



مقدمه

امروزه کم‌آبی یکی از عوامل تهدیدکننده امنیت اقتصادی و اجتماعی جهان و خصوصاً کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (Gleick, 2014). مدیریت بهینه منابع آب موجود در این مناطق بدون آگاهی از توان تبخیری محیط (تبخیرتعرق)، با مشکلات متعددی همراه خواهد بود. تبخیرتعرق (ET) مجموع تبخیر^۱ (عمدتاً از خاک) و تعرق^۲ (از گیاهان زراعی) است که بخش غالب مصرف سطح زمین را تشکیل می‌دهد (Anderson et al., 2012). این پارامتر یکی از مهم‌ترین عناصر چرخه هیدرولوژی است که تخمین صحیح آن از اهمیت بالایی در برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت آب در کشاورزی برخوردار است. با توجه به محدودیت‌هایی که در اندازه‌گیری مستقیم تبخیرتعرق وجود دارد، روش‌های تجربی و روابط ریاضی متنوعی برای تخمین این پارامتر توسط محققین مختلف توسعه داده شده است؛ که از آن جمله می‌توان به روابط پنمن، پنمن-مانتیت، رایت-پنمن، بلانی-کرایدل و هارگریوز-سامانی اشاره کرد.

یکی از پرکاربردترین این روابط، رابطه استاندارد پنمن مانتیت فائو-۵۶ است. این رابطه یک رویکرد مبتنی بر فیزیک برای محاسبه ET با استفاده از متغیرهای هواشناسی است که نسبت به روابط دیگر دقیق‌تر بوده (Berengena & Gavilan., 2005) و معیاری برای کالیبراسیون سایر معادلات تجربی محسوب می‌شود (Allen et al., 1998). با این حال این رابطه به پارامترهای هواشناسی زیادی نیاز دارد که به راحتی اندازه‌گیری نمی‌شوند. برای رفع این مشکل، برخی از معادلات تجربی که نیاز به پارامترهای هواشناسی کمتری دارند، توسعه یافته و در مقیاس جهانی مورد تأیید قرار گرفته‌اند (Hargreaves & Samani., 1985). یکی از بهترین این روابط، رابطه هارگریوز-سامانی است که به‌عنوان روشی مبتنی بر دما، کارایی بسیار خوبی در اقلیم‌های خشک و

نیمه‌خشک دارد (Alexandris et al., 2006 & Sabziparvar & Tabari., 2010).

علی‌رغم دقت قابل‌قبول روش هارگریوز-سامانی، استفاده از تنها یک پارامتر دما نمی‌تواند منجر به بیشترین دقت در تخمین تبخیرتعرق شود. از این رو در سال‌های اخیر کاربرد روش‌های یادگیری ماشین از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی^۴ (ANNs)، سیستم استنتاج عصبی-فازی^۵ (ANFIS) و برنامه‌ریزی بیان ژن^۶ (GEP) برای برآورد تبخیرتعرق، با توجه به عملکرد موفقیت‌آمیزشان، با استقبال زیادی از سوی محققین همراه بوده است (Ferreira., 2001). این روش‌ها به دلیل دقت بالا در تخمین تبخیرتعرق، سادگی و انعطاف‌پذیری در پارامترهای ورودی توسط بسیاری از محققین توصیه شده‌اند (Najafzadeh et al., 2013). یکی از مدل‌های کارآمد که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است، مدل GEP است. این مدل علاوه بر دارا بودن تمام ویژگی‌های روش‌های یادگیری ماشین، به دلیل داشتن محاسن دیگری همچون حساسیت کمتر به تعداد و نوع ورودی‌ها و عدم نیاز به دوره مشاهداتی بلندمدت، به‌طور گسترده‌ای در سال‌های اخیر به کار گرفته شده است (Deschaine., 2014).

شیری در سال ۲۰۱۷ با هدف ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف تبخیرتعرق در مناطق خشک ایران نشان داد که GEP عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های تجربی و نیمه تجربی دارد (Shiri., 2017). مطر در سال ۲۰۱۸ به ارزیابی مدل GEP برای تخمین تبخیرتعرق در مصر پرداخت. نتایج تحقیق وی نشان داد که دقت مدل GEP در تخمین تبخیرتعرق در شرایط اقلیمی گرم و خشک بیشتر از مدل‌های تجربی است (Mattar., 2018). فرزانه و همکاران در سال ۲۰۱۸، مطالعه‌ای باهدف مقایسه ۲۰ معادله‌ی برآورد تبخیرتعرق مرجع در یک منطقه‌ی نیمه‌خشک انجام دادند. در این پژوهش معادلات در چهار کلاس طبقه‌بندی شدند. ابتدا معادلات برای هر ایستگاه اعمال شدند و در مقایسه با مدل پنمن مانتیت فائو-۵۶

⁴ Artificial neural networks

⁵ Neuro-fuzzy inference systems

⁶ Gene expression programming

¹ Evapotranspiration

² Evaporation

³ Transpiration



و گرم و مرطوب از فلات مرکزی ایران انتخاب شده‌اند. شهرستان جیرفت با وسعت حدود ۱۳۷۹۹ کیلومتر مربع در ارتفاع ۷۲۲ متری از سطح دریا قرار دارد. این شهرستان به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی و طبیعی به هند ایران معروف بوده و از آن به عنوان قطب کشاورزی ایران در برخی محصولات همچون مرکبات یاد می‌شود. فاصله مرکز شهرستان تا مرکز استان حدود ۲۳۸ کیلومتر است. میانگین بارندگی سالیانه شهرستان حدود ۲۲۰ میلی‌متر است (سازمان هواشناسی، ۱۳۹۸). شهرستان یزد با وسعت ۲۴۹۱ کیلومتر مربع به عنوان مرکز استان یزد یکی از کلانشهرهای ایران در ارتفاع ۱۲۳۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است. میانگین بارندگی سالیانه شهرستان یزد حدود ۵۰ میلی‌متر است (سازمان هواشناسی، ۱۳۹۸). این شهرستان با قرار گرفتن در بخش مرکزی فلات ایران به دلیل بارش اندک، دور بودن از دریا و نزدیکی با کویر خشک و پهناور نمک، یکی از گرم‌ترین نقاط ایران است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک و همچنین خصوصیات آماری پارامترهای هواشناسی استفاده شده در این تحقیق به ترتیب در جداول (۱) و (۲) آورده شده است.

رابطه هارگریوز-سامانی

برای تخمین تبخیرتقرق با استفاده از رابطه‌ی پنمن مانیتث فائو-۵۶ نیاز به داده‌های هواشناسی زیاد و همچنین فرض یک گیاه مرجع است. برای رفع این مشکل، رابطه هارگریوز-سامانی ارائه شده است. در این رابطه با استفاده از بیشینه و کمینه دما، تابش برون زمینی و تبخیرتقرق مرجع تخمین زده می‌شود. معادله رابطه هارگریوز-سامانی به صورت زیر است:

$$ET_0 = 0.0023 \times R_a (T_{mean} + 17.8) \times TD^{0.5} \quad (1)$$

که در آن:

ET_0 : تبخیرتقرق گیاه مرجع (mm/day)

TD : تفاوت متوسط دمای بیشینه و کمینه (□)

T_{mean} : متوسط دمای روزانه (□)

مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که معادلات مبتنی بر انتقال جرم بدترین شبیه‌سازی را در همه مکان‌های مورد مطالعه ارائه می‌دهند (Farzanpour et al., 2018).

تعداد بالای مطالعات و روش‌های مورد استفاده به منظور برآورد تبخیرتقرق هرگز نتوانسته موجب کاهش توجه به آن شود و همواره روش‌های جدیدی برای برآورد تبخیرتقرق، توسط محققین مختلف ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفته است. برخلاف تعدد این تحقیقات، بررسی و مقایسه دقت روش‌های مختلف تخمین تبخیرتقرق در اقلیم‌های مختلف کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی دیگر با توجه به اینکه کم‌آبی، پدیده‌ی غالب مناطق گرم می‌باشد، تبخیرتقرق در این اقلیم‌ها، اهمیتی مضاعف پیدا می‌کند. بدین سبب در این پژوهش دو نوع متفاوت از اقلیم گرم مورد توجه قرار گرفته است. بدین ترتیب که قابلیت و کارایی روش GEP و رابطه‌ی تجربی هارگریوز-سامانی، برای دو اقلیم گرم و خشک و مرطوب از فلات مرکزی ایران در برآورد تبخیرتقرق ارزیابی شده است. همچنین ضمن بررسی نتایج هر یک از مدل‌ها، برای هر اقلیم بهترین رویکرد پیشنهاد شده است.

مواد و روش‌ها

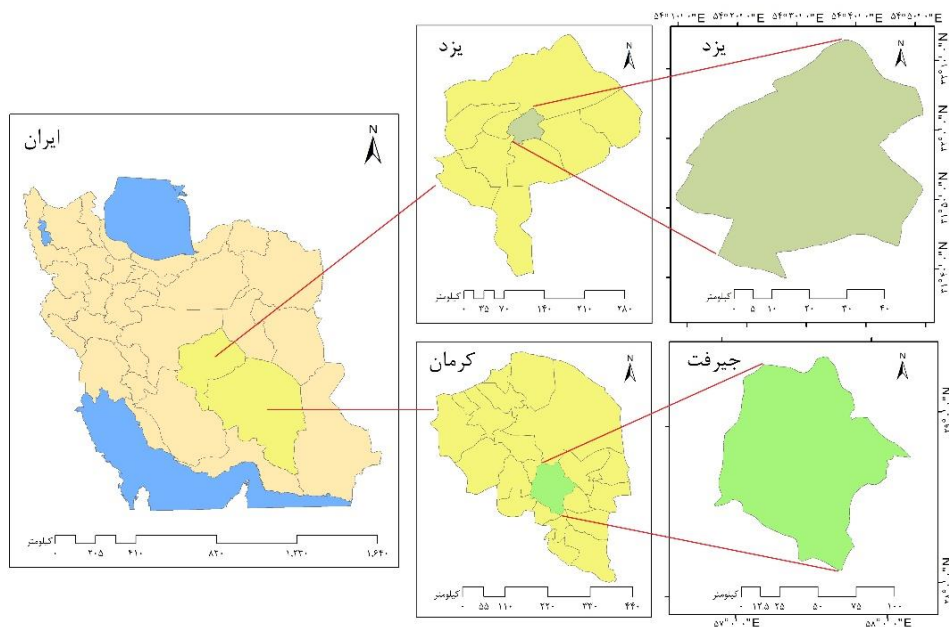
منطقه‌ی مورد مطالعه

در این مقاله، به منظور بررسی عملکرد روش GEP در مقایسه با رابطه تجربی هارگریوز-سامانی، در دو اقلیم گرم و خشک و مرطوب از فلات مرکزی از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک یزد و جیرفت، به مدت چهار سال از ۲۳ سپتامبر سال ۲۰۱۵ تا ۲۲ سپتامبر سال ۲۰۱۹ (سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ تا سال آبی ۹۸-۱۳۹۷)، معادل اول مهر ۱۳۹۴ تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۸، استفاده شد. بررسی‌ها با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیرتقرق در ایستگاه‌های سینوپتیک با استفاده از هر دو رویکرد روابط تجربی و GEP، صورت پذیرفت. شهرستان‌های یزد و جیرفت به ترتیب به عنوان نماینده‌ی اقلیم‌های گرم و خشک

Ra : تابش برون زمینی (mm/day)

جدول (۱): مشخصات ایستگاه سینوپتیک جیرفت و یزد

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)
جیرفت	۵۷/۷۷	۲۸/۷۰	۷۲۲
یزد	۵۴/۲۹	۳۱/۹۰	۱۲۳۰/۲



شکل (۱): موقعیت شهرستان‌های یزد و جیرفت در نقشه‌ی ایران

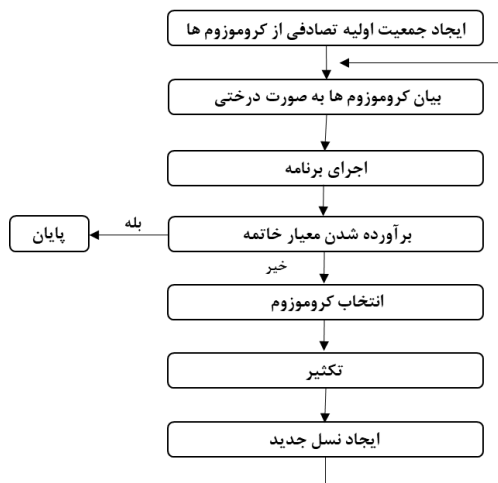
جدول (۲): خصوصیات آماری پارامترهای هواشناسی

متوسط		حداکثر		حداقل		پارامترهای هواشناسی
جبرفت	یزد	جبرفت	یزد	جبرفت	یزد	
۱/۵۷	۲/۵۷	۹/۱۳	۸/۱۳	۰	۰/۵	سرعت باد (متر بر ثانیه)
۳۲/۹۵	۲۸/۱۲	۴۸/۴	۴۴/۸	۱۲/۲	۰/۶	بیشینه دما (°C)
۲۰/۸۲	۱۴/۶۲	۳۸	۳۳/۱	۱/۴	-۵/۳	کمینه دما (°C)
۳۶/۲۳	۲۴/۷۴	۹۵	۹۶/۶۳	۵/۵	۴/۳۸	رطوبت نسبی (%)
۸/۷۸	۹/۴۶	۱۲/۶	۱۳/۵	۰	۰	ساعات آفتابی (ساعت)
۸/۳۴	-۳/۳۵	۳۰/۷۱	۱۱/۶۶	-۱۲/۶۷	-۲۱/۳۱	دمای نقطه شبنم (°C)
۰/۶۰۳	۰/۱۳۷	۵۱	۳۲	۰	۰	بارش روزانه (میلی متر)

برنامه ریزی بیان ژن (GEP)

در برنامه نویسی کامپیوتر، GEP یک الگوریتم تکاملی است که برنامه ها و یا مدل های کامپیوتری را ایجاد می کند. این برنامه های کامپیوتری دارای ساختارهای درختی پیچیده ای هستند که با تغییر اندازه، شکل و ترکیب آن ها، مانند یک ارگانسیم زنده، آشنا و سازگار می شوند، بنابراین، GEP از یک ژن ساده برای حفظ و انتقال اطلاعات ژنتیکی و پیچیده برای کشف محیط و سازگاری با آن بهره می برد. GEP نخستین بار در سال ۱۹۹۹ ارائه شد (Ferreira, 2002). از مزایای این روش نسبت به سایر روش ها می توان به طبیعت منحصربه فرد چند ژن بودن اشاره کرد که زمینه ای ارزیابی مدل های پیچیده ای را که شامل چندین زیر مدل است، فراهم می آورد (Ebtehaj et al., 2015). در روش GEP، ابتدا یک جمعیت تصادفی اولیه از فرمول ها از ترکیب تصادفی عملگرهای ریاضی مورد استفاده،

متغیرهای مسئله و اعداد ثابت ایجاد می شوند. سپس، هریک از افراد جمعیت ذکر شده با استفاده از توابع برازش مورد ارزیابی قرار می گیرند. پس از این مرحله، از روش های متفاوت انتخاب ژنتیک مانند روش چرخ رولت برای انتخاب افراد مناسب برای همبری استفاده می شود. منطق این انتخاب این گونه است که هریک از اعضای جمعیت متناسب با تابع برازش، احتمال انتخاب شدن را دارند. در مرحله بعد، افراد انتخاب شده، با استفاده از یکی از عملگرهای ریاضی همبری و جهش، جمعیت جدیدی ایجاد کرده و دوباره مورد ارزیابی قرار می گیرند. این فرآیند برای چندین نسل تکرار می شود تا کیفیت جمعیت به طور نسبی بهبود یابد و در صورت دستیابی به راه حل مطلوب و یا رسیدن نسل ها به تعداد معین، تکامل متوقف شده و بهترین راه حل ارائه می شود (Gandomi et al., 2013). شکل (۲) مراحل اجرای GEP را ارائه می کند.



شکل (۲): مراحل انجام الگوریتم GEP (Mollahasani et al., 2011)

کل داده‌ها برای هر پارامتر ۱۴۶۱ روز بوده، که از این تعداد ۱۰۲۳ روز (۷۰ درصد) به‌عنوان داده آموزش و ۴۳۹ روز (۳۰ درصد) به‌عنوان داده آزمایش انتخاب گردید. در این مقاله به منظور مدل‌سازی تبخیر تعرق تنظیمات ارائه شده در جدول (۳) در GEP اعمال شد.

در مدل‌سازی GEP از سرعت باد، بیشینه و کمینه دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، فشار بخار، فشار بخار اشباع، دمای نقطه‌ی شبنم و بارش ۲۴ ساعته به‌عنوان پارامترهای ورودی و از تبخیر تعرق به‌دست‌آمده از رابطه پنمن مانتیث فائو-۵۶ به‌عنوان پارامتر خروجی مدل استفاده گردید. تعداد

جدول (۳): تنظیمات در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی GEP

تعداد کروموزوم ها	۳۰
تعداد ژن ها	۴
حداکثر طول عبارت	۱۰
نرخ جهش	۰/۰۰۱۳۸
نرخ بازتاب ترکیبی ژن	۰/۰۰۲۷۷
نرخ انتقال ژن	۰/۰۰۲۷۷

دو مقدار را نشان می‌دهد و مقداری بین $(-\infty, +\infty)$ دارد (Ritter & Munoz-carpna., 2013). روابط (۲) تا (۴) این شاخص‌ها را توصیف می‌کنند.

$$R^2 = \frac{(\sum_1^N (ET_O - \overline{ET}_O)(ET_F - \overline{ET}_F))^2}{\sum_1^N (ET_O - \overline{ET}_O)^2 \cdot \sum_1^N (ET_F - \overline{ET}_F)^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^N (ET_F - ET_O)^2}{N}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_1^N |ET_F - ET_O|}{N} \quad (4)$$

که در این روابط:

نظور تخمین دقت تبخیر تعرق برآورد شده در این مقاله از شاخص‌های آماری ضریب تعیین، جذر متوسط مربعات خطا و میانگین خطای مطلق استفاده شده است. ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^1$)، تفاوت میان مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده را نشان می‌دهد، که مقداری بین $(-\infty, +\infty)$ داشته و مقادیر نزدیک‌تر به صفر، دقت بالاتر مدل را نشان می‌دهد. ضریب تعیین (R^{2^2})، بیانگر میزان احتمال هم‌بستگی میان دو دسته داده است، که مقداری بین $(-1, +1)$ دارد. میانگین خطای مطلق (MAE^3)، تفاوت بین

³ mean absolute error (MAE)

¹ root-mean-square error (RMSE)

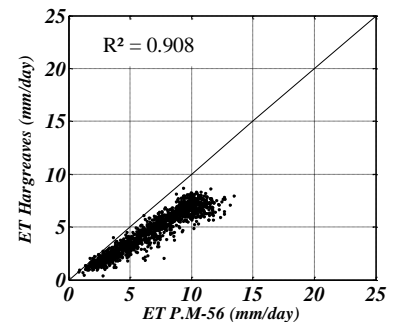
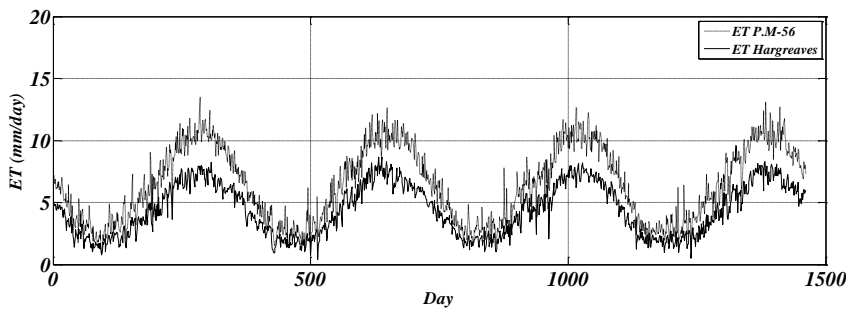
² Coefficient (R^2)

مطالعه و به‌منظور برآورد تبخیرتعرق در دو اقلیم گرم و خشک و گرم و مرطوب که نماینده هریک از آن‌ها به- ترتیب یزد و جیرفت است پرداخته خواهد شد. روند تغییرات تبخیرتعرق پتانسیل حاصل از رابطه تجربی هارگریوز-سامانی با $R^2=0/908$ و $RMSE=2/35$ و GEP با $R^2=0/951$, $RMSE=0/66$ برای یزد در جدول (۴) آورده شده است. همچنین نتایج روند تغییرات تبخیرتعرق حاصل از روش هارگریوز-سامانی و GEP نیز برای یزد در شکل‌های (۳) تا (۵) ارائه شده است.

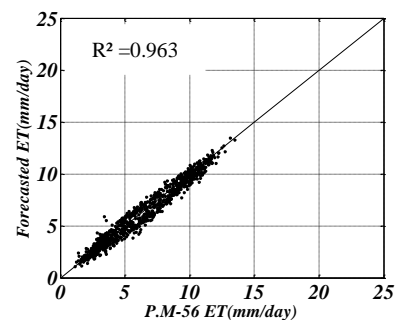
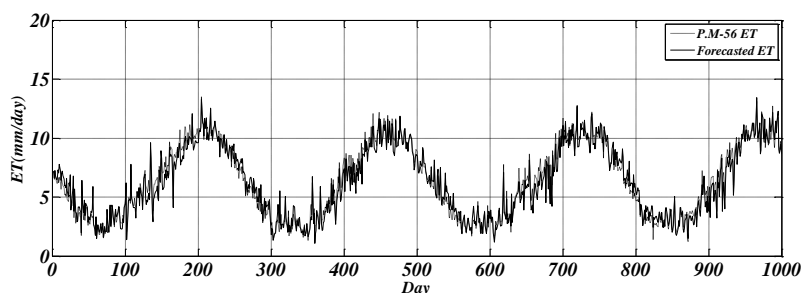
N: تعداد نمونه
 ET_0 : تبخیرتعرق مشاهداتی
 ET_F : تبخیرتعرق محاسباتی (پیش‌بینی شده)
 $\overline{ET_0}$: میانگین تبخیرتعرق مشاهداتی
 $\overline{ET_F}$: میانگین تبخیرتعرق محاسباتی (پیش‌بینی شده)
نتایج و بحث با توجه به ارزیابی‌های صورت گرفته توسط شاخص‌های آماری در مناطق مورد مطالعه در ادامه به بررسی دقت هریک از مدل‌های مورد بحث در این

جدول (۵): ارزیابی مقایسه روابط تجربی با GEP در یزد

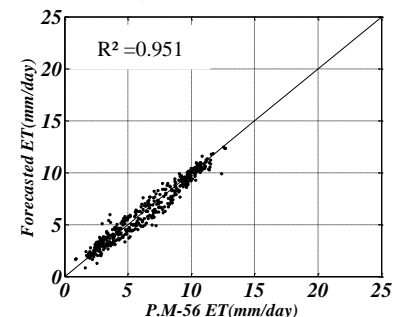
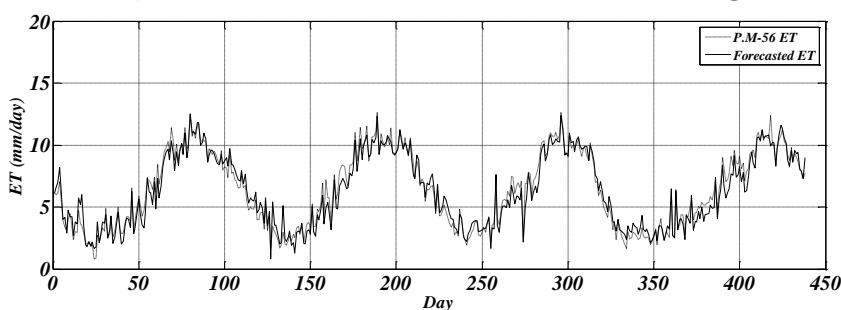
روش	آماره ارزیابی	R^2	RMSE(mm/day)	MAE(mm/day)
هارگریوز-سامانی		۰/۹۰۸	۲/۳۵	۲/۰۲
GEP	آموزش	۰/۹۶۳	۰/۵۹	۰/۴۸
	آزمایش	۰/۹۵۱	۰/۶۶	۰/۵۳



شکل (۳): داده‌های مشاهداتی و محاسباتی تبخیرتعرق با استفاده از روش هارگریوز-سامانی در ایستگاه یزد



شکل (۴): نمایش داده‌های مشاهداتی و محاسباتی تبخیر تعرق ایستگاه یزد با استفاده از *GEP* برای داده‌های آموزش



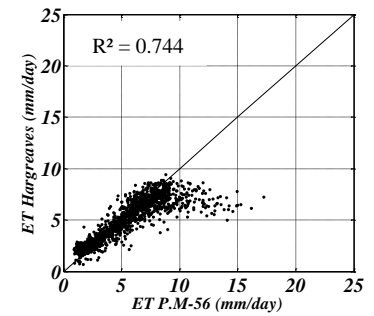
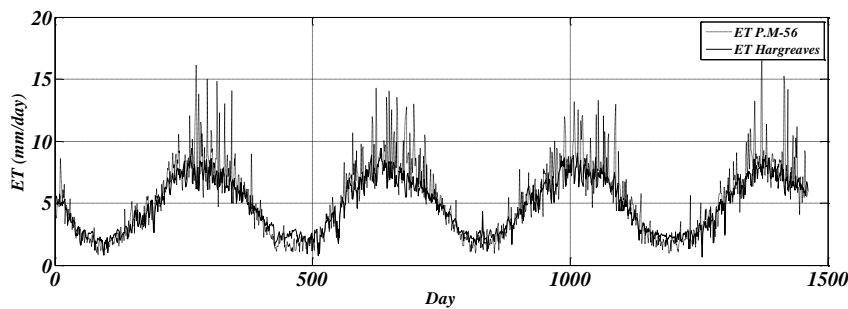
شکل (۵): نمایش داده‌های مشاهداتی و محاسباتی تبخیر تعرق در ایستگاه یزد با استفاده از *GEP* برای داده‌های آزمون

در جدول (۶) آورده شده است. همچنین نتایج روند تغییرات تبخیر تعرق حاصل از هارگریوز-سامانی و *GEP* برای جیرفت، در شکل‌های (۶) تا (۸) ارائه شده است.

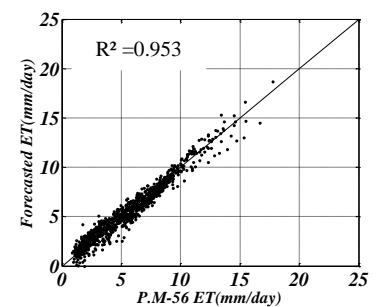
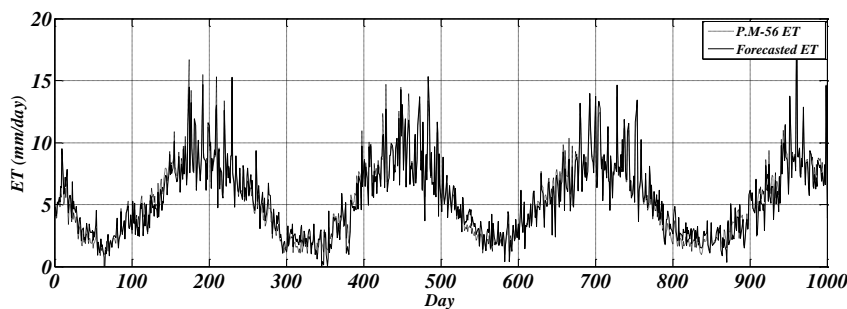
روند تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل حاصل از رابطه‌ی تجربی هارگریوز-سامانی با $R^2=0.744$ و $RMSE=1/6$ و *GEP* با $R^2=0.951$ ، $RMSE=0/66$ برای جیرفت

جدول (۶): ارزیابی مقایسه‌ای روابط تجربی با *GEP* برای جیرفت

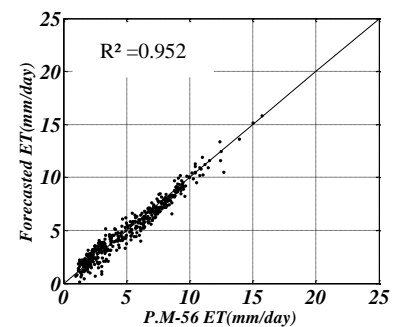
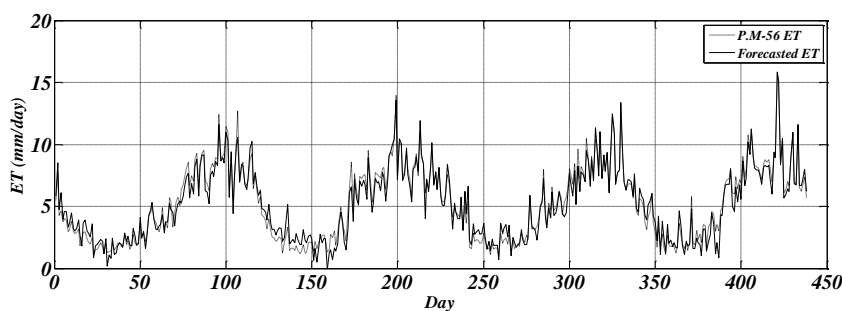
روش	آماره ارزیابی	R^2	RMSE(mm/day)	MAE(mm/day)
<i>GEP</i>	هارگریوز- سامانی	۰/۷۴۴	۱/۶	۰/۹۶
	آموزش	۰/۹۵۳	۰/۶۷	۰/۵۳
	آزمون	۰/۹۵۲	۰/۶۵	۰/۵۲



شکل (۶): نمایش تبخیر تعرق مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از روش هارگریوز-سامانی در ایستگاه جیرفت



شکل (۷): نمایش تبخیر تعرق مشاهداتی و محاسباتی ایستگاه جیرفت با استفاده از GEP برای داده‌های آموزش



شکل (۸): نمایش تبخیر تعرق مشاهداتی و محاسباتی در ایستگاه جیرفت با استفاده از GEP برای داده‌های آزمون

نتایج به دست آمده از روش GEP و رابطه‌ی تجربی هارگریوز-سامانی نشان می‌دهد که با $R^2=0/951$ ، $RMSE=0/66$ و $MAE=0/53$ برای یزد و همچنین $R^2=0/952$ ، $RMSE=0/65$ و $MAE=0/52$ برای جیرفت از عملکرد بهتری نسبت به مدل هارگریوز-سامانی برخوردار است. روش GEP در هر دو اقلیم از فلات مرکزی نسبت به

علاوه بر این، در روابط (۵) و (۶) معادلات بهینه‌ی مستخرج از GEP برای دو ایستگاه یزد و جیرفت از فلات مرکزی ایران و با اقلیم‌های گرم و خشک و مرطوب ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که دقت روش هارگریوز-سامانی در مناطق گرم و خشک نسبت به مناطق گرم و مرطوب، به دلیل رطوبت کمتر هوا، بالاتر است. مقایسه‌ی



دیگر روش مورد بحث در این مقاله از عملکرد بهتری برخوردار است و می‌توان در اقلیم‌های مشابه از این روش به‌عنوان یک جایگزین در برآورد تبخیرتعرق استفاده کرد.

$$ET_o = \min(u_m \times (t_{d-m} + t_{min}) \times (sshn - rrr24), ((t_{d-m} \times u_m^2) - ewm) + (1 - \min((ewsm - u_m), (t_{d-m} - u_m)) \times \max((\min((sshn, ewm) \times (t_{d-m} \times t_{d-m}), (ewm - t_{min})))))) + \min\left(ewm, \min\left(\left(\frac{ewm \times (t_{d-m} \times ffm) + (u_m + ewm)}{2}\right), t_{max}\right)\right) + \tanh(\min(ffm, u_m)) \quad (5)$$

$$ET_o = \frac{\left(ewm \times \left(\frac{t_{d-m} + rrr24}{2}\right) \times \sqrt[3]{ewsm}\right) + \frac{\sqrt[3]{u_m + u_m}}{2} - ffm + ((t_{max} \times u_m) - rrr24)}{\left(\frac{ffm + ffm}{2}\right) \times \frac{\sqrt[3]{1 - \tan(u_m)^2} + ewsm}{2} + ((\min(u_m + u_m), \sqrt[3]{\frac{u_m + t_{max}}{2}}) + \min((ffm \times ffm), u_m)) \times \left(\frac{t_{d-m} + u_m}{2}\right)} \quad (6)$$

که در آن:

U_m : رطوبت نسبی (%)

t_{d-m} : دمای نقطه شبنم ($^{\circ}C$)

t_{min} : کمینه دما ($^{\circ}C$)

t_{max} : بیشینه دما ($^{\circ}C$): sshn: ساعات آفتابی (hr)

$rrr24$: بارش ۲۴ ساعته (mm)

ewm : فشار بخار (mm.Hg)

$ewsm$: فشار بخار اشباع (mm.Hg)

ffm : سرعت باد (mm/s)

نتیجه‌گیری

و مرطوب استفاده شد. نتایج این مقاله نشان داد که رطوبت نسبی هوا می‌تواند در دقت رابطه هارگریوز-سامانی تأثیر مستقیم داشته باشد بنابراین استفاده از این رابطه در اقلیم گرم و خشک پیشنهاد می‌شود. به‌طور کلی داده‌های مورد نیاز به‌منظور برآورد تبخیرتعرق به روش GEP می‌توان به دمای کمینه و بیشینه، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، بارش ۲۴ ساعته، فشار بخار، فشار بخار اشباع و سرعت باد اشاره کرد، که همگی این پارامترها در دسترس هستند و می‌توان با استفاده از روابط ارائه شده برای هر منطقه تبخیرتعرق را با دقت بالایی تخمین زد. نتایج مقایسه‌ی دقت GEP با رابطه‌ی تجربی هارگریوز-سامانی، نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر روش GEP در هر دو اقلیم است. این بهبود دقت به‌دلیل توانایی روش برنامه‌ریزی بیان-ژن در کنترل و مدیریت داده‌های پیچیده و غیرخطی است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به‌دلیل عملکرد خوب روش GEP در هر دو اقلیم گرم و خشک و گرم و مرطوب،

برآورد تبخیرتعرق یک مسئله مهم در هیدرولوژی، مدیریت منابع آب، مدل‌سازی اکولوژیکی و مطالعات زیست‌محیطی است و همچنین در مناطق گرم که دارای توزیع غیریکنواخت بارش هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است. محدود بودن منابع آب تجدید پذیر، افزایش روزافزون جمعیت، نداشتن الگوی مصرف صحیح آب، راندمان پایین سیستم‌های آبیاری و عدم تناسب صحیح در عرضه و تقاضای آب مصرفی ازجمله دلایلی هستند که اهمیت برآورد تبخیرتعرق در این مناطق را دوچندان می‌کند. در این پژوهش، به بررسی عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) در مقایسه با رابطه تجربی هارگریوز-سامانی در دو ایستگاه با اقلیم گرم و خشک و گرم و مرطوب، واقع در فلات مرکزی ایران، پرداخته شده است. برای این منظور از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه سینوپتیک یزد و جیرفت به‌عنوان نماینده‌های اقلیم گرم و خشک و اقلیم گرم



می‌توان این روش را برای تخمین تبخیرتعرق در مناطق فاقد ایستگاه تبخیرسنجی استفاده کرد.

منابع

- وزیری، ژ. و سلامت، ع. ۱۳۸۷. تبخیر و تعرق گیاهان، کمیته آبیاری و زهکشی ایران، تهران، ۳۸۹ صفحه.
- سازمان هواشناسی کشور. ۱۳۹۸. سامانه درخواست داده‌های هواشناسی، <https://data.irimo.ir/>
- Alexandris, S., Kerkides, P. and Liakatas, A. 2006. Daily reference evapotranspiration estimates by the "Copais" approach. *Agricultural Water Management*, 82(3): 371-386.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. *FAO Irrigation and drainage paper No. 56*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56(97), e156.
- Anderson, M. C., Allen, R. G., Morse, A. and Kustas, W. P. 2012. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment*, 122: 50-65.
- Berengena, J. and Gavilán, P. 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2): 147-163.
- Deschaine, L. M. 2014. *Decision support for complex planning challenges (Doctoral dissertation, Ph. D. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. 233p)*
- Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Zaji, A. H., Azimi, H. and Sharifi, A. 2015. Gene expression programming to predict the discharge coefficient in rectangular side weirs. *Applied Soft Computing*, 35: 618-628.
9. Farzanpour, H., Shiri, J., Sadraddini, A. A. and Trajkovic, S. 2018. Global comparison of 20 reference evapotranspiration equations in a semi-arid region of Iran. *Hydrology Research*, 50(1): 282-300 .
- Ferreira, C. 2001. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *arXiv preprint cs/0102027*.
- Ferreira, C. 2002. Gene expression programming in problem solving. In *soft computing and industry* (pp. 635-653). Springer, London.
- Gandomi, A. H., Alavi, A. H., Ting, T. O. and Yang, X. S. 2013. Intelligent modeling and prediction of elastic modulus of concrete strength via gene expression programming. In *International Conference in Swarm Intelligence* (pp. 564-571). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gleick, P. H. 2014. Water, drought, climate change, and conflict in Syria. *Weather, Climate, and Society*, 6(3): 331-340.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2): 96-99.
- Mattar, M. A. 2018. Using gene expression programming in monthly reference evapotranspiration modeling: a case study in Egypt. *Agricultural Water Management*, 198: 28-38.
- Mollahasani, A., Alavi, A. H. and Gandomi, A. H. 2011. Empirical modeling of plate load test moduli of soil via gene expression programming. *Computers and Geotechnics*, 38(2): 281-286.
- 17 Najafzadeh, M., Barani, G. A. and Hessami-Kermani, M. R. 2013. Group method of data handling to predict scour depth around vertical piles under regular waves. *Scientia Iranica*, 20(3): 406-413.
- Ritter, A. and Muñoz-Carpena, R. 2013. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480: 33-45.
- Sabziparvar, A. A. and Tabari, H. 2010. Regional estimation of reference evapotranspiration in arid and semiarid regions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(10): 724-731.



Shiri, J. 2017. Evaluation of FAO56-PM, empirical, semi-empirical and gene expression programming approaches for estimating daily reference evapotranspiration in hyper-arid regions of Iran. *Agricultural water management*, 188: 101-114.



Gene Expression Programming Capability Assessment in Estimating the Potential Evapotranspiration Compared to Hargreaves-Samani Equation

Ali Barzkar¹, Sajad Shahabi^{2*}, Saeid Niazmradi³, Mohamad Reza Madadi⁴

Article taken from the master's thesis

Abstract:

Due to the water scarcity in areas with hot climates, an accurate estimation of evapotranspiration has a significant impact on water resources management and planning. In this paper, the gene expression programming (GEP) approach was used to estimate the daily evapotranspiration in Yazd (hot and dry climate) and Jiroft (warm and humid climate) synoptic stations. The results of this method along with the results of empirical relation of Hargreaves-Samani were validated with those of the empirical relation of Penman Mantis FAO-56. Statistical indices of coefficient of determination (R^2), root-mean-square error (RMSE) and mean absolute error (MAE) were employed to evaluate the efficiency of the utilized methods. The results indicated that GEP model (with $R^2 = 0.951$ and $RMSE = 0.66$ mm/day for Yazd and $R^2 = 0.958$ and $RMSE = 0.65$ mm/day for Jiroft) had higher performance compared to Hargreaves-Samani relation. Therefore, the use of GEP as a model with high capabilities is recommended for estimation of evapotranspiration in areas with hot-dry and warm-humid climates.

Keywords: Empirical equations; Jiroft; Meteorology; Water balance; Yazd.

¹ M.Sc. Student of Water Resources Engineering and Management, Kerman Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran; alibarzkar3307@gmail.com

² Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Kerman Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran; s.shahabi@kgut.ac.ir (*Corresponding author)

³ Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Kerman Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran; s.niazmradi@kgut.ac.ir

⁴ Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran; madadi@ujiroft.ac.ir



Gene Expression Programming Capability Assessment in Estimating the Potential Evapotranspiration Compared to Hargreaves-Samani Equation

Ali Barzkar¹, Sajad Shahabi^{2*}, Saeid Niazmradi³, Mohamad Reza Madadi⁴

Introduction

Evapotranspiration (ET) is one of the main parameters of the water cycle and its accurate estimation plays a significant role in water resource management and planning, particularly in semi-arid areas such as Iran. There are various methods for estimation of ET, among which the FAO Penman-Monteith method is the most recommended one. Nevertheless, this method requires several different climate variables, which may not be available for many regions. To address this shortcoming, various empirical methods have been proposed to estimate ET, which need fewer climate variables. Hargreaves-Samani is one of these empirical methods for warm climates that only use the temperature to estimate the ET. Despite the acceptable performance of the Hargreaves-Samani method; using the only temperature, in most cases, cannot yield a satisfactory result. Thus, in the recent decade, several data mining approaches have been used to estimate ET. Gene expression programming (GEP) is such a method that gained the attention of a lot of researchers.

GEP is an evolutionary algorithm that can formulate the relation between dependent variables and independent ones. The purpose of this paper is to evaluate the ability of the GEP algorithm to estimate the ET in warm climate regions of Iran. To this end, the cities of Yazd (hot and dry) and Jiroft (warm and humid) have been selected. The estimated ETs from these regions have been compared with those estimated using the Hargreaves-Samani method. The results of the comparison, using statistical indices such as coefficient of determination (R^2), root-mean-square error (RMSE), and mean absolute error (MAE), showed that the GEP algorithm performed better than the Hargreaves-Samani method. Therefore, the use of GEP as a model with high capabilities is recommended for the estimation of evapotranspiration in areas with hot-dry and warm-humid climates.

Methodology

Data

In this study, wind speed, maximum and minimum temperature, relative humidity, sunshine hours, dew point, and daily rainfall were used to estimate the potential ET using the GEP algorithm. These parameters have been collected from synoptic stations of Yazd and Jiroft cities between the years 2015 – 2019. These cities respectively have hot-dry climates and warm-humid climates. From these datasets, the data of 1023 days (70 % of the whole dataset) are used for training the GEP and the rest of the dataset is used for its evaluation.

Gene Expression Programming (GEP)

Gene expression programming (GEP) is an evolutionary algorithm that learns the relation between variables in a dataset and builds models to express these relationships. Similar to any other population-based evolutionary algorithm GEP starts with a population of possible solutions whose fitness solving the problem (i.e., finding the relationship between the variables) is estimated using an evaluation function. Population members evolve as the GEP algorithm proceed and a new population is constructed using genetic operators such as cross-over and mutation. Finally, the best-found member of the population is selected as the final solution.

¹ M.Sc. Student of Water Resources Engineering and Management, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran; alibarzkar3307@gmail.com

² Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran; s.shahabi@kgut.ac.ir (*Corresponding author)

³ Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran; s.niazmradi@kgut.ac.ir

⁴ Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran; madadi@ujiroft.ac.ir



Hargreaves-Samani method

Hargreaves-Samani, is one of the most frequently empirical equations to estimate ET_0 . In order to estimate ET_0 requires only the maximum and minimum temperature measurements. The Hargreaves-Samani equation was utilized as follows:

$$ET_0 = 0.0023 \times R_a(T_{mean} + 17.8) \times TD^{0.5} \quad (1)$$

Where ET_0 , TD, T_{mean} and R_a are reference ET (mm/day), the difference between the maximum and minimum temperatures ($^{\circ}C$), the mean daily temperature ($^{\circ}C$), and the extraterrestrial radiation (mm/day), respectively. To convert MJ/m².d into mm/day, it suffices to multiply the extraterrestrial radiation by 0.408.

Discussion and conclusion

The obtained results of GEP models (with $R^2 = 0.951$ and RMSE = 0.66 mm/day for Yazd and $R^2 = 0.958$ and RMSE = 0.65 mm/day for Jiroft) had higher performance compared to Hargreaves-Samani relation. The higher performances of the GEP algorithm in both cities can substantiate the usefulness of this method for the estimation of ET for these climates.

The most important references

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56(97), e156.
- Farzanpour, H., Shiri, J., Sadraddini, A. A. and Trajkovic, S. 2018. Global comparison of 20 reference evapotranspiration equations in a semi-arid region of Iran. Hydrology Research, 50(1): 282-300 .
- Ferreira, C. 2001. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. arXiv preprint cs/0102027.
- Ferreira, C. 2002. Gene expression programming in problem solving. In soft computing and industry (pp. 635-653). Springer, London.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied engineering in agriculture, 1(2): 96-99.
- Mattar, M. A. 2018. Using gene expression programming in monthly reference evapotranspiration modeling: a case study in Egypt. Agricultural Water Management, 198: 28-38.
- Sabziparvar, A. A. and Tabari, H. 2010. Regional estimation of reference evapotranspiration in arid and semiarid regions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 136(10): 724-731.
- Shiri, J. 2017. Evaluation of FAO56-PM, empirical, semi-empirical and gene expression programming approaches for estimating daily reference evapotranspiration in hyper-arid regions of Iran. Agricultural water management, 188: 101-114.