

در سال های اخیر، استفاده از روش های هوش مصنوعی و مدل های هیبریدی در پیش بینی پارامترهای هیدرولوژیکی بسیار متداول شده است. در این مطالعه، پتانسیل دو سیستم استنتاج عصبی-فازی تکاملی و عصبی-فازی انطباقی با بهینه سازی الگوریتم ژنتیک (ANFIS-GA) و الگوریتم موجک (ANFIS-Wavelet) برای شبیه سازی تبخیر بررسی شده است. ترکیب های مختلفی از داده های آب و هوای ماهانه، از جمله تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، دمای متوسط هوا و سرعت باد به دست آمده از دو ایستگاه سنویتیگ سراوان و خاش به عنوان پارامترهای ورودی برای مدل های توسعه یافته برای تخمین تبخیر استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که مدل های استنتاج تکاملی پیشنهادی، در مقایسه با ANFIS، برآورد بهتری از تبخیر روزانه دارند. همچنین، مدل هیبریدی ANFIS+GA با شاخص های  $R^2$ ، RMSE ۰٫۸۶ و ۳٫۲۱ میلی متر برای سراوان و ۰٫۸۴ و ۲٫۳۸ میلی متر برای خاش، بالاترین دقت محاسبه را به دست آورده است. در کل، نتایج این مطالعه نشان می دهد که استفاده از الگوریتم های بهینه سازی مانند الگوریتم ژنتیک و الگوریتم موجک در ترکیب با سیستم های استنتاج عصبی-فازی، بهبود قابل توجهی در پیش بینی پارامترهای هیدرولوژیکی مانند تبخیر دارد.

کلمات کلیدی: مدل سازی تبخیر، سیستم های استنتاج عصبی - فازی تکاملی، بهینه سازی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم موجک

## ۱. مقدمه

کمبود آب، افزایش هزینه های پمپاژ، مشکلات در سیستم ذخیره و انتقال آب از مهم ترین مسائلی هستند که بر افزایش راندمان کاربرد آب برای بهره برداری از سیستم های آبیاری بزرگ تاکید دارند. مهندسان آبیاری و مدیران کشاورزی باید نیاز آبی گیاه را به طور دقیق برای استفاده به موقع و موثر از آب کمیاب محاسبه کنند. برای کاربرد آب مفید، تبخیر و تعرق به دلیل کمک به محاسبه دقیق نیاز آبی گیاه، نقش حیاتی دارد. بنابراین، برآورد دقیق از تبخیر بسیار مهم است. ورودی های آب و هوایی متعددی مانند حداقل، حداکثر و متوسط دما، سرعت باد، میانگین رطوبت نسبی و مدت زمان تابش خورشید برای برآورد تبخیر و تعرق توسط معادله پن من - مونتیت لازم است. این تعداد زیاد از داده های آب و هوایی همیشه در دسترس یا قابل اعتماد نیستند. تاثیر متغیرهای آب و هوایی ذکر شده بر تبخیر و تعرق، آن را یک ماهیت پیچیده می سازد. هرناندز و همکاران [۱] بنابراین پیش بینی تبخیر و تعرق یکی از دشوارترین وظایف در مشکلات منابع آب است. در چنین وضعیتی، روش های محاسبه نرم که به درستی می توانند رفتار پیچیده بین ورودی و خروجی را مدل کنند، به عنوان یک جایگزین بهتر ظاهر می شوند. در سال های اخیر، روش های شبکه عصبی (ANN)،

استنتاج فازی (ANFIS) و روش بردار پشتیبان (SVM) برای مدل سازی سیستم های پیچیده مختلف در زمینه هیدرولوژی به کار گرفته شده اند [۲-۶].

مطالعات مختلفی در زمینه پیش بینی تبخیر و تعرق با استفاده از روش های محاسبات نرم انجام شده است. گوون و همکاران [۷] با استفاده از منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی و ترکیب این دو مدل ANFIS، مقدار تبخیر و تعرق را در منطقه چین برآورد کرده و نتایج را با روش فائو-پنمن-مانتیس مقایسه کرده اند. نتایج نشان داد که مدل ANFIS با تعداد ساعات آفتابی و حداکثر دما به عنوان داده های ورودی مدل، نتایج بهتری داشته و نسبت به دو مدل دیگر برتری نسبی دارد. هاشمی نجفی و همکار [۸] نیز از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی به منظور تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه اهواز استفاده کردند. نتایج آن ها نشان داد که دقت مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی (ANFIS) در مقایسه با روش های تجربی بالا بوده و قابلیت بالایی در پیش بینی تبخیر و تعرق گیاه مرجع دارد.

در سال های اخیر، مطالعات نشان می دهند که مدل های محاسباتی نرم ترکیبی، به طور کلی، دقت پیش بینی بهتری در مقایسه با روش های محاسباتی نرم مستقل فراهم می کنند. تمرکز اصلی تحقیقات محققان بر روی ترکیب چندین الگوریتم جستجوی اکتشافی جدید با روش های محاسباتی نرم است، به منظور بهینه سازی پارامترهای کنترل آن ها و افزایش دقت پیش بینی آن ها. در یکی از مطالعات، پاتیل و دکا [۹] با استفاده از ترکیب تبدیل موجک با روش های ANN و ANFIS، مدل سازی تبخیر و تعرق در مناطق خشک هند را انجام دادند و نتیجه نشان داد که مدل های ترکیبی عملکرد بهتری نسبت به مدل های محاسباتی نرم مستقل در پیش بینی تبخیر دارند [۱۰]. مطالعات دیگری نیز، مزایای استفاده از مدل های ترکیبی تبدیل موجک با شبکه های عصبی و استنتاج فازی را در پیش بینی تبخیر و تعرق در سه ایستگاه آب و هوایی مختلف ایران نشان داده اند. برای بهبود دقت پیش بینی، پیری و همکاران [۱۱] الگوریتم جستجوی فاخته (CSA) را برای بهینه سازی روش های ANN و ANFIS در برآورد تبخیر در دو ایستگاه آب و هوایی در ایران به کار بردند. به طور کلی، مطالعات نشان می دهند که استفاده از روش های محاسبات نرم ترکیبی جدید برای بهبود دقت پیش بینی و کاهش خطای روش حیاتی است. به همین دلیل، در این تحقیق، سیستم های عصبی-فازی تکاملی برای مدل سازی تبخیر پیشنهاد شده اند. برای بهینه سازی پارامترهای مدل های ANFIS، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه سازی موجک، به ترتیب، برای توسعه روش های محاسباتی نرم ترکیبی، ANFIS-Wavelet و ANFIS-GA، استفاده شده اند.

## ۲. مواد و روش ها

### ۲-۱. داده های استفاده شده

این مطالعه از داده های هواشناسی روزانه، ساعت خورشیدی، رطوبت نسبی، دمای هوا و سرعت باد از دو ایستگاه آب و هوایی در جنوب شرقی استان سیستان و بلوچستان، به نام های سنوپیچک خاش و سراوان، که در منطقه خشک و بیابانی واقع شده اند، استفاده کرده است. داده ها برای دوره ۵ ساله بین سال های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ جمع آوری شده اند و به سه بخش آموزش (با ۶۰٪ از مجموع

داده‌ها)، آزمایش (با ۲۰٪ از مجموع داده‌ها) و اعتبارسنجی (با ۲۰٪ باقی‌مانده) تقسیم شده‌اند. در جدول ۱ و ۲، ویژگی‌های آماری مختصر داده‌های استفاده‌شده برای ایستگاه‌های سنوپتیک خاش و سراوان بصورت خلاصه آمده است.

جدول ۱. آنالیز آماری ایستگاه سراوان

Statistic	Tm	RHm	Ud	Hs	Ea
Nbr. of observations	2072.00	2072.00	2072.00	2072.00	2072.00
Minimum	1.00	4.50	2.00	0.00	0.00
Maximum	34.10	97.50	27.00	14.50	21.90
1st Quartile	13.75	15.50	6.00	9.00	4.60
Median	22.45	23.00	8.00	10.00	9.20
3rd Quartile	28.15	37.00	10.00	11.10	13.00
Mean	21.03	28.23	8.26	9.59	8.88
Variance (n-1)	65.43	278.47	12.04	5.42	23.50
Standard deviation (n-1)	8.09	16.69	3.47	2.33	4.85

جدول ۲. آنالیز آماری ایستگاه خاش

Statistic	Tm	RHm	Ud	Hs	Ea
Nbr. of observations	2072.00	2072.00	2072.00	2072.00	2072.00
Minimum	2.15	2.50	0.00	0.00	0.00
Maximum	38.80	85.00	21.00	24.00	27.90
1st Quartile	15.83	16.88	5.00	9.00	5.20
Median	24.35	26.00	7.00	10.00	10.20
3rd Quartile	30.20	37.13	9.00	10.80	13.80
Mean	22.96	28.72	7.53	9.50	9.88
Variance (n-1)	66.59	227.78	8.64	5.24	27.61
Standard deviation (n-1)	8.16	15.09	2.94	2.29	5.25

در جدول ۱ و ۲، ویژگی‌های آماری مختصر داده‌های ایستگاه‌های سنوپتیک خاش و سراوان، از جمله حداقل (Minimum)، حداکثر (Maximum)، ربع اول (1st Quartile)، میانه (Median)، ربع سوم (۴/۳ داده‌ها)، میانگین (Mean)، واریانس (n-1) (Variance) و انحراف معیار (Standard deviation) (n-1) برای داده‌ها محاسبه شده است. تعداد داده‌ها در هر دو ایستگاه ۲۰۷۲ می‌باشد. مشخصات آماری دیگری که در جدول ۱ و ۲ آمده است عبارتند از: حداکثر تبخیر و درجه حرارت که به ترتیب برای ایستگاه سراوان ۲۱/۹ میلیمتر و ۳۴/۱۰ درجه سانتیگراد و برای ایستگاه خاش ۲۷/۹ میلیمتر و ۳۸/۸۰ درجه سانتیگراد محاسبه شده است.

۲-۲. مدل‌های استفاده شده

۲-۲-۱. سیستم استنباط عصبی - فازی انطباقی (ANFIS)

ANFIS یک مدل چند لایه است که در ابتدا توسط جانگ [۱۲] معرفی شد. این مدل، متغیرهای ورودی و خروجی را آموزش می‌دهد و توافق تخمین‌ها بین ورودی و خروجی را به شکل کارآمدترین ممکن فراهم می‌کند. چندین سیستم فازی در مقالات گزارش شده‌اند که عملکرد متفاوتی دارند و به عنوان نتایج، تفاوت‌های قابل توجهی دارند. در این تحقیق، نتایج نشان دادند که مدل FIS سوگنو، که داده‌های ورودی را به عنوان یک مجموعه فازی در نظر می‌گیرد و خروجی‌ها را به عنوان یک ضریب ثابت از یک تابع خطی در نظر می‌گیرد (تاکاگی و سوگنو ۱۹۸۵)، عملکرد خوبی دارد. همچنین، سیستم سوگنو به دلیل واقعیت فشرده بودن و کارآمد بودن از نظر زمان محاسباتی، بسیار رایج است [۵، ۱۳، ۱۴]. ANFIS در این تحقیق استفاده شده است و شامل یک ساختار شبکه است که از سیستم استنباط سوگنو استفاده می‌کند.

## ۲-۲-۲. بهینه سازی کنترل کننده فازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (ANFIS+ GA)

الگوریتم ژنتیک با بهره‌گیری از نظریه تکامل، راه حل مناسبی را برای حل مسئله انتخاب می‌کند [۱۵]. این الگوریتم، به تعداد جمعیت اولیه، پاسخ تصادفی برای مسئله تولید می‌کند و هر یک از این پاسخ‌ها در قالب یک کروموزوم کدگذاری می‌شوند. میزان برازندگی این کروموزوم‌ها بر حسب تابع معیار تعیین می‌شود. پس از تعیین میزان برازندگی هر کروموزوم، آن‌هایی که ارزش بالاتری داشته باشند، حفظ شده و بقیه به دور ریخته می‌شوند. غالباً دو کروموزومی که ارزش بیشتری دارند، به عنوان والد انتخاب شده و با مبادله ژن‌های خود، فرزندان را ایجاد می‌کنند. پس از تبادل ژنتیکی بین دو والد و عمل جهش، شرایط توقف بررسی شده و در صورت ارضای شرایط توقف، الگوریتم متوقف می‌شود. در غیر این صورت، الگوریتم به مرحله دوم باز می‌گردد و مراحل بعدی را تکرار می‌کند. شکل ۱، ساختار کلی الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد [۱۶]. انتخاب تابع معیار یا همان تابع برازندگی، گام مهمی در جهت بهبود روند الگوریتم ژنتیک است. برای هر کروموزوم در یک جمعیت، مقدار تابع برازندگی اندازه‌گیری و صحت عملکرد کنترل کننده توسط برازندگی این تابع سنجیده می‌شود. در این مقاله، هدف کاهش نوسانات توان خروجی تبخیر حول نقطه بهینه است. بنابراین، تابع برازندگی به صورت انتگرال قدر مطلق خطا انتخاب می‌شود.

## ۲-۲-۳. بهینه سازی کنترل کننده فازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (ANFIS+ Wavelet)

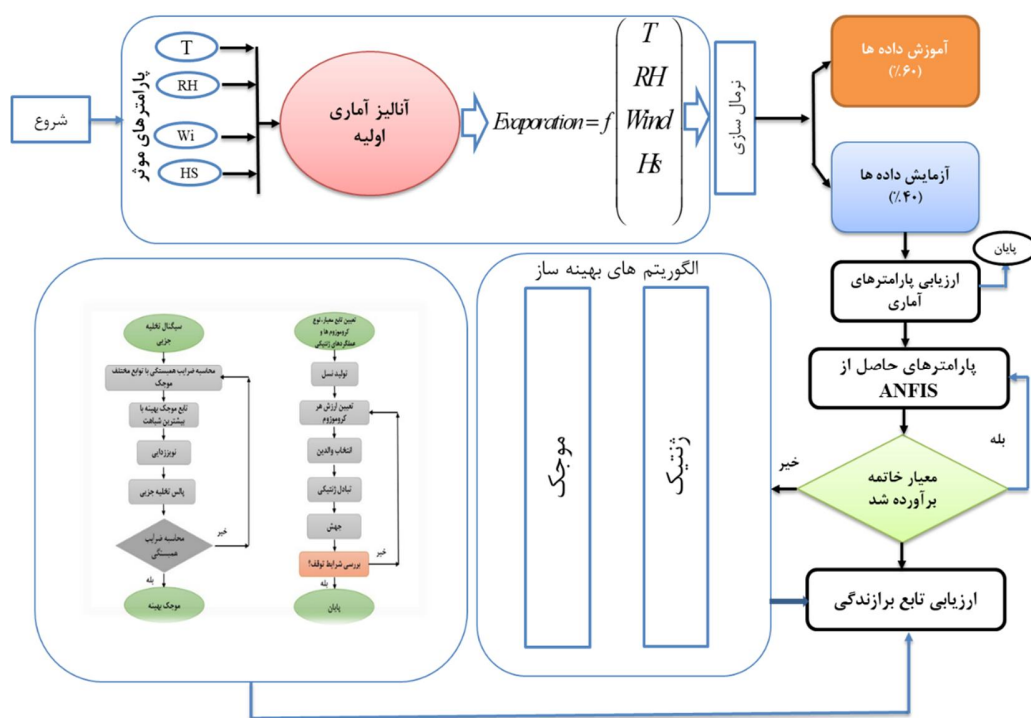
تبدیل موجک یکی از تبدیل‌های ریاضی کارآمد در زمینه پردازش سیگنال است. این تبدیل سیگنال را به یک مجموعه از توابع اساسی سیگنال تجزیه می‌کند و در حقیقت یک مجموعه تابع اساسی از تأخیر و تغییر در مقیاس موجک مادر حاصل می‌شود. موجک نوسان حداقلی دارد؛ به سمت صفر نزول می‌کند و این نزول باید در جهات مثبت و منفی واقع در دامنه‌اش محدود شده باشد. این مشخصه موجک را انعطاف‌پذیر کرده و مانند یک تابع رفتار می‌کند، بنابراین می‌توان رفتارهای موجی نامنظم پدیده‌های هیدرولوژیکی را با قابلیت مدل‌سازی توسط امواج نامنظم (موجک‌ها) نسبت به امواج مرتب (امواج سینوسی) بیشتر استفاده کرد. موجک دارای سه ویژگی تعداد نوسان محدود، بازگشت سریع به صفر در هر دو جهت مثبت و منفی در دامنه خود و میانگین صفر است که شرط مقبولیت نامیده می‌شود و به شکل رابطه ۱ زیر بیان می‌شود. (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۱)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) dt = 0 \quad (1)$$

که در آن:  $\varphi(t)$ : تابع تبدیل موج (موجک مادر) است. عبارت مادر به این دلیل به کار رفته است که توابع (موجک های) متفاوت به وجود آمده بر اساس پارامترهای مقیاس و انتقال همگی از تابع پایه (موجک مادر) ناشی می شوند. تابعی که برای پنجره‌ای کردن سیگنال استفاده می‌شود، موجک نامیده می‌شود رابطه ۲.

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \psi_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_t x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (2)$$

$\tau$  پارامتر انتقال، اندازه گیری زمان،  $s$  پارامتر مقیاس، اندازه گیری فرکانس و  $\psi$  موجک مادر، همه‌ی هسته‌هایی که با استفاده تبدیل (شیفت) و یا ضربی از موجک مادر بدست می‌آیند.

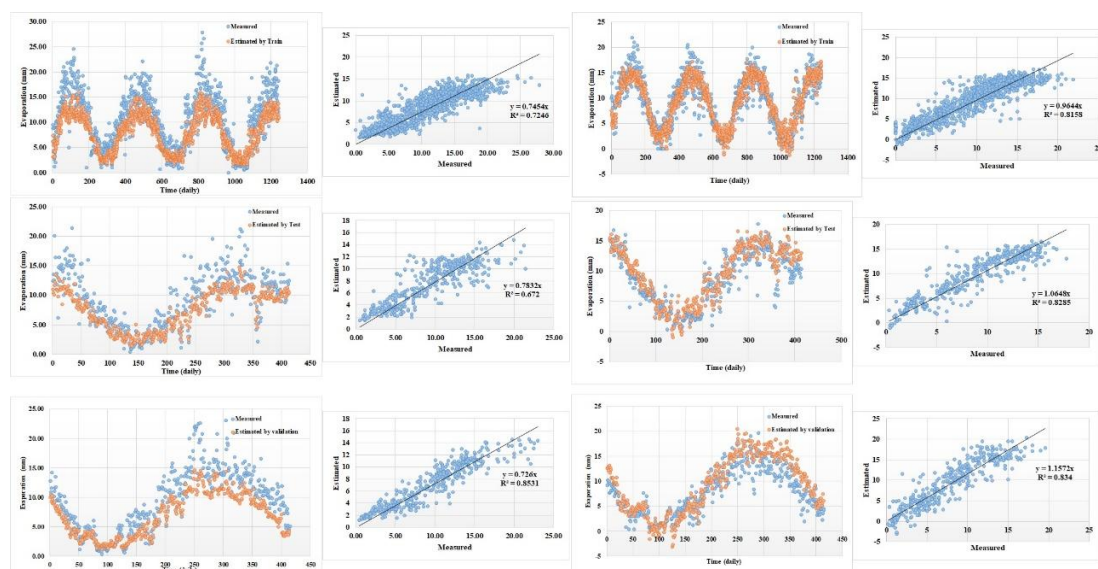


شکل ۱. فلوچارت های مربوط به الگوریتم ژنتیک و موجک به ترتیب از راست به چپ

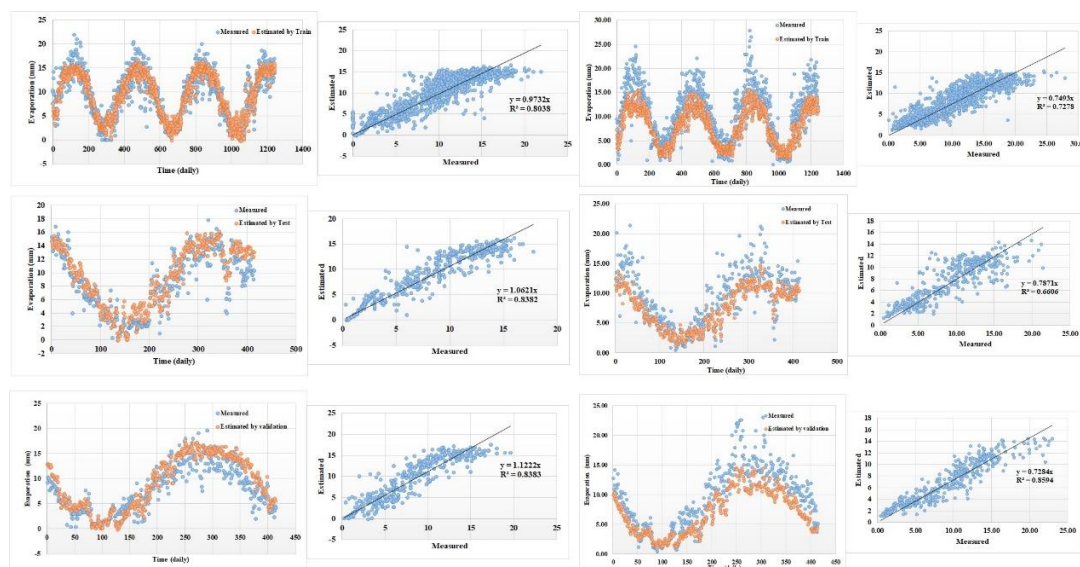
### ۳. کاربرد و نتایج

در این مطالعه، توانایی دو سیستم عصبی-فازی تکاملی ANFIS-GA و ANFIS-W در مدل سازی تبخیر با استفاده از ترکیبات ورودی مختلف داده‌های آب و هوایی بررسی شده و با روش کلاسیک ANFIS مقایسه شده‌اند. برای پارامترهای کنترل، مقادیر مختلفی برای هر روش امتحان شد. برای ANFIS-GA از ۲۰۰ تکرار استفاده شد و تعداد تکرارها، جمعیت، درصد جهش و ترکیب

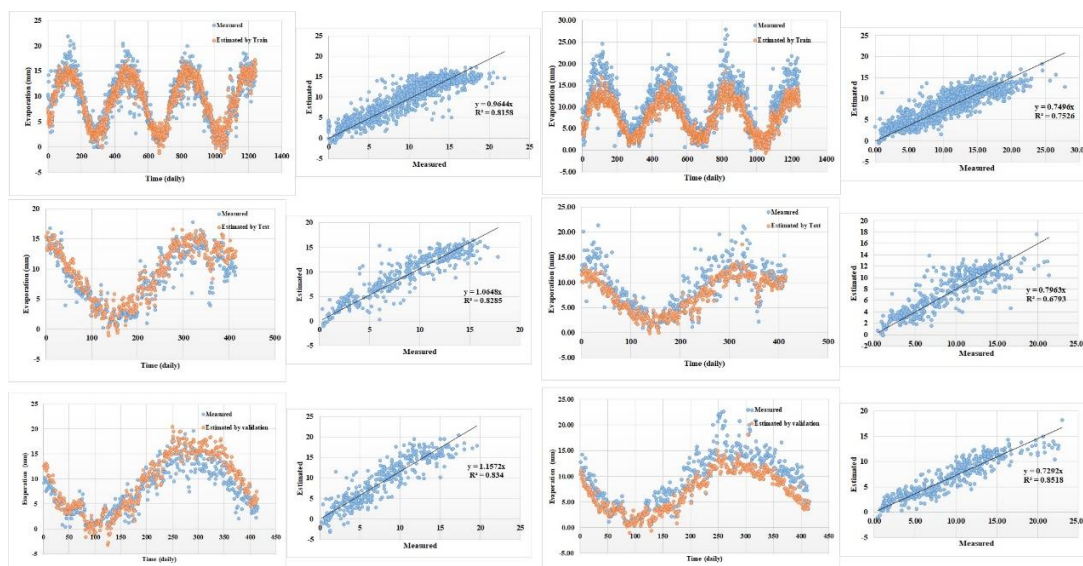
به ترتیب به ۲۰۰، ۵۵، ۷ و ۲۰ تنظیم شده است. برای ANFIS-W، تعداد تکرارها ۵۰۰ و نوع کرنل شعاعی استفاده شده است. برای ANFIS، خوشه‌بندی زیرکشی با ۱۵۰ تکرار و شعاع‌های ۰،۳۵ استفاده شد. تمام پارامترهای مورد استفاده تنظیم شدند و تعداد بهینه نورون‌ها در لایه مخفی برابر ۱۲ بود. در این مطالعه، معیارهای ارزیابی زیر برای انتخاب بهترین مدل‌ها استفاده شده‌اند.



شکل ۲. نتایج شبیه سازی مربوط به استنتاج فازی برای ایستگاه سراوان و خاش در سه مرحله آموزش، آزمایش و اعتبار سنجی به ترتیب از راست به چپ.



شکل ۳. نتایج شبیه سازی مربوط به ANFIS+GA برای ایستگاه سراوان و خاش در سه مرحله آموزش، آزمایش و اعتبار سنجی به ترتیب از راست به چپ.



شکل ۴. نتایج شبیه سازی مربوط به ANFIS+W برای ایستگاه سراوان و خاش در سه مرحله آموزش، آزمایش و اعتبار سنجی به ترتیب از راست به چپ.

جدول ۳- مقادیر بدست آمده ایستگاه سینوپتیک براساس  $R^2$  و RMSE در مرحله اعتبارسنجی

مدل	ایستگاه	RMSE	$R^2$
ANFIS	سراوان	3.23	0.85
ANFIS+GA		3.21	0.86
ANFIS+W		3.24	0.85
ANFIS	خاش	2.59	0.81
ANFIS+GA		2.38	0.84
ANFIS+W		2.70	0.83

نتایج نمودارهای شکل های ۱، ۲، ۳ و ۴ نشان می دهد که تمامی روش ها با استفاده از چهار متغیر سرعت باد، درجه حرارت، رطوبت نسبی و ساعت خورشیدی، پراکنده ترین برآورد را تولید می کنند. این پراکندگی برای هر سه مدل ANFIS، ANFIS+GA و ANFIS+W به خوبی نشان داده شده است. همچنین، شکل های ۱ تا ۴ نشان می دهند که مدل سازی با دقت خوبی با استفاده از روش های هوش مصنوعی در برآورد تبخیر در سه مرحله آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی انجام شده است. این نتایج برای هر دو ایستگاه به خوبی نشان داده شده است. بررسی مراحل مختلف شبیه سازی در هر دو ایستگاه با نسبت ۶۰٪ آموزش، ۲۰٪ آزمایش و ۲۰٪ اعتبارسنجی انجام شده است. اما بررسی مدل ها در جدول ۳، نشان می دهد که الگوریتم ژنتیک به لحاظ آماری در هر دو ایستگاه

برتری را نشان داده است. بر اساس مقدار  $R^2$ ، برای ایستگاه سروان و خاش به ترتیب برابر با ۰,۸۶ و ۰,۸۴ بوده است. همچنین، از لحاظ RMSE برای ایستگاه سروان و خاش به ترتیب ۳,۲۱ و ۲,۳۸ میلی‌متر بوده است.

#### نتیجه گیری کلی

مقایسه ورودی‌های مختلف آب و هوایی نشان داد که با افزایش تعداد متغیرهای ورودی، دقت تخمین مدل‌های استفاده شده افزایش می‌یابد و چهار متغیر ورودی (متوسط دما، ساعت خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد) بهترین نتایج را برای هر روش تولید می‌کنند. همچنین، این مقایسه نشان داد که تابش خورشید تأثیر بیشتری بر تأخیر در هر دو ایستگاه دارد، درحالی که از طرفی، به‌درگاه رطوبت نسبی و سرعت باد در ورودی‌ها، موجب کاهش دقت مدل‌ها در ایستگاه خاش می‌شود.