دارد که دما بالاتر از صفر درجه سانتیگراد باشد. زمانی که دما کمتر یا برابر با صفر درجه سانتیگراد باشد، مقدار PET برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود [۴]. برای تخمین میزان PET در یک ماه استاندارد ۳۰ روزه، که هر روز آن دارای ۱۲ ساعت نور است از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$PET_{TH} = \begin{cases} 0, & T \geq 0 \\ 16K(10\frac{T_m}{I})^a, & 0 < T \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه  $T_m$  میانگین دمای هوا (سانتیگراد)،  $I$  شاخص حرارتی سال و  $a$  ضریب ثابت (به صورت تابعی از  $I$ ) است.  $a$  و  $I$  به ترتیب از روابط (۲) و (۳) حاصل می‌شوند:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0.2T_m)^{1.514} \quad (2)$$

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49 \quad (3)$$

$K$  در رابطه (۱) به عنوان ضریب تصحیح معرفی می‌شود که تابعی از عرض جغرافیایی و زاویه میل خورشید به صورت زیر می‌باشد:

$$K = \frac{N}{12} \cdot \frac{NDM}{30} \quad (4)$$

که در آن  $NDM$  تعداد روزهای ماه و  $N$  حداکثر ساعت روشنایی روز است که عبارت است از:

$$N = \frac{24}{\pi} \cdot \omega_s \quad (5)$$

$\omega_s$  زاویه ساعتی خورشید بر حسب رادیان است، که از رابطه (۶) حاصل می‌گردد.

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{-\tan(\varphi)\tan(\delta)}{X^{0.5}}\right) \quad (6)$$

$$X = 1 - [\tan(\varphi)]^2 \cdot [\tan(\delta)]^2 \quad (7)$$

### ۳-۲- محاسبه اختلاف بین دو مدل

مدل TH تأثیر پارامترهای هواشناسی نظیر تابش، سرعت باد، رطوبت هوا و سایر عوامل را در محاسبات در نظر نمی‌گیرد، به همین دلیل مقدار PET معمولاً کمتر از میزان واقعی برآورد می‌شود [۱۹]. اما مقدار PET محاسبه شده بر اساس مدل PM به دلیل در نظر گرفتن کلیه عوامل اقلیمی دقیق و استاندارد است [۱]. اختلاف بین این دو مدل میزان ضعف مدل TH در محاسبه PET دقیق را نشان می‌دهد. بنابراین، در صورت استفاده از مدل TH برای محاسبه PET، بایستی DPET برای تضمین دقت به صورت زیر برآورد شود [۱۰].

$$DPET = PET_{PM} - PET_{TH} \quad (10)$$

در این رابطه  $DPET$  اختلاف بین دو مدل PM و TH بر حسب میلیمتر،  $PET_{PM}$  برآورد PET از روش PM و  $PET_{TH}$  برآورد PET از روش TH است.

### ۴-۲- محاسبه بخار آب قابل بارش

یکی از اثرات مهم جو بر سیگنال‌های ارسالی از ماهواره‌های GNSS، تأخیر ناشی از عبور این سیگنال‌ها از لایه تروپوسفر است، که در راستای قائم اندازه‌گیری می‌شود و به عنوان تأخیر تروپوسفری زینت (ZTD) شناخته شده است. این تأخیر کلی را می‌توان به دو بخش تأخیر هیدروستاتیک زینتی<sup>۳</sup> (ZHD) و تأخیر تر زینتی<sup>۴</sup> (ZWD) تقسیم کرد [۲۰، ۲۱]. تأخیر هیدروستاتیک زینتی (ZHD) را می‌توان با استفاده از مدل ساستاموین<sup>۵</sup> به صورت زیر برآورد کرد [۲۲]:

$$ZHD = \frac{0.002277P}{(1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00000028h)} \quad (11)$$

که در آن  $P$  فشار هوا در سطح ایستگاه بر حسب هکتو پاسکال،  $\varphi$  عرض جغرافیایی ایستگاه و  $h$  ارتفاع ارتومتریک ایستگاه بر حسب متر است.

برای محاسبه مقادیر  $ZTD$ ، از روش تعیین موقعیت نقطه‌ای دقیق<sup>۶</sup> (PPP) با استفاده از پردازش مشاهدات GPS،

در رابطه (۷) اگر  $X \leq 0$  باشد، آنگاه  $X = 0.00001$  است.  $\varphi$  عرض جغرافیایی و  $\delta$  زاویه میل خورشید است.  $\delta$  از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\delta = 0.409 \sin \left[ \frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right] \quad (8)$$

در این رابطه  $J$  شماره روز از سال است.

### ۲-۲- روش پنمن مانیتیت

مدل تجربی PM توسط فائو برای محاسبه PET دقیق پیشنهاد شده است [۱]. مقدار PET محاسبه شده از مدل PM به عنوان نوعی نرخ تبخیر تعرق (ET) تعریف می‌شود که یک پوشش گیاهی فرضی را به عنوان مرجع در نظر می‌گیرد. این پوشش گیاهی مرجع دارای ارتفاع فرضی ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی ثابت ۷۰ متر بر ثانیه و ضریب آلبیدو<sup>۱</sup> ۰/۲۳ (بدون واحد) است، که می‌توان آن را به عنوان یک سطح وسیع از علفزار مرطوب (بدون کمبود آب)، با رشد فعال و ارتفاع یکنواخت در نظر گرفت [۱، ۱۲]. برخلاف مدل TH، روش محاسبه تبخیر تعرق بالقوه با استفاده از مدل PM که با عنوان  $PET_{PM}$ ، نشان داده می‌شود بسیار پیچیده بوده [۷] و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$PET_{PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (9)$$

در این رابطه  $T$  میانگین دمای هوا در ارتفاع دو متری (درجه سانتیگراد) و  $u_2$  میانگین سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه) است.  $R_n$  تابش خالص ورودی به سطح و  $G$  شار گرمای خاک است، که هر دو دارای واحد یکسان (مگاژول بر مترمربع بر روز) هستند.  $e_s$  فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)،  $e_a$  فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)،  $e_s - e_a$  کمبود فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار (کیلوپاسکال بر درجه سانتیگراد) و  $\gamma$  ضریب ثابت سایکرومتری<sup>۲</sup> (کیلوپاسکال بر درجه سانتیگراد) است.

<sup>۵</sup> Saastamoinen  
<sup>۱</sup> Precipitable water vapor

<sup>۱</sup> Albedo coefficient  
<sup>۲</sup> Psychrometric constant coefficient  
<sup>۳</sup> Zenith Hydrostatic Delay  
<sup>۴</sup> Zenith Wet Delay

$$\Pi = [10^{-6} (\frac{k_3}{T_m} + k_2') \rho_w \cdot R_v]^{-1} \quad (14)$$

که در آن،  $R_v$  ثابت جهانی گاز مخصوص بخار آب (۴۶۱/۵۰ ژول بر کیلوگرم درجه کلون)،  $k_2'$  ثابت فیزیکی تجربی (۱۶/۴۸ درجه کلون بر هکتوپاسکال)،  $k_3$  ثابت فیزیکی تجربی ( $۳/۷۷۶ \times ۱۰^۵$  مجذور درجه کلون بر متر هکتوپاسکال) و  $\rho_w$  چگالی بخار آب (۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) است.  $T_m$  نیز به عنوان میانگین وزنی دما (کلون) است و تنها پارامتر متغیر بوده و آن را می‌توان از رابطه ارائه شده توسط بیویس در سال ۱۹۹۲ به صورت زیر محاسبه کرد:

$$T_m = 70.2 + 0.72T_s \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)  $T_s$  نمایانگر دمای هوا در سطح است.

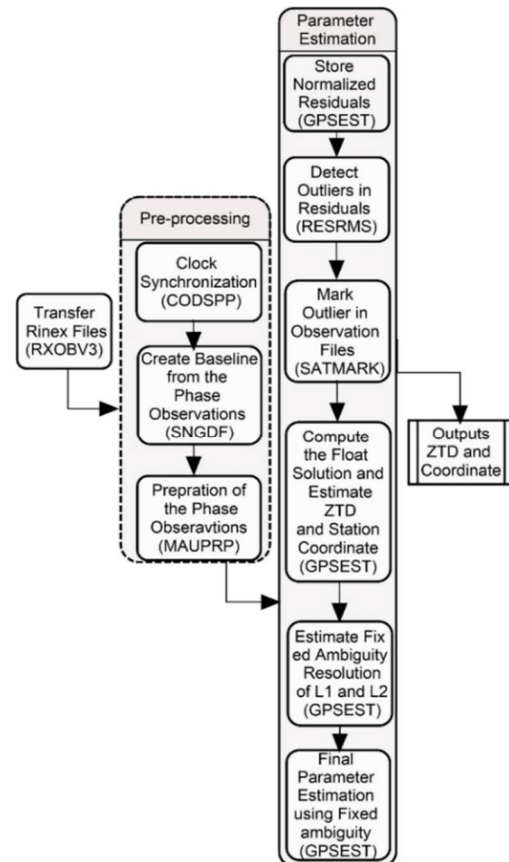
## ۲-۵- مدل‌سازی تحلیل رگرسیون

در این بخش، با در نظر گرفتن تأثیر دما، فشار، بخار آب قابل بارش و پارامترهای مکانی و زمانی بر روی DPET، بین روابط PM و TH، یک مدل بهینه و کارآمد برای برآورد PET در مقیاس بزرگ ارائه شده است تا بتواند در شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه و با داده‌های محدود به نتایج دقیقی دست یافت. برای کل منطقه مطالعاتی، مدل DPET به عنوان یک برآوردگر بهینه PET، به صورت تابعی از متغیرهای هواشناسی، پارامترهای مکانی و زمانی در نظر گرفته می‌شود. هدف از مدل‌سازی تابع DPET، شناسایی و تعیین ارتباط بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل موجود با استفاده از روش تحلیل رگرسیون است [۷]. این فرآیند شامل تنظیم پارامترهای مدل DPET برای دستیابی به بهترین تناسب با مجموعه داده‌های موجود می‌باشد.

$$DPET = F(PWV, T, P_s, MOY, \varphi, \lambda, h) \quad (16)$$

که در این رابطه  $PWV$  میانگین ماهیانه بخار آب قابل بارش (میلیمتر)،  $T$  دمای میانگین ماه (سانتیگراد)،  $P_s$  میانگین ماهیانه فشار هوا (هکتوپاسکال) و  $MOY$  ماه از سال،  $\varphi$ ،  $\lambda$  و  $h$  عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه هستند.

توسط نرم افزار برنیز استفاده شد. فرآیند تعیین ZTD با استفاده از نرم افزار برنیز در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱- فلوجارت تخمین پارامتر ZTD با استفاده از نرم‌افزار برنیز [۲۳]

با کسر کردن مقدار  $ZHD$  از مقدار  $ZTD$  می‌توان به مقدار  $ZWD$  دست یافت.  $ZWD$  با دقت بالا از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (17)$$

$ZWD$  به طور مستقیم با بخار آب در جو مرتبط است و می‌تواند با استفاده از یک تابع نگاشت به میزان بخار آب قابل بارش یا  $PWV$  تبدیل شود [۲۰].  $PWV$  برابر مقدار کل بخار آب موجود در ستونی قائم از جو با سطح مقطع یک متر مربع، از سطح زمین تا بالاترین سطح تروپوسفر است که قابلیت بارش دارد. مقدار  $PWV$  از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (18)$$

در این رابطه  $\Pi$  تابع نگاشت می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

میانگین قدرمطلق خطا<sup>۳</sup> یا (MAE) ۳- ضریب همبستگی پیرسون<sup>۴</sup> یا (r) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (19)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (20)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2 \right]}} \quad (21)$$

که در روابط بالا  $y_i$  مقادیر مرجع به دست آمده از روش PM و  $\hat{y}_i$  مقادیر محاسبه شده از مدل‌های دیگر است.  $\bar{y}$  میانگین مقادیر مرجع،  $\bar{\hat{y}}$  میانگین مقادیر محاسبه شده و  $n$  تعداد نمونه‌ها است.

برای محاسبه میزان بهبود RMSE (Improvement-IRMSE) مدل KPET نسبت به TH از روش زیر استفاده شد [۱۰].

$$IRMSE = \left[ \frac{RMSE_{TH, PM} - RMSE_{KPET, PM}}{RMSE_{TH, PM}} \right] \times 100 \quad (22)$$

که در این رابطه،  $IRMSE$  میزان بهبود RMSE مدل توسعه یافته KPET را نسبت به مدل TH با واحد درصد مشخص می‌کند.  $RMSE_{TH, PM}$  میزان RMSE بین دو مدل سنتی PM و TH است و  $RMSE_{KPET, PM}$  بیانگر میزان RMSE بین دو مدل توسعه یافته KPET و PM است.

در ارزیابی دقت مدل‌ها در این مطالعه، مقدار کوچکتر و نزدیک به صفر RMSE و MAE نشان‌دهنده دقت بالاتر و تطابق بهتر نتایج مدلسازی است. نتایج r در بازه منفی یک تا مثبت یک قرار دارد. مقدار r نزدیک به مثبت یک نشان‌دهنده همبستگی مثبت خطی قوی مقدار r نزدیک به منفی یک نشان‌دهنده همبستگی منفی خطی قوی و مقدار نزدیک به صفر بیانگر نبود رابطه خطی معنادار بین نتایج است.

### ۳- منطقه مطالعاتی

در این تحقیق، منطقه مطالعاتی شامل حوضه لس‌آنجلس و بخش‌هایی از اطراف آن در کالیفرنیا جنوبی کشور ایالات

برای این منظور، رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو<sup>۱</sup> به عنوان یک روش آماری جامع که به منظور مدل‌سازی و تحلیل روابط غیرخطی بین متغیرهای وابسته و مستقل به کار می‌رود، انتخاب شد. رگرسیون چندجمله‌ای قادر است تا تعاملات پیچیده و تاثیرات غیر خطی بین متغیرها را مدل‌سازی کند [۲۴، ۲۵]. فرم صریح ریاضی معادله رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو مورد استفاده در این مقاله به صورت زیر می‌باشد.

$$DPET = a_0 + a_1 PWV + a_2 T + a_3 P_s \dots \\ + a_4 MOY + a_5 MOY^2 + a_6 \phi + a_7 \lambda + a_8 h \dots \\ + a_9 \phi \lambda + a_{10} \phi h + a_{11} \lambda h + a_{12} \phi^2 + a_{13} \lambda^2 + a_{14} h^2 \quad (17)$$

هدف از حل این معادله، یافتن ضرایب  $a_0$  تا  $a_{14}$  است که به بهترین شکل ممکن، متغیر وابسته  $DPET$  را به متغیرهای مستقل  $PWV$ ،  $T$ ،  $P_s$ ،  $MOY$ ،  $\phi$ ،  $\lambda$  و  $h$  برازش می‌دهد. این ضرایب با استفاده از روش سرشکنی کمترین مربعات جهت بهینه‌سازی ضرایب مدل برآورد شد. این روش بهینه‌سازی، ضرایب مدل را به گونه‌ای محاسبه می‌کند که مجموع مجذورات اختلافات بین مقادیر واقعی و حاصل از مدل‌سازی به حداقل ممکن برسد [۲۴].

### ۲-۶- تولید مدل

پس از اتمام مراحل فرآیند مدل‌سازی، با افزودن  $DPET$  حاصل از مدل‌سازی در هر مکان متناسب با زمان، به مقدار اولیه PET حاصل از مدل TH به صورت زیر:

$$KPET = PET_{TH} + DPET \quad (18)$$

مدل PET بهینه ایجاد شده در این مطالعه یعنی (KNTU-PET: KPET) به دست می‌آید.

### ۲-۷- معیارهای آماری

برای بحث و ارزیابی نتایج حاصل از مدل KPET نسبت به مدل‌های TH و PM، از معیارهای آماری ارزیابی رگرسیون شامل: ۱- ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> یا (RMSE)، ۲-

۴ Pearson Correlation Coefficient

۱ Multiple Quadratic Polynomial Regression Model

۲ Root Mean Squared Error

۳ Mean Absolute Error



جدول ۱- مقایسه نتایج معیار آماری RMSE برای مدل‌های

PM و TH، KPET

ایستگاه	RMSE		IRMSE
	TH-PM	KPET-PM	KPET-TH
CSSV	۱/۱۵	۰/۳۲	۷۲/۲۵
SDLC	۲/۶۴	۰/۴۶	۸۲/۶۰
CECK	۲/۱۲	۰/۴۳	۷۹/۷۰
ECSC	۲/۱۲	۰/۴۵	۷۸/۹۵
VLCC	۱/۱۸	۰/۴۴	۶۲/۷۲
میانگین	۱/۴۲	۰/۴۲	۷۶/۲۴

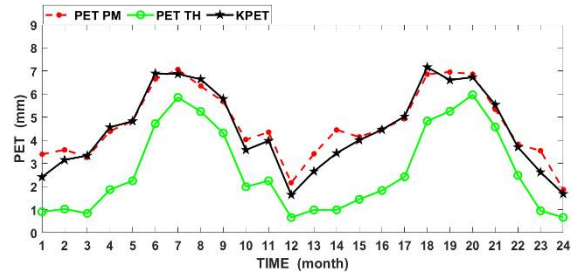
جدول ۲- مقایسه نتایج معیارهای آماری MAE و r برای

مدل‌های PM و TH، KPET

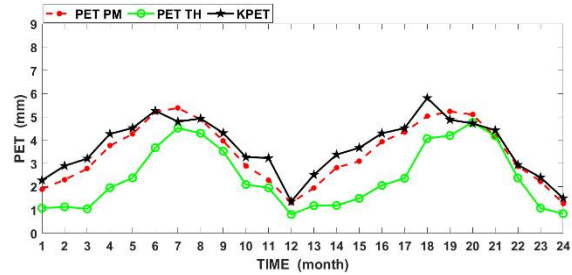
ایستگاه	MAE		r	
	TH-PM	KPET-PM	TH-PM	KPET-PM
CSSV	۱/۰۰	۰/۲۴	۰/۹۰	۰/۹۸
SDLC	۲/۴۷	۰/۳۴	۰/۹۳	۰/۹۹
CECK	۲/۰۶	۰/۳۶	۰/۹۳	۰/۹۶
ECSC	۲/۰۱	۰/۳۴	۰/۹۳	۰/۹۸
VLCC	۱/۰۳	۰/۳۸	۰/۹۰	۰/۹۶
میانگین	۱/۷۱	۰/۳۳	۰/۹۲	۰/۹۷

در ستون اول و دوم جدول شماره (۲) مقادیر MAE از دو مدل KPET و مدل TH نسبت به مدل PM آمده است. مقادیر MAE نشان می‌دهند که ستون دوم با میانگین ۰/۳۳ به طور قابل توجهی مقادیر کمتری نسبت به ستون اول با میانگین ۱/۷۱ دارد. این میزان کاهش MAE نشان می‌دهد که مدل KPET نسبت به TH عملکرد بهتری دارد. بررسی میزان ضریب همبستگی بین مدل KPET و TH نسبت به مدل PM، نشانگر افزایش همبستگی بین نتایج حاصل از مدل‌های KPET و PM در تمام ایستگاه‌های کنترل در مقایسه با همبستگی مدل‌های TH و PM است، که این روند افزایشی را می‌توان در دو ستون انتهایی جدول (۲) مشاهده نمود. نمودار همبستگی نتایج، بین مدل‌های KPET و PM در مقایسه با همبستگی نتایج، بین مدل‌های TH و PM توسط شکل (۸) نمایش داده شده است.

نتایج معیارهای آماری از عملکرد مدل KPET بر روی ایستگاه‌های کنترل مورد مطالعه، نشان‌دهنده افزایش قابل توجه دقت و همبستگی مدل KPET نسبت به مدل TH است. این نتایج نشان می‌دهد که، مدل KPET توانسته است برآورد PET در منطقه را با داده‌های هواشناسی محدود به



شکل ۶- مقایسه سری زمانی مدل KPET، مدل‌های TH و PM در ایستگاه کنترل ECSC



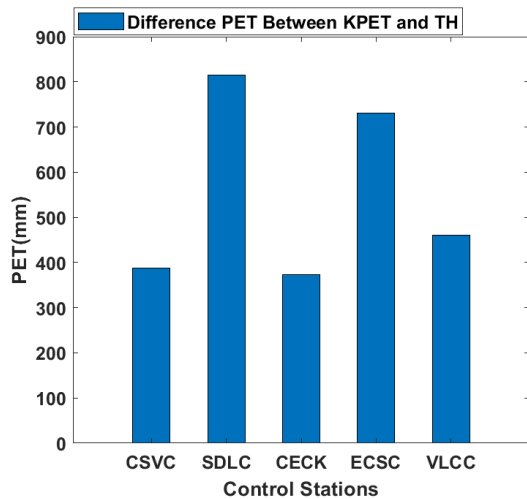
شکل ۷- مقایسه سری زمانی مدل KPET، مدل‌های TH و PM در ایستگاه کنترل VLCC

به منظور ارزیابی صحت عملکرد مدل سازی، نتایج حاصل از مدل KPET توسط معیارهای آماری RMSE، MAE، ضریب همبستگی، مورد بحث و ارزیابی قرار گرفتند. مدل PM به عنوان روش مرجع برای ارزیابی مدل‌های TH و KPET انتخاب شد.

جدول (۱) و (۲) نتایج حاصل از ارزیابی مدل KPET و TH را نسبت به مدل مرجع PM در ایستگاه‌های کنترل نشان می‌دهد. از آنجا که روش TH عوامل تأثیرگذار اقلیمی بر فرآیند PET، همچون سرعت باد، تابش و رطوبت را در محاسبات در نظر نمی‌گیرد مقدار RMSE بزرگتری را در تمام ایستگاه‌های کنترل شامل می‌شود که در ستون اول جدول (۱) می‌توان مشاهده نمود. مقایسه‌ی نتایج RMSE مدل KPET و مدل TH نسبت به مدل PM در ایستگاه‌های کنترل، کاهش محسوس مقدار RMSE مدل KPET نسبت به مدل TH را در ستون دوم جدول (۱) نمایان می‌سازد.

همچنین میزان بهبود مقادیر RMSE مدل KPET نسبت به مدل TH در ایستگاه‌های کنترل به ترتیب ۷۲/۲۵٪، ۸۲/۶۰٪، ۷۹/۷۰٪، ۷۸/۹۵٪ و ۶۲/۷۲٪ به دست آمد که حاکی از افزایش دقت مدل توسعه یافته KPET در این مطالعه است.

خوبی بهبود دهد و در شرایط مختلف زمانی و مکانی، عملکرد قابل قبولی و سازگاری بالا داشته باشد.

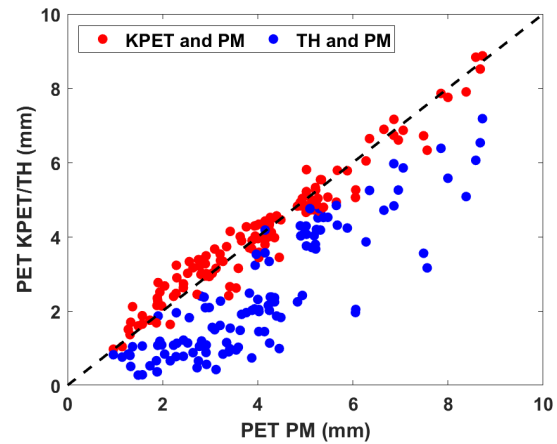


شکل ۱۰- اختلاف برآورد مقادیر PET حاصل از مدل KPET نسبت به مدل TH در سال ۲۰۲۲

## ۵- نتیجه گیری

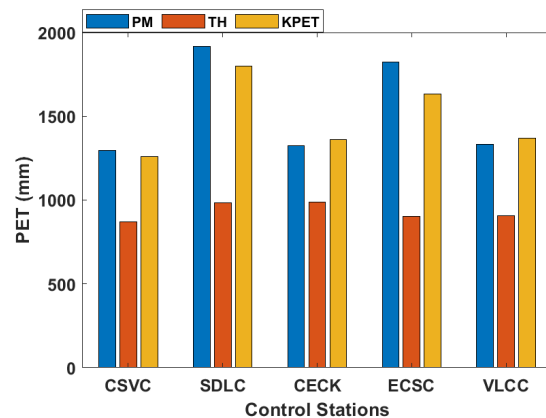
هدف این مطالعه دستیابی به مدلی دقیق جهت برآورد PET نسبت به مدل TH با استفاده از مشاهدات هواشناسی کمتر نسبت به مدل مرجع بین‌المللی PM و رفع مشکل وابسته به سایت بودن برآورد PET در منطقه مورد مطالعه بود. بنابراین در این مقاله، مدل KPET توسعه داده شد که از دما و فشار و PWV به دست آمده از GNSS و پارامترهای موقعیت و زمان استفاده می‌کند. منطقه لس‌آنجلس در ایالت کالیفرنیا به عنوان منطقه آزمایش انتخاب شد و به طور کلی نتایج آماری در منطقه نشان داد که مدل KPET پیشنهادی عملکرد رضایت‌بخشی در منطقه داشته و قابلیت برآورد PET با دقت بالا با تعداد پارامترهای هواشناسی کمتر را دارد.

میزان بهبود RMSE در ایستگاه‌های کنترل به ترتیب ۰/۷۲/۲۵٪، ۰/۸۲/۶٪، ۰/۷۹/۷٪، ۰/۷۸/۹۵٪ و ۰/۶۲/۷۲٪ به دست آمد. همچنین اختلاف مقادیر PET برآورد شده مدل KPET نسبت به مدل TH، از بیشینه ۸۱۶ میلی‌متر تا کمینه ۳۷۴ میلی‌متر در سال ۲۰۲۲ ثبت شد که بهبود قابل توجه مدل KPET در ثبت نتایج صحیح از PET نسبت به مدل TH را نشان می‌دهد. با توسعه GNSS، PWV به دست آمده از GNSS به راحتی و با چگالی بالا در دسترس است. بنابراین، می‌توان گفت روش پیشنهادی در این مطالعه پتانسیل بالایی برای محاسبه PET با دقت بالا جهت مطالعات هواشناسی و اقلیمی به ویژه مطالعات شاخص‌های خشکسالی را دارد.



شکل ۸- نمودار نتایج همبستگی بین مدل‌های KPET و PM و مدل‌های TH و PM

شکل (۹) مجموع سالانه PET برآورد شده توسط سه روش TH، PM و KPET را در سال ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. مطابق نتایج این شکل، مقادیر PET سالانه حاصل از مدل KPET بسیار نزدیک به مقادیر مدل مرجع PM است، حالی که مدل TH در مقایسه با مدل مرجع PM، PET را به‌طور قابل توجهی کمتر برآورد می‌کند. شکل (۱۰) اختلاف مقادیر PET برآورد شده بین مدل KPET و مدل TH را در سال ۲۰۲۲ نمایش می‌دهد. این اختلاف در بازه ۳۷۴ تا ۸۱۶ میلی‌متر قرار دارد که بیانگر عملکرد ضعیف‌تر مدل TH و برتری مدل KPET در برآورد مقادیر دقیق PET است.



شکل ۹- مقایسه نتایج سالانه PET حاصل از مدل‌های KPET و TH با مدل PM در سال ۲۰۲۲

## مراجع

- [۱] Allen, R., et al., FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 56: p. 26-40.
- [۲] McKenney, M.S. and N.J. Rosenberg, Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993. 64(1): p. 81-110.
- [۳] Fisher, J.B., R.J. Whittaker, and Y. Malhi, ET come home: potential evapotranspiration in geographical ecology. *Global Ecology and Biogeography*, 2011. 20(1): p. 1-18.
- [۴] Thornthwaite, C.W., An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 1948. 38(1): p. 55-94.
- [۵] Hao, L., et al., A Comprehensive Study on Factors Affecting the Calibration of Potential Evapotranspiration Derived from the Thornthwaite Model. *Remote sensing*, 2022. 14(18): p. 4644-4644.
- [۶] Hsin-Fu, Y., Comparison of Evapotranspiration Methods Under Limited Data, in *Current Perspective to Predict Actual Evapotranspiration*, B. Daniel, Editor. 2017, IntechOpen: Rijeka. p. Ch. 1.
- [۷] Li, H., et al., Estimation of diurnal-provided potential evapotranspiration using GNSS and meteorological products. *Atmospheric Research*, 2022. 280: p. 106424.
- [۸] Sheffield, J., E. Wood, and M. Roderick, Little Change in Global Drought over the Past 60 Years. *Nature*, 2012. 491: p. 435-438.
- [۹] Pereira, A. and W. Pruitt, Adaptation of the Thornthwaite Scheme for Estimating Daily Reference Evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 2004. 66: p. 251-257.
- [۱۰] Zhao, Q., et al., High-Precision Potential Evapotranspiration Model Using GNSS Observation. *Remote Sensing*, 2021. 13: p. 4848.
- [۱۱] H. Hargreaves, G. and Z. A. Samani, Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1985. 1(2): p. 96-99.
- [۱۲] Zotarelli, L., et al., Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida, 2010. 8.
- [۱۳] Vicente-Serrano, S., S. Beguería, and J.I. López-Moreno, A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 2010. 23: p. 1696-1718.
- [۱۴] Zhao, Q., et al., Retrieval of a High-Precision Drought Monitoring Index by Using GNSS-Derived ZTD and Temperature. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021. PP: p. 1-1.
- [۱۵] Mori, M., K. Hiramatsu, and M. Harada, Estimating Daily Potential Evapotranspiration using the Relation between GPS-derived Precipitable Water Vapor and Surface Temperature. *Transactions of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering*, 2007. 2007(250): p. 347-352,a1.
- [۱۶] Zhao, Q., et al., Improved Drought Monitoring Index Using GNSS- Derived Precipitable Water Vapor over the Loess Plateau Area. *Sensors*, 2019. 19: p. 5566.
- [۱۷] Ma, X., et al., A novel method of retrieving potential ET in China. *Journal of Hydrology*, 2021. 598: p. 126271.
- [۱۸] Pipatsitee, P., et al., Estimating daily potential evapotranspiration using GNSS-based precipitable water vapor. *Heliyon*, 2023. 9(7): p. e17747.
- [۱۹] Aschonitis, V., et al., Correcting Thornthwaite potential evapotranspiration using a global grid of local coefficients to support temperature-based estimations of reference evapotranspiration and aridity indices. 2021.
- [۲۰] Bevis, M., et al., GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 1992. 97.

- [۲۱] Abdellaoui, H., N. Zaourar, and S. Kahlouche, Contribution of permanent stations GPS data to estimate the water vapor content over Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019. 12.
- [۲۲] Saastamoinen, J., Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, 1972. 105(1): p. 279-298.
- [۲۳] Adavi, Z., R. Weber, and M.F. Glaner, Assessment of regularization techniques in GNSS tropospheric tomography based on single- and dual-frequency observations. *GPS Solutions*, 2021. **26**(1): p. 21.
- [۲۴] Hastie, T., et al., *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. *Math. Intell.*, 2004. 27: p. 83-85.
- [۲۵] James, G., et al., *An Introduction to Statistical Learning*. 2013. 426.
- [۲۶] Bruno, D., et al., *Climate of Los Angeles, California*. 2000.