

مدل‌سازی تبخیر روزانه از تشت، با استفاده از برنامه‌نویسی بیان‌ژن و سری‌های زمانی در استان خوزستان

نیلوفر باقری^۱، احمدرضا قاسمی^{۲*} و محمدعلی نصر اصفهانی^۳

چکیده

مدل‌سازی تبخیر از تشت، علاوه بر کاربرد در مطالعات هیدرولوژی مانند برآورد هدررفت آب از مخازن سدها، به برآورد نیاز آبی گیاهان در مناطقی که اطلاعات لایسی‌متری وجود ندارد نیز کمک می‌کند. مدل‌سازی این پارامتر مهم می‌تواند در تخمین داده‌های گم‌شده نیز بسیار کارگشا باشد. در این پژوهش با به‌کارگیری مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن (GEP) و برخی مدل‌های سری زمانی، تبخیر روزانه از تشت در یک دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۰) در سه ایستگاه سینوپتیک اهواز، آبادان و دزفول مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد استفاده از داده‌های ۱۴، ۱۶ و ۲۰ ماه قبل برای شبیه‌سازی نسبت به دوره‌های کوتاه‌تر، در هر دو مرحله آموزش و آزمون نتایج دقیق‌تری ارائه می‌کند. همچنین براساس معیارهای ارزیابی، میزان خطای شبیه‌سازی در ماه‌های سرد سال (اکتبر تا مارس) نسبت به ماه‌های گرم (آوریل تا سپتامبر) به‌طور متوسط ۲۸ درصد کمتر بود. هرچند در تمام ۱۲ ماه سال، حداقل یک الگوی مناسب با دقت قابل‌قبول برای شبیه‌سازی داده‌های تبخیر روزانه به‌دست آمد. بهترین نتایج در ماه‌های گرم سال در ماه آگوست و در دزفول مشاهده شد، به‌نحوی که خطای برآورد تبخیر روزانه ۰/۹۳ میلی‌متر در روز و ضریب نش ۰/۸۰ به‌دست آمد. در ماه‌های سرد سال نیز کمترین خطا (۰/۷۰ میلی‌متر در روز) در ماه دسامبر و در آبادان به‌همراه ضریب نش ۰/۸۲ مشاهده شد که نشان‌دهنده کارایی بالای مدل GEP در شبیه‌سازی داده‌های تبخیر از تشت است. مقایسه نتایج این مدل با برخی مدل‌های سری زمانی نیز نشان داد مدل GEP در همه ماه‌ها در آبادان دارای خطای کمتری است. در دزفول مدل Holt در ماه‌های ژانویه و سپتامبر نتایج بهتری نسبت به GEP ارائه کرد. میزان خطا در این دو ماه به‌ترتیب ۶۱ و ۷۱ درصد کمتر از مدل GEP بود. در ایستگاه اهواز نیز مدل Exponential smoothing در اکتبر و مدل Holt در نوامبر به‌ترتیب تبخیر روزانه را با ۴۸ و ۶۸ درصد خطای کمتر برآورد کردند.

واژه‌های کلیدی: استان خوزستان، برنامه‌نویسی بیان‌ژن، تبخیر روزانه، مدل‌سازی.

ارجاع: باقری ن. قاسمی ا. و نصر اصفهانی م. ع. ۱۴۰۲. مدل‌سازی تبخیر روزانه از تشت، با استفاده از برنامه‌نویسی بیان‌ژن و سری‌های زمانی در استان خوزستان. مجله پژوهش آب ایران. ۴۹: ۱-۱۱. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14189.2480>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: ghasemiar@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷

مقدمه

تبخیر از سطوح آب، یکی از فرایندهای بسیار مهم در هواشناسی و هیدرولوژی است. استفاده بهینه از منابع آب موجود به دلیل هزینه‌های بالای ذخیره‌سازی آب در سدها و مخازن، امری ضروری است؛ هرچند میزان تبخیر از مخازن همواره چالش‌برانگیز است زیرا حجم بالایی از آب مخازن سدها تبخیر شده و از دست می‌رود. آب و املاح باقی‌مانده از حجم آب تبخیرشده، کیفیت آب را کاهش می‌دهد (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۸۹)؛ بنابراین مطالعه تبخیر از سطح آب می‌تواند به مدیریت منابع آب کمک کند.

برآورد میزان تبخیر از سطح آب (تشت تبخیر) در مدیریت آب در مزرعه نیز کاربرد دارد. تنظیم برنامه آبیاری براساس میزان تبخیر از تشت نقش مهمی در افزایش تولید گیاهان زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کند. در آزمایش‌های مختلف، میزان افزایش فاصله آبیاری براساس تبخیر از تشت، برای گیاهان مختلف زراعی مشخص شده است که براساس آن بدون اینکه عملکرد گیاهان زراعی از نظر اقتصادی کاهش پیدا کند، می‌توان فاصله آبیاری را به‌منظور کاهش مصرف آب، افزایش داد (اسکندری، ۱۳۹۴). تبخیر از تشت یکی از مؤلفه‌های مهم و تأثیرگذار در سیکل هیدرولوژی و برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب است و برآورد آن در مقیاس‌های زمانی مختلف، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای جوی، از اهمیت ویژه‌ای در برنامه‌ریزی آبیاری در کشاورزی برخوردار است (فهرمان و قره‌خانی، ۱۳۹۰). مطالعه‌های اولیه درباره برآورد تبخیر سطحی آب، به‌صورت تجربی توسط دالتون در سال ۲۰۰۱ میلادی آغاز شد. درحالی‌که در بسیاری از فرایندها دقت از اهمیت زیادی برخوردار است؛ اما در معادله‌های تجربی این دقت به‌خوبی به‌دست نمی‌آید. به‌عبارت‌دیگر، نتیجه‌های نظری تطابق مناسبی با نتیجه‌های تجربی ندارند؛ بنابراین در بسیاری از نقاط دنیا پژوهش‌های گسترده و طولانی‌مدتی در این زمینه انجام گرفته است. ساخت مجموعه‌ای که بتواند یک فرایند حقیقی را به‌طور کامل شبیه‌سازی کند، حتی در مقیاس کوچک، پرهزینه و وقت‌گیر است و افزون بر آن، بسیاری از فرایندها را نمی‌توان به‌طور کامل مورد مطالعه قرار داد؛ بنابراین ایده استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری برای آموزش در علوم مهندسی مورد توجه

قرار گرفته است (علی‌حسینی و بابایی، ۱۳۹۵). مشاهدات مربوط به تبخیر از طریق تشت، همواره دارای داده‌های گم‌شده هستند؛ علاوه‌براین، شبکه مترامی از ایستگاه‌های تبخیرسنجی نیز در دسترس نیست. به‌همین دلیل، توسعه یک رویکرد جایگزین برای تخمین میزان تبخیر، ضروری به نظر می‌رسد.

یکی از روش‌های مطالعاتی در بررسی تغییرات و برآورد تبخیر از تشت، استفاده از مدل‌های سری زمانی یا مدل‌های کامپیوتری است. مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن (Gene Expression Programming, GEP) یکی از مدل‌های کامپیوتری قدرتمند است که توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ابداع و به‌طور رسمی در سال ۲۰۰۱ معرفی شد (فریرا، ۲۰۰۱). تاکنون از روش برنامه‌نویسی بیان‌ژن با هدف مدل‌سازی داده‌ها در پژوهش‌های فراوانی استفاده شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. سیدون و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای با هدف پیش‌بینی تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از برنامه‌نویسی بیان‌ژن در گیانگ‌سوی چین نشان دادند که برنامه‌نویسی بیان‌ژن را می‌توان به‌عنوان یک مدل قابل‌اعتماد برای پیش‌بینی ET_0 در نظر گرفت. متار (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای برای برآورد ET_0 ماهانه با استفاده از حداقل داده‌ها در مصر نشان داد که برنامه‌نویسی بیان‌ژن در مقایسه با سایر مدل‌های تجربی دقیق‌تر است.

محمدرضاپور و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی با استفاده از سه مدل ماشین بردار پشتیبانی، سیستم استنتاج فازی و برنامه‌نویسی بیان‌ژن، تبخیر-تعرق مرجع ماهانه را در استان سیستان و بلوچستان شبیه‌سازی کردند. آن‌ها نشان دادند که مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن در برآورد تبخیر-تعرق مرجع ماهانه، بهترین مدل بوده است. متار و الازوا (۲۰۱۹) تبخیر-تعرق مرجع را از ترکیب‌های مختلف متغیرهای آب‌وهوایی با استفاده از دو تکنیک مختلف برنامه‌نویسی بیان‌ژن و رگرسیون خطی چندگانه مدل‌سازی کردند. مقادیر کمتر خطای مدل GEP عملکرد بهتر آن را نسبت به مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه تأیید کرد. یوسف‌عباس و همکاران (۲۰۲۰) نیز با استفاده از برنامه‌نویسی بیان‌ژن و سیستم استنتاج فازی به پیش‌بینی تبخیر روزانه در سواحل سوریه پرداختند و نشان دادند که مدل GEP عملکرد بهتری نسبت به مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) برای

ضمن استفاده از داده‌های روزانه، نتایج مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن با نتایج برخی مدل‌های سری زمانی نیز مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر روی ایستگاه‌های سینوپتیک مهم استان خوزستان انجام شد. داده‌های تبخیر از تشت مربوط به سه ایستگاه اهواز، آبادان و دزفول که طولانی‌ترین و دقیق‌ترین داده‌های استان را دارند در دوره آماری ۲۰ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۰) در مقیاس روزانه از سازمان هواشناسی کشور تهیه و پس از بررسی صحت داده‌ها، با استفاده از برنامه‌ریزی بیان‌ژن مدل‌سازی شدند. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)
اهواز	۴۰° ۴۸'	۲۰° ۳۱'	۲۲/۵
آبادان	۴۸° ۱۷'	۳۰° ۲۰'	۳
دزفول	۴۸° ۲۴'	۳۲° ۲۲'	۱۴۰

برنامه‌نویسی بیان‌ژن GEP

برنامه‌نویسی بیان‌ژن یک الگوریتم تکاملی است که مدل‌های کامپیوتری را ایجاد می‌کند. این مدل‌ها دارای ساختارهای درختی پیچیده‌ای هستند که با تغییر اندازه، شکل و ترکیب آن‌ها، مانند یک ارگانسیم زنده، سازگار می‌شوند. برنامه‌نویسی بیان‌ژن یکی از اساسی‌ترین گام‌ها در زمینه بهینه‌سازی است که با مدل‌سازی فرایندهای پیچیده طبیعی و مصنوعی، با داشتن تعداد معینی برداشت میدانی یا نقاط آزمون، مسئله مورد نظر را حل می‌کند (برزکار و همکاران، ۱۴۰۰).

در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی تبخیر روزانه از تشت با استفاده از برنامه‌نویسی بیان‌ژن، ۸۰ درصد از داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد برای آزمون در نظر گرفته شد و ۷ الگوی زیر برای بررسی کارایی این مدل در برآورد مقدار تبخیر از تشت، مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲).

تخمین تبخیر از تشت داشته است. حقیقت‌جو و همکاران (۱۳۹۶) برای تخمین مقدار تبخیر روزانه تشت در خراسان جنوبی، از مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن استفاده کردند و نشان دادند که مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن از دقت قابل‌قبولی در تخمین تبخیر روزانه از تشت برخوردار است. حقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای از مدل GEP برای برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در استان کرمانشاه استفاده کردند و نشان دادند که بین داده‌های به‌دست‌آمده از مدل و تشت تبخیر قرابت زیادی وجود دارد. سبزواری و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به بررسی قابلیت مدل‌های تجربی، برنامه‌نویسی بیان‌ژن و رگرسیون گام‌به‌گام در برآورد تبخیر-تعرق مرجع ماهانه در ایستگاه بروجرد پرداختند. مقایسه عملکرد الگوها حاکی از برتری مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن نسبت به بقیه مدل‌ها بود. عمادی و همکاران (۱۴۰۱) تبخیر ماهانه را با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، استنتاج فازی و برنامه‌نویسی بیان‌ژن، در دو حوضه آبریز دریاچه ارومیه و گاوخونی مدل‌سازی کردند. نتایج حاکی از این بود که در هر دو حوضه، روش برنامه‌نویسی بیان‌ژن بهترین عملکرد را در مقایسه با دیگر مدل‌ها داشته است. سبزواری و همکاران (۱۴۰۱) نیز از رگرسیون چندمتغیره و برنامه‌نویسی بیان‌ژن برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در خرم‌آباد استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که برنامه‌نویسی بیان‌ژن با $R^2=0/97$ ، $RMSE=0/97$ و $NSE=0/97$ در تخمین تبخیر-تعرق مرجع ماهانه مدلی قابل قبول است.

تبخیر یکی از متغیرهای اساسی در حوزه‌های مختلف کشاورزی و مدیریت منابع آبی بوده و مدل‌سازی آن در تعیین برنامه‌های مدیریتی این بخش‌ها، جزو ملزومات است؛ علاوه بر این، وجود داده‌های گم‌شده در اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی نیز استفاده از این داده‌ها را با محدودیت روبه‌رو می‌کند. در صورتی که بتوان مدل توانمندی برای برآورد مقادیر تبخیر از تشت به‌دست آورد، می‌توان آن را جایگزین روش‌های مرسوم برای تخمین مقادیر گم‌شده کرد. با توجه به اینکه بررسی منابع نشان داد روش برنامه‌نویسی بیان‌ژن کارکرد مناسبی در مدل‌سازی داده‌های مختلف داشته است؛ بنابراین در این پژوهش، از این مدل برای برآورد و تخمین مقادیر تبخیر از تشت در استان خوزستان استفاده شد. در این تحقیق

جدول ۲- الگوهای مختلف معرفی شده به مدل GEP

علامت	معرفی الگو
M2	برآورد تبخیر با استفاده از داده‌های ۲ ماه قبل
M4	برآورد تبخیر با استفاده از داده‌های ۴ ماه قبل
M6	برآورد تبخیر با استفاده از داده‌های ۶ ماه قبل
M10	برآورد تبخیر با استفاده از داده‌های ۱۰ ماه قبل
M14	برآورد تبخیر با استفاده از داده‌های ۱۴ ماه قبل
M16	برآورد تبخیر با استفاده از داده‌های ۱۶ ماه قبل
M20	برآورد تبخیر با استفاده از داده‌های ۲۰ ماه قبل

محمدرضاپور و همکاران (۱۳۹۴) نیز در تحقیقی در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از برنامه‌نویسی بیان‌ژن به مدل‌سازی تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه برای ایستگاه‌های زاهدان، زابل، ایرانشهر و چابهار پرداختند. آن‌ها نیز عنوان کردند که الگوهای ۱، ۲ و ۳ ماهه به دلیل کم‌بودن متغیر مستقل یا کم‌بودن حافظه مدل از دقت کمی برای پیش‌بینی میزان تبخیر-تعرق ماهانه برخوردار هستند، اما با افزایش حافظه مدل از الگوی دهم به بعد، دقت مدل بهبود یافته است.

در ایستگاه دزفول در همه این سه الگو، میزان خطا کمتر از یک میلی‌متر و به ترتیب معادل ۰/۵۱، ۰/۳۴ و ۰/۳۳ میلی‌متر است. میزان خطا در دو ایستگاه آبادان و اهواز بیشتر از ایستگاه دزفول و حداکثر مقدار خطا در این دو ایستگاه ۱/۹ میلی‌متر است. در هر سه ایستگاه مورد بررسی بهترین نتایج در مرحله آموزش در بین ماه‌های گرم سال (آوریل تا سپتامبر)، در ماه مه و در ماه‌های سرد سال (اکتبر-مارس) به ترتیب در ماه‌های دسامبر، نوامبر و اکتبر مشاهده شد (جدول ۲).

بهترین نتایج براساس کمترین میزان خطا و بالاترین ضریب نش در مرحله آموزش برای سه ایستگاه دزفول، آبادان و اهواز به ترتیب در ماه اکتبر (الگوی M16)، ماه مه (M20) و ماه نوامبر (M14) به دست آمد.

نتایج مدل‌سازی تبخیر روزانه از تشت در مرحله آموزش

نتایج مرحله آموزش که با ۲۰ درصد داده‌های باقیمانده انجام شد، در زیر ارائه شده است. نتایج این بخش در اصل توانایی مدل در برآورد داده‌های گم‌شده را نشان می‌دهد. به‌طور کلی در برخی ایستگاه‌ها نتایج این بخش نسبت به بخش آموزش اندکی ضعیف‌تر است (شکل ۱) که دلیل آن ناشی از کم‌شدن تعداد داده‌ها در مرحله آموزش است. این مسئله تقریباً در همه پژوهش‌های مشابه مشاهده می‌شود، زیرا بخش عمده‌ای از داده‌ها برای آموزش مدل‌ها استفاده می‌شود (طاووسی و زهرایی، ۱۳۹۴؛ فیض‌اله‌پور و همکاران، ۱۳۹۶؛ امجدی و همکاران، ۱۳۹۸). با وجود ضعیف‌تر شدن نتایج در بخش آموزش، در همه ماه‌های مورد بررسی حداقل در یکی از الگوهای شبیه‌سازی، مقادیر خطا پایین و قابل قبول بود. در بین ۷ الگوی مورد بررسی، مقادیر خطا در ایستگاه دزفول بین ۰/۳۵ تا ۱/۹

در مرحله بعد داده‌های تبخیر روزانه با استفاده از برخی مدل‌های تحلیل سری‌زمانی، مانند مدل نرم‌سازی نمایی (Exponential smoothing model)، هالت (Holt's mode)، آریما (ARIMA)، مدل روند خطی براون (Brown's linear trend) و وینترز (Winters' model) نیز مقایسه شد. این مدل‌ها در پژوهش‌های فراوانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (قاسمی، ۱۳۹۵؛ خسروی و همکاران، ۱۳۹۷؛ فلاح و همکاران، ۱۴۰۰؛ تیموری و تیموری، ۱۴۰۱؛ پروین و شارما، ۲۰۲۰؛ بوزناد و همکاران، ۲۰۲۰؛ وو و همکاران، ۲۰۲۱).

در انتها به کمک شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Squared Error, RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و ضریب نش-ساتکلیف (Nash-Sutcliffe, N.S) نتایج مدل ارزیابی شد. بالاترین مقادیر ضریب تبیین که داری بیشترین میزان ضریب نش-ساتکلیف و کمترین مقدار خطا باشند، به‌عنوان بهترین الگو انتخاب شدند.

نتایج و بحث

نتایج مدل‌سازی تبخیر روزانه از تشت در مرحله آموزش

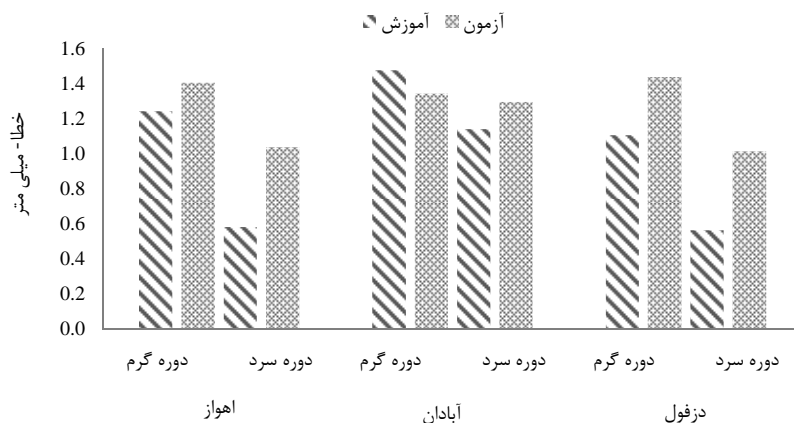
مدل‌سازی تبخیر روزانه در مرحله آموزش در ایستگاه دزفول و آبادان در ۱۲ ماه نشان داد، بهترین الگوها از نظر میزان دقت شبیه‌سازی، الگوهای ۱۴، ۱۶ و ۲۰ هستند. در ایستگاه اهواز نیز بهترین نتایج در الگوهای ۱۶ و ۲۰ به دست آمد. به‌طور کلی الگوهای با حافظه پایین (الگوهای ۲، ۴ و ۶ و ۱۰) نسبت به الگوهای ۱۴، ۱۶ و ۲۰ نتایج ضعیف‌تری ارائه دادند. به‌عبارت‌دیگر با افزایش حافظه مدل برای شبیه‌سازی، دقت افزایش یافته است (جدول ۲).

خطا براساس شاخص‌های R^2 ، RMSE و ضریب نش در ماه‌های مورد بررسی در گام زمانی چهاردهم، شانزدهم و بیستم به‌دست آمد.

میلی‌متر در روز، آبادان ۰/۷۰ تا ۱/۹ و اهواز بین ۰/۵۰ تا ۱/۹ میلی‌متر در روز متغیر است. مانند مرحله آموزش در سه ایستگاه مورد مطالعه بیشینه دقت و کمترین میزان

جدول ۲- نتایج بهترین الگوهای مورد بررسی ورودی مدل GEP در بخش آموزش برای برآورد تبخیر روزانه

ایستگاه	الگو	ماه مه			ماه اکتبر		
		R^2	RMSE	N.S.	R^2	RMSE	N.S.
دزفول	M2	۰/۶۴	۱/۴۸	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۹۴	۰/۶۶
	M4	۰/۷۲	۱/۲۹	۰/۷۲	۰/۶۳	۰/۹۲	۰/۶۴
	M6	۰/۶۷	۱/۳۷	۰/۶۸	۰/۸۳	۰/۶۳	۰/۸۳
	M10	۰/۶۸	۱/۲۸	۰/۷۷	۰/۸۶	۰/۵۱	۰/۸۵
	M14	۰/۸۴	۰/۹۶	۰/۸۴	۰/۹۰	۰/۵۱	۰/۸۹
	M16	۰/۷۶	۱/۱۸	۰/۷۶	۰/۹۰	۰/۵۷	۰/۹۰
	M20	۰/۹۰	۰/۷۵	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۵۰	۰/۸۹
آبادان	ماه مه			دسامبر			
	M2	۰/۶۵	۱/۰۴	۰/۶۵	۰/۳۳	۰/۹۹	۰/۵۲
	M4	۰/۴۴	۱/۷۳	۰/۴۴	۰/۷۵	۰/۶۷	۰/۷۵
	M6	۰/۴۰	۱/۵۲	۰/۴۰	۰/۵۲	۰/۷۲	۰/۵۱
	M10	۰/۷۳	۱/۳۵	۰/۶۷	۰/۵۲	۰/۹۰	۰/۵۲
	M14	۰/۶۸	۱/۳۰	۰/۷۰	۰/۶۴	۰/۷۵	۰/۶۲
	M20	۰/۷۴	۱/۲۶	۰/۷۴	۰/۶۶	۰/۷۶	۰/۶۵
اهواز	ماه مه			نوامبر			
	M2	۰/۴۰	۱/۹۱	۰/۳۹	۰/۶۵	۰/۶۰	۰/۶۵
	M4	۰/۵۳	۱/۲۹	۰/۵۴	۰/۵۶	۰/۷۴	۰/۵۵
	M6	۰/۷۵	۱/۳۴	۰/۷۵	۰/۷۸	۰/۵۳	۰/۷۸
	M10	۰/۷۳	۱/۴۳	۰/۶۸	۰/۷۴	۰/۶۴	۰/۷۵
	M14	۰/۷۸	۱/۲۵	۰/۷۴	۰/۸۵	۰/۴۳	۰/۸۵
	M20	۰/۸۸	۰/۹۶	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۳۹	۰/۹۰
		۰/۷۹	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۵۷	۰/۸۴	۰/۵۶



شکل ۱- تغییرات مقادیر خطای مدل در مراحل آموزش و آزمون در دو دوره سرد و گرم سال

در ماه مه اتفاق افتاده بود، در بخش آزمون در دو ایستگاه دزفول و آبادان بهترین نتایج در آگوست مشاهده شد. نتایج مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای بهترین ماه سرد و گرم سال در هر ایستگاه در بخش آزمون، در جدول ۳ ارائه شده است.

در ماه‌های سرد سال (اکتبر تا مارس) الگوهایی که در بخش آموزش جزو بهترین الگوها بودند، در بخش آزمون نیز از نظر مقدار خطا و دو شاخص ضریب نش و تبیین، بهترین نتایج این بخش را ارائه کردند؛ اما در ماه‌های گرم سال (آوریل-سپتامبر) که در بخش آموزش بهترین نتایج

جدول ۳- نتایج بهترین الگوهای مورد بررسی ورودی مدل GEP در بخش آزمون برای برآورد تبخیر روزانه

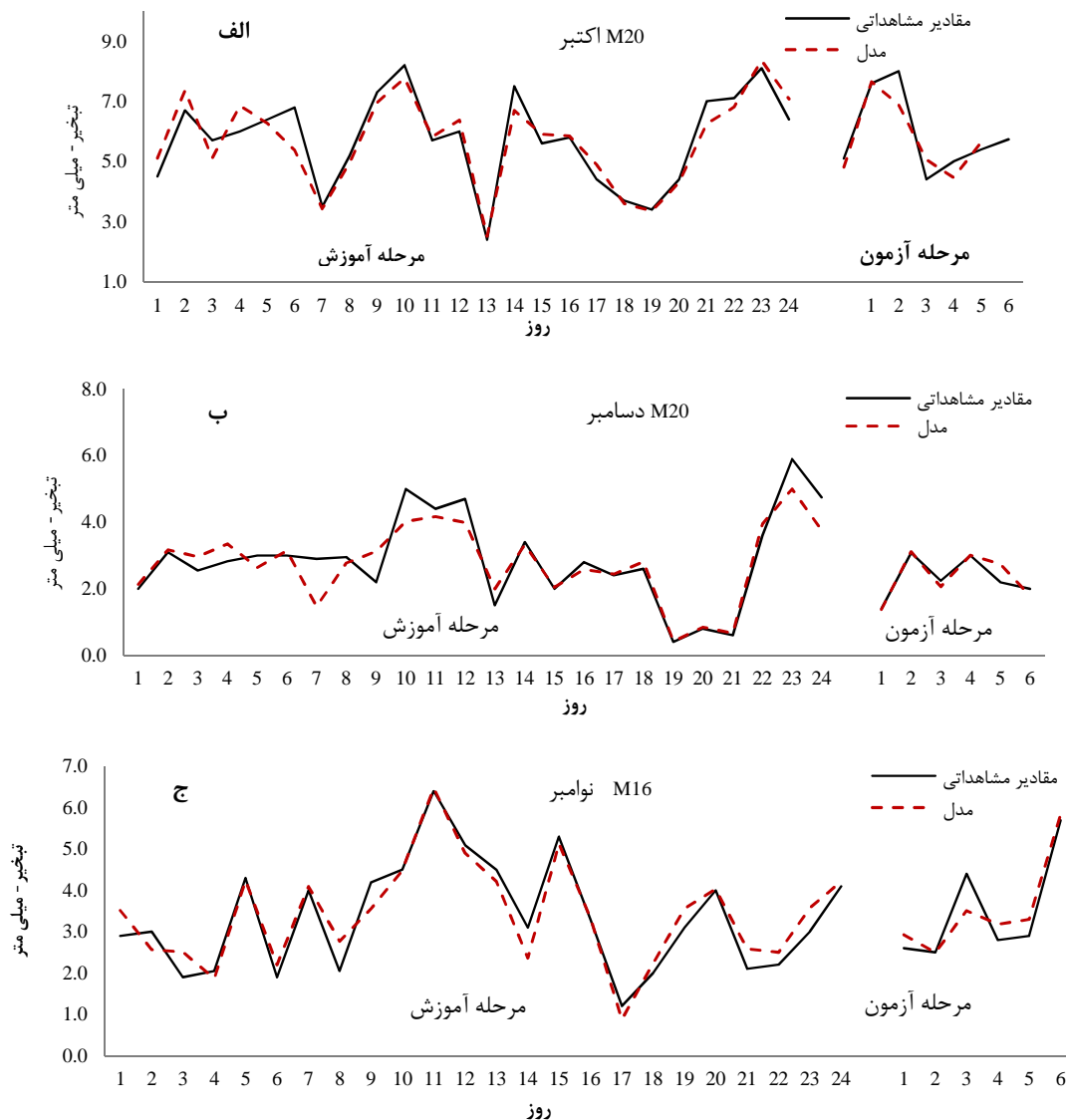
ایستگاه	الگو	ماه آگوست			ماه اکتبر		
		R ²	RMSE	N.S.	R ²	RMSE	N.S.
دزفول	M2	۰/۱۲	۱/۳۵	۰/۲۴	۰/۷۹	۰/۹۲	۰/۶۵
	M4	۰/۱۳	۱/۸۹	۰/۴۵	۰/۶۱	۰/۸۹	۰/۶۹
	M6	۰/۱۱	۱/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۵	۱/۸۶	۰/۱۹
	M10	۰/۲۷	۱/۷۰	۰/۶۳	۰/۵۴	۱/۰۵	۰/۹۴
	M14	۰/۱۳	۱/۳۶	۰/۱۹	۰/۵۶	۱/۰۳	۰/۶۳
	M16	۰/۵۵	۱/۵۲	۰/۴۲	۰/۱۳	۱/۰۷	۰/۲۳
	M20	۰/۸۰	۰/۹۳	۰/۸۰	۰/۷۱	۰/۸۴	۰/۸۱
آبادان	M2	۰/۱۴	۱/۱۶	۰/۵۰	۰/۱۶	۱/۵۷	۰/۳۴
	M4	۰/۲۸	۱/۰۸	۰/۴۸	۰/۳۶	۱/۵۵	۱/۵۰
	M6	۰/۲۷	۱/۰۷	۰/۵۰	۰/۴۸	۱/۶۷	۰/۴۹
	M10	۰/۳۲	۱/۶۸	۰/۷۴	۰/۳۵	۰/۹۹	۰/۴۶
	M14	۰/۲۲	۱/۹۸	۰/۶۱	۰/۱۳	۱/۹۰	۰/۷۶
	M16	۰/۷۶	۱/۰۱	۰/۸۲	۰/۱۳	۱/۲۱	۰/۴۶
	M20	۰/۸۲	۰/۹۵	۰/۸۷	۰/۶۵	۰/۷۰	۰/۸۲
اهواز	M2	۰/۴۳	۱/۹۹	۰/۴۲	۰/۱۵	۱/۸۰	۰/۱۲
	M4	۰/۲۰	۱/۶۱	۰/۳۹	۰/۱۳	۱/۶۲	۱/۵۰
	M6	۰/۴۸	۱/۷۲	۰/۸۳	۰/۱۸	۱/۱۵	۰/۱۴
	M10	۰/۵۴	۱/۷۷	۱/۸۰	۰/۲۴	۱/۳۲	۰/۱۸
	M14	۰/۴۹	۱/۹۹	۰/۷۵	۰/۴۷	۱/۰۳	۰/۷۶
	M16	۱/۱۳	۱/۷۸	۱/۶۰	۰/۶۳	۱/۸۰	۰/۸۵
	M20	۰/۷۸	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۵۴	۰/۸۱	۱/۸۰

آبادان و اهواز به ترتیب در ماه اکتبر (الگوی M20)، دسامبر (M20) و نوامبر (M16) به دست آمد. انطباق مناسب مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل بر داده‌های اندازه‌گیری شده در شکل ۲ به خوبی مشاهده می‌شود. میانگین خطا در دو مرحله آموزش و آزمون برای ایستگاه دزفول (شکل ۲- الف) ۰/۶۷ میلی‌متر، برای ایستگاه آبادان (شکل ۲- ب) ۰/۶۶ میلی‌متر و برای ایستگاه اهواز (شکل ۲- ج) ۰/۵۹ میلی‌متر به دست آمد که نشان‌دهنده دقت مدل در برآورد تبخیر روزانه در این ایستگاه‌ها است.

بر اساس نتایج به دست آمده از ارزیابی مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن در هر دو مرحله آموزش و آزمون می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد این مدل در پیش‌بینی تبخیر روزانه از تشت در ایستگاه‌های مورد بررسی در گام‌های زمانی بالا مناسب است. شکل ۲، تغییرات مقادیر تبخیر مشاهده‌ای به همراه مقادیر مدل‌سازی شده توسط مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن برای بهترین الگوها، در دو مرحله آموزش و آزمون در سه ایستگاه مورد مطالعه را در ماه‌های سرد (اکتبر تا مارس) سال نشان می‌دهد. بهترین نتایج در سه ایستگاه دزفول،

است (شکل ۱). هرچند در ۱۲ ماه سال، حداقل یک الگوی مناسب با دقت قابل قبول از لحاظ شاخص‌های آماری برای شبیه‌سازی داده‌های تبخیر وجود دارد.

مقایسه نتایج مدل‌سازی شده در ماه‌های سرد سال (اکتبر تا مارس) با ماه‌های گرم سال (آوریل تا سپتامبر) حاکی از آن است که مدل میزان تبخیر روزانه در ماه‌های سرد سال را با خطای کمتر و دقت بیشتری شبیه‌سازی کرده



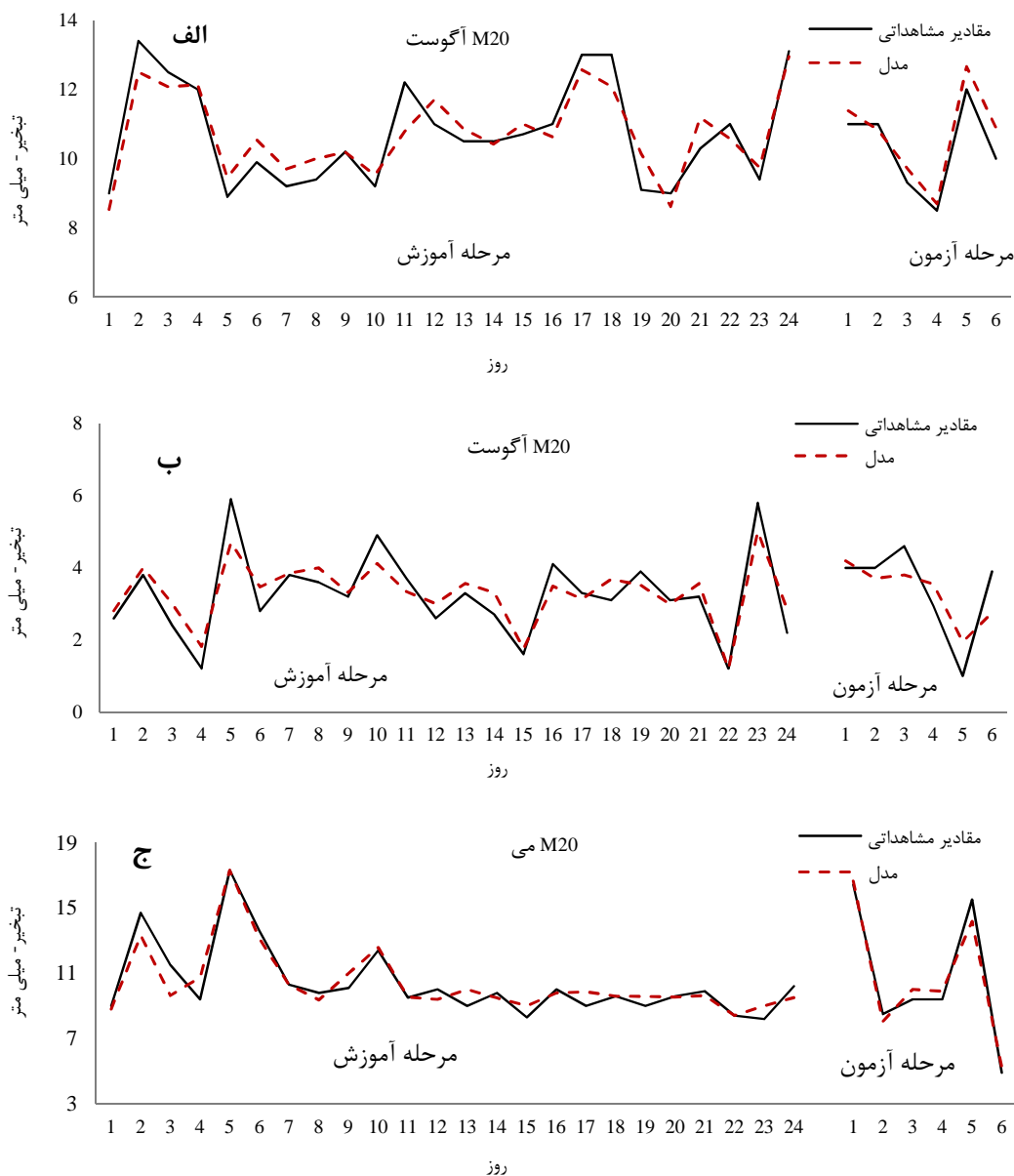
شکل ۲- تغییرات مقادیر مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده در دو مرحله آموزش و آزمون برای سه ایستگاه الف: دزفول (اکتبر، الگوی M20) ب: آبادان (دسامبر، الگوی M20) و ج: اهواز (نوامبر، الگوی M16)

برای ماه مه ایستگاه اهواز $0.95/0.95$ میلی‌متر و 0.95 به‌دست آمد. با توجه به اینکه مقادیر خطا کمتر از ۱ میلی‌متر و ضریب نش حداقل 0.80 است، می‌توان با اطمینان کارایی مدل GEP را در برآورد تبخیر روزانه از تشت در ایستگاه‌های مورد بررسی تأیید کرد.

بهترین نتایج در ماه‌های گرم سال (آوریل تا سپتامبر) نیز برای ماه آگوست (در دزفول و آبادان) و مه (در اهواز) و در الگوی M20 به‌دست آمد (شکل ۳). مقدار خطای برآورد تبخیر روزانه در ماه آگوست دزفول $0.93/0.93$ میلی‌متر و ضریب نش 0.80 به‌دست آمد. این مقادیر برای ماه آگوست ایستگاه آبادان به ترتیب $0.95/0.95$ میلی‌متر و 0.82 و

استنتاج تطبیقی فازی-عصبی و GEP در ۱۲ ایستگاه در غرب و شمال غرب ایران برای برآورد تبخیر-تعرق، نشان دادند که مدل GEP می‌تواند به‌عنوان جایگزین روابط تجربی برای تخمین تبخیر-تعرق در پژوهش‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرد.

کارایی مدل GEP در پژوهش‌های بسیاری تأیید شده است. حقیقت‌جو و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی در استان خراسان جنوبی عنوان کردند که مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن کارایی بهتری نسبت به مدل عصبی-فازی در برآورد روزانه تبخیر از تشتک دارد. معروف‌پور و همکاران (۱۳۹۶) نیز با مقایسه مدل‌های شبکه عصبی، سامانه



شکل ۳- تغییرات مقادیر مشاهده‌ای و مدل‌سازی‌شده در دو مرحله آموزش و آزمون در ماه‌های گرم سال برای سه ایستگاه الف: دزفول (آگوست، الگوی M20) ب: آبادان (آگوست، الگوی M20) و ج: اهواز (مه، الگوی M20)

جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول بهترین مدل به‌دست‌آمده برای برآورد داده‌های تبخیر روزانه در هر ماه ارائه شده است. نتایج ارائه‌شده در این جدول نشان

نتایج مدل‌های سری زمانی

نتایج بررسی انطباق مدل‌های سری زمانی مورد بررسی بر داده‌های تبخیر از تشت در سه ایستگاه مورد بررسی در

بیان‌ژن است. میزان خطا در این دو ماه در مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن به ترتیب ۰/۴۱ و ۱/۱ میلی‌متر در روز برآورد شد، درحالی‌که در مدل Holt به ترتیب ۰/۱۶ و ۰/۳۲ به دست آمد.

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن در اغلب ماه‌های سال در هر سه ایستگاه مورد مطالعه می‌تواند با دقت قابل‌قبولی میزان تبخیر روزانه از تشت را نسبت به مدل‌های سری زمانی مورد بررسی، برآورد کند؛ بنابراین می‌توان از این مدل برای برآورد و تخمین اعداد گم‌شده تبخیر از تشت استفاده کرد. متار (۲۰۱۸) نیز در برآورد میانگین تبخیر تعرق پتانسیل ماهانه در ۳۲ ایستگاه در مصر نشان داد که مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن GEP نسبت به مدل‌های تجربی دقیق‌تر است. یوسف‌عباس و همکاران (۲۰۲۰) به پیش‌بینی تبخیر در سواحل سوریه با استفاده از برنامه‌نویسی بیان‌ژن و سیستم استنتاج فازی پرداختند و نتیجه گرفتند که مدل GEP عملکرد بهتری برای تخمین تبخیر از تشت دارد. سبزواری و همکاران (۱۴۰۰) نیز در پژوهشی از برنامه‌نویسی بیان‌ژن و رگرسیون گام‌به‌گام در برآورد تبخیر-تعرق ماهانه در ایستگاه بروجرد استفاده کردند و نشان دادند مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن نسبت به بقیه مدل‌ها برتری دارد.

می‌دهد که برای برخی ماه‌ها و براساس مقادیر خطا و ضریب تبیین نتایج قابل‌قبولی به دست نیامده است. در ایستگاه اهواز مقایسه نتایج به دست آمده از ارزیابی مدل‌های سری زمانی با نتایج مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن نشان می‌دهد که غیر از ماه‌های اکتبر و نوامبر، نتایج از نظر دقت و مقدار خطای شبیه‌سازی، ضعیف‌تر از مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن است.

در ماه اکتبر میزان ضریب تبیین و خطا در مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن به ترتیب برابر با ۰/۸۱ و ۰/۶۵ است در حالی که در مدل Exponential smoothing (Exp-Smo) این مقادیر به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۳۴ به دست آمد. برای ماه نوامبر نیز مقدار ضریب تبیین در مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن ۰/۹۰ و میزان خطا ۰/۳۹ میلی‌متر به دست آمد درحالی‌که در مدل Holt ضریب تبیین ۰/۹۰ و میزان خطا تنها ۰/۲۶ میلی‌متر است که نشان‌دهنده دقت بیشتر دو مدل Exponential smoothing و Holt در برآورد و شبیه‌سازی مقادیر تبخیر روزانه از تشت در ماه‌های اکتبر و نوامبر در ایستگاه اهواز است.

در ایستگاه آبادان نتایج همه مدل‌های سری زمانی مورد بررسی ضعیف‌تر از مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن به دست آمد. در ایستگاه دزفول نیز تنها نتایج مدل Holt در سه ماه ژانویه و سپتامبر دقیق‌تر از نتایج مدل برنامه‌نویسی

جدول ۴- نتایج مدل‌های سری زمانی مورد بررسی در برآورد تبخیر روزانه از تشت در سه ایستگاه مورد بررسی

اهواز			آبادان			دزفول		
مدل	RMSE	R ²	مدل	RMSE	R ²	مدل	RMSE	R ²
Holt	۰/۱۶	۰/۸۶ ^{**}	ARIMA	۰/۲۵	۰/۱۰ ^{ns}	Holt	۰/۲۶	۰/۶۵ ^{ns}
Holt	۰/۱۹	۰/۶۷ ^{ns}	Exp-Smo	۰/۳۵	۰/۷۸ ^{ns}	Holt	۰/۲۶	۰/۶۵ ^{ns}
Holt	۰/۲۶	۰/۶۵ ^{ns}	Exp-Smo	۰/۴۴	۰/۷۴ ^{ns}	Holt	۰/۳۰	۰/۷۸ ^{ns}
ARIMA	۰/۳۰	۰/۷۸ ^{ns}	Holt	۰/۵۷	۰/۷۲ ^{ns}	ARIMA	۰/۳۰	۰/۷۸ ^{ns}
Holt	۰/۴۶	۰/۸۲ ^{ns}	Holt	۰/۶۴	۰/۷۶ ^{ns}	Holt	۰/۴۶	۰/۸۲ ^{ns}
ARIMA	۰/۵۷	۰/۴۱ ^{ns}	Exp-Smo	۰/۷۳	۰/۴۱ ^{ns}	ARIMA	۰/۵۷	۰/۴۱ ^{ns}
Exp-Smo	۰/۳۶	۰/۱۰ ^{ns}	Exp-Smo	۰/۷۳	۰/۵۹ ^{ns}	Exp-Smo	۰/۳۶	۰/۱۰ ^{ns}
Exp-Smo	۰/۳۷	۰/۷۴ ^{ns}	Exp-Smo	۰/۶۸	۰/۵۸ ^{ns}	Exp-Smo	۰/۳۷	۰/۷۴ ^{ns}
Holt	۰/۳۲	۰/۸۸ [*]	Holt	۰/۸۷	۰/۵۶ ^{ns}	Holt	۰/۳۲	۰/۸۸ [*]
Holt	۰/۳۱	۰/۸۴ ^{ns}	Exp-Smo	۰/۶۳	۰/۷۶ ^{ns}	Holt	۰/۳۱	۰/۸۴ ^{ns}
Holt	۰/۲۹	۰/۷۸ ^{ns}	Holt	۰/۳۶	۰/۶۴ ^{ns}	Holt	۰/۲۹	۰/۷۸ ^{ns}
Exp-Smo	۰/۱۸	۰/۱۶ ^{ns}	Exp-Smo	۰/۲۷	۰/۰۶ ^{ns}	Exp-Smo	۰/۱۸	۰/۱۶ ^{ns}

ns: غیر معنی‌دار، * معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ و ** معنی‌دار در سطح ۰/۰۱

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، از مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن و مدل‌های سری زمانی نمایی (Exponential smoothing model)، حالت (Holt's model)، آریما (ARIMA)، مدل روند خطی براون (Brown's linear trend) و وینترز (Winters' model) برای مدل‌سازی تبخیر روزانه از تشت در استان خوزستان در دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۰ استفاده شد. سه ایستگاه سینوپتیک اهواز، دزفول و آبادان که دارای طولانی‌ترین دوره آماری بودند، انتخاب و بررسی شدند. مدل‌سازی براساس ۸۰ درصد از داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد از داده‌ها برای آزمون انجام شد. نتایج ارزیابی مدل به کمک سه شاخص ضریب نش-سانتکلیف، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا انجام شد. خلاصه نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن نسبت به مدل‌های سری زمانی مورد بررسی در اغلب ماه‌ها برتری دارد. در ایستگاه آبادان نتایج مدل‌سازی برنامه‌نویسی بیان‌ژن از همه مدل‌های سری زمانی مورد بررسی قوی‌تر بود. در ایستگاه دزفول نیز تنها در ماه‌های ژانویه و سپتامبر نتایج مدل Holt نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن ارائه داد. میزان خطای مدل Holt در این ماه‌ها به‌طور متوسط ۶۶ درصد کمتر از مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن است. در ایستگاه اهواز نیز مقایسه نتایج مدل‌های سری زمانی با مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن نشان داد تنها در ماه‌های اکتبر و نوامبر، به ترتیب نتایج مدل Exponential smoothing و مدل Holt از نظر دقت و مقدار خطای شبیه‌سازی، قوی‌تر از مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن است. میزان خطا در مدل Exponential smoothing تنها ۰/۳۴ میلی‌متر در روز به‌دست آمد که ۴۸ درصد کمتر از خطا در مدل GEP است. این میزان خطا برای ماه نوامبر و مدل Holt ۶۸ درصد کمتر از مدل GEP به‌دست آمد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت به جز ماه‌های ژانویه، اکتبر و نوامبر، آن هم در برخی ایستگاه‌ها، مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن توانسته است با دقت قابل‌قبولی میزان تبخیر روزانه از تشت را برآورد کند؛ بنابراین می‌توان این مدل را برای تخمین داده‌های گم‌شده تبخیر از تشت در این سه ایستگاه توصیه کرد.

منابع

- اسکندری ح. ۱۳۹۴. کاربرد تشتک تبخیر در تنظیم فاصله آبیاری و افزایش کارایی استفاده از آب در گیاهان زراعی. همایش ملی بحران کم‌آبی و راه‌های برون‌رفت، ۲۵ شهریور. همدان. ۶-۱.
- امجدی ح. ماشاءالله ع. و سلطانی م. ۱۳۹۸. ارزیابی قابلیت مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن در شبیه‌سازی تابش خورشیدی رسیده به زمین. مطالعه موردی اهواز. انرژی‌های تجدیدپذیر و نو. ۶(۲): ۸۵-۹۳.
- برزگار ع. شهابی س. نیازمردی س. و مددی م. ۱۴۰۰. ارزیابی قابلیت برنامه‌ریزی بیان‌ژن در تخمین تبخیرتقرق پتانسیل در مقایسه با رابطه هارگریوز-سامانی. مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۱(۴۴): ۳۱۶-۳۳۰.
- تیموری ت. و تیموری ل. ۱۴۰۱. بررسی کاربرد مدل‌های سری زمانی در پیش‌بینی جریان ماهانه ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه. مطالعات علوم محیط‌زیست. ۷(۲): ۴۷۹۹-۴۸۰۷.
- حقی‌زاده ع. بیات و. و ارشیا آ. ۱۳۹۸. برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه‌های سینوپتیک کرمانشاه با استفاده از مدل برنامه‌نویسی بیان‌ژن. مجله فضای جغرافیایی. ۶۷(۳): ۲۹-۴۲.
- حقیقت‌جو پ. محمدزاده ز. و محمدرضاپور ا. ۱۳۹۶. مقایسه روش‌های سیستم استنتاج عصبی-فازی و برنامه‌ریزی بیان‌ژن در برآورد تبخیر از تشتک. مجله حفاظت منابع آب و خاک. ۶(۴): ۱۰۷-۱۱۷.
- خسروی ی. بلیانی س. و بیات ع. ۱۳۹۷. واکاوی زمانی بارش سالانه شهر شیراز با استفاده از تحلیل‌های سری زمانی. مهندسی منابع آب. ۱۱(۳۸): ۱-۱۴.
- سبزواری ی. حیدر نصرالهی ع. شریفی‌پور م. و شاهی‌نژاد ب. ۱۴۰۱. کاربرد رگرسیون چندمتغیره و برنامه‌ریزی بیان‌ژن در مدل‌سازی تبخیر و تعرق مرجع (مطالعه موردی ایستگاه خرم‌آباد). علوم و مهندسی آبیاری. ۴۵(۱): ۳۵-۴۸.
- سبزواری ی. و سعیدی‌نیا م. ۱۴۰۰. ارزیابی مدل‌های تجربی و هوش مصنوعی در برآورد

- بلوچستان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۲(۵): ۳۰۷-۳۱۳.
۱۹. معروف پور س. معروف پور ع. و ثانی خانی ه. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی تبخیر-تعرق مرجع ماهانه بدون داده‌های اقلیمی با استفاده از محاسبات نرم در غرب و شمال غرب ایران. مهندسی منابع آب. ۳۴(۳): ۳۷-۴۹.
20. Bouznad I. E. Guastaldi E. Zirulia A. Brancale M. Barbagli A. and Bengusmia D. 2020. Trend analysis and spatiotemporal prediction of precipitation, temperature, and evapotranspiration values using the ARIMA models: case of the Algerian Highlands. *Arabian Journal of Geosciences*. 13(25): 1-17.
21. Ferreira C. 2001. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Syst*. 13(3): 87-129.
22. Mohammadrezapour O. Piri J. and Kisi O. 2018. Comparison of SVM, ANFIS and GEP in modeling monthly potential evapotranspiration in an arid region (Case study: Sistan and Baluchestan Province, Iran). *Water Supply*. 19(2): 392-403.
23. Mattar M. 2018. Using gene expression programming in monthly reference evapotranspiration modeling: A case study in Egypt. 198(2): 28-38.
24. Mattar M. and Alazba A. 2019. GEP and MLR approaches for the prediction of reference evapotranspiration. *Neural Computing and Applications*. 31(5): 5843-5855.
25. Praveen B. and Sharma P. 2020. Climate variability and its impacts on agriculture production and future prediction using autoregressive integrated moving average method (ARIMA). *Journal of Public affair*. 20(2): 1-12.
26. Seydou T. Yufeng L. and Guy F. 2017. Gene-Expression Programming for short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using public weather forecast information. *Water resources management*. 31(4): 4891-4908.
27. Wu X. Zhou J. Yu H. Li D. Xie K. Chen Y. Hu J. Sun H. and Xing F. 2021. The development of a hybrid wavelet-ARIMA-LSTM model for precipitation amounts and drought analysis. *Atmosphere*. 12(1): 1-17.
28. YosofAbas M. Amar G. and Hemad M. 2020. Estimating daily evapotranspiration in the Syrian coast using gene expression programming and a neural inference system Adaptive Gaussian. *Journal of Engineering and Computer Science*. 21(10): 48-55.
- تبخیر-تعرق مرجع (مطالعه موردی: ایستگاه بروجرد). نشریه علوم و خاک. ۲(۹۶): ۲۳۷-۲۵۱.
۱۰. طاووسوی س. ت. و زهرایی ا. ۱۳۹۴. مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات بیشینه دمای شیراز برای دوره اقلیمی منتهی به سال ۱۴۰۰ خورشیدی. مجله نیوار. ۸۸(۸۹): ۴۳-۵۲.
۱۱. علی‌حسینی ا. و بابایی ف. ۱۳۹۵. مدل‌سازی فرایند تبخیر سطحی آب در سدهای آبی با استفاده از CFD (مطالعه موردی: سد امیرکبیر کرج). نشریه مهندسی شیمی ایران. ۳۵(۴): ۱۲۵-۱۳۶.
۱۲. عمادی ع. زارعی س. رشید ع. و زمان‌زاد س. ۱۴۰۱. مدل‌سازی تبخیر ماهانه با استفاده از روش‌های منفرد و هیبریدی-موجک داده‌کاوی در حوضه‌های آبریز ایران با تنوع اقلیمی. نشریه آبیاری و آب ایران. ۴(۱۲): ۳۵۴-۳۷۳.
۱۳. فلاح س. ایلدرمی ع. و نوری ح. ۱۴۰۰. پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر شاخص‌های خشکسالی (SPI) و (SDI) در حوزه آبخیز ملایر با استفاده از سری زمانی ARIMA. جغرافیا و برنامه‌ریزی. ۲۵(۷۷): ۲۰۵-۲۱۸.
۱۴. فیض‌اله‌پور ف. دلاور م. و حسامی م. ۱۳۹۶. ارزیابی و تحلیل عدم قطعیت برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک. نشریه دانش آب و خاک. ۲۷(۴): ۱۳۵-۱۴۷.
۱۵. قاسمی ا.ر. ۱۳۹۵. امکان‌سنجی مدل‌سازی و پیش‌بینی دماهای کمینه و بیشینه ایران با روش پتیت و هالت-وینترز. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۴۳(۱۶): ۷-۲۴.
۱۶. قهرمان ن. و قره‌خانی ا. ۱۳۹۰. ارزیابی مدل‌های تصادفی سری زمانی در برآورد تبخیر از تشتک (مطالعه موردی: ایستگاه شیراز). پژوهش آب در کشاورزی. ۲۵(۱): ۷۵-۸۱.
۱۷. کارآموز م. و عراقی‌نژاد ش. ۱۳۸۹. هیدرولوژی پیشرفته. چاپ اول. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. ۴۶۴ ص.
۱۸. محمدرضاپور ا. امینی ا. و کاراندیش ف. ۱۳۹۴. مدل‌سازی تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن در استان سیستان و

