



## Technical Note

### Evaluation of the Efficiency of Artificial Intelligence Models for Simulating Evaporation in Selected Stations in Dry, Semi-Dry and Very-Wet Climates in Iran

M.H. Dehghanipour<sup>1</sup>, H.R. Ghazvinian<sup>2</sup>, and A.H. Dehghanipour<sup>3\*</sup>

#### Abstract

In this study, daily simulation models of pan evaporation were developed using a multilayer perceptron neural network, a radial basis function, and an optimized experimental relationship based on the genetic algorithm with 13 input combinations of climate variables, i.e., average daily temperature, maximum and minimum temperature, relative humidity, sunshine hours and wind speed. These models were applied to simulate evaporation in Semnan, Shahrud, and Rasht stations with dry, semi-dry, and very wet climatic conditions, respectively. The best input combination for simulation models was selected based on the quantitative evaluation results; i.e. temperature, relative humidity, sunshine, and wind speed which had a correlation coefficient between 0.56 to 0.85, root mean square error between 1.1 to 2.6 mm, and the PBIS coefficient between 1 to 29.5%. The results of the developed models' sensitivity analysis showed that temperature and then relative humidity are sensitive parameters for evaporation simulation. The optimized experimental relationship with the best input combination among the evaporation simulation models had a greater ability to simulate the mean and standard deviation of evaporation, and the model was selected as the best model. Finally, the ability of the best model with the best input combination was confirmed by its application to simulate the evaporation pan in three stations Garmsar (dry), Damghan (semi-dry), and Ramsar (very wet), resulted in correlation coefficients of 0.6 to 0.84, root mean square errors of 1.29 to 3.16 mm and PBIS coefficients of 2.1 to 9.2%.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Neural Networks, Genetic Algorithm, Evaporation, Climate, Iran.

Received: January 17, 2021

Accepted: April 10, 2021

## یادداشت فنی

### ارزیابی کارایی مدل‌های هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی تبخیر در ایستگاه‌های منتخب با اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک و بسیار مرطوب ایران

محمدحسن دهقانی پور<sup>۱</sup>، حمیدرضا قزوینیان<sup>۲</sup> و امیرحسین دهقانی پور<sup>۳\*</sup>

#### چکیده

در این تحقیق، مدل‌های شبیه‌سازی روزانه تبخیر از تشت با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، تابع پایه شعاعی و یک رابطه تجربی بهینه‌سازی شده بر پایه الگوریتم ژنتیک، با ۱۳ ترکیب ورودی از متغیرهای هواشناسی یعنی میانگین دمای روزانه، دمای بیشینه و کمینه، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد توسعه داده شد. این مدل‌ها برای شبیه‌سازی تبخیر در ایستگاه‌های سمنان، شاهرود و رشت با شرایط اقلیمی خشک، نیمه‌خشک و بسیار مرطوب به کار گرفته شد. پس از ارزیابی کمی مدل‌ها، ترکیب ورودی شامل دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد برای مدل‌های شبیه‌سازی تبخیر، با ضریب همبستگی بین ۰/۵۶ تا ۰/۸۵، ریشه میانگین مربعات خطا بین ۱/۱ تا ۲/۶ میلی‌متر و پی‌بایاس ۱ تا ۲۹/۵ درصد، به عنوان ترکیب ورودی برتر انتخاب شد. با انجام آنالیز حساسیت مدل‌های توسعه داده شده، دما و سپس رطوبت نسبی، به عنوان متغیرهای حساس برای شبیه‌سازی تبخیر انتخاب شدند. همچنین رابطه تجربی بهینه‌سازی شده با ترکیب ورودی برتر، توانایی بیشتری برای شبیه‌سازی مقادیر میانگین و انحراف‌معیار تبخیر از خود نشان داد و این مدل به عنوان مدل برتر انتخاب شد. در نهایت توانایی مدل برتر به همراه ترکیب ورودی برتر در شبیه‌سازی تشت تبخیر سه ایستگاه گرمسار (خشک)، دامغان (نیمه خشک) و رامسر (بسیار مرطوب)، با ضرایب همبستگی ۰/۶ تا ۰/۸۴، ریشه میانگین مربعات خطا ۱/۲۹ تا ۳/۱۶ میلی‌متر و پی‌بایاس ۲/۱ تا ۹/۲ درصد، مورد تأیید قرار گرفت.

**کلمات کلیدی:** هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک،

تبخیر، اقلیم، ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱۰/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱/۲۱

1- B.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University. Email: [Mohammad.dh7713@gmail.com](mailto:Mohammad.dh7713@gmail.com)

2- Ph.D. Student in Water Resources Engineering and Management, Department of Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University. Email: [Hamidrezaghazvinian@semnan.ac.ir](mailto:Hamidrezaghazvinian@semnan.ac.ir)

3- Ph.D. in Water Resources Engineering and Management, Department of Water and Environment, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology. Email: [A\\_Deghanipour@civileng.iust.ac.ir](mailto:A_Deghanipour@civileng.iust.ac.ir), [amir.deghanipour@gmail.com](mailto:amir.deghanipour@gmail.com)

\*- Corresponding Author

DOI: [10.1001.1.17352347.1400.17.1.20.1](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.1.20.1)

۱- دانشجوی کارشناسی، گروه آموزشی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۲- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۳- دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

## ۱- مقدمه

مناطق هم‌اقلیمشان که شامل ایستگاه‌های گرمسار (خشک)، دامغان (نیمه‌خشک) و رامسر (بسیار مرطوب) است، به مدت ۹ سال (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸) پرداخته شد.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، داده‌های مورد بررسی از ایستگاه‌های سینوپتیک سمنان، گرمسار، شاهرود، دامغان، رشت و رامسر اخذ شد. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های سینوپتیک از روش دومارتن استفاده شد. با توجه به متغیرهای هواشناسی مشاهداتی در ایستگاه‌های سینوپتیک و با به کارگیری روش دومارتن، نوع اقلیم ایستگاه‌های سینوپتیک سمنان و گرمسار خشک، شاهرود و دامغان نیمه‌خشک، رشت و رامسر بسیار مرطوب است.

### ۲-۲- مراحل انجام تحقیق

در این تحقیق از متغیرهای هواشناسی روزانه سه ایستگاه سینوپتیک سمنان، شاهرود و رشت به مدت ۱۴ سال (۲۰۰۵-۲۰۱۸) (شامل میانگین دمای روزانه، دمای کمینه، دمای بیشینه بر حسب درجه سلسیوس، سرعت باد بر حسب نات، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و تبخیر بر حسب میلی‌متر) استفاده شد و از آن برای آموزش مدل‌های هوش مصنوعی MLP و RBF و توسعه روابط تجربی بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شد. به منظور بررسی امکان استفاده از ترکیب‌های متفاوتی از داده‌های هواشناسی برای شبیه‌سازی تشت تبخیر روزانه، برای سه مدل هوش مصنوعی MLP، RBF و روابط تجربی، ۱۳ ترکیب ورودی مختلف از متغیرهای ورودی برای هر سه ایستگاه مورد مطالعه تعریف شد (جدول ۱).

تبخیر یکی از مؤلفه‌های اصلی چرخه هیدرولوژی است (Afkhani et al., 2017) و تخمین آن در برآورد بیلان آبی حوضه‌ها، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری و مدیریت منابع آب نقش اساسی دارد (Majidi Kh et al., 2017; Soultani, 2018). یکی از روش‌های برآورد تبخیر، استفاده از تشت‌های تبخیر است که در اکثر نقاط جهان، به عنوان وسیله اندازه‌گیری تبخیر از سطح آزاد آب به صورت مستقیم استفاده می‌شود (Ghazvinian et al., 2020b; Irmak et al., 2002). از متغیرهای تأثیرگذار بر میزان تبخیر می‌توان به دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی اشاره کرد (Dehghanipour et al., 2020; Ghazvinian et al., 2020c; SINGH and XU, 1997). از جمله روش‌های مدل‌سازی تبخیر استفاده از هوش مصنوعی است (Piri and Ansari, 2013). هوش مصنوعی در مدل‌سازی تبخیر از تشت توسط پژوهشگران زیادی مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است (Allawi and El-Shafie, 2016; Malik et al., 2018; Patle et al., 2020; Qasem et al., 2019). در تحقیق حاضر با هدف ارزیابی کارایی مدل‌های هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی تبخیر مناطق اقلیمی خشک، نیمه‌خشک و بسیار مرطوب ایران، دو شبکه عصبی MLP و RBF و رابطه تجربی بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک به منظور شبیه‌سازی تشت تبخیر در سه ایستگاه سمنان (خشک)، شاهرود (نیمه‌خشک) و رشت (بسیار مرطوب) مورد استفاده قرار گرفت. ۱۳ ترکیب ورودی از متغیرهای هواشناسی مختلف تأثیرگذار بر تبخیر در نظر گرفته شد و پس از یافتن ترکیب‌های ورودی برتر مدل‌ها، به آنالیز حساسیت متغیرهای ورودی در هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه پرداخته شد. در نهایت به منظور صحت‌سنجی مدل برتر انتخاب شده در هر یک از ایستگاه‌های سمنان، شاهرود و رشت، به شبیه‌سازی تشت تبخیر

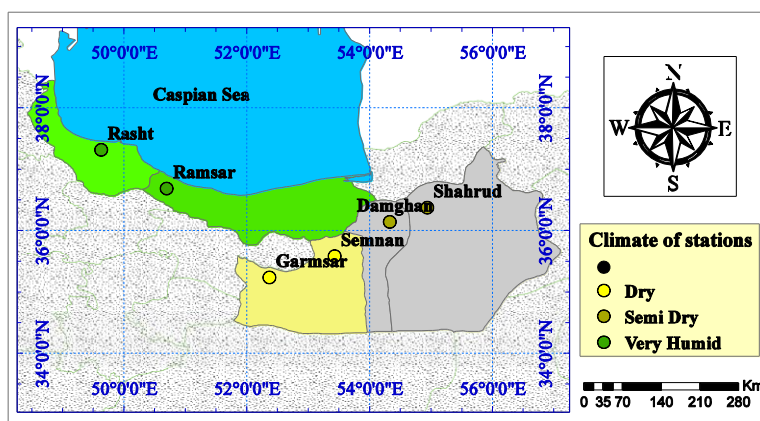


Fig. 1- Location of studied synoptic stations  
شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

**Table 1- Different combinations of used climatic variables: mean temperature (Tavg), minimum temperature (Tmin), maximum temperature (Tmax), wind speed (WS), relative humidity (RH), and sunshine hours (SSH)**

جدول ۱- ترکیب‌های متفاوت مورد استفاده از متغیرهای اقلیمی دمای میانگین (Tavg)، دمای کمینه (Tmin)، دمای بیشینه (Tmax)، سرعت باد (WS)، رطوبت نسبی (RH) و ساعات آفتابی (SSH)

Composition number	Input parameters	Composition number	Input parameters
1	Tmin - Tmax - WS - SSH - RH	8	Tavg - SSH
2	Tavg - WS - SSH - RH	9	Tmin - Tmax
3	Tmin - WS - SSH - RH	10	Tavg
4	Tmax - WS - SSH - RH	11	WS
5	WS - SSH - RH	12	RH
6	Tavg - WS	13	SSH
7	Tavg - RH	-	-

۲۴۰، تعداد اعضای جهش یافته ۹۰، نرخ جهش ۰/۰۴ و تعداد مراحل تکرار ۲۰۰ انتخاب شد. به منظور انتخاب والدین از میان اعضای خانواده، از روش Roulette Wheel Selection استفاده شد (Ho-Huu et al., 2018). عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی توسعه داده شده، با استفاده از چندین شاخص آماری مورد ارزیابی قرار داده شد. این شاخص‌های آماری ضریب تبیین ( $R^2$ )، میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب پی‌بایاس (PBIS) در نظر گرفته شد (Ghazvinian et al., 2019, 2020a; Naderpour et al., 2020).

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- نتایج برآورد تبخیر با استفاده از مدل‌های MLP، RBF و روابط تجربی بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک

در جدول ۲ نتایج ارزیابی کمی حاصل از ارزیابی مدل‌سازی تحت تبخیر در سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارزیابی کمی دوره اعتبارسنجی مدل‌های توسعه داده شده در جدول ۲، ترکیب ورودی ۳ (شامل متغیرهای دمای کمینه، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد) در مدل MLP برای ایستگاه‌های سمنان، شاهرود و رشت، ترکیب ورودی ۲ (شامل متغیرهای میانگین دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد) در مدل RBF برای ایستگاه‌های سمنان و رشت، ترکیب ورودی ۳ در مدل RBF برای ایستگاه شاهرود و ترکیب‌های ورودی ۲، ۳ و ۴ در مدل‌سازی با استفاده از روابط تجربی، به ترتیب برای ایستگاه‌های سمنان، شاهرود و رشت به عنوان ترکیب‌های برتر این تحقیق هستند. جدول ۳ بیانگر مقادیر برآورد شده ضرایب در ترکیب‌های ورودی (به ترتیب ورودی‌ها) در جدول ۱ است. به عنوان مثال در ترکیب ورودی ۸ رابطه تجربی تعریف شده به صورت  $E = a \times T_{avg}^2 + b \times SSH^2 + c$  است. در شکل ۲ نمودارهای

همچنین مقادیر بهینه پارامترهای ثابت ضرب‌شونده در توان دوم متغیرهای ورودی ۱۳ ترکیب مختلف در روابط تجربی، توسط الگوریتم ژنتیک (GA) برآورد شد. تابع هدف در بهینه‌سازی پارامترهای روابط تجربی، میانگین مربعات خطا میان تبخیر مدل‌سازی شده و تبخیر مشاهداتی در نظر گرفته شد. همچنین به منظور آنالیز حساسیت، متغیرهای ورودی میانگین دمای روزانه، درصد رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ (دوره ارزیابی مدل) به صورت تک به تک در سه مدل و سه منطقه مدل‌سازی حذف شدند و تاثیر حذف آنها در نتایج مدل‌سازی تبخیر مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت مدل‌های برتر توسعه یافته، برای صحت‌سنجی در ایستگاه‌های گرمسار، دامغان و رامسر و برای دوره آماری ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ مورد استفاده قرار گرفتند.

در این تحقیق، به منظور آموزش شبکه عصبی MLP (Ghazvinian et al., 2020c)، با فرایند سعی و خطا، ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد باقی مانده برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد (Ghazvinian et al., 2020d; Naderpour et al., 2019). برای آموزش آن، روش یادگیری مارکوارت-لونبرگ با تعداد ثابت ۲۰۰ تکرار استفاده شد (Naderpour et al., 2019) و برای سه لایه ورودی، میانی و خروجی، به ترتیب تعداد ۷ نورون، ۱۴ نورون و ۱ نورون انتخاب شد. در لایه‌های میانی از تابع انتقال تانژانت هایپربولیک و در لایه خروجی از تابع انتقال خطی استفاده شد. همچنین در شبکه عصبی RBF (Rocha, 2009)، ۷۰ درصد داده‌ها به منظور آموزش و ۳۰ درصد باقیمانده به عنوان داده‌های تست انتخاب شدند و مقدار ایده‌آل تابع هدف (مقدار میانگین مربعات خطا) صفر و با سعی و خطا در مدل‌سازی بهتر بر اساس مقدار میانگین مربعات خطا، بیشترین تعداد نورون مورد استفاده سه عدد در نظر گرفته شد. در این تحقیق، برای الگوریتم ژنتیک تعداد اعضای خانواده ۳۰۰، تعداد اعضای فرزندان

### ۳-۲- آنالیز حساسیت

نتایج بررسی آنالیز حساسیت در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل مذکور، با حذف متغیر میانگین دما، بیشترین افزایش در RMSE در دو شبکه عصبی استفاده شده و روابط تجربی در سه ایستگاه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. بنابراین دما، حساس‌ترین متغیر در شبیه‌سازی مقدار تبخیر در سه ایستگاه مورد مطالعه با شرایط اقلیمی مختلف محسوب می‌شود. سایر متغیرها، حساسیت متفاوتی را در مدل‌های شبکه عصبی و روابط تجربی از خود نشان می‌دهند. اما در بیشتر موارد رطوبت نسبی پس از دما بیشترین حساسیت را از خود نشان می‌دهد.

### ۳-۳- نتایج ارزیابی کمی مدل برتر شرایط اقلیمی متفاوت در شبیه‌سازی تشت تبخیر مناطق هم‌اقلیم دیگر

جدول ۴ بیانگر مقادیر ضرایب آماری ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و ضرایب پی‌بایاس میان داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده با استفاده از مدل‌های برتر در سه ایستگاه دامغان، گرمسار و رامسر است.

مقدار تبخیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ترکیب‌های ورودی برتر مرحله آزمون هر مدل در سه ایستگاه مطالعاتی، ارائه شده است. به دلیل نزدیک بودن ضرایب آماری برآورد شده در ترکیب‌های ورودی برتر به یکدیگر در مدل‌های مختلف، به منظور تشخیص و انتخاب صحیح مدل برتر، توانایی مدل‌های RBF، MLP و روابط تجربی در شبیه‌سازی مقادیر انحراف معیار تبخیر و میانگین مقدار تبخیر از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که روابط تجربی درجه دو بهینه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک که با نماد لوزی شکل نمایش داده شده‌اند دارای نزدیکی بیشتری نسبت به میانگین و انحراف معیار مقدار تبخیر مشاهداتی (به صورت خط‌چین) بوده و دارای بیشترین توانایی در شبیه‌سازی مقادیر انحراف معیار و میانگین تبخیر به ویژه در ایستگاه‌های سمنان و شاهرود هستند و پس از روابط تجربی، مدل MLP دارای بیشترین توانایی است. بنابراین روابط تجربی بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک به همراه ترکیب‌های ورودی برتر آنها، به عنوان مدل‌های برتر این تحقیق هستند.

Table 2- Quantitative evaluation results of MLP, RBF models, experimental relationships optimized using genetic algorithm in 13 different input combinations in Semnan, Shahrud and Rasht stations (2000-2005)

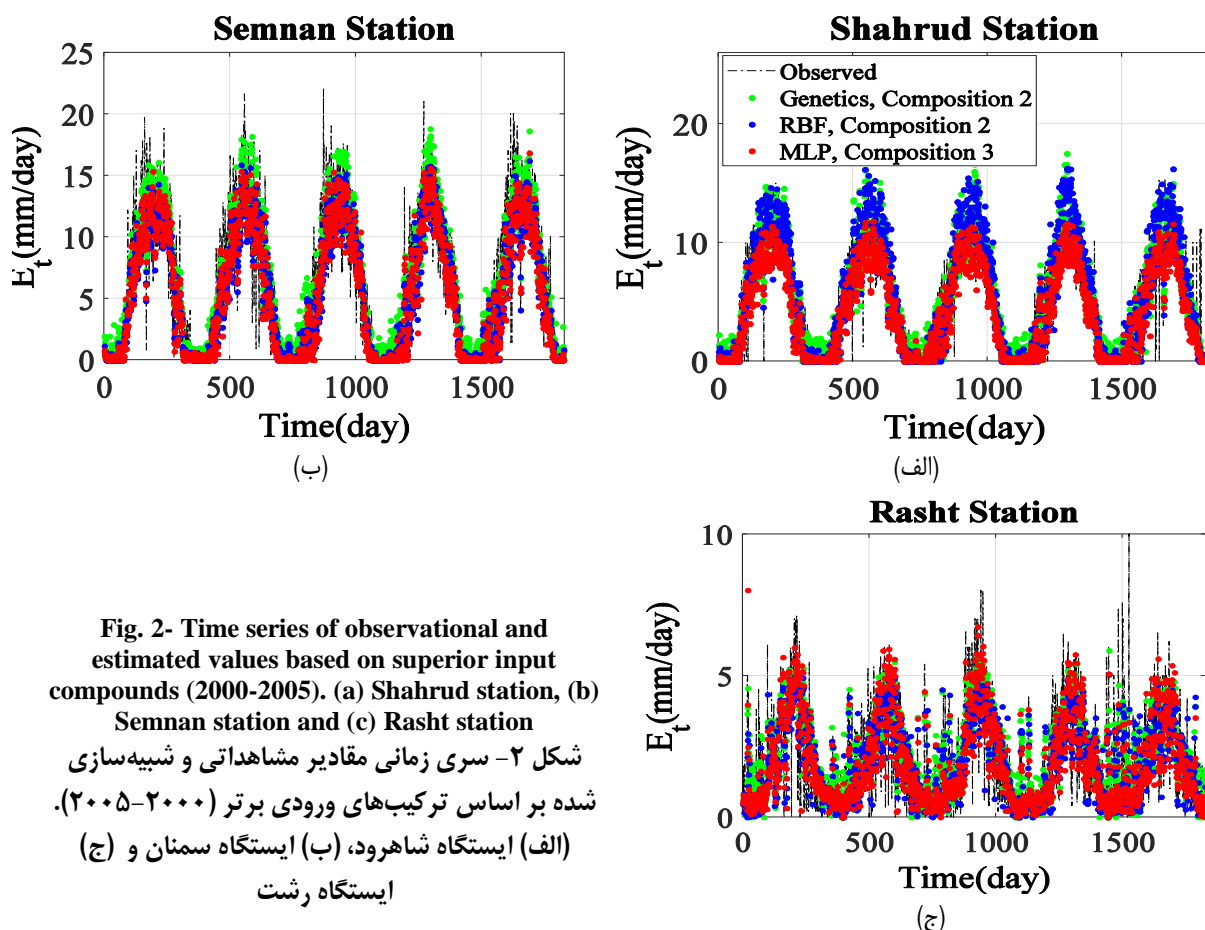
جدول ۲- نتایج ارزیابی کمی اعتبارسنجی مدل‌های MLP، RBF، روابط تجربی بهینه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک در ۱۳ ترکیب ورودی مختلف در ایستگاه‌های سمنان، شاهرود و رشت (۲۰۰۵-۲۰۰۰)

Combination of input variables														
Station	Coefficient	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
MLP model														
Semnan (Dry)	R <sup>2</sup>	0.8106	0.8011	<b>0.82*</b>	0.7613	0.5864	0.8022	0.7898	0.8067	0.7833	0.7915	0.1283	0.5097	0.415
	RMSE	2.66	2.6	<b>2.6</b>	2.96	3.7	2.66	2.75	2.68	2.8	2.7	5.39	4.02	4.50
	PBIS	-15	-13.4	<b>-14.9</b>	-15.67	-3.5	-12.26	-12.9	-13.8	-14.2	-13.4	7.97	-4.18	-13.2
Shahrud (Semi-Dry)	R <sup>2</sup>	0.8453	0.8359	<b>0.85</b>	0.6988	0.5744	0.8119	0.8076	0.8308	0.8055	0.8068	0.1246	0.3914	0.463
	RMSE	1.8	2.06	<b>1.8</b>	2.6	2.8	2.32	2.2	1.9	2.24	2.2	4.30	3.3	3.13
	PBIS	-17.2	-21.9	<b>-15.8</b>	-26.6	-15.46	-26.31	-22	-18.34	-24.26	-22.9	-29.8	-8.08	-0.71
Rasht (Very wet)	R <sup>2</sup>	0.5827	0.5571	<b>0.58</b>	0.4969	0.3424	0.5071	0.5589	0.5343	0.5036	0.4948	0.0027	0.3004	0.283
	RMSE	1.09	1.13	<b>1.1</b>	1.2	1.3	1.1	1.12	1.14	1.2	1.2	1.7	1.4	1.42
	PBIS	-6	-3.8	<b>-3.1</b>	1.33	-4.5	-8.95	1.8	1.8	1.54	1.8	-16.8	5.5	5
RBF model														
Semnan (Dry)	R <sup>2</sup>	0.7938	<b>0.79</b>	0.7966	0.7789	0.5467	0.7982	0.7953	0.7903	0.7358	0.7956	0.1146	0.5055	0.389
	RMSE	2.74	<b>2.7</b>	2.74	2.8	3.85	2.7	2.75	2.79	3.09	2.74	5.48	4.04	4.63
	PBIS	-14.18	<b>-13</b>	-14.9	-16.37	1.13	-16.5	-14.8	-15.43	-15.03	-13.82	3.50	-4.29	-15.8
Shahrud (Semi-Dry)	R <sup>2</sup>	0.8177	0.8157	<b>0.83</b>	0.796	0.4754	0.8152	0.8081	0.8081	0.8123	0.8087	0.1437	0.3647	0.424
	RMSE	2.57	2.61	<b>2.41</b>	2.74	3.5	2.54	2.53	2.4	2.43	2.46	4.5	3.7	3.3
	PBIS	-32	-33.2	<b>-29.5</b>	-35.45	-33.19	-31.8	-31.2	-29.82	-28.9	-29	-40.6	-30.3	-13
Rasht (Very wet)	R <sup>2</sup>	0.5554	<b>0.56</b>	0.5592	0.5223	0.2608	0.5163	0.5639	0.5179	0.4763	0.4979	0.0022	0.2631	0.267
	RMSE	1.12	<b>1.1</b>	1.11	1.1	1.45	1.17	1.1	1.16	1.22	1.2	1.7	1.44	1.4
	PBIS	-6.8	<b>-1</b>	-3.76	-0.63	2.08	-7.65	2.81	1.42	2.42	2.22	-7	4.04	4.4
Optimized experimental relationship with using Genetic Algorithm(GA)														
Semnan (Dry)	R <sup>2</sup>	0.7812	<b>0.79</b>	0.7789	0.7816	0.4706	0.7866	0.786	0.791	0.7843	0.8307	0.0849	0.372	0.365
	RMSE	2.7318	<b>2.6</b>	2.7	2.71	4.2	2.6	2.67	2.64	2.6	0.7852	5.61	4.57	4.6
	PBIS	7.7	<b>6.9</b>	6	7.1	10	6.34	4.75	5.456	5.02	2.6	13.2	2.99	9.32
Shahrud (Semi-Dry)	R <sup>2</sup>	0.7924	<b>0.79</b>	0.7921	0.7878	0.478	0.8	0.7976	0.8072	0.7955	5.098	0.0711	0.0518	0.4015
	RMSE	2.13	<b>2</b>	2.15	2.2	3.2	2.16	2.2	2.19	2.26	0.7966	4.1	7.06	3.38
	PBIS	9.57	<b>8.74</b>	12.7	15.4	11.8	14.4	19.2	17.19	17.98	2.25	7.21	112.9	13.4
Rasht (Very wet)	R <sup>2</sup>	0.5623	0.5612	<b>0.56</b>	0.5268	0.2683	0.5124	0.5468	0.5265	0.504	18.14	0.0052	0.2476	0.246
	RMSE	1.14	1.1	<b>1.14</b>	1.2	1.52	1.20	1.16	1.20	1.2	0.4912	1.73	1.5	1.5
	PBIS	13.1	13.6	<b>11.4</b>	15.1	19.77	13.24	12	15.4	14.4	1.23	19.34	15.7	20

\* ضرایب آماری با رنگ قرمز، بیانگر ضرایب ترکیب‌های ورودی برتر هستند.

**Table 3- Values of optimized decision parameters of experimental relationships optimized using genetic algorithm in 13 different input combinations in three stations of Semnan, Shahrud and Rasht (2005-2018)**  
 جدول ۳- مقادیر پارامترهای تصمیم بهینه‌سازی شده روابط تجربی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در ۱۳ ترکیب ورودی مختلف در سه ایستگاه سمنان، شاهرود و رشت (۲۰۱۸-۲۰۰۵)

Climate	P	Combination of input variables												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Semnan (Dry)	a	0.013	0.012	0.016	0.009	0.029	0.01	0.013	0.013	0.006	0.013	0.047	-2E-3	0.076
	b	0.002	0.01	0.011	0.011	0.05	0.009	-2E-4	0.009	0.006	0.23	4.6	10.4	0.25
	c	0.012	0.01	0.015	0.006	-1	-0.01	0.86	-0.24	-0.13	-	-	-	-
	d	0.023	5E-5	-2E-4	3E-5	2.6	-	-	-	-	-	-	-	-
	e	2E-4	-0.4	0.79	-1.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	f	-1.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shahrud (Semi-Dry)	a	0.019	0.014	0.019	0.009	0.016	0.015	0.014	0.014	0.008	0.015	0.024	-2E-3	0.065
	b	5E-4	0.008	0.007	0.008	0.043	0.007	-2E-4	0.012	0.007	0.57	4.3	10.6	0.45
	c	0.01	0.013	0.016	0.006	-1E-3	0.24	1.46	-0.05	0.22	-	-	-	-
	d	0.023	1E-5	-3E-4	-2E-4	3.77	-	-	-	-	-	-	-	-
	e	3E-5	-0.54	1.21	0.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	f	-0.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rasht (Very wet)	a	0.004	0.004	0.005	0.003	0.016	0.005	0.004	0.004	0.003	0.005	-0.01	-1E-3	0.022
	b	0.001	0.015	0.004	0.021	0.023	0.021	-2E-4	0.007	0.002	0.49	2.38	6.79	1.42
	c	0.02	0.015	0.005	0.004	-5E-5	0.4	2.37	0.42	0.36	-	-	-	-
	d	0.007	-1E-4	-3E-4	-5E-5	1.67	-	-	-	-	-	-	-	-
	e	-9E-5	1.81	3.19	1.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	f	1.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



**Fig. 2- Time series of observational and estimated values based on superior input compounds (2000-2005). (a) Shahrud station, (b) Semnan station and (c) Rasht station**  
 شکل ۲- سری زمانی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بر اساس ترکیب‌های ورودی برتر (۲۰۰۰-۲۰۰۵).  
 (الف) ایستگاه شاهرود، (ب) ایستگاه سمنان و (ج) ایستگاه رشت

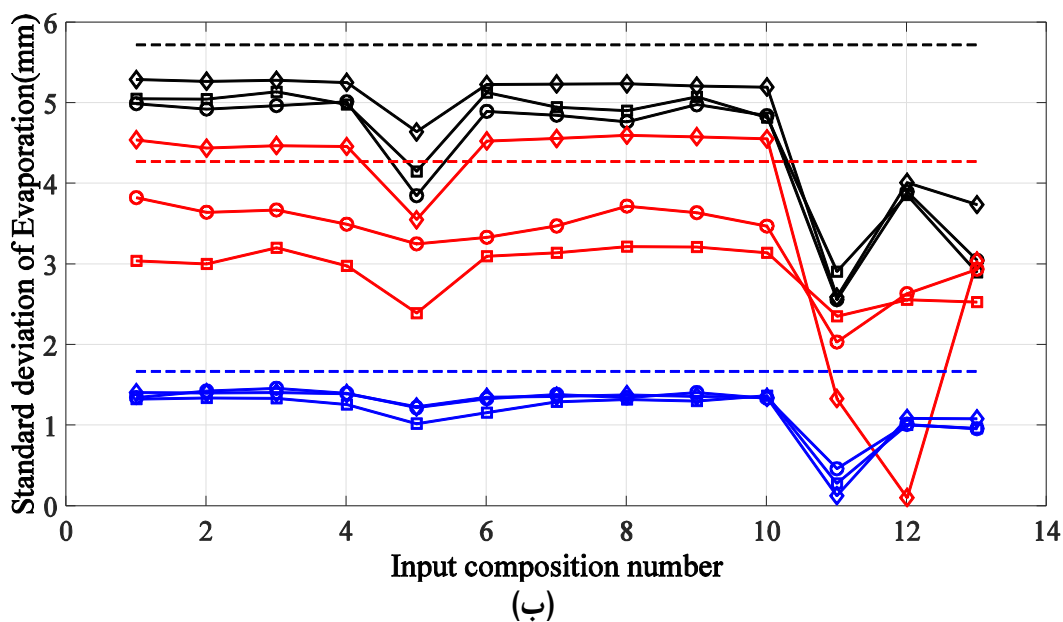
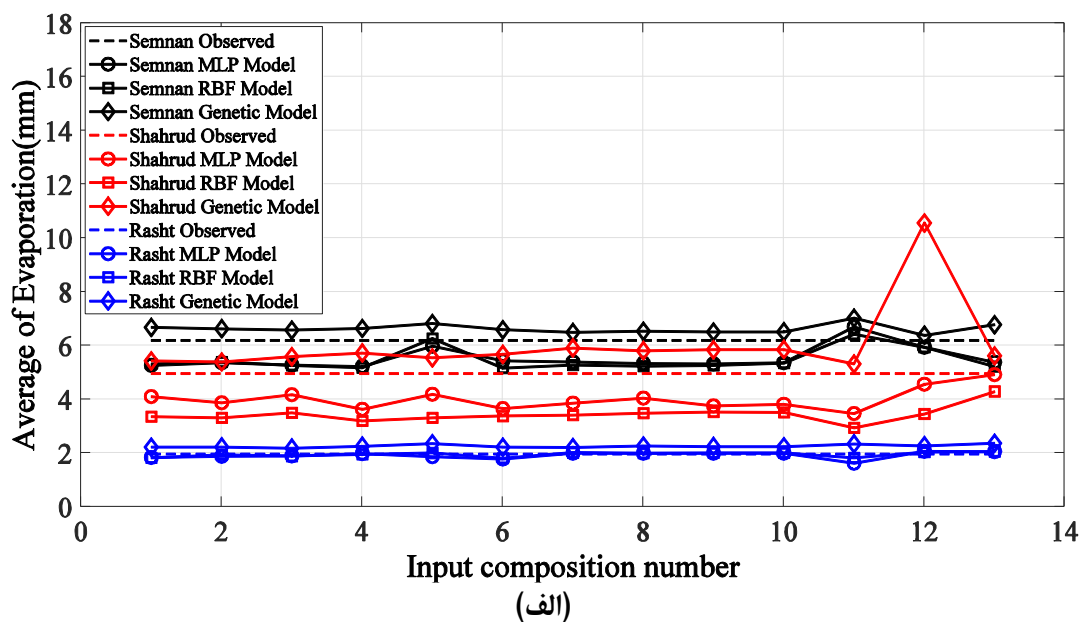


Fig. 3- Mean and standard deviation of observational and computational evaporation by RBF, MLP models and experimental relationships optimized using genetic algorithm in different input compounds in the test phase (2000-2005). (a) the mean of the simulated evaporation and (b) the standard deviation of the simulated evaporation

شکل ۳- میانگین و انحراف معیار تبخیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های RBF، MLP و روابط تجربی بهینه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک در ترکیب‌های ورودی مختلف در مرحله آزمون (۲۰۰۵-۲۰۰۵). (الف) میانگین تبخیر شبیه‌سازی شده و (ب) انحراف معیار تبخیر شبیه‌سازی شده

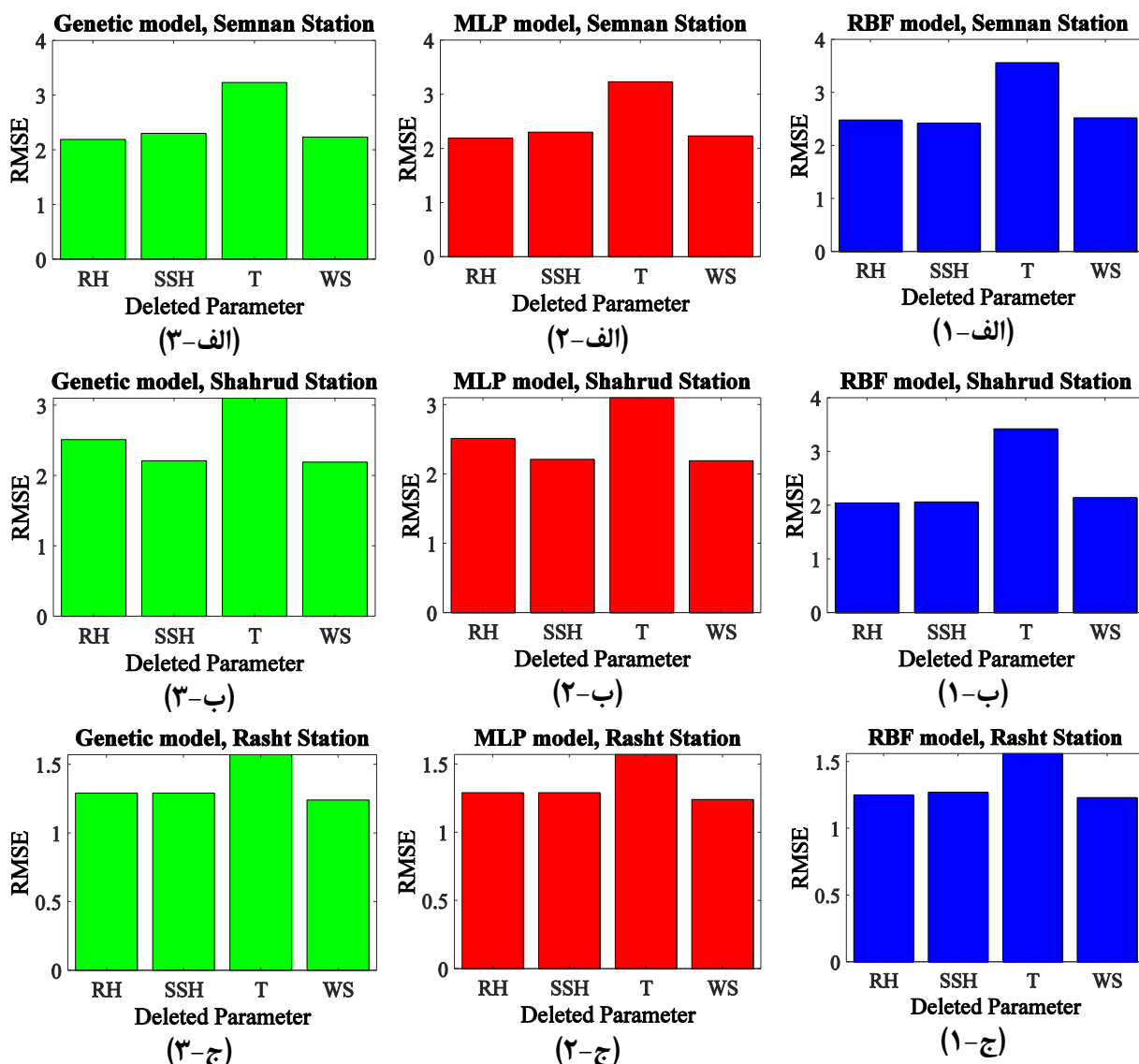


Fig. 4- Sensitivity analysis results. (a) Semnan station, (b) Shahrud station, (c) Rasht station. (1) RBF model, (2) MLP model, (3) experimental relationship

شکل ۴- نتایج آنالیز حساسیت. (الف) ایستگاه سمنان، (ب) ایستگاه شاهرود، (ج) ایستگاه رشت. (۱) مدل RBF، (۲) مدل MLP، (۳) رابطه تجربی

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

با انجام ارزیابی کمی مرحله آزمون سه مدل RBF، MLP و روابط تجربی بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵، ترکیب ورودی ۳ (شامل متغیرهای دمای کمینه، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد) در مدل MLP برای ایستگاه‌های سمنان، شاهرود و رشت به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۸۲، ۰/۸۵ و ۰/۵۸، ریشه میانگین مربعات خطا ۲/۶، ۱/۸ و ۱/۱ میلی‌متر و ضریب پدیده‌یاس دامغان (نیمه‌خشک) و رامسر (بسیار مرطوب)، مورد تأیید است.

در شکل ۵ میزان نزدیکی داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده با استفاده از مدل‌های برتر (روابط تجربی) به صورت نموداری نمایش داده شده است. با توجه به میزان نزدیکی داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده در شکل ۵ و ضرایب آماری حساب شده جدول ۴، توانایی مدل‌های برتر انتخاب شده که شامل روابط تجربی درجه دو هستند، در شبیه‌سازی تست تبخیر سه ایستگاه گرمسار (خشک)، دامغان (نیمه‌خشک) و رامسر (بسیار مرطوب)، مورد تأیید است.

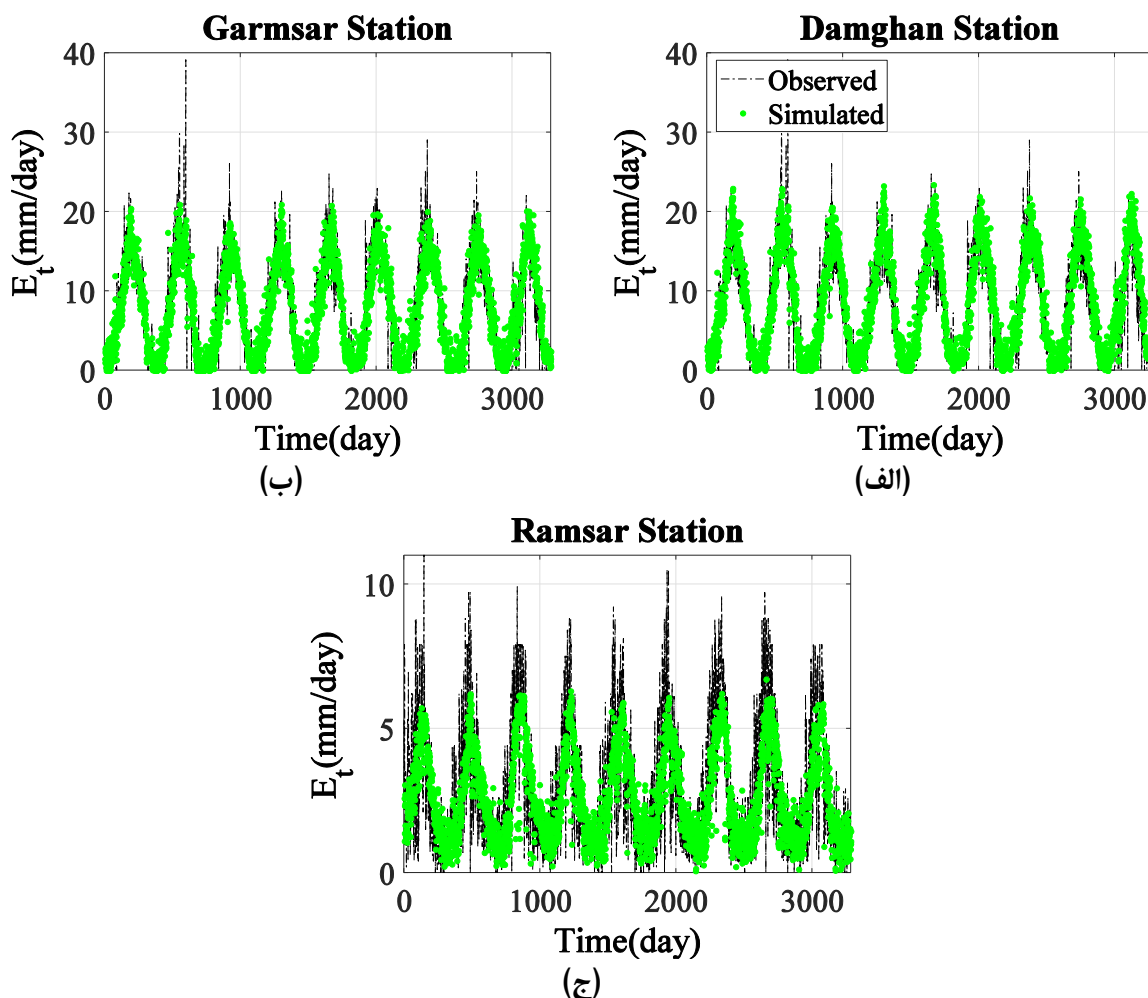


Fig. 5- Time series of observational and estimated values using the selected superior model (experimental relationships) along with superior input combinations in stations with similar climate (2009-2018). (a) Damghan station, (b) Garmsar station and (c) Ramsar station

شکل ۵- سری زمانی مقادیر مشاهداتی و برآورد شده با استفاده از مدل برتر انتخاب شده (روابط تجربی) به همراه ترکیب‌های ورودی برتر در ایستگاه‌ها با اقلیم‌های مشابه (۲۰۰۹-۲۰۱۸). (الف) ایستگاه دامغان، (ب) ایستگاه گرمسار و (ج) ایستگاه رامسر

Table 4- Evaluation of the selected best models for modeling of the evaporation pan of stations with similar climate (Garmsar, Damghan and Ramsar)

جدول ۴- ارزیابی مدل‌های برتر انتخاب شده در مدل‌سازی تشت تبخیر در ایستگاه‌های با اقلیم مشابه (گرمسار، دامغان و رامسر)

Station	R <sup>2</sup>	RMSE	PBIS
Garmsar(Dry)	0.84	2.75	2.54
Damghan(Semi-Dry)	0.82	3.16	9.20
Ramsar(Very wet)	0.60	1.29	2.15

میانگین مربعات خطا ۲/۷ و ۱/۱ میلی‌متر و ضریب پی‌بایاس ۱۳- و ۱- درصد، ترکیب ورودی ۳ در مدل RBF برای ایستگاه شاهرود با ضریب همبستگی ۰/۸۳ و ریشه میانگین مربعات خطا ۲/۴۱ میلی‌متر

همچنین ترکیب ورودی ۲ (شامل متغیرهای میانگین دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد) در مدل RBF برای ایستگاه‌های سمنان و رشت به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۷۹ و ۰/۵۶ و ریشه



- Irrigation and Water Engineering 11(2):147–165 (In Persian)
- Ghazvinian H, Bahrami H, Ghazvinian H, and Heddami S (2020c) Simulation of monthly precipitation in semnan city using ANN artificial intelligence model. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering* 4(4):36–46
- Ghazvinian H, Karami H, Farzin S, and Mousavi SF (2020d) Effect of MDF-cover for water reservoir evaporation reduction, experimental, and soft computing approaches. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering* 4(1):98–110
- Ghazvinian H, Mousavi S-F, Karami H, Farzin S, Ehteram M, Hossain MS, Fai CM, Hashim H Bin, Singh VP, Ros FC, ... El-Shafie A (2019) Integrated support vector regression and an improved particle swarm optimization-based model for solar radiation prediction. *PLOS ONE* 14(5):e0217634
- Ho-Huu V, Nguyen-Thoi T, Truong-Khac T, Le-Anh L, and Vo-Duy T (2018) An improved differential evolution based on roulette wheel selection for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints. *Neural Computing and Applications* 29(1):167–185
- Irmak S, Haman DZ, and Jones JW (2002) Evaluation of class a pan coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 128(3):153–159
- Majidi Kh M, Alizadeh A, Farid A, and Vazifiedoust M (2017) Evaporation from lakes and reservoirs: Developing a remote sensing algorithm of reference and water surface energy balance. *Iran-Water Resources Research* 13(2):154–169 (In Persian)
- Malik A, Kumar A, and Kisi O (2018) Daily pan evaporation estimation using heuristic methods with gamma test. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 144(9)
- Naderpour H, Nagai K, Fakharian P, and Haji M (2019) Innovative models for prediction of compressive strength of FRP-confined circular reinforced concrete columns using soft computing methods. *Composite Structures* 215:69–84
- Naderpour H, Rezazadeh Eidgahee D, Fakharian P, Rafiean AH, and Kalantari SM (2020) A new proposed approach for moment capacity estimation of ferrocement members using Group Method of Data Handling. *Engineering Science and Technology* 23(2):382–391
- Patle GT, Chettri M, and Jhahharia D (2020) Monthly pan evaporation modelling using multiple linear regression and artificial neural network techniques. *Water Supply* 20(3):800–808
- و ضریب پی‌بایاس ۲۹/۵- درصد و ترکیب‌های ورودی ۲، ۳ و ۳ در مدل‌سازی با استفاده از روابط تجربی، به ترتیب برای ایستگاه‌های سمنان، شاهرود و رشت با ضرایب همبستگی ۰/۷۹، ۰/۷۹ و ۰/۵۶، ریشه میانگین مربعات خطا ۲/۶، ۲ و ۱/۱ میلی‌متر و ضریب پی‌بایاس ۶/۹، ۸/۷ و ۱۱/۴ درصد انتخاب شدند. با ارزیابی کمی توانایی مدل‌های MLP، RBF، و روابط تجربی در شبیه‌سازی مقادیر انحراف معیار تبخیر و میانگین تبخیر در مرحله آزمون (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵)، روابط تجربی درجه دو بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک به ویژه در ایستگاه‌های سمنان و شاهرود، بیشترین توانایی را از خود نشان دادند و به عنوان مدل برتر انتخاب شد. با آنالیز حساسیت متغیرهای ورودی مدل‌های توسعه داده شده برای شبیه‌سازی تحت تبخیر سه ایستگاه مورد نظر، متغیر ورودی دما و پس از آن در بیشتر موارد، مقدار درصد رطوبت نسبی، بیشترین حساسیت را از خود نشان دادند. در نهایت توانایی مدل برتر انتخاب شده ایستگاه‌های سمنان (خشک)، شاهرود (نیمه‌خشک) و رشت (بسیار مرطوب)، در شبیه‌سازی تبخیر مناطق هم اقلیمشان که شامل ایستگاه‌های گرمسار (خشک)، دامغان (نیمه‌خشک) و رامسر (بسیار مرطوب) است، به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۸۴، ۰/۸۲ و ۰/۶ و ریشه میانگین مربعات خطا ۲/۷۵، ۳/۱۶ و ۱/۲۹ میلی‌متر و ضرایب پی‌بایاس ۲/۵۴، ۹/۲ و ۲/۱۵ درصد، مورد تأیید قرار گرفت.

## ۵- مراجع

- Afkhami H, Malekinezhad H, and esmailzadeh E (2017) Designing of unoring floating cover using Worn tires for evaporation reduction of open water resources. *Iran-Water Resources Research* 13(3):214–219 (In Persian)
- Allawi MF and El-Shafie A (2016) Utilizing RBF-NN and ANFIS methods for multi-lead ahead prediction model of evaporation from reservoir. *Water Resources Management* 30(13):4773–4788
- Dehghanipour AH, Moshir Panahi D, Mousavi H, Kalantari Z, and Tajrishy M (2020) Effects of water level decline in lake Urmia, Iran, on Local Climate Conditions. *Water* 12(8):2153
- Ghazvinian H, Farzin Saeed, Karami H, and Mousavi SF (2020a) Investigating the effect of using polystyrene sheets on evaporation reduction from water-storage reservoirs in arid and semiarid regions (Case study: Semnan city). *Journal of Water and Sustainable Development* 7(2):45–52
- Ghazvinian H, Karami H, Farzin S, and Mousavi SF (2020b) Experimental study of evaporation reduction using polystyrene coating, wood and wax and its estimation by intelligent algorithms.

- Rocha H (2009) On the selection of the most adequate radial basis function. *Applied Mathematical Modelling* 33(3):1573–1583
- SINGH VP and XU C-Y (1997) Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrological Processes* 11(3):311–323
- Soultani N (2018) Evaluating efficiency of empirical estimation reference evapotranspiration (Pan based method) in different climate conditions (Case Study of Iran). *Iran-Water Resources Research* 14(4):170–183
- PIRI J and ANSARI H (2013) Daily pan evaporation modelling with ANFIS and NNARX. *Iran Agricultural Research* 31(2):51–64 (In Persian)
- Qasem SN, Samadianfard S, Kheshtgar S, Jarhan S, Kisi O, Shamshirband S, and Chau K-W (2019) Modeling monthly pan evaporation using wavelet support vector regression and wavelet artificial neural networks in arid and humid climates. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 13(1):177–187