

مقایسه کارآیی مدل‌های سری زمانی خطی و غیرخطی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تبخیر- تعرق مرجع

کامران زینی‌زاده^۱

ندا خان محمدی^۲

چکیده

برآورد دقیق میزان تبخیر- تعرق مرجع (ET_0) نقش بسیار مهمی در مدیریت منابع آب و بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی دارد. یکی از روش‌های برآورد ET_0 استفاده از مدل‌های سری زمانی است. در این تحقیق، دقت و کارایی مدل خطی آرما (ARMA) و غیرخطی بیلینبیر (BL) در شبیه‌سازی و پیش‌بینی ET_0 در سه ایستگاه سینوپتیک واقع در شمال غرب کشور مورد مقایسه قرار گرفت. بدین منظور، مقادیر ماهانه ET_0 از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ با استفاده از روش فائوپنمن-مانتیث ۵۶ محاسبه شد. مقادیر محاسبه شده ET_0 در طول سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ به ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها به کار گرفته شد. نتایج شاخص‌های آماری در مرحله صحت‌سنجی (میلیمتر بر روز $RMSE < 0.691$ و $R^2 > 0.818$) نشان داد که هر دو مدل خطی و غیرخطی می‌توانند سری زمانی ET_0 را با دقت قابل قبول در ایستگاه‌های مورد مطالعه شبیه‌سازی و پیش‌بینی نمایند. در نهایت، مقادیر ET_0 با استفاده از کل آمار موجود طی سال‌های

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه (نویسنده مسئول)

Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir

۲- دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه ارومیه

۱۹۹۰-۲۰۱۴ توسط هر دو روش مورد مطالعه مدل و با انتخاب مدل برتر برای پنج سال آبی (۲۰۱۵-۲۰۱۹) پیش‌بینی شد. همچنین، نتایج آزمون دایبلد و ماریانو نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین نتایج دو مدل خطی و غیرخطی در مدل‌بندی سری زمانی ET_0 ، جز در ایستگاه اردبیل، وجود ندارد.

واژگان کلیدی: آزمون دایبلد و ماریانو، تبخیر-تعرق مرجع، مدل خطی آرما، مدل غیرخطی بیلینبیر.

مقدمه

با توجه به کاهش شدید ذخیره آب‌های شیرین دنیا و مسئله بحران آب، برآورد و پیش‌بینی دقیق میزان تبخیر-تعرق مرجع می‌تواند نقش مهمی در تعیین میزان دقیق مقدار آب آبیاری داشته باشد. اهمیت نقش پدیده تبخیر-تعرق در مدیریت آب آبیاری، محققان بسیاری را به انجام مطالعات مختلف در این زمینه ترغیب نموده است. تحقیقات انجام یافته توسط Zhanetti et al. (2002: 224)، Hupet and Vanclooster (2001: 192)، Li et al. (2007: 83)، al. (2007: 83)، بختیاری و همکاران (۱۳۸۸: ۱۳)، Kisi (2010: 175)، Zheng et al. (2010: 30)، ولیزاده کامران (۱۳۹۳: ۳۱۷)، ولیزاده کامران (۱۳۹۴: ۳۵۳) و (2016: 1535) در قرن اخیر از آن جمله‌اند.

پیچیدگی و عدم دانش کافی در ارتباط با فرآیندهای فیزیکی موجود در چرخه هیدرولوژیک، متخصصان در این زمینه را به ساخت و گسترش مدل‌های آماری برای بیان این فرآیندها سوق داده است. از جمله مدل‌های ارائه شده جهت مدل‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیک، مدل سری زمانی می‌باشد. مدل سری زمانی از دو بخش یا مولفه اصلی شامل مولفه تصادفی و مولفه قطعی مدل تشکیل شده که مولفه قطعی مدل با استفاده از ارقام مشاهداتی و مولفه تصادفی با استفاده از روش‌های مختلف استوکاستیک به دست می‌آید. بنابراین ساختار مدل‌های سری زمانی می‌تواند با ساختار سری‌های هیدرولوژیک در صورت

انتخاب درست مدل و محاسبات صحیح آن سازگاری داشته باشد (Salas, 1993: 13). در زمینه استفاده از سری‌های زمانی در مدل‌سازی پارامترهای هیدرولوژیک، تحقیقات متعددی صورت گرفته است. در تحقیقات صورت گرفته، از مدل سری زمانی برای پیش‌بینی بارندگی ساعتی (Borland and Montana, 1996: 199)، تحلیل دبی چشمه (Padilla et al., 1996: 917)، مدل‌سازی سطح ایستابی (Ahn, 2000: 234)، ارزیابی داده‌های ساعات آفتابی و تابش خورشیدی (Tiba and Fraidenraich, 2004: 1147)، مدل نمودن و پیش‌بینی دماهای مطلق حداقل و حداکثر (خورشیددوست و همکاران، ۱۳۸۸: ۳۱)، ارزیابی بارش باران (Laux et al., 2011: 2401) و برآورد و تخمین مقادیر آبی سری زمانی روزانه تبخیر از تشت (قهرمان و قره‌خانی، ۱۳۹۰: ۷۵) استفاده شده است.

نتایج تحقیقات مختلف مبنی بر مناسب بودن مدل‌های سری زمانی در مدل‌بندی و پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی، عده‌ای از محققان از جمله محققان کشور را علاقه‌مند به کاربرد این مدل‌ها در زمینه تبخیر-تعرق نموده است. پیش‌بینی ماهانه تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در استان فارس (فولادمند، ۱۳۸۹: ۱۵۷) و پیش‌بینی داده‌های هفتگی و ماهانه تبخیر-تعرق در ایستگاه باجگاه (شیروانی و هنر، ۱۳۹۰: ۱۳۵) از آن جمله‌اند. در ایستگاه ارومیه نیز، آزاد طلاتپه و همکاران (۱۳۹۲: ۲۱۳)، تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه را با استفاده از دو مدل AR و ARMA پیش‌بینی کردند. ایشان مدل AR(11) را به عنوان مناسب‌ترین مدل معرفی نمودند. بهمنش و همکاران (۱۳۹۳: ۸۵)، در همین ایستگاه، سری‌های زمانی خطی و غیرخطی را در پیش‌بینی تبخیر-تعرق مرجع مورد مقایسه قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که مدل غیرخطی بیلینبیر در مقایسه با مدل خطی، توانایی بیشتری در مدل‌بندی و پیش‌بینی تبخیر-تعرق مرجع ماهانه دارد. زارع‌ایبانه و همکاران (۱۳۹۳: ۴۵)، متوسط تبخیر-تعرق ماهانه مربوط به ۵ ایستگاه استان کرمانشاه را بر اساس داده‌های هواشناسی ۲۲ ساله و توسط روش فائوپنمن‌مانتیث ۵۶ محاسبه نموده و مقادیر به‌دست آمده را با استفاده از سری‌های زمانی مدل نمودند. ایشان مدل‌های برتر انتخاب شده برای هر ایستگاه را جهت پیش‌بینی مقادیر ET_0 در سال ۲۰۰۹ مورد استفاده قرار دادند. در تحقیقی دیگر، مقایسه‌ای بین نتایج روش‌های سری زمانی و شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تبخیر-تعرق مرجع

ماهانه در ایستگاه ارومیه توسط آزادلاتپه و همکاران (۱۳۹۴: ۷۵) انجام و مدل برتر برگزیده شد.

حفظ منابع آبی موجود نیازمند تدوین برنامه‌های دقیق مدیریتی و برنامه‌ریزی صحیح و اصولی جهت استفاده از ذخایر آب در زمان حاضر و آینده می‌باشد. با توجه به در دسترس نبودن و مجهول بودن اطلاعات موردنیاز در سال‌های آتی جهت مدیریت مصرف، اهمیت پیش‌بینی پارامترهای مهمی چون تبخیر- تعرق مرجع که نقش مهمی در چرخه هیدرولوژیک دارد، بیش از پیش احساس می‌گردد. بررسی تحقیقات نشان می‌دهد که علی‌رغم اهمیت این پارامتر و اثبات قابلیت مدل‌های سری زمانی در مدل‌بندی و پیش‌بینی پدیده‌های هیدرولوژیک، مطالعات محدودی در این زمینه صورت گرفته است. مناطق شمال غرب کشور نیز از این قضیه مستثنی نیستند. لذا در تحقیق حاضر، مقادیر تبخیر-تعرق مرجع در سه ایستگاه واقع در شمال غرب کشور با استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی سری زمانی مدل شده و پیش‌بینی این پارامتر برای پنج سال آتی با استفاده از مدل برتر با خطای کمتر صورت گرفته است.

منطقه مورد مطالعه

جهت انجام تحقیق از آمار ماهانه سه ایستگاه اردبیل، تبریز و رشت واقع در شمال غرب کشور طی سال‌های مشترک آماری ۲۰۱۴-۱۹۹۰ استفاده شد. بازه زمانی مورد مطالعه بر اساس وجود آمار کافی و حداقل نیاز به تکمیل سری زمانی پارامترهای هواشناسی مورد نیاز جهت محاسبه ET_0 انتخاب شده است. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)
اردبیل	۴۸° ۱۷'	۳۸° ۱۵'	۱۳۳۲
تبریز	۴۶° ۱۲'	۳۸° ۰۶'	۱۳۶۱
رشت	۴۹° ۳۶'	۳۷° ۱۵'	-۶/۹

مواد و روش‌ها

پس از تکمیل نمودن آمار هواشناسی سه ایستگاه رشت، اردبیل و تبریز، آزمون داده‌های پرت روی آنها انجام گرفت. پس از اطمینان از عدم وجود داده پرت در ایستگاه‌های مربوطه، مقادیر تبخیر-تعرق توسط روش استاندارد فائوپنمن-مانتیث ۵۶ که از روش‌های معتبر جهت تخمین ET_0 است (Allen et al., 1998)، محاسبه گردید. مقدار ET_0 در روش اشاره شده با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left[\frac{900}{T + 273} \right] U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

که در آن ET_0 تبخیر-تعرق مرجع (mm/day)، R تابش خالص در سطح گیاه ($\text{MJm}^{-2} \text{d}^{-1}$)، G شار گرما به داخل خاک ($\text{MJm}^{-2} \text{d}^{-1}$)، T دمای هوا در ارتفاع دو متری ($^{\circ}\text{C}$)، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (ms^{-1})، e_s فشار بخار اشباع (kpa)، e_a فشار بخار واقعی (kpa)، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار اشباع (kpa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($\text{kpa}^{\circ}\text{C}^{-1}$) و γ ضریب ثابت سایکرومتری ($\text{kpa}^{\circ}\text{C}^{-1}$) می‌باشد (Allen et al., 1998: 24). تمام محاسبات جهت برآورد مقدار ET_0 در نرم‌افزار Excel انجام شد.

مدل آرما (ARMA)

مدل میانگین متحرک خودهمبسته (آرما) رایج‌ترین مدل کاربردی در پیش‌بینی سری‌های زمانی هیدرولوژیک است، شکل کلی این مدل به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$Z_t = \sum_{i=1}^p (\phi_i Z_{t-i}) - \sum_{j=1}^q (\theta_j \varepsilon_{t-j}) + \varepsilon_t \quad (2)$$

در رابطه (۲) Z_t سری زمانی نرمال و استاندارد، ϕ_i و θ_j ضرایب مدل، ε_t سری زمانی مستقل یا سری تصادفی مدل، p و q رسته یا مرتبه مدل می‌باشد. به منظور انتخاب رسته یا مرتبه مدل و انتخاب بهترین مدل، از روش $AICC^1$ (تست آکائیکه) که در واقع معیار

¹ Akaike Information Criteria Corrected

آکائیکه اصلاح شده بوده و در آن خطای مدل محاسبه می‌شود، استفاده شد. در این روش که همراه با آزمون و خطا است، مدلی که AICC کمتری داشته باشد، برازش بهتری خواهد داشت. برای محاسبه مقادیر AICC، نرم‌افزار ITSM مورد استفاده قرار گرفت (آزادلاتپه و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۱۶). با توجه به رابطه (۲)، نرمال و ایستا بودن سری از ضروریات مدل ARMA می‌باشد. بنابراین معیاری جهت آزمون نرمال و ایستا بودن سری مربوطه مورد نیاز می‌باشد.

مدل بیلینیر (BL)

مدل‌های خطی سری زمانی در واقع بسط مرتبه اول سری‌های تیلور می‌باشد. ایده اصلی مدل بیلینیر نیز غیرخطی بودن بسط مرتبه دوم سری تیلور است (Tsay, 2002: 85). شکل کلی مدل بیلینیر به صورت زیر می‌باشد:

$$Z_t = \sum_{i=1}^p (\theta_i Z_{t-i}) - \sum_{j=1}^q (\theta_j \varepsilon_{t-j}) + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (\beta_{ij} \cdot Z_{t-i} \cdot \varepsilon_{t-j}) + \varepsilon_t \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، Z_t سری زمانی موردنظر، p ، q ، r و s اعداد صحیح مثبت که رسته یا مرتبه مدل بیلینیر را نشان می‌دهند، β ، θ و ϕ ضرایب مدل و ε_t : سری تصادفی نرمال و استاندارد می‌باشد. مدل بیلینیر در واقع مدل ARMA (خطی) بسط داده شده می‌باشد که عبارت غیرخطی $\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (\beta_{ij} \cdot Z_{t-i} \cdot \varepsilon_{t-j})$ به سمت راست آن اضافه شده است (Ainkaran, 2004: 40). از مدل غیرخطی بیلینیر در شاخه‌های مختلف علوم اقتصاد استفاده شده است، اما به نظر می‌رسد که تحقیقی محدود راجع به استفاده از این مدل در مدل‌سازی و پیش‌بینی تبخیر-تعرق در ایران و دیگر کشورها صورت گرفته است. به همین دلیل در این تحقیق سعی شده است تا از بین مدل‌های غیرخطی موجود، از مدل غیرخطی بیلینیر که مدل جدیدی در مطالعات منابع آب می‌باشد، استفاده شود. بنابراین، مدل

¹ Bilinear Model

ARMA، به‌عنوان مدل خطی و مدل BL بعنوان مدل غیرخطی جهت مدل‌بندی سری زمانی ET_0 مرجع مورد استفاده قرار گرفت.

به‌منظور بررسی نرمال بودن سری زمانی ET_0 در ایستگاه‌های مورد مطالعه آزمون چولگی بکار رفت. به‌منظور تبدیل سری زمانی مربوطه به حالت نرمال نیز از رابطه $Y_t = \sqrt{(X_t \pm R)}$ که در آن X_t سری زمانی اصلی (مقدار ET_0 ماهانه)، Y_t سری زمانی نرمال شده (مقدار نرمال متغیر X) و R عدد حقیقی می‌باشد، استفاده شد. به‌منظور استاندارد نمودن سری زمانی نرمال شده نیز رابطه $Z_t = \frac{Y_t - \bar{Y}}{S}$ ، که در آن \bar{Y} و S به‌ترتیب میانگین و انحراف‌معیار سری زمانی نرمال شده می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت. محاسبات مذکور در نرم‌افزار Excel انجام یافت. جهت آزمون ایستا بودن سری مربوطه از دو روش ADF¹ و KPSS² تعریف شده در نرم‌افزار Eviews استفاده شد (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۰). جزئیات بیشتر مربوط به این دو روش در مطالعه خلیلی و همکاران (۱۳۸۹) ارائه شده است. پس از پیش‌پردازش داده‌های سری زمانی، نوبت به تعیین الگوی مناسب جهت مدل‌سازی می‌رسد. در این مطالعه، ابتدا ۸۰ درصد داده‌ها (دوره آماری ۲۰۰۹-۱۹۹۰) مدل شده و پارامترهای مربوطه به‌دست آمد (مرحله واسنجی). سپس با بکارگیری ۲۰ درصد باقی‌مانده از داده‌ها (دوره آماری ۲۰۱۴-۲۰۱۰) در مدل حاصله، پیش‌بینی انجام شد و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفت (مرحله صحت‌سنجی). برای پیش‌بینی نهایی، کل داده‌ها (دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۹۰) مدل شده و پس از بررسی پنج سال انتهایی سری زمانی (۲۰۱۴-۲۰۱۰) (مرحله آزمون)، اقدام به پیش‌بینی پنج سال آتی (۲۰۱۹-۲۰۱۵) شد. برای بیان کمی تفاوت بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل مربوطه، شاخص‌های آماری همچون ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط خطای نسبی (e) مورد استفاده قرار گرفت.

¹ Augmented Dickey Fuller Test

² Kwiatkowski Phillips Schmidt Shin Test

آزمون نکوئی برازش مدل

برای بررسی نکوئی برازش مدل منتخب (خطی و غیرخطی)، از آزمون پورت‌مانتو استفاده شد. به منظور بکارگیری این آزمون، ابتدا سری باقی‌مانده مدل به دست آمد. سپس، برای تعداد تاخیر مشخص، ضرایب خودهمبستگی سری محاسبه شده و آماره پورت‌مانتو (Q) توسط رابطه (۴) محاسبه گردید.

$$Q = (N - D) \sum_{k=1}^L r_k^2(\varepsilon) \quad (4)$$

که در آن N تعداد داده‌ها، L حداکثر تعداد تاخیر، D تعداد تفاضل‌ها و $r_k^2(\varepsilon)$ کورولوگرام^۱ باقی‌مانده‌ها می‌باشد. آماره آزمون پورت‌مانتو دارای توزیع کی‌دو با درجه آزادی L-p-q است و در صورتی که $Q \leq \chi_{(1-\alpha), (L-p-q)}^2$ باشد، مقادیر ε ناهمبسته بوده و مدل نظیر آن کفایت لازم را دارد (Salas et al., 1980: 89). در این مطالعه سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ (سطح اطمینان ۹۵٪) در نظر گرفته شد.

مقایسه عملکرد مدل‌های خطی و غیرخطی

به منظور مقایسه عملکرد دو مدل خطی و غیرخطی، از آزمون دایبلد و ماریانو^۲ که از دقت بالاتری نسبت به RMSE برخوردار است، استفاده شده است (عباسی و باقری، ۱۳۹۰: ۱۰۳). علی‌رغم کاربرد وسیع آزمون مذکور در شاخه‌های مختلف علوم نظیر اقتصاد، ولی کاربرد زیادی در علوم آب نداشته است. دایبلد و ماریانو این آزمون را به منظور مقایسه قدرت پیش‌بینی دو مدل ارائه دادند. آنها بدین منظور یک تابع تفاضلی از مقدار خطای مدل‌ها را در نظر گرفتند. فرض صفر این آزمون در رابطه ۵ ارائه می‌شود (Diebold and Mariano, 1995: 257). شکل ۱ فلوچارت کاربرد این آزمون را نشان می‌دهد.

$$d_t = E[g(e_t^A) - g(e_t^B)] = 0 \quad (5)$$

¹ Correlogram

² Diebold & Mariano

تابع g اغلب توان دوم خطاهای پیش‌بینی است. حال اگر n مشاهده و پیش‌بینی h وقفه زمانی بعد را در نظر بگیریم، آماره آزمون با استفاده از روابط (۶) تا (۹) محاسبه می‌شود.

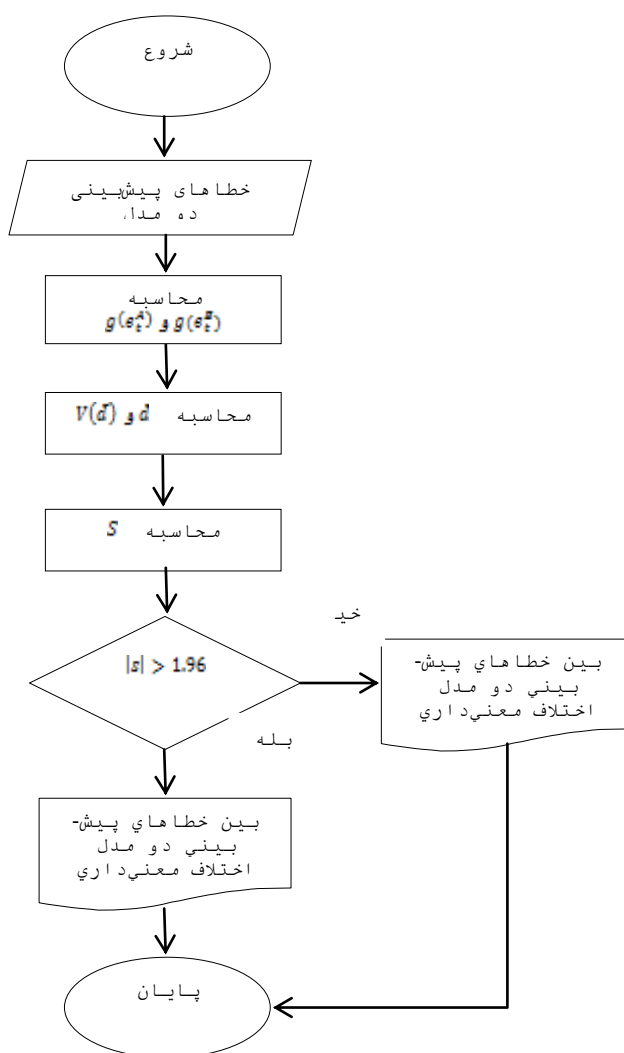
$$S = \frac{\bar{d}}{[v(\bar{d})]^{\frac{1}{2}}} \quad (۶)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{t=1}^n d_t}{n} \quad (۷)$$

$$v(\bar{d}) = \frac{[\hat{\gamma}_0 + 2 \sum_{k=1}^{h-1} \hat{\gamma}_k]}{n} \quad (۸)$$

$$\hat{\gamma}_k = \frac{\sum_{t=k+1}^n [(d_t - \bar{d})(d_{t-k} - \bar{d})]}{n} \quad (۹)$$

که در آن $\hat{\gamma}_k$ k امین خود کوواریانس d_t می‌باشد. (Diebold and Mariano (1995: 260) نشان دادند که با فرض صفر تساوی اعتبار پیش‌بینی دو مدل، S تقریباً دارای توزیع نرمال است؛ در این صورت، در سطح اطمینان ۹۵ درصد، اگر $|s| > 1.96$ باشد، فرض صفر رد شده و می‌توان نتیجه گرفت که بین خطاهای پیش‌بینی دو مدل اختلاف معنی‌داری وجود دارد.



شکل (۱) نحوه محاسبه مقدار آزمون دایبلد و ماریانو

یافته‌ها و بحث

سری زمانی ET_0

برای آماده‌سازی سری زمانی مربوطه برای ورود به نرم‌افزار و به‌منظور ارائه مراتب مناسب مدل، بعد از تکمیل نمودن داده‌ها و اطمینان از عدم وجود داده پرت، داده‌ها نرمال و استاندارد شدند. از آنجا که ایستا بودن داده‌ها شرط اساسی ورود آنها به مدل می‌باشد، ایستا بودن داده‌ها توسط دو آزمون ADF و KPSS مورد بررسی قرار گرفت. تفاضل‌گیری مرتبه یک از داده‌ها، باعث ایستا شدن آنها شده و شرط لازم برای ورود به مدل را محقق ساخت. جدول ۲ نتایج دو آزمون ADF و KPSS را برای سری زمانی ET_0 نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این جدول و نیز با توجه به مقادیر بحرانی آزمون ADF $(-2/871)$ و آزمون KPSS $(0/463)$ در سطح اطمینان ۹۵ درصد که با استفاده از نرم‌افزار Eviews محاسبه شد، می‌توان نتیجه گرفت که سری زمانی مربوط به ایستگاه‌های مورد مطالعه ایستا می‌باشد.

جدول (۲) نتایج آزمون‌های ADF و KPSS مربوط به سری زمانی ET_0 در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	آماره ADF	آماره KPSS
اردبیل	-۱۳/۹۹۲	۰/۰۹۴
تبریز	-۱۷/۲۳۳	۰/۱۸۴
رشت	-۱۱/۶۶۲	۰/۱۹۷

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

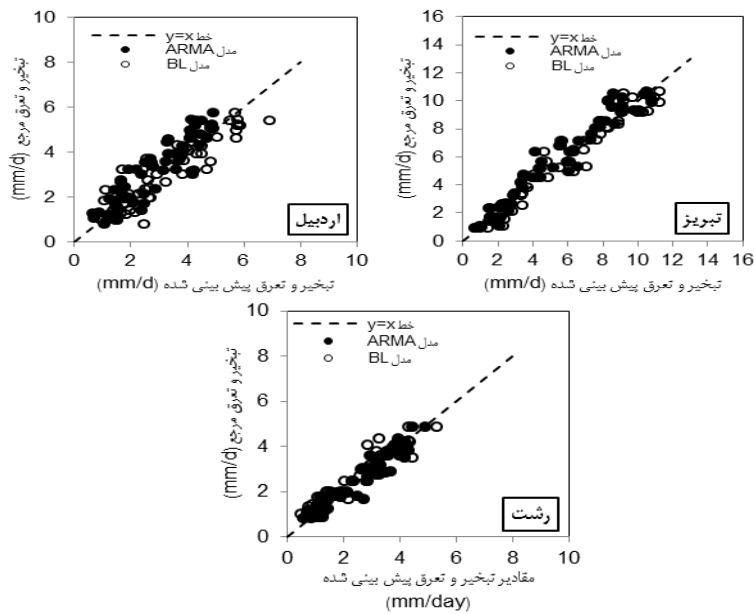
جهت واسنجی مدل، برازش مدل خطی ARMA و غیرخطی BL برای ۸۰ درصد از داده‌های ایستا شده انجام و مدل برتر تعیین شد. جدول ۳، مدل برتر به همراه نتایج آزمون پورت‌مانتو را در مرحله واسنجی نشان می‌دهد.

جدول (۳) نتایج مدل خطی و غیرخطی برازش داده شده برای سری زمانی ET₀ در مرحله واسنجی

ایستگاه	مدل خطی برتر	آماره Q	مدل غیرخطی برتر	آماره Q
رشت	ARMA(1, 5)	۶۰/۹۷۷	BL(1,5, 1,1)	۹۰/۵۶۴
اردبیل	ARMA(1, 5)	۷۰/۸۹۱	BL(1,5, 1,1)	۸۷/۳۷۰
تبریز	ARMA(2, 4)	۶۸/۰۶۶	BL(2,4, 1,1)	۱۰/۱۲۶۵

با توجه به نتایج آزمون پورت‌مانتو در جدول ۳ و مقایسه نتایج حاصل با مقدار جدول کی‌دو در سطح اطمینان ۹۵ درصد و نیز با توجه به معیارهای انتخاب مدل برتر، مدل‌های انتخابی خطی و غیرخطی، مدل مناسبی برای هر ایستگاه می‌باشند. با انتخاب مدل برتر برای هر ایستگاه، ۲۰ درصد بقیه داده‌ها توسط مدل حاصل پیش‌بینی شد (مرحله صحت-سنجی). نتایج مقایسه آمار تبخیر و تعرق مرجع با مقادیر پیش‌بینی شده (به مدت پنج سال) با استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی به صورت گرافیکی در شکل‌های ۲ و ۳ برای همه ایستگاه‌ها ارائه شده است. نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که هر دو مدل خطی و غیرخطی خصوصاً در ایستگاه‌های تبریز و رشت توانسته‌اند مقادیری نزدیک به مقدار مرجع ارائه دهند. این توانایی در سال‌های ابتدایی پیش‌بینی بیشتر بوده و تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده و مرجع در ایستگاه اردبیل بیشتر از دو ایستگاه دیگر است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، مدل سری زمانی در ایستگاه تبریز بهتر از ایستگاه رشت و در ایستگاه رشت بهتر از ایستگاه اردبیل، مقادیر ET₀ را پیش‌بینی نموده است. شکل ۳ نیز توافق خوب مقادیر حاصل از مدل‌های خطی و غیرخطی با مقادیر مرجع را در سال‌های ابتدایی خصوصاً در ایستگاه تبریز نشان می‌دهد. برای کمی نمودن میزان توافق بین مقادیر مرجع و پیش‌بینی شده، از شاخص‌های آماری استفاده شد. جدول ۴ نتایج شاخص‌های آماری حاصل از مرحله صحت-سنجی را نشان می‌دهد. نتایج جدول ۴ بیان‌کننده قابلیت مدل‌های انتخابی در مرحله صحت‌سنجی می‌باشد. شاخص‌های آماری در این جدول نشان می‌دهد که مدل ARMA

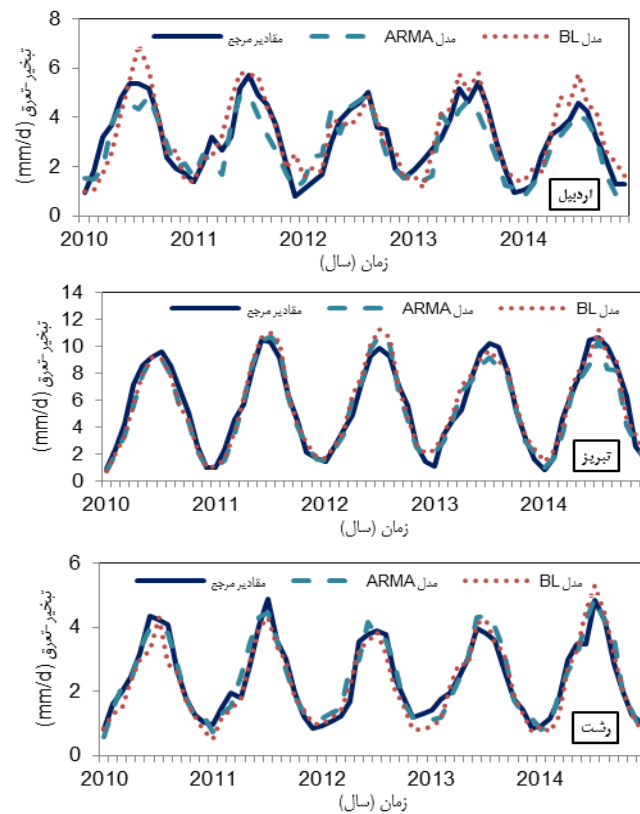
نسبت به مدل BL مقادیر کمتری از شاخص‌های خطا و مقدار بیشتری از ضریب تبیین ارائه نموده است و این امر قابلیت نسبتاً بیشتر مدل ARMA را در مقایسه با مدل BL جهت مدل‌بندی سری زمانی ET_0 در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنین مقدار کم ضریب β برای هر سه ایستگاه (± 0.05) که بخش غیرخطی را به مدل خطی ARMA اضافه می‌کند، نیز نشان‌دهنده تاثیر کم بخش غیرخطی در توصیف سری مربوطه است.



شکل (۲) مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده ET_0 توسط مدل‌های خطی و غیرخطی با مبنا قرار دادن مقادیر تبخیر و تعرق مرجع در مرحله صحت‌سنجی (خط چین: خط $y=x$)

جدول (۴) شاخص‌های آماری مربوط به هر ایستگاه در مرحله صحت‌سنجی

ایستگاه	مدل ARMA			مدل BL		
	e	R^2	RMSE (mm/d)	e	R^2	RMSE (mm/d)
اردبیل	0/201	0/823	0/653	0/228	0/818	0/691
تبریز	0/123	0/947	0/555	0/137	0/947	0/526
رشت	0/139	0/918	0/350	0/141	0/910	0/387



شکل (۳) مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده ET_0 توسط مدل‌های خطی و غیرخطی با مقادیر تبخیر و تعرق مرجع در مرحله صحت‌سنجی

پیش‌بینی

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، می‌توان چنین استنباط نمود که هر دو مدل خطی و غیرخطی، خصوصا مدل خطی، در مدل‌بندی و پیش‌بینی سری زمانی ET_0 در ایستگاه‌های مورد مطالعه، خصوصا تبریز و رشت، توانایی نسبتا بالایی داشته و می‌توان نسبت به پیش‌بینی ET_0 توسط دو مدل اشاره شده اقدام نمود. همانند مرحله واسنجی،

مدل‌های مختلف به سری مربوطه برازش داده شدند؛ با این تفاوت که در این مرحله، کل داده‌ها به عنوان یک سری منظور شد.

جدول ۵ مدل برتر را برای هر ایستگاه با در نظر گرفتن کل داده‌ها به عنوان سری نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۵ و با در نظر گرفتن معیارهای انتخاب مدل برتر در سطح اطمینان ۹۵ درصد، مشخص شد که مدل‌های انتخابی مدل مناسبی برای هر ایستگاه می‌باشد. به منظور آزمون کارایی مدل انتخابی، مقادیر پنج سال انتهایی مدل شده توسط مدل‌های خطی و غیرخطی با مقادیر مرجع مورد مقایسه قرار گرفته و شاخص‌های آماری تعیین شد. جدول ۶ نتایج این شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۵) نتایج مدل خطی ARMA و غیرخطی BL برازش داده شده برای کل سری زمانی ET₀ (مرحله آزمون)

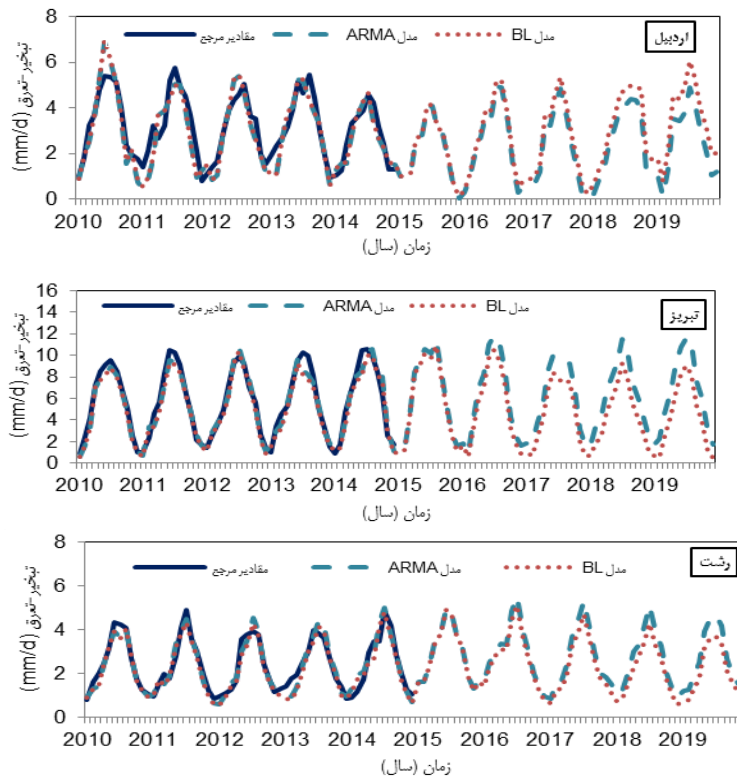
ایستگاه	مدل خطی	آماره Q	مدل غیرخطی	آماره Q
اردبیل	ARMA(1,5)	۷۶/۸۶۰	BL(1,5,1,1)	۷۶/۴۸۰
تبریز	ARMA(3,2)	۸۰/۲۶۷	BL(3,2,1,1)	۸۲/۲۰۲
رشت	ARMA(1,5)	۷۳/۷۴۰	BL(1,5,1,1)	۷۶/۹۸۵

جدول (۶) نتایج شاخص‌های آماری مربوط به مدل‌های ARMA و BL در مرحله آزمون

ایستگاه	مدل ARMA			مدل BL		
	e	R ²	RMSE	e	R ²	RMSE
اردبیل	0/209	0/844	0/667	0/209	0/842	0/662
تبریز	0/119	0/958	0/495	0/132	0/959	0/582
رشت	0/143	0/916	0/359	0/147	0/922	0/375

نتایج جدول ۶ قابلیت مدل‌های انتخابی را در مرحله آزمون نشان می‌دهد. نتایج این جدول همانند جدول ۴ حاکی از قابلیت مدل سری زمانی در مدل‌بندی و پیش‌بینی سری ET₀ می‌باشد. مطالعات محققین دیگر نیز قابلیت مدل‌های سری زمانی را در مدل‌بندی سری ET₀ به اثبات رسانیده است. فولادمند (۱۳۸۹: ۱۵۷)، نیز تفاوت معنی‌داری بین مقادیر محاسبه شده با مقادیر پیش‌بینی شده ET₀ مشاهده نکرد. شیروانی و هنر (۱۳۹۰: ۱۳۵)، بر اساس نتایج حاصله (مقدار ضریب تعیین ۰/۹۹ برای مقیاس ماهانه) بیان داشتند که از مدل

سری زمانی می‌توان برای پیش‌بینی و مدل‌سازی مقادیر میانگین ماهانه تبخیر-تعرق ایستگاه مورد مطالعه استفاده کرد. با توجه به نتایج جداول ۴ و ۶ می‌توان به نتایج پیش‌بینی با دقت خوب امیدوار بود. شکل ۴ نتایج حاصل از پیش‌بینی مقادیر ET_0 توسط مدل‌های انتخابی را برای سال‌های بدون آمار ۲۰۱۵ الی ۲۰۱۹ در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که روند پیش‌بینی هر دو مدل خطی و غیر خطی تقریباً یکسان می‌باشد.



شکل (۴) مقادیر مرجع و پیش‌بینی شده ET_0 با استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی

مقایسه عملکرد مدل خطی با مدل غیرخطی

جهت مقایسه عملکرد مدل خطی با مدل غیرخطی، از آزمون دایلد و ماریانو استفاده شد. برای انجام این آزمون، مقادیر مدل شده مورد استفاده قرار گرفت (نه مقادیر پیش‌بینی شده). همانطور که اشاره شد، مدل‌بندی داده‌ها توسط مدل‌های سری زمانی یک بار برای ۸۰ درصد داده‌ها و یک بار برای کل داده‌ها انجام گرفت. نتایج این آزمون در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد به جز در مرحله مدل‌بندی کل داده‌ها در ایستگاه اردبیل، هیچ اختلاف معنی‌داری بین مقادیر حاصله از مدل‌های خطی با مقادیر حاصل از مدل‌های غیرخطی وجود ندارد. کمترین اختلاف بین مدل‌های خطی و غیرخطی در ایستگاه رشت بوده و بیشترین اختلاف مربوط به ایستگاه اردبیل می‌باشد.

جدول (۷) مقادیر آماره آزمون دایلد و ماریانو (S)

ایستگاه	۸۰ درصد داده‌ها	کل داده‌ها
اردبیل	-1/779	-3/011
تبریز	0/591	-1/679
رشت	0/571	0/683

نتیجه‌گیری

تخمین صحیح مقدار تبخیر-تعرق مرجع، عاملی کلیدی در مدیریت منابع آب می‌باشد. براین اساس، مدل‌بندی ET_0 محاسبه شده با استفاده از رابطه فائوپنمن-مانتیث ۵۶ در سه ایستگاه مختلف کشور توسط مدل خطی ARMA و غیرخطی BL انجام گرفت. مرتبه‌های مدل برتر خطی و غیرخطی توسط معیارهای انتخاب مدل برتر تعیین شد. مقادیر ET_0 برآورد شده طی سال‌های ۲۰۰۹-۱۹۹۰ برای واسنجی و مقادیر سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۰ برای صحت‌سنجی مدل‌های خطی و غیرخطی انتخاب شده به عنوان مدل برتر مورد استفاده قرار گرفت. بررسی نتایج حاصل از صحت‌سنجی نشان داد که هر دو مدل خطی و

غیرخطی با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی مقادیر ET_0 می‌باشند. بعد از اطمینان از قابلیت مدل‌های سری زمانی در پیش‌بینی ET_0 ، در مرحله بعد، کل سری داده‌های موجود (۲۰۱۴-۱۹۹۰) با استفاده از هر دو مدل خطی و غیرخطی مدل شده و مدل برتر انتخاب شد. با مدل نمودن سری زمانی ET_0 توسط مدل انتخابی جدید، نتایج مربوط به سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۰ با استفاده از شاخص‌های آماری آزمون شد (مرحله آزمون). نتایج شاخص‌های آماری مرحله آزمون نیز توانایی هر دو مدل خطی و غیرخطی در مدل‌بندی سری زمانی ET_0 را نشان داد. پس از اطمینان از قابلیت مدل، پیش‌بینی سال‌های بدون آمار (۲۰۱۹-۲۰۱۵) در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه انجام یافت. به‌کارگیری آزمون دایبلد و ماریانو جهت مقایسه عملکرد دو مدل خطی و غیرخطی، عدم وجود اختلاف معنی‌دار را بین دو مدل، جز در مرحله مدل‌بندی کل داده‌ها در ایستگاه اردبیل، نشان داد.

منابع

- آزادلاتپه، نسرین؛ بهمنش، جواد و مجید منتصری، (۱۳۹۲)، «پیش بینی تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از مدل های سری زمانی»، *مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۷، شماره ۱، صص ۲۲۳-۲۱۳.
- آزادلاتپه، نسرین؛ بهمنش، جواد؛ منتصری، مجید و وحید رضوردی‌نژاد، (۱۳۹۴)، «مقایسه روش های سری زمانی و شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی تبخیر-تعرق مرجع (مطالعه موردی: ارومیه)»، *مجله علوم و مهندسی آبیاری*، جلد ۳۸، شماره ۴، صص ۷۵-۸۵.
- بهمنش، جواد؛ آزادلاتپه، نسرین؛ منتصری، مجید و سینا بشارت، (۱۳۹۳)، «ارزیابی مدل های سری زمانی خطی و غیرخطی بی‌لینیبیر در پیش بینی تبخیر-تعرق گیاه مرجع در ایستگاه سینوپتیک ارومیه»، *مجله پژوهش آب در کشاورزی*، جلد ۲۸، شماره ۱، صص ۸۵-۹۶.
- بختیاری، بهرام؛ لیاقت، عبدالمجید؛ خلیلی، علی و محمدجواد خانجانی، (۱۳۸۸)، «ارزیابی دو مدل ترکیبی برآورد تبخیر-تعرق مرجع چمن در بازه زمانی ساعتی (مطالعه موردی اقلیم کرمان)»، *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (علوم آب و خاک)*، جلد ۱۳، شماره ۵۰، صص ۲۶-۱۳.
- خلیلی، کیوان؛ فاخری فرد، احمد؛ دین پژوه، یعقوب و محمدعلی قربانی، (۱۳۸۹)، «تحلیل روند و ایستایی جریان رودخانه به منظور مدل سازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی»، *مجله دانش آب و خاک*، جلد ۲۰/۱، شماره ۱، صص ۶۱-۷۲.
- خلیلی، کیوان؛ رضوردی‌نژاد، وحید و نوید پرچمی، (۱۳۹۰)، «تحلیل ایستایی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی با استفاده از نرم افزار Eviews (مطالعه موردی رودخانه شهرچای ارومیه)»، *مجموعه مقالات یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر*، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- خورشیددوست، علی‌محمد؛ صنیعی، راحله و یوسف قویدل‌رحیمی، (۱۳۸۸)، «پیش‌بینی دماهای کرانگین اصفهان با استفاده از روش سری‌های زمانی»، *مجله فضای جغرافیایی*، دوره ۹، شماره ۲۶، صص ۴۸-۳۱.

- زارع‌ایبانه، حمید، سقائی، صبا، ارشادفتح، فرناز و حامد نوذری، (۱۳۹۳)، «مدلسازی و پیش‌بینی تبخیر-تعرق گیاه مرجع با سری زمانی (مطالعه موردی: استان کرمانشاه)»، *مجله هواشناسی کشاورزی*، جلد ۲، شماره ۱، صص ۴۵-۵۶.
- شیروانی، امین و تورج هنر، (۱۳۹۰)، «کاربرد مدل‌های سری‌های زمانی برای پیش‌بینی تبخیر-تعرق در ایستگاه باجگاه»، *مجله پژوهش آب ایران*، سال ۵، شماره ۸، صص ۱۳۵-۱۴۲.
- عباسی، ابراهیم و سحر باقری، (۱۳۹۰)، «پیش‌بینی بازده سهام با استفاده از مدل‌های غیرخطی آستانه‌ای و بررسی نقش حجم معاملات در بهبود عملکرد این مدل‌ها»، *مجله تحقیقات مالی*، دوره ۱۳، شماره ۳۲، صص ۹۱-۱۰۸.
- فولادمند، حمیدرضا، (۱۳۸۹)، «پیش‌بینی ماهانه تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در استان فارس»، *مجله دانش آب و خاک*، جلد ۲۰/۱، شماره ۴، صص ۱۶۹-۱۵۷.
- قهرمان، نوذر و ابوذر قره‌خانی، (۱۳۹۰)، «ارزیابی مدل‌های تصادفی سری زمانی در برآورد تبخیر از تشت (مطالعه موردی: ایستگاه شیراز)»، *مجله پژوهش آب در کشاورزی*، دوره ۲۵، شماره ۱ (ب)، صص ۷۵-۸۱.
- ولیزاده‌کامران، خلیل، (۱۳۹۳)، «برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در آذربایجان شرقی به روش استفتن با استفاده از GIS»، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۱۸، شماره ۴۹، صص ۳۱۷-۳۳۴.
- ولیزاده‌کامران، خلیل، (۱۳۹۴)، «برآورد تبخیر-تعرق واقعی به روش سبال کوهستانی در منطقه مشکین‌شهر»، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۱۹، شماره ۵۳، صص ۳۸۲-۳۵۳.
- Ahn, H. (2000), "Modeling of groundwater heads based on second order difference time series modelings", *Journal of Hydrology*, 234: 82-94.
- Ainkaran, P. (2004), "Analysis of some linear and nonlinear time series models", A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, School of Mathematics and Statistics, University of Sydney.

- Borland, P. and A. Montana, (1996), "Forecasting of storm rain fall by combined use of rider, rain gages and linear models", *Atmospheric research*, 42: 199-216.
- Diebold, FX, Mariano, RS (1995), "Computing predictive accuracy", *Business and Economic Statistics*, 13: 253-263.
- Hupet, F., M. Vanclooster, (2001), "Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration", *Journal of Hydrology*, 243: 192-204.
- Kisi, O. (2010), "Fuzzy Genetic Approach for modeling Reference Evapotranspiration", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(3): 175-183.
- Kumar, M., Raghuwanshi, N.S., Singh, R., Wallender, W.W. and W.O. Pruitt (2002), "Estimating evapotranspiration using artificial neural network", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(4): 224- 233.
- Laux, P., Vogl, S., Qiu, W., Knoche, H.R. and H. Kunstmann (2011), "Copula-based statistical refinement of precipitation in RCM simulations over complex terrain", *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 2401-2419.
- Li, Y., Horton, R., Ren, T. and C. Chen (2010), "Prediction of annual reference evapotranspiration using climatic data", *Journal of Agricultural Water Management*, 97: 300-308.
- Padilla, A., Puldo-Bosch, A., Cavache, M., and A. Vallejos, (1996), "The ARMA model applied to the flow of Karst Springs", *Journal of Water resources bulletin*, 32: 917-928.
- Salas, J.D., Dellear, J.W., Yevjevich, V. and W.L. Lane (1980), "Applied modeling of hydrologic time series", Water Resources Publications, Colorado.
- Salas, J.D. (1993), "Analysis and modeling of hydrological time series", Maidment, McGraw-Hill Publications, New York.

- Tiba, C. and N. Fraidenraich (2004), "Analysis of monthly time series of solar radiation and sunshine hours in tropical climates", *Journal of Renewable Energy*, 29: 1147-1160.
- Tsay, R.S. (2002), "Analysis of financial time series", University of Chicago, Wiley publication, New York.
- Zanetti, S.S., Sousa, E.F., Oliveira, V.P.S., Almeida, F.T. and S. Bernardo (2007), "Estimating evapotranspiration using artificial neural network and minimum climatological data", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(2): 83-89.
- Zheng, C., Wang, Q. and P. Li (2016), "Coupling SEBAL with a new radiation module and MODIS products for better estimation of evapotranspiration", *Journal of Hydrological Sciences*, 61(8): 1535-1547.