

برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از مدل‌های تجربی، مدل‌سازی آن با شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن‌ها با داده‌های لایسیمیتری (مطالعه موردی: کشت و صنعت نیشکر سلمان فارسی)

عاطفه صیادی شهرکی^{۱*}، عبدعلی ناصری^۲، سعید برومندنسب^۳، امیر سلطانی محمدی^۴

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز

۲ و ۳- استاد گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- استادیار گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز

(تاریخ دریافت: ۹۹/۰۳/۰۳، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۲۵)

چکیده

تبخیر و تعرق یک پدیده چند متغیره و پیچیده است که به عوامل متعدد اقلیمی بستگی دارد و دقیق‌ترین روش برای برآورد آن، لایسیمیتر است. اما استفاده از لایسیمیتر، مستلزم وقت و هزینه زیادی است، از این رو تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از پارامترهای هواشناسی و مدل‌های تجربی انجام می‌گیرد. این مدل‌ها دارای ضرایبی هستند که معرف شرایط منطقه‌ای است که مدل در آن منطقه، واسنجی شده است؛ لذا کاربرد این مدل‌ها برای هر منطقه، نیاز به بررسی دارد. امروزه شبکه‌های عصبی مصنوعی کاربردی بسیاری در مسائل مختلف مهندسی آب که رابطه و الگوی مشخصی بین عوامل مؤثر بر وقوع یک پدیده وجود ندارد، پیدا کرده‌اند. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی مدل شبکه عصبی و مدل‌های تجربی در برآورد تبخیر و تعرق گیاه با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه و داده‌های لایسیمیتری ۳ ساله (فروردین ۱۳۹۵ تا اسفند ۱۳۹۷)، برای کشت و صنعت نیشکر سلمان فارسی می‌باشد. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی نسبت به مدل‌های تجربی به کار رفته، عملکرد مناسب‌تری داشته و دارای RMSE، MAE و R^2 به ترتیب ۰/۱۲۵، ۰/۲۴ و ۰/۹۷ برابر میلی‌متر بر روز می‌باشد و همچنین در بین مدل‌های تجربی، مدل پنمن-فائو-مانیت با RMSE، MAE و R^2 به ترتیب ۲/۰۷، ۳/۰۹ و ۰/۹۱ برابر میلی‌متر بر روز در اولویت قرار دارد. همچنین برای ارزیابی دقت مدل شبکه عصبی با کاهش پارامترهای اقلیمی ۱۰ سناریو تعریف شد. نتایج نشان داد از میان تمامی متغیرهای هواشناسی، دمای حداکثر، دمای حداقل و سرعت باد اهمیت بیش‌تری در برآورد تبخیر و تعرق دارند.

کلمات کلیدی: تبخیر و تعرق، شبکه عصبی مصنوعی، لایسیمیتر، مدل‌های تجربی.

مقدمه

میان مولفه‌های سیستم خاک-گیاه و اتمسفر می‌باشد (Keskin et al., 2009). تبخیر و تعرق از عمده‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژیکی است که تخمین درست آن در طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری و مطالعات منابع آب از اهمیت زیادی برخوردار است. تخمین بیش از حد آب مورد نیاز گیاه ضمن هدر دادن آب آبیاری، باعث ماندابی شدن اراضی، شست‌وشوی مواد غذایی خاک و آلوده نمودن منابع آب زیرزمینی می‌شود. ضمن آن که تخمین کم‌تر از حد مورد نیاز گیاه نیز باعث اعمال تنش رطوبتی به گیاه شده و در نتیجه کاهش محصول را به همراه خواهد داشت (Fathi and KochakZadeh., 2004). تاکنون روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری و برآورد تبخیر و تعرق ارائه شده است. دقیق‌ترین

تبخیر فرآیندی است که در نتیجه آن آب از خاک و توده‌های آب موجود در کره زمین به اتمسفر باز می‌گردد. اهمیت تبخیر از آن‌جا آشکار می‌شود که سالانه میلیون‌ها مترمکعب آب‌های شور و شیرین موجود در دریاها، دریاچه‌های طبیعی و مصنوعی، سدها و... تبخیر یافته و به هدر می‌روند (Rosenberry et al., 2007). انجام فرآیند تبخیر سبب تغییر در فرآیند گردش هیدرولوژیکی آب در طبیعت آن منطقه می‌شود. با توجه به میزان اندک نزولات جوی و محدودیت منابع آب در ایران، مدیریت صحیح منابع آب از اهمیت زیادی برخوردار بوده و لازم است که در استفاده از آب دقت لازم به عمل آید. تبخیر و تعرق^۱ از سطح خاک و گیاه، دشوارترین مولفه چرخه هیدرولوژیکی به دلیل فعل و انفعالات پیچیده

^۱ Evapotranspiration

در تعداد پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در صورت استفاده از پارامتر دما، می‌توان تبخیر و تعرق پتانسیل را در تمامی ایستگاه‌ها به‌خوبی برآورد نمود. در بررسی که توسط (Wang) و همکاران (۲۰۰۸)، در منطقه بورکینافاسو در آفریقا انجام شد، نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی با داده‌های دمایی حداکثر و حداقل و تابش فرازمینی به‌عنوان ورودی، در مقایسه با روش بلانی کریدل و هارگریوز در نواحی با اقلیم نیمه‌خشک از دقت بیش‌تری برخوردار است. (Heydari) و همکاران (۲۰۱۳)، به تخمین روش‌های تجربی مختلف برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع پرداختند. آن‌ها به کمک داده‌های ایستگاه نائین در بازه زمانی ۱۹۹۳-۲۰۰۶ به تخمین هریک از مدل‌ها پرداختند. مقایسه این مدل‌ها با روش پنمن موتیث فائو و بررسی شاخص-های آماری نشان داد که روش بلانی کریدل بهترین همبستگی را با روش پنمن موتیث فائو دارد. (Citakoglu) و همکاران (۲۰۱۴)، میانگین تبخیر و تعرق را با استفاده از مدل‌های عصبی- فازی و شبکه عصبی مصنوعی تخمین زدند. آن‌ها دریافتند که هر دو مدل برآورد بهتری نسبت به روش کلاسیک دارند. ملکی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۳)، با استفاده از فن‌های هوش محاسباتی و همچنین روش‌های آماری چندمتغیره، به تحلیل حساسیت عوامل موثر بر تبخیر و تعرق مرجع بر پایه روش فائو مانتیث در مناطق غرب و شمال غرب ایران پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد روش شبکه عصبی نسبت به روش درختی تصمیم و تحلیل عاملی برای تعیین مهم‌ترین پارامترهای تبخیر و تعرق کارایی بهتری دارد. در پژوهشی دیگر عبدالله‌پور آزاد و ستاری (۱۳۹۴)، جریان روزانه رودخانه اهرچای را با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی پیش‌بینی کرده و سپس آن را با سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی، مقایسه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد روش سیستم استنتاج فازی- عصبی دقت قابل قبولی دارد. از پژوهش‌های دیگر در خصوص برآورد تبخیر تعرق با استفاده از مدل‌های تجربی و شبکه عصبی مصنوعی می‌توان به کوچک‌زاده و بهمنی (۱۳۸۴)، زارع ایبانه و همکاران (۱۳۸۹)، طلاپه و

روش بدست آوردن تبخیر تعرق پتانسیل، استفاده از لایسیمتر^۱ است. که البته این روش به دلیل زمان‌بر بودن و هزینه زیاد مقرون به صرفه نمی‌باشد، بنابراین پژوهشگران بسیاری تلاش نمودند تا با ایجاد رابطه‌های مختلف برآورد این مؤلفه مهم سیکل هیدرولوژی را سهل‌تر نمایند (Kumar et al., 2002). سازمان خوارو بار جهانی (فائو)، در نشریه ۵۶، رابطه پنمن- مانتیث را که دارای اساس فیزیکی هست، به‌عنوان روش مناسب برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل پیشنهاد نموده است (Allen et al., 1998). از آن‌جا که تبخیر و تعرق پدیده‌ای غیرخطی و پیچیده است و پارامترهای هواشناسی بسیاری در برآورد آن مؤثرند و از طرفی به علت اندازه‌گیری نکردن برخی از این متغیرها در بعضی نقاط، امروزه کارشناسان تمایل دارند از روش‌هایی که بتوانند برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل را با حداکثر دقت و حداقل تعداد پارامترهای مورد نیاز انجام دهند، استفاده نمایند (Wang et al., 2008). البته رابطه‌های تجربی بسیاری از جمله هارگریوز و بلانی کریدل برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل پیشنهاد شده‌اند که نیاز به پارامترهای ورودی کمی دارند اما این رابطه‌ها در همه نواحی اقلیمی دقت خوبی ندارند، بنابراین استفاده از آن‌ها با خطای زیادی همراه است (Jensen et al., 1990). شبکه‌های عصبی مصنوعی^۲ ابزاری موثر برای مدل کردن سیستم‌های غیرخطی هستند. زیرا این شبکه‌ها نیازی به رابطه ریاضی برای پدیده‌های پیچیده ندارند (Kumar et al., 2002). تاکنون مطالعات زیادی در خصوص برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از روش‌های مستقیم، غیر مستقیم و مدل شبکه عصبی انجام شده است. عابدی کوپایی و همکاران (۱۳۸۷)، طی یک پژوهشی به مقایسه چهار روش تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع با داده‌های میکرو لایسیمتری در منطقه اصفهان پرداختند. ایشان معادله پنمن مانتیث فائو را دقیق‌ترین معادله و معادله تشتک تبخیر را کم دقت‌ترین معادله نسبت به سایر معادلات تبخیر و تعرق روزانه معرفی کردند. (Landeras) و همکاران (۲۰۰۸)، در پژوهشی در شمال اسپانیا، نتایج تبخیر و تعرق پتانسیل بدست آمده از روش شبکه عصبی مصنوعی در ۴ ایستگاه هواشناسی را با تغییر

1. Lysimeter

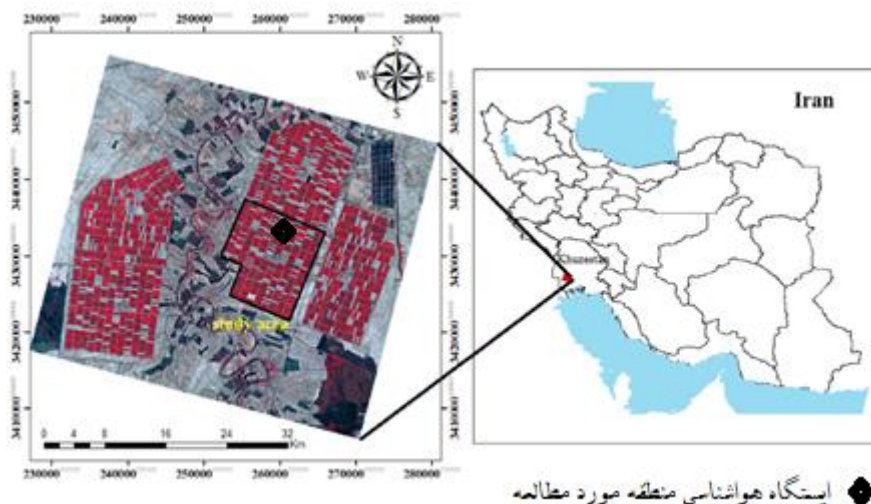
2. Artificial Neural Network

هکتار است که سالانه از ۱۰۰۰۰ هکتار آن برداشت صورت گرفته و ۲۰۰۰ هکتار آن در حال آیش و کشت مجدد است. کشت و صنعت سلمان فارسی از شمال به کشت و صنعت نیشکر دعبل خزاعی و از شرق به جاده اهواز-آبادان محدود می‌شود و پیچانرودهای رودخانه کارون بزرگ از غرب و جنوب آن را در بر گرفت اند. ایستگاه اقلیم شناسی سازمان هواشناسی کشت و صنعت سلمان فارسی با طول جغرافیایی ۲۸ ° ۴۸، عرض جغرافیایی ۵۸ ° ۳۰ و ارتفاع ایستگاه از سطح دریا ۵ متر می‌باشد که در سال ۲۰۰۳ تأسیس گردیده است. منطقه مورد تحقیق دارای اقلیم خشک با تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های معتدل می‌باشد. فصل ریزش‌های جوی از آبان ماه شروع و تا اردیبهشت ماه ادامه می‌یابد. سردترین ماه سال در منطقه دی ماه و گرم‌ترین آن مرداد ماه می‌باشد. موقعیت کشت و صنعت نیشکر سلمان فارسی در شکل (۱) نشان داده شده است.

همکاران (۱۳۹۲)، بهمنش و همکاران (۱۳۹۳)، (Nourani) و همکاران (۲۰۱۴)، (Bachour) و همکاران (۲۰۱۵)، (Kisi) و همکاران (۲۰۱۶)، حقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) و ... اشاره نمود. تعدد پارامترهای مؤثر در برآورد تبخیر-تعرق گیاه پتانسیل و از طرفی اندازه‌گیری نکردن برخی از این پارامترها در بعضی ایستگاه‌های سطح کشور سبب گردیده است، امکان برآورد دقیق آن در مناطق نام برده میسر نباشد. بنابراین هدف از پژوهش حاضر، برآورد تبخیر تعرق با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه نتایج آن با داده‌های لایسیمتری و مدل‌های تجربی در کشت و صنعت نیشکر سلمان فارسی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: کشت و صنعت نیشکر سلمان فارسی که یکی از کشت و صنعت‌های هفتگانه شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی است که در حدود ۴۰ کیلومتری جنوب اهواز واقع است. مساحت اراضی کشاورزی آن نزدیک به ۱۲۰۰۰



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی کشت و صنعت نیشکر سلمان فارسی

۱۳۹۵ تا اسفند ماه سال ۱۳۹۷ به صورت روزانه از بخش هواشناسی کشت و صنعت نیشکر سلمان فارسی دریافت گردید. همچنین به منظور برآورد تبخیر و تعرق با روش مستقیم، از اطلاعات برداشت شده از لایسیمترهای کشت و

داده‌های مورد نیاز: جهت انجام این تحقیق کلیه اطلاعات هواشناسی شامل: دمای کمینه (T_{min})، دمای بیشینه (T_{max})، دمای میانگین (T_{mean})، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (U_2)، رطوبت نسبی کمینه (RH_{min})، رطوبت نسبی بیشینه (RH_{max}) و ساعات آفتابی (N) از فروردین ماه سال

روش پنمن - مانتیث - فائو: در سال ۱۹۹۸ میلادی، سازمان خوار و بار کشاورزی (فائو) رابطه پنمن - مانتیث - فائو اصلاح شده (Allen و همکاران، ۱۹۹۸) را ارائه داد که به صورت رابطه (۲) می‌باشد.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.3 U_2)}$$

که در آن ET_0 تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر در روز)، R_n تابش خالص ورودی به سطح گیاه (مگا ژول بر متر مربع بر روز)، G شار گرمایی خاک (مگا ژول بر متر مربع بر روز)، T میانگین روزانه دمای هوا (درجه سلسیوس)، U_2 سرعت روزانه باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)، e_a فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)، e_s فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) و γ ضریب ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) می‌باشد.

روش هارگریوز - سامانی: معادله هارگریوز - سامانی (۱۹۸۵) برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر وزنی در دیویس کالیفرنیا ارائه شده است و فرم آن به صورت رابطه (۳) می‌باشد.

$$ET_0 = 0.0023 R_a (T_{mean} + 17.8) * \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (3)$$

در این رابطه T_{max} ، T_{min} و T_{mean} به ترتیب دمای حداکثر، حداقل و متوسط روزانه بر حسب درجه سلسیوس، R_a تابش فرازمینی و ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع که هر دو دارای واحد میلی‌متر در روز می‌باشند.

روش آیروماک: آیروماک و همکاران (۲۰۰۳)، با استفاده از روش رگرسیون‌گیری چند جمله‌ای و داده‌های متعلق به فلوریدا به استخراج معادله‌ای جهت برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع پرداختند که فرم آن به صورت رابطه (۴) می‌باشد.

$$ET_0 = -0.611 + 0.149 R_s + 0.079 T \quad (4)$$

در این رابطه ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز)، R_s تابش خورشیدی (مگا ژول بر متر مربع در روز) و T دمای هوای روزانه (درجه سلسیوس) می‌باشد.

صنعت نیشکر سلمان فارسی طی دوره زمانی مورد مطالعه، استفاده گردید.

روش تحقیق: برای صحت‌سنجی داده‌های دریافت شده از ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه از دستورالعمل پیوست ۵ مندرج در **FaO-56** (Allen و همکاران، ۱۹۹۸)، استفاده شد و داده‌های پرت شناسایی و حذف گردیدند. همچنین برای برآورد داده‌های غیر موجود نیز از دستورالعمل فصل سوم مندرج در **FaO-56**، استفاده شد. سپس کلیه اطلاعات هواشناسی و سایر اطلاعات منطقه مورد مطالعه از قبیل ارتفاع ایستگاه، طول و عرض جغرافیایی و ... وارد نرم افزار اکسل شد و تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش‌های تجربی برآورد گردید. مقدار تبخیر تعرق مرجع در ضرایب گیاهی موجود در ماه‌های مختلف ضرب شده و با اطلاعات ایستگاه لایسیمتری مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اجرای مدل شبکه عصبی مصنوعی از نرم افزار **MATLAB** با ورودی اطلاعات هواشناسی شامل: دمای کمینه، دمای بیشینه، دمای میانگین، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، رطوبت نسبی کمینه، رطوبت نسبی بیشینه و ساعات آفتابی و خروجی داده‌های لایسیمتری (برای شبیه‌سازی داده‌های لایسیمتری)، استفاده گردید. در نهایت به مقایسه عملکرد روش‌های تجربی و شبکه عصبی مصنوعی در دقت برآورد تبخیر و تعرق پرداخته شد.

روش‌های تجربی مورد استفاده:

روش بلانی - کریدل: مدل ارائه شده توسط بلانی - کریدل برای تخمین ET_0 در سال ۱۹۵۰ در مناطق غربی ایالات متحده و همچنین در سایر نقاط به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. رابطه (۱)، معادله بلانی - کریدل را نشان می‌دهد (مهدوی، ۱۳۸۵).

$$ET_0 = P(0.457T + 8.13) \quad (1)$$

که در این رابطه ET_0 تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز)، P درصد کل ساعات آفتابی به کل ساعات آفتابی سال، T دمای هوای روزانه (درجه سلسیوس) می‌باشد.

شده وارد شود، خروجی متناظر با آن ارائه می‌شود. در حالت

کلی یک شبکه عصبی از سه لایه تشکیل شده است: (شکل ۲- الف): لایه ورودی که اطلاعات را دریافت می‌کند، لایه میانی یا پنهان که خود می‌تواند شامل چند لایه باشد و از مهمترین پردازشگرهای اطلاعات به شمار می‌رود و لایه خروجی که این پردازش را دریافت و خروجی را نمایش می‌دهد. (شکل ۲- ب): مدل ساده‌ای از یک سلول شبکه عصبی (که نرون نامیده می‌شود) را نشان می‌دهد. بدنه این سلول از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول تابع ترکیب یا انتقال نام دارد که تمام ورودی‌ها را جمع می‌کند و نتیجه را به صورت یک مجموع وزن‌دار نشان می‌دهد. طبق این شکل برای هر نرون i تمام ورودی‌های I_j توسط فاکتور W_j وزن‌دار می‌شوند، سپس هر ورودی در وزن مربوطه ضرب شده و حاصلضرب‌ها با هم جمع می‌شوند تا مجموع وزن دار u_i را نتیجه دهند:

$$u_i = \sum_{j=1}^i W_j I_j \quad (7)$$

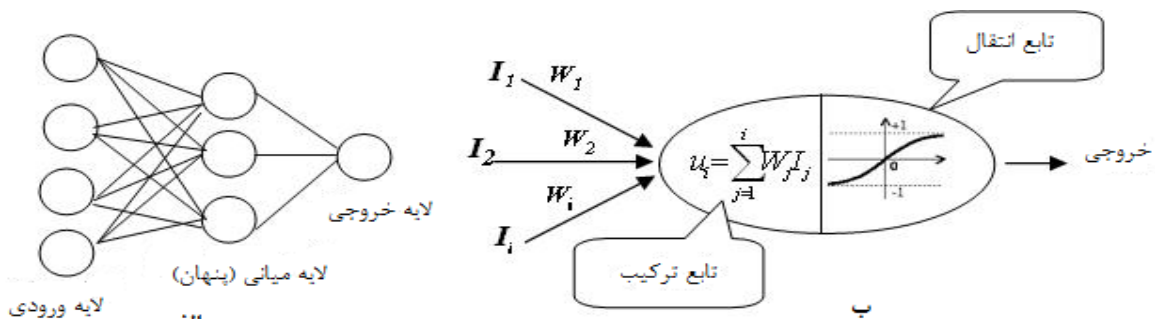
روش تورک: تورک (۱۹۶۱)، تحت شرایط اقلیمی اروپای غربی (۵) و (۶) را برای تبخیر و تعرق گیاه مرجع به ترتیب برای رطوبت نسبی بیشتر از ۵۰ درصد و رطوبت نسبی کمتر از ۵۰ درصد، ارائه کرد.

$$ET_0 = 0.31 \frac{T}{T + 15} (R_s + 2.09) \quad (5)$$

$$ET_0 = 0.31 \frac{T}{T + 15} (R_s + 2.09) \left(1 + \frac{50 - RH}{70}\right) \quad (6)$$

در روابط بالا ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی متر در روز)، R_s تابش خورشیدی (مگا ژول بر متر مربع در روز)، T دمای هوای روزانه (درجه سلسیوس) و RH رطوبت نسبی متوسط روزانه (درصد) می‌باشد.

مدل شبکه عصبی مصنوعی: شبکه عصبی مصنوعی سامانه‌ای است با تعداد زیادی ورودی و تنها یک خروجی و شامل دو حالت آموزش و عملکرد می‌باشد. در حالت آموزش یاد می‌گیرد که در مقابل الگوهای ورودی خاص برانگیخته شود. در حالت عملکرد وقتی یک الگوی ورودی شناسایی



شکل ۲- الف: مدل ساده یک شبکه عصبی مصنوعی که از یک لایه ورودی، یک لایه میانی و یک لایه پنهان تشکیل شده است. ب: مدل ریاضی از فرایند پردازش در یک نرون.

وقتی مجموع وزن‌دار به حد آستانه‌ای رسید، تابع انتقال تحریک شده تا خروجی را نتیجه دهد. معمولاً در یک سلول شبکه عصبی یک ورودی اضافی نیز وجود دارد که بایاس نامیده می‌شود. نقش بایاس افزایش یا کاهش مجموع وزن‌دار است (Dayhoff., 1990; Khanna., 1990).

برای نرمال کردن داده‌ها، باید آن‌ها را در بازه (۰ و ۱) تبدیل کرد که این کار با استفاده از دستور mapminmax در محیط برنامه MATLAB با استفاده از رابطه (۸) انجام گردید.

$$[P_n, P_s] = \text{mapminmax}(P, 0, 1) \quad (8)$$

در این رابطه P_n ماتریس نرمال شده، P_s ساختار مربوط به پارامترهای تنظیمی جهت برگرداندن داده‌های شبیه‌سازی شده به داده‌های حقیقی و P ماتریس داده‌های حقیقی است.

برای بررسی توانایی مدل شبکه عصبی مصنوعی در شرایط کمبود داده‌های اقلیمی و همچنین انتخاب مدل بهینه برای برآورد تبخیر و تعرق منطقه مطالعه، در طراحی مدل‌ها تعداد پارامترهای ورودی به تدریج کاهش یافت و در نهایت سناریو مطابق جدول (۱)، در نظر گرفته شد.

روند استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی شامل سه مرحله آموزش، صحت‌سنجی و آزمون می‌باشد. در پژوهش حاضر ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد صحت‌سنجی و ۱۵ درصد برای آزمون در نظر گرفته شد. همچنین تابع محرک در نظر گرفته شده برای مرحله آموزش و آزمون تانژانت سیگموئید می‌باشد. اضافه می‌گردد که انتخاب کلیه پارامترها بر اساس روش سعی و خطا است.

جدول ۱- سناریوهای در نظر گرفته شده جهت ساختار مدل شبکه عصبی مصنوعی

متغیرهای ورودی	سناریو
$T_{max}, U_2, RH_{min}, RH_{max}, NT_{min}$	۱
$T_{max}, U_2, RH_{min}, RH_{max}, T_{min}$	۲
$T_{max}, RH_{min}, RH_{max}, NT_{min}$	۳
$RH_{min}, RH_{max}, U_2, NT_{mean}$	۴
$T_{max}, RH_{min}, RH_{max}, T_{min}$	۵
$RH_{min}, RH_{max}, NT_{mean}$	۶
T_{max}, U_2, NT_{min}	۷
T_{max}, NT_{min}	۸
T_{max}, U_2, T_{min}	۹
T_{max}, T_{min}	۱۰

MAE به صفر نزدیک‌تر، و مقدار R^2 به یک نزدیک‌تر باشد، دقت مدل در برآورد مقدار تبخیر و تعرق بهتر است.

معیارهای ارزیابی مدل: برای تعیین میزان دقت مدل‌ها از مقادیر RMSE^۱، MAE^۲ و R^2 استفاده گردید:

نتایج و بحث

پژوهش حاضر به منظور برآورد تبخیر و تعرق در کشت و صنعت نیشکر سلمان فارسی با استفاده از مدل‌های تجربی، شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های لایسیمیتری انجام گرفته است. شبکه طراحی شده برای مدل شبکه عصبی مصنوعی، شبکه پیش‌خور چند لایه با الگوریتم آموزشی پس‌انتشار خطا می‌باشد. پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که این شبکه، ساده‌ترین و پرکاربردترین نوع شبکه عصبی است که در خصوص برآورد پارامترهای مجهول مناسب ارزیابی شده است

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{observed,i} - y_{predicted,i})^2} \quad (9)$$

$$MAE = 100 * \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{observed,i} - y_{predicted,i}| \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_{predicted} - y_{observed})}{\sum y_{predicted}^2 - \frac{\sum y_{observed}^2}{n}} \quad (11)$$

در رابطه بالا $y_{predicted}$: مقادیر برآورد شده، $y_{observed}$: مقادیر مشاهداتی و n : تعداد داده‌ها است. هر چه RMSE و

1. Root Mean Square of Error
3. Correlation Coefficient

2. Mean Absolute Error

نتایج به‌کارگیری ۱۰ سناریو بکار گرفته برای مدل شبکه عصبی طراحی شده در مرحله آزمون در جدول (۲) نشان داده شده است. مطابق نتایج این جدول بالاترین دقت برآورد تبخیر و تعرق مربوط به سناریو ۱ با داده‌های ورودی از قبیل دمای کمینه، دمای بیشینه، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، رطوبت نسبی کمینه، رطوبت نسبی بیشینه و ساعات آفتابی می‌باشد و کم‌ترین دقت مدل هم در سناریو ۱۲ با دو ورودی دمای بیشینه و دمای کمینه بود که با نتایج نوری و همکاران (۱۳۹۲)، صارمی و فرهادی بانسوله (۱۳۹۴)، قربانی و همکاران (۱۳۹۵) و... مطابقت دارد. همچنین به نظر می‌رسد متغیرهای دمای حداقل، دمای حداکثر و سرعت باد نقش مهمی را در ورودی‌های مدل ایفا می‌کنند، به طوری که با وجود این سه پارامتر، مقدار خطا در برآورد کاهش می‌یابد ضمن اینکه سناریو ۷ با وجود تعداد متغیرهای ورودی محدود، نتایج قابل قبولی ارائه نموده است. این نتیجه‌گیری با پژوهش‌های کوچک‌زاده و بهمنی (۱۳۸۴) و صیادی و همکاران (۱۳۸۸) مبنی بر استفاده از پارامترهای دما و سرعت باد به‌عنوان موثرترین فاکتورها در برآورد تبخیر و تعرق همخوانی دارد. در این پژوهش از سناریوی ۱ برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده شد.

(Adineh et al., 2008; Parvaresh Rizi et al., 2006; Khoshtaghaza et al., 2007; Ardicioglu et al., 2007). شبکه‌های گوناگون با تعداد نرون‌ها و تکرارهای مختلف تشکیل داده شد. برای جلوگیری از یادگیری بیش از حد و کاهش خطا باید تعداد تکرار بهینه در مدل شبکه عصبی تعیین شود. برای انجام این کار تعداد تکرار از ۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ تغییر داده شد و در پایان هر مرحله خطای آن ثبت گردید. در شبکه طراحی شده خطا تا تکرار ۲۴۰۰۰ روند نزولی و بعد از آن روند صعودی یافت. بنابراین تعداد تکرار بهینه برابر ۲۴۰۰۰ انتخاب شد. در مدل شبکه عصبی طراحی شده تکراری که به بالاترین ضریب تبیین در مرحله آموزش و خطای زیر ۵ درصد دست یافت، به عنوان تکرار بهینه انتخاب شد. سپس تعداد نرون‌های مختلف برای لایه پنهان و ورودی جهت انتخاب بهترین مدل با کمترین خطا در نظر گرفته شد. تعداد نرون‌های لایه پنهان از یک تا ده و تعداد نرون‌های لایه ورودی از یک تا پنج تغییر داده شد و در هر مرحله مقدار ضریب $RMSE$ و R^2 بین نقاط شبیه‌سازی شده توسط مدل شبکه عصبی و اندازه‌گیری شده محاسبه گردید. نتایج نشان داد تعداد بهینه نرون در لایه پنهان برای مدل شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده، ۹ و برای لایه ورودی ۳ می‌باشد.

جدول ۲- نتایج به‌کارگیری سناریوهای مختلف مدل شبکه عصبی در مرحله آزمون

سناریو	$RMSE$	R^2
۱	۰/۱۲۵	۰/۹۷۱
۲	۰/۲۴۵	۰/۹۴۳
۳	۰/۳۱۸	۰/۹۱۵
۴	۰/۲۱۹	۰/۹۵۹
۵	۰/۲۹۷	۰/۹۴۸
۶	۰/۲۴۵	۰/۹۳۹
۷	۰/۲	۰/۹۵۱
۸	۰/۴۱۱	۰/۹۲۲
۹	۰/۲۴۹	۰/۹۳۵
۱۰	۰/۴۱	۰/۹۱۶

مصنوعی و داده‌های لایسیمتری را نشان می‌دهد. برطبق نتایج جدول (۳)، در بین مدل‌های تجربی بیش‌ترین و کم‌ترین دقت

جدول (۳) شاخص‌های آماری محاسبه شده بین مقادیر برآوردی با استفاده از مدل‌های تجربی و شبکه عصبی

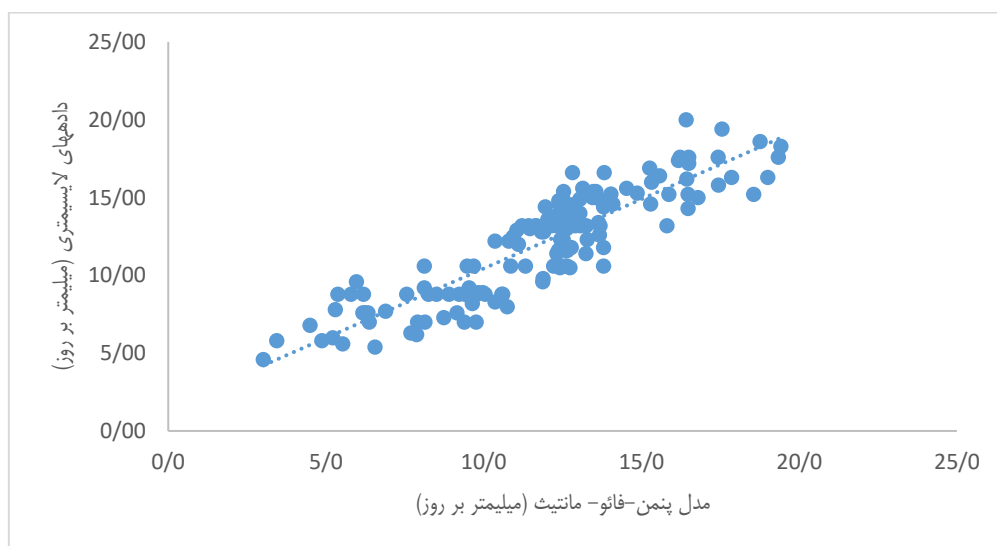
مصنوعی و در بین مدل‌های تجربی هم دقت مدل تورک در اولویت قرار داشته است. نوری و همکاران (۱۳۹۲)، پژوهش مشابهی را در ایستگاه سینوپتیک مشهد انجام دادند که نتایج آن‌ها حاکی از کارایی و دقت مدل شبکه عصبی بود. بیش‌ترین و کم‌ترین دقت برآورد مدل‌های تجربی در پژوهش آن‌ها به ترتیب مربوط به هارگریوز-سامانی و بلانی کریدل بود.

شکل (۳) و (۴)، برازش منحنی بین داده‌های لایسمتری و مدل پنمن-فائو-مانتیت و شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد.

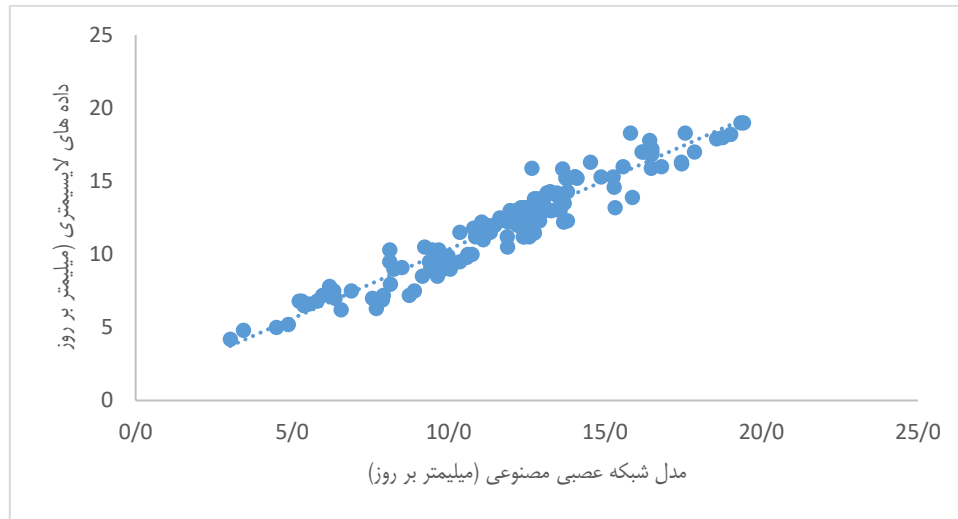
برآورد تبخیر و تعرق به ترتیب مربوط به مدل پنمن-فائو-مانتیت و مدل بلانی کریدل می‌باشد. همچنین مدل‌های تورک، هارگریوز-سامانی و ایرماک هم در اولویت‌های بعدی قرار دارند. با مشاهده نتایج ارائه شده، مدل شبکه عصبی مصنوعی در هر سه مرحله آموزش، صحت‌سنجی و آزمون نتایج قابل قبولی داشته، به طوری که دقت برآورد آن از مدل‌های تجربی بیش‌تر بوده است. هژبر و همکاران (۱۳۹۳) پژوهشی در خصوص برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از مدل‌های تجربی و شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه کهرئز ارومیه انجام دادند. در پژوهش آن‌ها هم بالاترین دقت مربوط به مدل شبکه عصبی

جدول ۳- شاخص‌های آماری محاسبه شده بین مقادیر برآوردی با استفاده از مدل‌های تجربی، شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های لایسمتری

مدل تجربی	RMSE	MAE	R ²
بلانی-کریدل	۵/۹۸	۵/۶۶	۰/۷۱
پنمن-فائو-مانتیت	<u>۲/۰۷</u>	<u>۳/۰۹</u>	<u>۰/۹۱</u>
هارگریوز-سامانی	۳/۱۱	۴/۰۲	۰/۸۸
آیرماک	۵/۶۷	۴/۵۱	۰/۷۹
روش تورک	۲/۹۱	۳/۰۴	۰/۸۹
شبکه عصبی مصنوعی (آموزش)	۰/۱۱	۰/۱۵۲	۰/۹۸۴
شبکه عصبی مصنوعی (صحت‌سنجی)	۰/۱۴۷	۰/۲۱۸	۰/۹۷۷
شبکه عصبی مصنوعی (آزمون)	۰/۱۲۵	۰/۲۴	۰/۹۷



شکل ۳- برازش منحنی داده‌های لایسمتری و مدل پنمن-فائو-مانتیت



شکل ۴- برازش منحنی داده‌های لایسمتری و مدل شبکه عصبی مصنوعی در مرحله آزمون

برای برآورد دقیق تبخیر و تعرق و آب مورد نیاز گیاهان جهت برنامه‌ریزی صحیح آبیاری، کاهش تلفات آب و جلوگیری از کاهش محصول توصیه می‌شود. همچنین انجام مطالعات در زمینه مقایسه کارایی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی در برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف پیشنهاد می‌گردد.

منابع

۱. آزادلاتپه، ن.، بهمنش، ج.، منتصری، م. ۱۳۹۲. پیش‌بینی تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از مدل‌های سری زمانی. مجله آب و خاک، سال ۲۷ شماره ۱: ۲۱۳-۲۲۳.
۲. بهمنش، ج.، آزاد پلاتپه، ن.، منتصری، م.، بشارت، س. ۱۳۹۳. ارزیابی مدل‌های سری زمانی خطی و غیر خطی بیلینیر در پیش‌بینی تبخیر-تعرق گیاه مرجع در ایستگاه سینوپتیک ارومیه. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، سال ۲۸، شماره ۱: ۸۵-۹۶.
۳. حقی‌زاده، ع.، یوسفی، ح.، ابراهیمیان، ط. و یاراحمدی، ی. ۱۳۹۸. مقایسه مدل هیبریدی PSO-ANFIS و مدل تجربی تورک در تخمین تبخیر و تعرق مرجع (مطالعه موردی: پلدختر- لرستان). مجله اکوهیدرولوژی، سال ۶، شماره ۳: ۶۸۵-۶۹۴.
۴. زارع ایبانه، ح.، بیات ورکشی، م.، معروفی، ص. و امیری چایجان، ر. ۱۳۹۸. ارزیابی سیستم‌های هوشمند عصبی

نتیجه‌گیری

به‌منظور مدیریت منابع آبی و کاهش هدررفت آب، برآورد دقیق تبخیر و تعرق اهمیت فراوانی دارد. از آنجایی که تبخیر و تعرق پدیده‌ای غیرخطی و پیچیده است و پارامترهای هواشناسی بسیاری در برآورد آن موثرند و از طرفی اندازه‌گیری نکردن برخی از این متغیرها در بعضی نقاط، در این پژوهش به مقایسه دقت برآورد مدل‌های تجربی و شبکه عصبی نسبت به داده‌های لایسمتری کشت و صنعت نیشکر فارسی پرداخته شد. همچنین برای ارزیابی دقت مدل شبکه عصبی با کاهش پارامترهای اقلیمی ۱۰ سناریو تعریف شد. نتایج نشان داد از میان تمامی متغیرهای هواشناسی، دمای حداکثر، دمای حداقل و سرعت باد اهمیت بیشتری در برآورد تبخیر و تعرق دارند. دلیل فیزیکی آن هم می‌توان به تأثیر دما که نشان دهنده میزان انرژی تابش خورشیدی رسیده به زمین دانست و از طرفی جزء تبخیر ناشی از آیرودینامیک هوا، بیش‌تر تحت تأثیر باد است. مدل شبکه عصبی مصنوعی بالاترین دقت را میان کلیه مدل‌های بکاررفته در این پژوهش را داشت (به طوری که در مرحله آزمون مقدار $RMSE=0.125$ و $R^2=0.97$ بدست آمد). همچنین در بین مدل‌های تجربی بیش‌ترین و کم‌ترین دقت برآورد تبخیر و تعرق به ترتیب مربوط به مدل پنمن-فائو-ماتیتث و مدل بلانی کریدل می‌باشد. بنابراین در صورت موجود بودن اطلاعات واقعی یا لایسمتری استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

- محاسباتی و روش‌های آماری چند متغیره. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، سال ۲۸، شماره ۱: ۱۳۷-۱۵۱.
۱۲. مهدوی، م. ۱۳۸۵. هیدرولوژی کاربردی، جلد اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۳۴۲ صفحه.
۱۳. نوری، س.، فلاح قاهری، غ.ع. و ثنایی نژاد، ح. ۱۳۹۲. مدل‌سازی تبخیر و تعرق گیاه پتانسیل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با حداقل متغیرهای اقلیمی در ایستگاه سینوپتیک مشهد. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، سال ۲۰، شماره ۵: ۱۶۳-۱۷۸.
۱۴. هژبر، ح.، معاضد، ه. و شکری کوچک، س. ۱۳۹۳. برآورد تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از مدل‌های تجربی، مدل‌سازی آن با شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آنها با داده‌های لایسمتری در ایستگاه کهریر ارومیه. فصلنامه مهندسی آبیاری و آب، سال ۴ شماره ۱۵: ۱۳.
15. Araya, A., Stroosnijder, L., Girmay, G., & Keesstra, S. D. 2011. Crop coefficient, yield response to water stress and water productivity of teff (*Eragrostis tef* (Zucc.). *Agricultural water management*, 98(5), 775-783.
16. Cosgrove, W. J. and Rijsberman, F. R. 2014. *World water vision: making water everybody's business*. Earthscan Publications Ltd, London. 142 p.
17. Costello, L. R., Matheny, N. P., Clark, J. R., & Jones, K. S. 2000. *A Guide to Estimating Irrigation Water Needs of Landscape Plantings in California, the Landscape Coefficient Method and Wucols III*. University of California Cooperative Extension, California Department of Water Resources: Berkeley, CA, USA.
18. Doorenbos, J. 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper, 24, 1-179.
19. Grattan, S., Bowers, W., Dong, A., Snyder, R., Carroll, J., & George, W. 1998. *New crop*
- در کاهش پارامترهای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع. مجله آب و خاک، سال ۲، شماره ۲۴: ۲۹۷-۳۰۵.
۵. صارمی، م. و فرهادی بانسوله، ب. ۱۳۹۴. تعیین پارامترهای موثر در برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: استان لرستان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، سال ۴، شماره ۹: ۶۲۳-۶۱۴.
۶. صیادی، ح.، اولاد غفاری، ا.، فعالیان، ا. و صدرالدینی، ع.ا. ۱۳۸۸. مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی RBF و MLP در برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع. مجله دانش آب و خاک، سال ۱، شماره ۱۹: ۱-۱۲.
۷. عابدی کوپایی، ج.، اسلامیان، س. س. امیری، م. ج. ۱۳۸۷. مقایسه چهار روش تخمین تبخیر و تعرق سطح مرجع با داده‌های میکرو لایسمتری در منطقه اصفهان، دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اهواز.
۸. عبدالله‌پور آزاد، م. ر. و ستاری، م. ت. ۱۳۹۴. پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه اهرچای با استفاده از روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و مقایسه آن با سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، سال ۲۲، شماره ۱: ۲۹۸-۲۸۷.
۹. قربانی، م.، شکری، س. و برومندنسب، س. ۱۳۹۵. بررسی عملکرد شبکه‌های عصبی در برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک اهواز). فصلنامه علمی پژوهشی اکویولوژی تالاب، سال ۸، شماره ۲۸: ۳۴-۲۳.
۱۰. کوچک‌زاده، م.، و بهمنی، ع. ۱۳۸۴. ارزیابی عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در کاهش پارامترهای مورد نیاز، جهت برآورد تبخیر و تعرق مرجع. مجله علوم کشاورزی، سال ۴، شماره ۱۱: ۸۷-۹۶.
۱۱. ملکی نژاد، ح.، پورمحمدی، س.، پور شرعیاتی، ر. و محمدی، س. ۱۳۹۳. سنجش حساسیت تبخیر و تعرق مرجع نسبت به عوامل اقلیمی با استفاده از فن‌های هوش

24. Shojaei, P., Gheysari, M., Nouri, H., Myers, B., & Esmaili, H. 2018. Water requirements of urban landscape plants in an arid environment: The example of a botanic garden and a forest park. *Ecological engineering*, 123, 43-53.
25. Symes, P., Connellan, G., Buss, P., & Dalton, M. 2008. Developing Water Management Strategy for Complex Landscapes. In *Irrigation Australia 2008 Conference, Best Practice Open Space Irrigation Workshop*. Melbourne Exhibition Centre, May (pp. 20-22).
26. Tyagi, N. K., Sharma, D. K., & Luthra, S. K. 2000. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. *Agricultural water management*, 45(1), 41-54.
27. Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. 2019. The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1-11.
28. Wolf, D., & Lundholm, J. T. 2008. Water uptake in green roof microcosms: effects of plant species and water availability. *Ecological Engineering*, 33(2), 179-186.
- coefficients estimate water use of vegetables, row crops. *California agriculture*, 52(1), 16-21.
20. Hassanli, A. M., Ahmadi, S., & Beecham, S. 2010. Evaluation of the influence of irrigation methods and water quality on sugar beet yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 97(2), 357-362.
21. Ma, X., Sanguinet, K. A., & Jacoby, P. W. 2020. Direct root-zone irrigation outperforms surface drip irrigation for grape yield and crop water use efficiency while restricting root growth. *Agricultural Water Management*, 231, 105993.
22. Nouri, H., Beecham, S., Kazemi, F., & Hassanli, A. M. 2012. A review of ET measurement techniques for estimating the water requirements of urban landscape vegetation. *Urban Water Journal*, 10(4), 247-259.
23. Nouri, H., Glenn, E. P., Beecham, S., Chavoshi Boroujeni, S., Sutton, P., Alaghmand, S. & Nagler, P. 2016. Comparing three approaches of evapotranspiration estimation in mixed urban vegetation: Field-based, remote sensing-based and observational-based methods. *Remote Sensing*, 8(6), 492.