

## برآورد ضریب رواناب رگبار با استفاده از هوش مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کسلیان)

حسین پوراسدالله<sup>۱</sup>، مهدی وفاخواه<sup>۲\*</sup>، بهارک معتمد وزیری<sup>۳</sup>، علیرضا مقدم‌نیا<sup>۴</sup>، حسین اسلامی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری واحد علوم تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

۲. استاد دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳. استادیار واحد علوم تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

۴. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشگاه تهران

۵. استادیار واحد شوشتر دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۱۱/۱۱؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

### چکیده

در تحقیق پیش رو تخمین ضریب رواناب با توجه به تأثیر پوشش گیاهی انجام شده است. ابتدا مدل‌سازی ضریب رواناب با استفاده از داده‌های سیلاب و رگبار ساعتی طی دوره آماری ۱۳۶۶-۱۳۸۸ انجام شده و ضرایب رواناب حوضه آبخیز کسلیان تهیه شد. در مرحله بعد، با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، شبکه عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و عوامل مؤثر شامل شدت بارش، مقدار شاخص  $\phi$ ، بارش ۵ روز قبل و شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI) ضریب رواناب در مقیاس رگبار برآورد شد. سپس، صحت و اهمیت هر یک از عوامل مؤثر بر ضریب رواناب حوضه آبخیز کسلیان ارزیابی شد. نتایج نشان داد از بین سه مدل ANN، SVR و ANFIS، مدل ANN با مجذور میانگین مربعات خطا، ضریب تبیین، میانگین خطای اریبی و ضریب نش-ساتکلیف به ترتیب ۰/۸۴، ۰/۸۵، ۰/۸ و ۰/۰۱ در مرحله آموزش و ۰/۱۲، ۰/۷۶، ۰/۷۴ و ۰/۰۳- در مرحله آزمایش به عنوان مدل کارا در ارتباط با پیش‌بینی ضریب رواناب است. در مجموع، پیشنهاد می‌شود با توجه به اینکه ضریب رواناب کارکرد زیادی در فرایندهای هیدرولوژیک و بروز سیل دارد، بنابراین تخمین بهینه آن می‌تواند به مدیریت بهتر حفاظت آب و خاک و مدیریت فرسایش و رسوب حوضه آبخیز کمک کند.

**کلیدواژگان:** حفاظت آب و خاک، شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی، شبکه عصبی مصنوعی، مدیریت رواناب.

## مقدمه

در چند دهه اخیر، برآورد درست و به موقع از وضعیت کمی و کیفی رواناب، یکی از دغدغه‌های مدیریت‌های کلان کشور به حساب می‌آید و از طرف دیگر، عدم تخمین مناسب رواناب حاصل از بارش در حوضه‌های آبخیز، مدیریت بهینه منابع آبی و شبکه آبرسانی را دچار مشکل کرده است [۱]. با توجه به بروز سیلاب‌های گوناگون و خطرهایی که از این راه جوامع انسانی و سازه‌های سر راه آنها مورد تهدید قرار می‌گیرند، بررسی فرایند بارش - رواناب و اندازه‌گیری میزان رواناب اهمیت زیادی دارد [۲-۴]. یکی از پارامترهای اساسی در برآورد رواناب، ضریب رواناب است. به سبب دشواری و پیچیدگی مسائل مربوط به این پدیده، از سوی متخصصان روش‌ها و الگوهای مختلفی ارائه شده و مطالعات زیادی برای تعیین ضریب رواناب سطحی انجام یافته است که در اغلب آنها جدول‌هایی تهیه شده است که در آنها از یک یا چند عامل استفاده می‌شود [۴ و ۵]. روش‌های گوناگونی برای برآورد رواناب سطحی و حداکثر دبی سیلاب در پروژه‌های گوناگون آبخیزداری، کنترل سیلاب و طراحی بیشتر سازه‌های هیدرولوژی وجود دارد [۶-۸]. با توجه به اینکه تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی کارکرد زیادی در تغییر ضریب رواناب و در نتیجه، رواناب تولیدی حوضه دارد و می‌تواند در رگبارهای شدید موجب پاسخ سریع حوضه آبخیز و وقوع سیل شود، از این رو، ضرورت انجام پژوهش حاضر در شرایط فعلی مشهود است. در ضمن، استفاده از روش‌های جدید و کارا در برآورد و پیش‌بینی مانند روش‌های هوش مصنوعی باعث دقیق‌تر شدن پیش‌بینی‌ها می‌شود. مطالعات زیادی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی به برآورد و پیش‌بینی رواناب و ضریب رواناب پرداخته شده است. عطایی [۹] کارآمدی شبکه‌های عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب و مقایسه نتایج آنها با مدل HEC-HMS در حوضه آبریز قره‌سو در استان اردبیل را بررسی کرد. داده‌های استفاده شده در تحقیق یادشده شامل بارندگی روزانه به همراه دبی روزانه و لحظه‌ای رودخانه یادشده طی یک دوره آماری ۳۰ ساله بود. نتایج تحقیق یادشده نشان داد هر یک از روش‌های استفاده شده توانایی قابل توجهی در تخمین میزان بارش - رواناب حوضه قره‌سو داشته است و بنابراین، با اطمینان کافی می‌توان از آنها در مقادیر بارش - رواناب بهره

برد. Zhang و همکاران [۱۰] با استفاده از معادلات رگرسیونی به بررسی روابط بارش - رواناب پرداختند و محاسبه ضریب رواناب در سال‌ها و ماه‌های گوناگون در دو حوضه آبخیز در چین را قابل اعتماد ارزیابی کردند. McIntyre و همکاران [۱۱] ۳۶ رگبار در حوضه آبخیز WadiAhin عمان را مورد بررسی قرار دادند. آنها رابطه بین دبی اوج، حجم رواناب و ضریب رواناب را با ۴ متغیر بارش و شاخص رطوبت پیشین مطالعه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد حجم بارش، کنترل‌کننده اولیه حجم رواناب و دبی اوج بوده است و همچنین، ضریب رواناب در رگبارهای حوضه آبخیز مطالعاتی را بین ۲ تا ۳۶ درصد به دست آوردند. دستورانی و همکاران [۱۲] به کارایی شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی در مدل‌سازی بارش - رواناب در حوضه آبخیز سد زاینده‌رود پرداختند. به این منظور، ابتدا با بهره‌گیری از نرم‌افزار Wingamma داده‌ها و پارامترهای موجود بررسی و تجزیه و تحلیل شد و پارامترهای ورودی مناسب به علاوه تعداد مناسب داده برای آموزش شبکه، تعیین شد. سپس، با استفاده از آمار روزانه بارش - رواناب، کارایی شبکه عصبی مصنوعی و سیستم عصبی - فازی در تخمین رواناب حاصل از بارش بررسی شد. نتایج حاصل از مطالعه یادشده نشان داد این دو روش به میزان قابل قبولی قادر به تخمین رواناب حاصل از بارش با به کارگیری پارامترهای ورودی مناسب و استفاده از ساختارهای مناسب شبکه عصبی مصنوعی و شبکه عصبی - فازی، هستند. Sen [۱۳] تغییرات ضریب رواناب لحظه‌ای و دبی اوج را با استفاده از یک سری ورودی‌های فرضی در ترکیه شبیه‌سازی کرد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد ضریب رواناب با توجه به تغییرات بارش و رواناب در بازه‌های زمانی متفاوت بوده است. ایشان یک مدل نمایی برای تغییرات ضریب رواناب در فاصله‌های زمانی بسیار کوچک با فرض ثابت بودن دیگر متغیرها ارائه کرد. Solaimani [۱۴] برای پیش‌بینی و مدل‌سازی بارش - رواناب در حوضه آبخیز جراحی واقع در منطقه نیمه‌خشک ایران از شبکه عصبی مصنوعی با پرسپترون چندلایه و کاربرد و مقایسه الگوریتم‌های مختلف استفاده کرد. نتایج به دست آمده از مطالعه یادشده نشان داد روش شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی رواناب مناسب‌تر و کارا تر از روش کلاسیک رگرسیونی است. Fonley و Curtu [۱۵] تغییرات

آبخیز کسلیان، به این نتیجه رسیدند که ضریب رواناب به دست آمده از روش SCS به تغییرات شماره منحنی بسیار حساس است. در ضمن، تا کنون در ایران، از روش شبکه عصبی- فازی تطبیقی به منظور پیش‌بینی ضریب رواناب استفاده نشده است؛ بنابراین تحقیق حاضر در نظر دارد از این روش به دلیل یادشده استفاده کند. هدف از تحقیق حاضر، تخمین ضریب رواناب با استفاده از عواملی همچون شدت بارندگی، شاخص فی، بارندگی ۵ روز قبل و شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی با استفاده از سه مدل شبکه عصبی، شبکه عصبی تطبیقی فازی و رگرسیون بردار پشتیبان و تعیین تأثیر هر یک از این عوامل بر ضریب رواناب است.

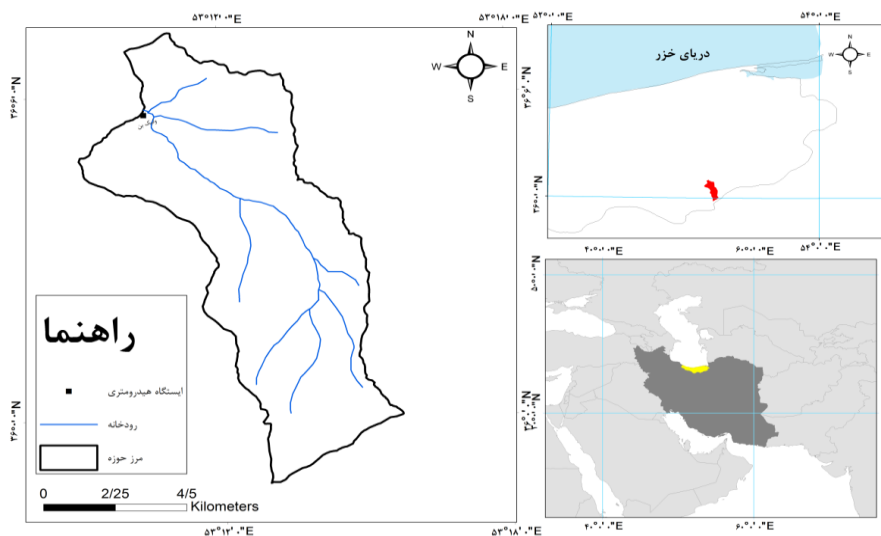
### مواد و روش‌ها

#### خصوصیات منطقه مطالعه شده

حوضه آبخیز کسلیان در شمال ایران با مساحت ۶۶ کیلومتر مربع در محدوده رشته کوه‌های البرز بین  $12^{\circ} 18'$  تا  $10^{\circ} 30' 53''$  طول شرقی و  $35^{\circ} 16'$  تا  $35^{\circ} 02'$  عرض شمالی واقع شده است. رودخانه کسلیان به همراه رود تالار جزء سرشاخه‌های مهم حوضه آبخیز تالار به شمار می‌روند. رودخانه‌های کسلیان و تالار در نزدیکی شیرگاه به هم می‌پیوندند و در نهایت، به دریای خزر می‌ریزند. در خروجی این حوضه ایستگاه هیدرومتری ولیکن قرار دارد. موقعیت حوضه بررسی شده در ایران و استان مازندران در شکل ۱ آورده شده است.

غیرخطی ضریب رواناب محاسبه شده توسط مدل هیدرولوژیکی ODEs در مقیاس یک دامنه را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد افزایش ضریب رواناب به عوامل خاصی همچون ویژگی‌های دامنه و شدت و فراوانی بارش‌های پیشین داشته است. Moeyersons و همکاران [۱۶] ویژگی‌های مکانی ضریب رواناب ۲۵ بارش مؤثر در ایجاد آبکند در ۳۵ منطقه در Kinshas کنگو را مطالعه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تراکم خاک، وجود مواد نفوذناپذیر، پوشش گیاهی و شیب نیز به ترتیب مهم‌ترین عوامل کنترل کننده ضریب رواناب بودند.

با توجه به اینکه ارزیابی پویایی ضریب رواناب در مقیاس حوضه آبخیز و تأثیر تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی بر ضریب رواناب رگبار پژوهش‌های کمی صورت گرفته و از طرفی، در حوضه بررسی شده نیز پژوهشی در این خصوص مشاهده نشده است، این ضرورت احساس می‌شود. پژوهش حاضر در حوضه آبخیز کسلیان به سبب شرایط طبیعی و اقلیمی و جاذبه‌های توریستی و تأثیرپذیری زیاد آن از تغییر کاربری و تبدیل بخش عمده‌ای از اراضی کشاورزی و مرتعی به مناطق مسکونی طی سالیان اخیر انجام گرفته است. به رغم ضرورت بررسی تغییرات ضریب رواناب رگبار در منطقه مطالعه شده و تعیین نقش پوشش گیاهی بر تغییرپذیری ضریب رواناب، تا کنون پژوهشی در این زمینه در منطقه صورت نگرفته است. فقط می‌توان به تحقیق شریفی و همکاران [۵] اشاره کرد که با ارزیابی ضریب رواناب ناشی از بارش در حوضه



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز کسلیان در ایران و استان مازندران

با تقسیم حجم رواناب به دست آمده از سطح زیرمنحنی آب نمود به حجم بارش، مقدار ضریب رواناب متوسط کل واقعه محاسبه شد [۱۷].

#### تعیین شاخص $\phi$

این شاخص در واقع نشان دهنده تلفات متوسط است. ابتدا تخمین اولیه شاخص  $\phi$  از طریق تقسیم تفاضل بارندگی و رواناب بر مدت زمان بارندگی به دست می آید. سپس، مقدار  $\phi$  واقعی از طریق سعی و خطا طوری تعیین شد که بارش مازاد و ارتفاع رواناب با هم برابر شوند [۱۷].

#### شیوه تقسیم بندی دوره های زمانی مطالعه شده

در این پژوهش، میانگین و انحراف معیار شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی منطقه مطالعه شده به عنوان مبنای طبقه بندی دوره های زمانی در نظر گرفته شد [۱۸]. جدول ۱ دوره های زمانی مطالعه شده و شیوه تقسیم بندی آنها را نشان می دهد.

جدول ۱. گروه بندی شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی

شماره	طبقه	تعداد واقعه ها
۱	میانگین - انحراف معیار < شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی	۱۳
۲	میانگین > شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی > انحراف معیار	۶
۳	میانگین > شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی > انحراف معیار + میانگین	۳۱
۴	میانگین > شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی > انحراف معیار + میانگین	۴

که در آن  $P_{NIR}$  و  $P_{Red}$  به ترتیب بازتابندگی در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک است. همچنین، تاریخ تصاویر لندست برای تهیه شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی در جدول ۲ نشان داده شده است.

#### تعیین متغیرهای مستقل و ضریب رواناب

در این مرحله ضمن تعیین متغیرهای مستقل، خصوصیات مختلف بارش مانند مقدار شاخص  $\phi$ ، مجموع بارش ۵ روز قبل، شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی به عنوان متغیرهای مستقل و ضریب رواناب رگبار بخش های مختلف به عنوان متغیر وابسته مد نظر قرار گرفت. همچنین، ورودی ها و نیز داده های مراحل آموزش و آزمایش برای همه مدل ها یکسان بوده است.

#### جمع آوری اطلاعات و داده های مورد نیاز پژوهش

برای انجام پژوهش حاضر، ابتدا اطلاعات و داده های مورد نیاز شامل خصوصیات کلی حوضه آبخیز، آب نمودهای مربوط به ایستگاه هیدرومتری ولیک بن واقع در خروجی حوضه آبخیز و باران نمودهای متناظر مربوط به ایستگاه سینوپتیک سنگده واقع در مرکز ثقل حوضه آبخیز با مراجعه به شرکت تحقیقات منابع آب (تماب) و اداره کل آب منطقه ای استان مازندران و تصاویر ماهواره ای طی سال های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۱ متناظر با رگبارهای منتخب از سایت <https://earthexplorer.usgs.gov/> دانلود شدند.

#### تعیین ضریب رواناب مربوط به هر رگبار

تجزیه آب نمود و تعیین رواناب مستقیم ناشی از رگبار مربوطه برای هر رگبار انجام شد. پس از بررسی روش های مختلف کسر آب پایه، روش مناسب برای جداسازی آب پایه بر اساس مقایسه با روش گرافیکی تعیین دقیق نقطه عطف شاخه نزولی آب نمود انتخاب شد [۱۷]. سپس،

#### شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI)

شاخص پوشش گیاهی به عنوان یکی از شاخص های پر کاربرد در مطالعات زبادی برای ارزیابی پوشش گیاهی استفاده شده است. مبنای ساختاری این شاخص، وجود کلروفیل در گیاهان مختلف است که نور قرمز را جذب و لایه مزوفیل برگ نور مادون قرمز نزدیک را منعکس می کند [۱۹]. این شاخص نشان دهنده سلامت، تنش، سبزیگی و بیوماس گیاهی است و با استفاده از باندهای قرمز و نیز مادون قرمز نزدیک از رابطه ۱ محاسبه می شود [۱۹]:

$$NDVI = \frac{P_{NIR} - P_{Red}}{P_{NIR} + P_{Red}} \quad (1)$$

جدول ۲. تصاویر لندست برای تهیه شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی

شماره	تاریخ (شمسی)	سنجنده	ماهواره	شماره	تاریخ (شمسی)	سنجنده	ماهواره
۱	۹/۳/۱۳۶۶	TM	LANDSAT5	۲۸	۲۴/۷/۱۳۷۵	TM	LANDSAT5
۲	۸/۳/۱۳۶۶	TM	LANDSAT5	۲۹	۱۱/۴/۱۳۷۶	TM	LANDSAT5
۳	۲۸/۷/۱۳۶۶	TM	LANDSAT5	۳۰	۱۵/۲/۱۳۷۶	TM	LANDSAT5
۴	۴/۸/۱۳۶۶	TM	LANDSAT5	۳۱	۱۷/۸/۱۳۸۵	ETM+	LANDSAT7
۵	۱۶/۸/۱۳۶۶	TM	LANDSAT5	۳۲	۲۴/۸/۱۳۸۵	ETM+	LANDSAT7
۶	۱۰/۱۱/۱۳۶۶	TM	LANDSAT5	۳۳	۲۶/۶/۱۳۸۵	ETM+	LANDSAT7
۷	۹/۶/۱۳۶۷	TM	LANDSAT5	۳۴	۱۷/۸/۱۳۸۴	ETM+	LANDSAT7
۸	۳۰/۶/۱۳۶۷	TM	LANDSAT5	۳۵	۳/۵/۱۳۸۲	ETM+	LANDSAT7
۹	۲۹/۸/۱۳۶۷	TM	LANDSAT5	۳۶	۱۶/۲/۱۳۸۳	ETM+	LANDSAT7
۱۰	۲۵/۱۲/۱۳۶۷	TM	LANDSAT5	۳۷	۷/۱/۱۳۸۶	ETM+	LANDSAT7
۱۱	۹/۲/۱۳۶۸	TM	LANDSAT5	۳۸	۲۴/۲/۱۳۸۶	ETM+	LANDSAT7
۱۲	۱۱/۶/۱۳۶۹	TM	LANDSAT5	۳۹	۱۲/۱۱/۱۳۸۵	ETM+	LANDSAT7
۱۳	۱۰/۷/۱۳۶۹	TM	LANDSAT5	۴۰	۳۰/۱۱/۱۳۸۶	ETM+	LANDSAT7
۱۴	۲۹/۳/۱۳۷۰	TM	LANDSAT5	۴۱	۱۳/۱۲/۱۳۸۶	ETM+	LANDSAT7
۱۵	۳/۳/۱۳۷۰	TM	LANDSAT5	۴۲	۱۱/۹/۱۳۸۷	ETM+	LANDSAT7
۱۶	۲۳/۴/۱۳۷۰	TM	LANDSAT5	۴۳	۴/۱۱/۱۳۸۷	ETM+	LANDSAT7
۱۷	۱۳/۷/۱۳۷۰	TM	LANDSAT5	۴۴	۲۳/۱۱/۱۳۸۷	ETM+	LANDSAT7
۱۸	۱۵/۷/۱۳۷۱	TM	LANDSAT5	۴۵	۱۳۸۸.۰۱.۳۱	ETM+	LANDSAT7
۱۹	۳۰/۳/۱۳۷۱	TM	LANDSAT5	۴۶	۲۷/۲/۱۳۸۸	ETM+	LANDSAT7
۲۰	۱۴/۳/۱۳۷۲	TM	LANDSAT5	۴۷	۲۴/۵/۱۳۸۸	ETM+	LANDSAT7
۲۱	۲۱/۴/۱۳۷۲	TM	LANDSAT5	۴۸	۲/۷/۱۳۸۸	ETM+	LANDSAT7
۲۲	۳۰/۷/۱۳۷۳	TM	LANDSAT5	۴۹	۱۰/۷/۱۳۸۸	ETM+	LANDSAT7
۲۳	۵/۹/۱۳۷۳	TM	LANDSAT5	۵۰	۱۶/۷/۱۳۸۸	ETM+	LANDSAT7
۲۴	۲۶/۱۲/۱۳۷۳	TM	LANDSAT5	۵۱	۸/۱۲/۱۳۸۸	ETM+	LANDSAT7
۲۵	۲۶/۳/۱۳۷۴	TM	LANDSAT5	۵۲	۲۱/۱/۱۳۸۹	ETM+	LANDSAT7
۲۶	۲۰/۷/۱۳۷۴	TM	LANDSAT5	۵۳	۳۰/۱/۱۳۸۹	ETM+	LANDSAT7
۲۷	۱۵/۷/۱۳۷۵	TM	LANDSAT5	۵۴	۲/۴/۱۳۸۹	ETM+	LANDSAT7

### ارتباط متغیرهای مستقل با ضریب رواناب

ارتباط و مدل سازی متغیرهای مستقل با ضریب رواناب از طریق روش های شبکه عصبی مصنوعی، شبکه عصبی-فازی تطبیقی و رگرسیون بردار پشتیبانی اجرا شدند. به این منظور، داده ها برای مراحل آموزش، آزمون و اعتبارسنجی مشخص شدند و در نهایت، با استفاده از ترکیب های مختلف مدل ها اجرا شدند.

### شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

ANN نوعی روش محاسباتی با قابلیت دستیابی، ارائه و محاسبه است [۲۰]. هدف از مدل ANN، ساخت نوعی روش پیش بینی خروجی از عوامل ورودی که در فرایند مدل سازی استفاده نشده اند، است [۲۱]. مدل ANN استاندارد شامل سه لایه، یعنی ورودی، لایه های پنهان و لایه خروجی است. برای ایجاد نتایج، از تابع انتقال غیرخطی استفاده می کند [۲۱]. در این مطالعه از شبکه های عصبی سه لایه (MLP) استفاده شد [۲۱ و ۲۲].

### شبکه عصبی - فازی تطبیقی

در سال های اخیر از ترکیب منطق فازی با شبکه های عصبی مصنوعی، سیستم های فازی-عصبی به وجود آمده اند. شبکه تطبیقی، نوعی ساختار پیشروی چندلایه است که رفتار کلی خروجی آن به وسیله مقدار یک مجموعه از پارامترهای قابل اصلاح تعیین می شود؛ به بیان دیگر، ساختار شبکه تطبیقی شامل یک مجموعه از گره های متصل به هم است که به طور مستقیم به هم مرتبط شده اند و در آن هر گره یک واحد پردازش محسوب می شود. ANFIS یکی از سیستم های متداول عصبی فازی است که سیستم فازی سوگنو را در یک ساختار عصبی اجرا می کند. این سیستم برای فرایند آموزش از ترکیبی از روش های آموزش پس انتشار خطا و کمینه مربعات خطا بهره گیری می کند [۲۳].

### رگرسیون بردار پشتیبان

رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) از اصول مشابه SVM برای طبقه بندی استفاده می کند، روش SVR زیرمجموعه

### اعتبارسنجی مدل‌های استخراجی

پس از اینکه از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و شبکه عصبی فازی تطبیقی به همراه رگرسیون بردار پشتیبان برای برآورد ضریب رواناب استفاده شد، با مقایسه این روش‌ها و مقایسه مقادیر مدل‌سازی با مشاهده‌ای بر اساس میانگین خطای اریب یا انحراف (MBE<sup>۱</sup>)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE<sup>۲</sup>)، ضریب تعیین<sup>۳</sup> و ضریب نش-ساتکلیف، بهترین مدل انتخاب شده و ضریب رواناب برای دوره‌های مختلف برآورد و مقایسه شد.

### بحث و نتیجه‌گیری

#### مشخصات عمومی وقایع مطالعه شده

مشخصات ۵۴ رگبار و دبی متناظر آن پس از بررسی صحت و دقت باران‌نمودها و آب‌نمودهای مربوطه در جدول ۳ ارائه شده است.

#### نتایج مدل‌سازی ضریب رواناب

نتایج مدل‌سازی ضریب رواناب با استفاده از عوامل مستقل مانند شدت متوسط بارندگی، شاخص فی، بارش ۵ روز قبل، شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی تعیین شد. در مدل ANN به کمک فرایند یادگیری پیش‌بینی صورت می‌گیرد. ۷۰ درصد داده‌ها [۳۸] برای دوره آموزش انتخاب شدند و ۳۰ درصد [۱۶] برای آزمون مدل تعیین شدند. در روش استنتاج فازی-عصبی در این تحقیق، با استفاده از الگوریتم یادگیری FCM<sup>۴</sup> و الگوی هیبریدی برای تعیین پارامترهای سیستم فازی به منظور آموزش و تست مدل استفاده شد. در روش SVR تابع کرنل RBF و Linear از توابع کرنل به منظور پیش‌بینی ضریب رواناب استفاده شد. مقادیر پارامترهای  $c$ ،  $p$ ،  $\epsilon$  و برای روش SVR به ترتیب برابر ۲، ۰/۰۰۱، ۲۰۰ در نظر گرفته شد. شکل‌های ۲ و ۳، عملکرد و مراحل آموزش و میزان ضریب همبستگی را در مدل ANN، شکل ۴ و ۵، نتایج مدل ANFIS در برآورد ضریب رواناب و در شکل ۶، کمینه‌سازی خطا با استفاده از روش SVR با برآورد محدودکننده‌ها نمایش داده شده است.

رگرسیونی مدل SVM است. در SVR، تابع مرتبط با متغیر وابسته با چند متغیر مستقل برآورد می‌شود [۲۴]. در این روابط رگرسیونی از میان متغیرهای مستقل و وابسته با میزان خطای مجاز تعیین می‌شود. اگر  $W$  بردار ضرایب و  $b$  ثابت تابع رگرسیونی و  $\phi$  نیز تابع کرنل باشد، برای پیدا کردن فرم مشخصی از تابع  $f(X)$  به شرح زیر باید عمل کرد (روابط ۲ و ۳):

$$f(x) = W^T \cdot \phi(x) + b$$

$$W^T \cdot \phi(X_i) + b - y_i \leq \epsilon + \epsilon_i^*, \frac{1}{2} W^T \cdot W + C \sum_{i=1}^N \epsilon_i + \sum_{i=1}^N \epsilon_i^* \quad (2)$$

$$y_i - W^T \cdot \phi(X_i) - b \leq \epsilon + \epsilon_i, \epsilon_i, \epsilon_i^* \geq 0$$

$$\sum_{i=1}^N \bar{a}_i \cdot \phi(x_i)^T \cdot \phi(x) + b \quad (3)$$

که در آن  $C$ : عدد صحیح و مثبت است. این عامل تعیین‌کننده مقدار خطای مدل‌سازی هنگام آموزش است.  $\phi$ : تابع کرنل،  $N$ : تعداد داده و دو متغیر  $\epsilon$  و  $\epsilon_i^*$  مشخصه‌های کمبود هستند؛ که در رابطه یادشده  $\bar{a}$ ، ضرایب لاگرانژ است. دلیل پیچیده بودن محاسبات مربوط به  $\phi(x)$ ، از کرنل RBF به منظور حل آن استفاده می‌شود (رابطه ۴).

$$K(X_j, X_i) = \phi(X_j)^T \phi(X_i) \quad (4)$$

معادله این کرنل به صورت رابطه ۵ نشان داده شده است.

$$\sqrt{b^2 - 4ac} \quad (5)$$

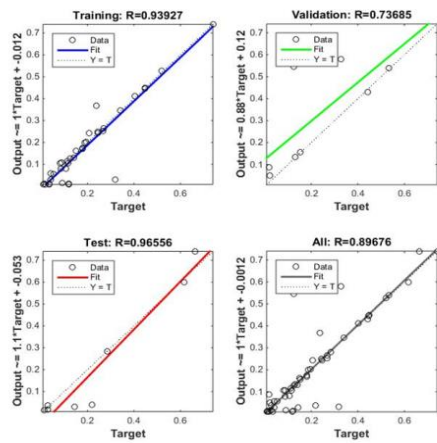
#### بررسی ارتباط ضریب رواناب با پوشش گیاهی

به منظور بررسی ارتباط بین ضریب رواناب و گروه‌بندی رگبارهایی که دارای مقادیر مشخص از شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی بوده‌اند از روش تجزیه واریانس یک‌طرفه در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. در روش تجزیه واریانس یک‌طرفه از آزمون چنددامنه‌ای دانکن که از متداول‌ترین آزمون‌ها برای مقایسه گروه‌های شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی است، استفاده شد. طی آزمون چنددامنه‌ای دانکن در این روش پس از رد فرضیه صفر (برابری تمام میانگین‌های ضریب رواناب در گروه‌های مختلف شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی دوره مطالعه شده)، میزان اختلاف میانگین نشان‌دهنده ارتباط بین ضریب رواناب با پوشش گیاهی است.

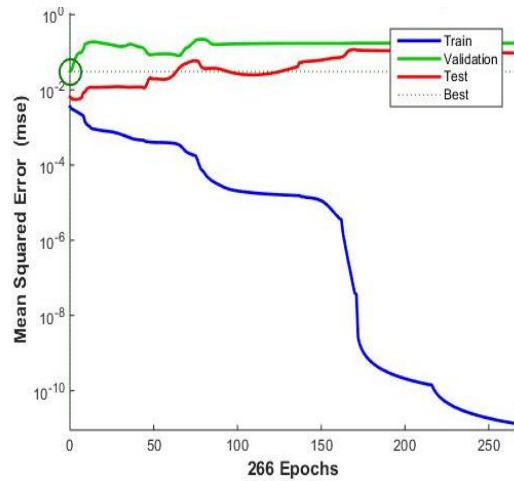
1. Mean Bias Error  
2. Root Mean Squared Error  
3. Coefficient of Determination  
4. Fuzzy c-means

جدول ۳. مشخصات عمومی وقایع استفاده شده در تحقیق

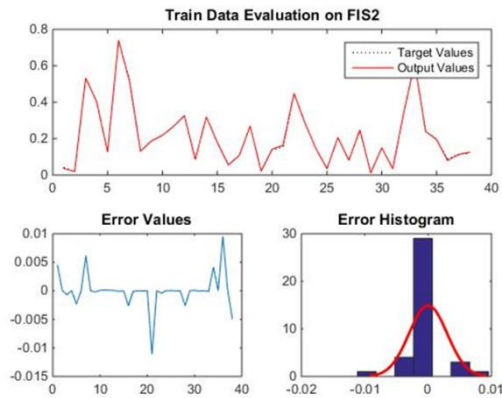
سال شمسی	مقدار کل بارش (میلی متر)	مدت کل بارش (ساعت)	شدت متوسط بارندگی (میلی متر بر ساعت)	دبی اوج (m <sup>3</sup> /s)	ضریب رواناب کل (درصد)	ارتفاع رواناب (میلی متر)	شاخص فی (میلی متر بر ساعت)	بارش ۵ روز قبل (میلی متر)
۹۳/۱۳۶۶	۱۳/۷۷	۶/۳۵	۲/۲	۱/۵۳	۴/۱۱	-/۵۷	۱/۶۱	۱/۵
۸۳/۱۳۶۶	۱۴/۹۸	۴/۳۵	۳۳/۳	۲/۱	۱/۹۹	-/۳	۴/۹	.
۲۸/۷/۱۳۶۶	۶/۶۶	۳	۲۲/۲	۳/۷۸	۵۳/۲	۳/۵۴	-/۲۷	.
۴۸/۱۳۶۶	۱۵/۸	۴	۳/۹۵	۱۲/۱۱	۴۰/۳۲	۶/۳۷	-/۶۱	۱۸/۵
۱۶/۸/۱۳۶۶	۷/۴۹	۳	۲/۵	۱/۵۱	۱۲/۴۷	-/۹۳	-/۶۸	.
۱۰/۱/۱۳۶۶	۵/۱	۱/۵	۳/۴	۳/۴۱	۷۳/۹۹	۳/۷۷	-/۲۳	۶۶
۹/۶/۱۳۶۷	۹/۴	۶	۱/۵۷	۷/۵	۵۲/۰۸	۴/۹	-/۱۹	.
۳۰/۶/۱۳۶۷	۱۴/۶۶	۱۰	۱/۴۷	۲/۹۲	۱۳/۰۹	۱/۹۲	-/۴۴	۱۱۰/۵
۲۹/۸/۱۳۶۷	۹/۷۲	۲/۵	۳/۸۹	۳/۱۱	۱۸/۷۶	۱/۸۲	-/۹۵	۱۵
۲۵/۱۲/۱۳۶۷	۱۶/۸۳	۳	۵/۶۱	۱۳/۶۴	۲۱/۸۴	۳/۶۷	۱/۷	۹
۹/۲/۱۳۶۸	۸/۴۶	۲/۵	۳/۳۸	۲/۶۶	۲۶/۶۷	۲/۲۶	-/۶۶	۳/۵
۱۱/۶/۱۳۶۹	۱۸/۲	۵	۳/۶۴	۱۲/۵۱	۳۲/۶۴	۵/۹۴	-/۶۹	۱۳
۱۰/۷/۱۳۶۹	۱۵/۹۵	۶/۵	۲/۴۵	۱/۶	۸/۶۵	۱/۳۸	-/۹۹	۹/۵
۲۹/۳/۱۳۷۰	۱۰/۵	۲/۲۵	۴/۶۶	۱۲/۴۵	۳۱/۹۶	۳/۳۵	۱/۹	۵
۳/۳/۱۳۷۰	۲۵/۱۳	۶/۵	۳/۸۷	۱۰/۳۹	۱۷/۹۸	۴/۵۲	۱/۲۱	۱/۵
۲۳/۴/۱۳۷۰	۲۴/۴۳	۱۲	۲/۰۴	۱/۴۸	۵/۳۹	۱/۳۲	۱/۲۸	.
۱۳/۷/۱۳۷۰	۸/۰۵	۳	۲/۶۸	۶/۹۱	۱۰/۶۶	-/۸۶	-/۹۷	۲۸
۱۵/۷/۱۳۷۰	۳/۷۹	۶/۵	-/۸۵	۱/۷۴	۲۶/۸۹	۱/۰۲	-/۱۱	۲۷
۳۰/۳/۱۳۷۱	۴۴/۱۹	۱	۱۹/۴۴	۱/۴۷	۲/۱۶	-/۴۲	-/۳۳	۸
۱۴/۳/۱۳۷۲	۹/۹۹	۱۱	-/۹۱	۱/۶۹	۱۴/۱۶	۱/۴۱	۱/۱۷	۲۵
۲۱/۴/۱۳۷۲	۸/۵	۸	۱/۰۶	۱/۴۶	۱۵/۲۸	۱/۳	-/۹۶	.
۳۰/۷/۱۳۷۳	۲۳/۸۹	۱۳/۵	۱/۶۸	۱۲/۲۲	۴۴/۸۷	۱۰/۷۲	-/۳۲	۳۶
۵/۹/۱۳۷۳	۱۷/۴۱	۴	۴/۳۵	۸/۵۴	۲۸/۴۹	۴/۹۶	-/۹۸	۳/۵
۲۶/۱۲/۱۳۷۳	۱۸/۵۴	۸/۵	۱/۹۵	۲/۹۵	۱۴/۴۹	۲/۶۹	۱/۱	۳۹
۲۶/۳/۱۳۷۴	۱۹/۹	۲/۲۵	۴/۸۴	۱/۴۱	۳/۵	-/۷	۸/۱۵	۳/۵
۲۰/۷/۱۳۷۴	۲۷/۲۵	۲۳	۱/۰۹	۸/۲۳	۲۰/۶۵	۵/۶۳	-/۶۹	۱۱/۵
۱۵/۷/۱۳۷۵	۱۸/۱۳	۱۳	۱/۳۹	۲/۲۲	۸/۰۸	۱/۴۶	-/۶۹	۳۴
۲۴/۷/۱۳۷۵	۲۲/۱۳	۷	۳/۱۶	۱۲/۰۱	۲۴/۵۱	۵/۴۲	۱/۵۱	.
۱۱/۴/۱۳۷۶	۲۷/۲	۲/۵	۱۰/۸۸	۲/۰۷	۱/۲۲	-/۳۳	۱/۱۷	۰/۵
۱۵/۲/۱۳۷۶	۱۳/۰۸	۴	۳/۲۷	۳/۲۷	۱۴/۹۴	۱/۹۵	۱/۰۵	۲۸/۵
۱۷/۸/۱۳۸۵	۵۲/۹	۲۴	۲/۱۸	۲/۵۹	۳/۴۹	۱/۸۵	۵/۹۷	.
۲۴/۸/۱۳۸۵	۸/۷	۱۲/۲۵	-/۷	۳/۸۷	۳۲/۹۹	۲/۹۶	-/۵۷	۱۸
۲۶/۶/۱۳۸۵	۱۲/۷	۵/۷۵	۲/۱۲	۴/۶	۱۲/۱۴	۷/۸۲	-/۸۸	۱۳/۵
۱۷/۸/۱۳۸۴	۴۱/۹۳	۲۶/۷۵	۱/۵۶	۱/۵	۲۴/۴۱	۱۰/۳۳	-/۵	۱
۳/۵/۱۳۸۲	۱۱	۱۳/۵	-/۸۱	۲/۴۱	۱۹/۵۲	۲/۱۵	-/۸۵	۲۱
۱۶/۲/۱۳۸۳	۱۵	۱۱/۲۵	۱/۳۳	۱/۶۲	۸/۹۶	۱/۳۴	۲/۲۶	۱/۵
۷/۱/۱۳۸۶	۱۶/۲	۶/۵	۲/۴	۵/۰۴	۱۱/۳۳	۱/۸۴	۳/۴۳	.
۲۴/۲/۱۳۸۶	۳۱/۹۵	۳۰/۷۵	۱/۰۴	۵/۱۴	۱۲/۰۴	۳/۸۵	۲/۶	۵
۱۲/۱/۱۳۸۵	۱۵/۴	۷	۲/۱۲	۳/۷۴	۱۱/۴۷	۱/۷۷	۲/۲۲	۲۴/۵
۳۰/۱/۱۳۸۶	۱۱/۷۵	۳	۳/۶۱	-/۵۸	۳۱/۴۴	۵/۲۱	-/۵۸	۷
۱۳/۱/۱۳۸۶	۳/۶۳	۱۰/۱۵	۶/۰۲	۲/۶۱	۱/۳۹	-/۸۸	۲/۱۱	۲
۱۱/۹/۱۳۸۷	۷/۷	۸/۴۵	-/۸۵	۷/۲	۲۹/۶۶	۹/۱	۵/۱	.
۴/۱/۱۳۸۷	۱۲/۵۳	۲/۱۵	۵/۵۶	۵/۰۷	۱۱/۷۸	۱/۴۸	۱/۹۸	.
۲۳/۱/۱۳۸۷	۳/۶۵	۱	۳/۶۵	۱/۲۷	۸/۶۲	-/۳۱	۱/۰۷	۳/۵
۱۳۸۸۰۱۳۱	۱۰/۰۸	۱/۵	۵/۷۵	۱/۴۱	۳/۹۷	-/۴	۱/۷۳	۱
۲۷/۲/۱۳۸۸	۶/۲	۸/۵	-/۹۱	۴/۲	۴۴/۶۸	۲/۷۷	-/۹۵	۶۰
۲۴/۵/۱۳۸۸	۱۱/۴۵	۲/۴۵	۳/۸۱	۱۰/۱	۲۳/۸۵	۲/۷۳	-/۹۹	۱۱/۵
۲/۷/۱۳۸۸	۱۳/۴۷	۵/۵	۸/۲	۱/۰۴	۱/۱۲	۰/۵۳	۴/۲	۴۱
۱۰/۷/۱۳۸۸	۳/۱۵	۱/۱۵	۲/۱۲	-/۹۲	۱۲/۶۴	-/۴	-/۹۸	۱۷
۱۶/۷/۱۳۸۸	۵/۳۶	۱/۱۵	۳/۵۷	۲/۹۵	۱۸/۰۱	-/۹۶	-/۹۸	۱/۵
۸/۱۲/۱۳۸۸	۸/۹۵	۱/۵	۱۰/۸۲	۱/۵	۱/۹۵	-/۳۷	۲/۶۷	۹
۲/۱/۱۳۸۹	۱۴/۲۳	۳/۵	۳/۷۹	۱/۰۴	۲/۷۹	-/۴	۱/۷۱	۱۲/۴
۳۰/۱/۱۳۸۹	۲۸/۶۴	۶/۱۵	۴/۴	۲/۴۳	۲/۹۱	-/۸۳	۱/۵۹	۷



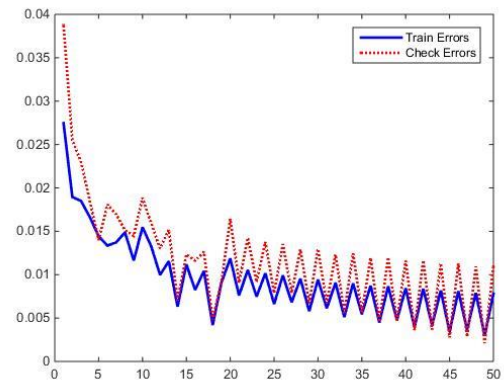
شکل ۳. میزان ضریب همبستگی در مراحل آموزش، اعتبارسنجی، آزمایش



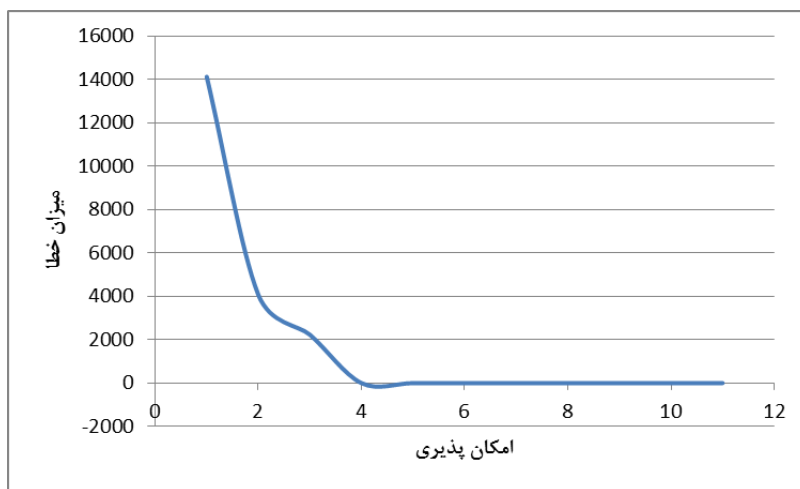
شکل ۲. عملکرد روش ANN در مراحل مختلف تعیین ضریب رواناب



شکل ۵. آخرین آزمایش مدل ANFIS در پیش‌بینی ضریب رواناب



شکل ۴. میزان خطا در مرحله آموزش مدل ANFIS



شکل ۶. کمینه‌سازی خطا با استفاده از روش SVR با برآورد محدودکننده‌ها



## بررسی ارتباط بین ضریب رواناب با پوشش گیاهی

به منظور بررسی پویایی ضریب رواناب با پوشش گیاهی حوضه آبخیز کسلیان و تأثیر آن بر میزان رواناب، از آزمون واریانس یک طرفه در سطح معناداری ۹۵ درصد استفاده شد که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۸، میزان ضریب رواناب را در فصول مختلف نمایش می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل واریانس یک طرفه نشان داد سطح معناداری بین ضریب رواناب با پوشش گیاهی ۰/۰۴۲ بوده که نشان از پویایی درونی ضریب رواناب با پوشش گیاهی دارد. این نتایج همراستا با نتایج Ahmed و همکاران (۲۰۱۹) و Han و همکاران (۲۰۱۹) است که اظهار داشته‌اند تغییرپذیری NDVI ارتباط معنادار با میزان ضریب رواناب دارد.

## نتایج مدل‌سازی ضریب رواناب در مرحله آموزش و آزمایش

نتایج مدل‌سازی ضریب رواناب با استفاده از عوامل مستقل مانند شدت متوسط بارندگی، شاخص فی، بارش ۵ روز قبل، شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی در مرحله آموزش و آزمایش تعیین شد (جدول‌های ۵ و ۶). درخور یادآوری است که برآورد رواناب با عوامل دیگری همچون مقدار بارندگی، مدت بارندگی و دبی اوج نیز مورد آزمون قرار گرفت که به دلیل عملکرد سطح پایین روش‌ها از مدل‌سازی حذف شد.

مقادیر پیش‌بینی‌شده ضریب رواناب در هر سه روش در مرحله آموزش در جدول ۵ نمایش داده شده است.

جدول ۴. آزمون واریانس یک طرفه در سطح معناداری ۵٪

سطح معناداری	مقدار بحرانی	میانگین مربعات	درجه آزادی	مربعات خطا	
۰/۰۴۲	۲/۴۷۲	۰/۰۶۷	۳	۰/۲۰۱	بین گروهی
		۰/۰۲۷	۵۰	۱/۳۵۵	درون گروهی
			۵۳	۱/۵۵۵	مجموع

جدول ۵. مقادیر ضریب رواناب پیش‌بینی‌شده در سه روش ANFIS، SVR و ANN در مرحله آموزش

شماره	ضریب رواناب مشاهده‌ای	ANFIS	SVR	ANN	شماره	ضریب رواناب مشاهده‌ای	ANFIS	SVR	ANN
۱	۰/۰۴۱۱	۰/۰۲۶۶	۰/۲۰۸۳	۰/۰۲۸۶	۲۰	۰/۱۴۱۶	۰/۱۴۱۷	۰/۱۵۵۲	۰/۱۳۱۴
۲	۰/۰۱۹۹	۰/۰۱۹۹	۰/۲۸۴۸	۰/۰۰۹۷	۲۱	۰/۱۵۲۸	۰/۱۶۴۰	۰/۱۵۸۰	۰/۱۵۵۴
۳	۰/۵۳۲	۰/۵۳۲۷	۰/۰۶۶۳	۰/۵۳۹۱	۲۲	۰/۴۴۸۷	۰/۴۴۸۷	۰/۱۴۷۸	۰/۴۵۰۳
۴	۰/۴۰۳۲	۰/۴۰۳۱	۰/۲۱۵۰	۰/۴۱۲۹	۲۳	۰/۲۸۴۹	۰/۲۸۵۳	۰/۱۵۹۳	۰/۲۸۱۹
۵	۰/۱۲۴۷	۰/۱۲۷۰	۰/۲۵۶۴	۰/۱۲۸۵	۲۴	۰/۱۴۴۹	۰/۱۴۴۹	۰/۱۷۶۹	۰/۰۲۹۳
۶	۰/۷۳۹۹	۰/۷۳۹۹	۰/۲۶۰۹	۰/۷۳۸۵	۲۵	۰/۰۳۵۰	۰/۰۳۵۰	۰/۰۶۰۰	۰/۰۰۸۲
۷	۰/۵۲۰۸	۰/۵۱۴۶	۰/۲۰۰۹	۰/۵۲۶۰	۲۶	۰/۲۰۶۵	۰/۲۰۶۵	۰/۰۲۰۳۲	۰/۲۴۲۵
۸	۰/۱۳۰۹	۰/۱۳۰۹	۰/۲۳۰۷	۰/۱۳۲۸	۲۷	۰/۰۸۰۸	۰/۰۸۰۸	۰/۰۵۱۴	۰/۱۰۵۶
۹	۰/۱۸۷۶	۰/۱۸۷۸	۰/۰۰۸۲	۰/۱۹۸۵	۲۸	۰/۲۴۵۱	۰/۲۴۷۷	۰/۱۰۴۴	۰/۲۴۲۹
۱۰	۰/۲۱۸۴	۰/۲۱۸۳	۰/۲۴۹۴	۰/۰۳۸۸	۲۹	۰/۰۱۲۲	۰/۰۱۲۲	۰/۱۸۷۳	۰/۰۱۴۲
۱۱	۰/۲۶۶۷	۰/۲۶۶۶	۰/۲۴۸۱	۰/۲۵۳۷	۳۰	۰/۱۴۹۴	۰/۱۴۹۳	۰/۱۵۲۵	۰/۱۶۲۳
۱۲	۰/۳۲۶۴	۰/۳۲۶۳	۰/۲۱۵۳	۰/۵۸۰۷	۳۱	۰/۰۳۴۹	۰/۰۳۴۹	۰/۳۰۴۴	۰/۰۱۱۲
۱۳	۰/۰۸۶۵	۰/۰۸۶۴	۰/۰۵۶۹	۰/۱۰۶۸	۳۲	۰/۳۳۹۹	۰/۳۳۹۹	۰/۱۸۶۳	۰/۳۴۴۷
۱۴	۰/۳۱۹۶	۰/۳۱۹۶	۰/۱۹۴۰	۰/۰۳۱۶	۳۳	۰/۶۱۵۶	۰/۶۱۵۷	۰/۰۵۴۴	۰/۵۹۸۶
۱۵	۰/۱۷۹۸	۰/۱۷۹۸	۰/۰۷۹۶	۰/۱۷۴۷	۳۴	۰/۲۴۴۱	۰/۲۳۹۹	۰/۱۷۱۰	۰/۲۵۰۵
۱۶	۰/۰۵۳۹	۰/۰۵۶۵	۰/۲۵۸۳	۰/۰۵۶۷	۳۵	۰/۱۹۵۲	۰/۱۹۵۲	۰/۲۲۳۳	۰/۲۰۳۵
۱۷	۰/۱۰۶۶	۰/۱۰۶۷	۰/۲۱۸۳	۰/۰۸۱۰	۳۶	۰/۰۸۹۶	۰/۰۸۰۱	۰/۰۶۲۷	۰/۰۱۵۰
۱۸	۰/۲۶۸۹	۰/۲۶۸۹	۰/۲۸۷۴	۰/۲۶۶۱	۳۷	۰/۱۱۳۳	۰/۱۱۳۱	۰/۱۶۳۹	۰/۱۱۵۹
۱۹	۰/۰۲۱۶	۰/۰۲۱۷	۰/۲۳۹۸	۰/۰۴۹۳	۳۸	۰/۱۲۰۴	۰/۱۲۵۳	۰/۱۶۱۷	۰/۰۱۱۴

جدول ۶. مقادیر ضریب رواناب پیش‌بینی‌شده در سه روش ANFIS، SVR و ANN در مرحله آزمایش

شماره	ضریب رواناب مشاهده‌ای	ANFIS	SVR	ANN
۱	۰/۱۸۶۵	۰/۰۳۶۶	۰/۲۱۵۳	۰/۱۱۴۶
۲	۰/۰۷۶۸	۰/۰۱۹۹	۰/۱۶۶۱	۰/۴۴۳۱
۳	۰/۴۱۳۷	۰/۵۳۲۷	۰/۲۵۹۷	۰/۱۳۹۲
۴	۰/۴۱۴۱	۰/۴۰۳۱	۰/۲۴۲۸	۰/۶۶۲۹
۵	۰/۲۵۰۹	۰/۱۲۷	۰/۲۲۴۶	۰/۰۰۸۲
۶	۰/۴۳۰۹	۰/۷۳۹۹	۰/۲۸۰۵	۰/۱۱۷۷
۷	۰/۲۱۹۷	۰/۵۱۴۶	۰/۲۳۶۶	۰/۰۸۶۱
۸	۰/۲۵۲۲	۰/۱۳۰۹	۰/۳۰۵۳	۰/۰۳۹۷
۹	۰/۲۶۶۲	۰/۱۸۷۸	۰/۲۱۲۱	۰/۴۴۶۷
۱۰	۰/۲۷۵۷	۰/۲۱۸۳	۰/۱۸۳۴	۰/۲۳۸۵
۱۱	۰/۲۶۰۹	۰/۲۶۶۶	۰/۲۱۴۸	۰/۰۱۱۲
۱۲	۰/۲۳۷	۰/۳۲۶۳	۰/۲۱۳۴	۰/۱۲۶۳
۱۳	۰/۲۷۴۶	۰/۰۸۶۴	۰/۲۳۴۲	۰/۱۸۰۰
۱۴	۰/۱۹۱	۰/۳۱۹۶	۰/۱۷۹۸	۰/۰۱۹۵
۱۵	۰/۱۹۳۶	۰/۱۷۹۸	۰/۱۹۶۷	۰/۰۲۷۸
۱۶	۰/۱۷۶۱	۰/۰۵۶۵	۰/۲۱۹۴	۰/۰۲۹۰

جدول ۷. نتایج صحت‌سنجی مدل‌های تخمین ضریب رواناب

مدل	مرحله	MBE	RMSE	R <sup>2</sup>	NS
ANFIS	آموزش	۰	۰	۱	۱
	آزمایش	۰	۰/۱۳	۰/۵۶	۰/۵۲۳
SVR	آموزش	-۰/۰۴	۰/۱۹	۰/۵۳	۰/۴۶
	آزمایش	-۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۴۱	۰/۲۱
ANN	آموزش	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۸۵	۰/۸۴
	آزمایش	-۰/۰۳	۰/۱۲	۰/۷۶	۰/۷۴

صحت‌سنجی مدل‌های پیش‌بینی ضریب رواناب پس از تهیه مدل‌های ANFIS، ANN و SVR (شکل‌های ۲ تا ۶)، به‌منظور تخمین ضریب رواناب حوضه آبخیز کسلیان، این روش‌ها به‌وسیله ضرایب آماری استفاده‌شده اعتبارسنجی شدند. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۷ نشان داده شده است.

اطلاعات مربوط به ۵۴ رگبار مطالعاتی به همراه ضریب رواناب متوسط، شاخص فی، مجموع بارش ۵ روز پیش و شدت بارندگی در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس جدول ۳، تغییرات در ضریب رواناب مربوط به ۵۴ رگبار به این شکل است که مقدار بیشینه و کمینه ضریب رواناب بین ۰/۸۲ تا ۷۳ درصد نوسان دارد. میانگین میانه و انحراف ضریب رواناب نیز به ترتیب ۱۹، ۱۳/۶۲ و ۱۷ به‌دست آمده است. این نتایج مطابق با نتایج پژوهش‌های اسلامیان و

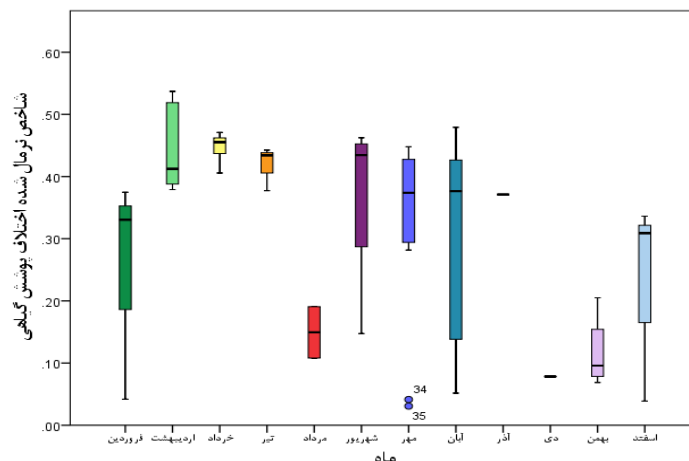
همکاران [۲۵]، Tapia و همکاران [۲۶]، زینالی و همکاران [۱۸] است که بیان کردند تغییرات قابل ملاحظه‌ای در میزان ضریب رواناب در بین وقایع مختلف وجود دارد و نشان‌دهنده پویایی این ضریب در وقایع مختلف است.

تحلیل مشخصات شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی متناظر با ضریب رواناب

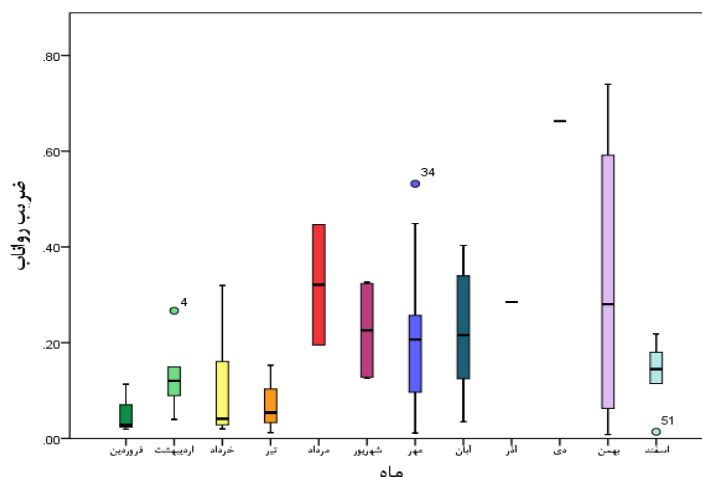
این شاخص از طریق تصاویر ماهواره‌ای لندست برای وقایع مورد نظر استخراج شد. همانند آنچه در ضریب رواناب مشاهده شده است، در این شاخص نیز تغییرات بین ۵۴ واقعه وجود داشته، به این شکل که بیشینه و کمینه این شاخص ۰/۵۳ و ۰/۰۳ است. مقدار میانگین، انحراف معیار و میانه این شاخص نیز به ترتیب ۰/۳۱، ۰/۱۳ و ۰/۳۷ و به‌دست آمده است که با پژوهش‌های Yuan و همکاران [۲۷] و Liu و همکاران [۲۸] که نتیجه گرفتند

تغییرپذیری مقدار شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی روی میزان رواناب می‌تواند اثرگذار باشد، مطابقت دارد. همچنین، روند کلی تغییرات این شاخص از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۸۸ رو به منفی بوده است. در شکل‌های ۷ و ۸، تغییرات ماهانه شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی و ضریب رواناب نشان داده شده است.

تغییرپذیری مقدار شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی روی میزان رواناب می‌تواند اثرگذار باشد، مطابقت دارد. همچنین، روند کلی تغییرات این شاخص از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۸۸ رو به منفی بوده است. در شکل‌های ۷ و ۸، تغییرات ماهانه شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی و ضریب رواناب نشان داده شده است.



شکل ۷. مقادیر شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی ماهانه به‌دست آمده از ۵۴ واقعه



شکل ۸. مقادیر ضریب رواناب ماهانه به‌دست آمده از ۵۴ واقعه

که در فصل به‌صورت رگبارهای با زمان کوتاه و شدت زیاد مربوط دانست که مطابق با نتایج پژوهش Kwaad [۲] است که بیان کرد افزایش میزان رواناب در نتیجه رگبارهای با شدت زیاد است که موجب افزایش بیشتر هدررفت خاک و رواناب تولیدی بیشتر شده است. در فصل پاییز هم‌زمان با اتمام فصل گرم و بارش‌های پاییزه، میزان NDVI افزایش پیدا کرده است. میزان میانگین ضریب رواناب نیز در فصل پاییز (به‌خصوص مهر و آبان) به تبعیت از پوشش گیاهی نسبت به فصل تابستان کمتر شده است که این نتایج را می‌توان مطابق با نتایج پژوهش‌های

با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، در فصل بهار روند افزایشی در میزان شاخص NDVI مشاهده شده است که این روند کاملاً مطابق با روند نزولی میانگین ضریب رواناب در فصل بهار است. در مردادماه این روند عکس شده است؛ یعنی با کاهش میزان NDVI، میزان ضریب رواناب در این ماه افزایش یافته است که با نتایج حاصل از پژوهش‌های Martiny و همکاران [۲۸] و Piao و همکاران [۲۹] که بیان کردند ضریب رواناب در فصول بارانی کاهش می‌یابد، مطابقت دارد. علت کاهش میزان NDVI در مردادماه را می‌توان به توقف فصل رشد و همچنین، میزان بارش‌هایی

### جمع‌بندی

در این تحقیق تخمین ضریب رواناب با استفاده از عواملی همچون شدت بارندگی، شاخص فی، بارندگی ۵ روز قبل و شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی با استفاده از سه مدل شبکه عصبی، شبکه عصبی - فازی تطبیقی و رگرسیون بردار پشتیبان صورت گرفت. در مرحله آخر ارزیابی کارایی این سه مدل انجام شد و در نهایت، مدل شبکه عصبی به‌عنوان مدل بهینه برای تخمین ضریب رواناب رگبار در حوضه آبخیز کسلیان تعیین شد. در مجموع، پیشنهاد می‌شود که با توجه به اینکه ضریب رواناب کارکردهایی در مکانیزم‌های هیدرولوژیک و بروز سیل ایفا می‌کند، بنابراین تخمین بهینه آن می‌تواند به مدیریت بهتر حفاظت آب و خاک و مدیریت فرسایش رسوب این حوضه یاری‌رسان باشد. بنابراین، توصیه می‌شود که از تخریب جنگل و تغییر آن به زراعت دیم جلوگیری شود تا روند افزایشی ضریب رواناب کاهش یابد؛ عملیات مرتبط با حفاظت خاک و آبخیزداری در پاییز و زمستان و به‌خصوص در آذر، دی و بهمن‌ماه با توجه به کاهش شاخص NDVI و افزایش رواناب برای مبارزه با هدررفت بیشتر آب و خاک بیشتر مد نظر قرار گیرد. بنابراین، تحقیق حاضر می‌تواند به‌عنوان یک پایلوت در دیگر مناطق شمالی کشور به‌عنوان یک الگو قرار گیرد.

### منابع

- [1]. Kavian AA, 2014. Application of SWAT semi-physical distribution model in simulating the effect of land use change on runoff of Haraz dam watershed (a study on the scale of useful life of the dam), Research project of Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)
- [2]. Kwaad, F., 1991. Summer and winter regimes of runoff generation and soil erosion on cultivated loess soils (The Netherlands). *Earth Surf. Process. Landforms* 16, 653-662.
- [3]. Shi P.J., Yuan Y., Zheng J., Wang J., Wang J.A., Ge Y., Qiu G.Y., 2007. The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China, *Catena*, 69: 31-35
- [4]. Xu, E., Zhang, H., 2020. Change pathway and intersection of rainfall, soil, and land use influencing water-related soil erosion. *Ecological Indicators*. 113, 106281.

Martiny و همکاران [۲۸] و Piao و همکاران [۲۹] دانستند. از ماه آذر تا ابتدای اسفند نیز این نسبت عکس بین NDVI و ضریب رواناب مشاهده شده است، به گونه‌ای که در دی و بهمن‌ماه که کمترین میزان NDVI ثبت شده است؛ بیشترین میزان ضریب رواناب را در این دو ماه می‌توان مشاهده کرد که از منظر مدیریت منابع آب و خاک حائز اهمیت است. در اسفندماه نیز با گرم شدن تدریجی هوا و شروع دوره رشد و جوانه‌زنی، از میزان ضریب رواناب کم شده است.

### تحلیل پویایی درونی ضریب رواناب رگبار

در ارتباط با گروه‌بندی شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که هر چه میزان شاخص NDVI از ۱ به ۴ افزایش می‌یابد، میزان میانگین ضریب رواناب کاهش پیدا می‌کند (جدول ۱). نتایج ارزیابی صحت این سه مدل نشان داد مدل ANN در مرحله آزمایش با توجه به آماره‌های  $R^2$ ، RMSE، NS و MBE بیشترین میزان را در مدل‌سازی ضریب رواناب داشته است که با نتایج پژوهش‌های Tokar و Markus [۳۰] و Maria و همکاران [۳۱] که اظهار داشته‌اند مدل ANN صحت بیشتری در مدل‌سازی ضریب رواناب داشته‌اند، هم‌خوانی دارد؛ و با نتایج پژوهش‌های Kumari و همکاران [۷] و Jimeno-Sáez و همکاران [۳۲] که بیان کردند روش ANN نسبت به روش ANFIS کارایی کمتری داشته مطابقت ندارد. با توجه به مقادیر  $R^2$ ، RMSE، NS و MBE در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی دو مدل ANN و ANFIS می‌توان گفت که با توجه به کم بودن تعداد داده در کل عملکرد قابل قبولی در برآورد ضریب رواناب داشته‌اند. کمتر بودن صحت نتایج ANFIS نسبت به ANN را می‌توان کم بودن تعداد داده و آموزش کاذب بیشتر مدل ANFIS نسبت به ANN برشمرد. بنابراین، اگر تعداد داده‌های ورودی افزایش پیدا کند، ممکن است عملکرد مدل ANFIS نسبت به ANN تغییر یابد. در این ارتباط دستورانی و همکاران [۱۲ و ۳۳] بیان کرده‌اند که مدل ANFIS با توجه به بهره بردن از پتانسیل فازی‌سازی در کنار پتانسیل شبکه عصبی نتایج بهتری نسبت به شبکه عصبی در مدل‌سازی بارش - رواناب ارائه کرده است که با نتایج این تحقیق هم‌راستا نیست.

- [5]. Sharifi AR, Dinapajoochi, Fakhri Fard A., Moghaddamnia AR, 2013. Optimal combination of variables for simulation of runoff in Imameh watershed using gamma test, *Journal of Water Science and Soil*, 23 (4), 59-72. (In Persian)
- [6]. Dinka, M.O., Klik, A., 2019. Effect of land use-land cover change on the regimes of surface runoff—the case of Lake Basaka catchment (Ethiopia). *Environmental Monitoring and Assessment*. 191, 278.
- [7]. Kumari, p., Kumar, p. and P.V. Singh. 2018. Rainfall-Runoff Modelling Using Artificial Neural Network and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Indian Journal of Ecology* (2018) 45(2): 281-285
- [8]. Merz R., Bloschl G., Parajka J., 2006. Spatio-temporal variability of event runoff coefficients, *Journal of Hydrology*, 331: 591-604.
- [9]. Ataei M., 2017, Rainfall-runoff modeling using artificial neural network (ANN) and HEC-HMS methods (Case study: Gharasoo catchment), 2nd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Crisis Management, Tehran, Allameh University Majlis.
- [10]. Zhang X.M., Yu X.X., Zhang M.L., Li J.L., 2007. Response of land use/coverage change to hydrological dynamics at watershed scale in the Loess Plateau of China, *Acta Ecologica Sinica*, 27(2): 414-423. <http://glovis.usg>
- [11]. McIntyre N., Al-Qurashi, A., Wheeler, H.S., 2007. Analysis of rainfall-runoff events from an arid catchment in Oman, *Hydrological Sciences Journal*, 52(6): 1103-1118.
- [12]. Dastorani, M. T., Moghadamnia, A., Piri, J., & Rico-Ramirez, M. (2010). Application of ANN and ANFIS models for reconstructing missing flow data. *Environmental Monitoring and Assessment*. 166(1), 421-434.
- [13]. Sen Z., 2008. Instantaneous runoff coefficient variation and peak discharge estimation model, *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(4): 270-277.
- [14] Solaimani, K. 2009. Rainfall-runoff prediction based on artificial neural network (a case study: Jarahi watershed). *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Sciences*. 5: 6. 856-865.
- [15]. Curtu, R., Fonley, M., 2015. Nonlinear response in runoff magnitude to fluctuating rain patterns. *Chaos An Interdiscip. Journal of Nonlinear Science*. 25, 36409.
- [16]. Moeyersons, J., Imwangana, F.M., Dewitte, O., 2015. Site-and rainfall-specific runoff coefficients and critical rainfall for mega-gully development in Kinshasa (DR Congo). *Natural Hazards*. 79, 203-233.
- [17]. Mahdavi MB, 2002. *Applied Hydrology*, Volume 2, Second Edition, University of Tehran Press, 437 p. (In Persian)
- [18]. Zeinali, V., Vafakhah, M., Sadeghi, S.H., 2019. 'Impact of Urbanization on Temporal Distribution Pattern of Storm Runoff Coefficient. *Environmental Monitoring and Assessment*. 191, 595. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7734-3>
- [19]. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA special publication*, 351(1974), 309.
- [20]. Parida B.P., Moalafhi D.B., Kenabatho P.K., 2006. Forecasting runoff coefficients using ANN for water resources management: The case of Notwane catchment in Eastern Botswana, *Physics and Chemistry of the Earth*, 31: 928-934.
- [21]. Li, Y., Xie, Z., Qin, Y., Zheng, Z., 2019. Responses of the Yellow River basin vegetation: climate change. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*.
- [22]. Minhaj, M. 2005. *Fundamentals of Neural Networks*, Amirkabir University of Technology, Tehran. (In Persian)
- [23]. Mousavi, S. J., Ponnambalam, K., & Karray, F. 2007. Inferring operating rules for reservoir operations using fuzzy regression and ANFIS. *Fuzzy Sets and Systems*, 158(10), 1064-1082. doi:10.1016/j.fss.2006.10.024
- [24]. Drucker, H., Burges, C. J., Kaufman, L., Smola, A., & Vapnik, V. (1997). Support vector regression machines. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 9, 155-161.
- [25]. Eslamian SS, Mamanpoosh AR, Nasri Z., Etemadi H., 2006. Analysis of runoff coefficients and correlation between runoff and rainfall in Bazaft basin, the first conference on regional water resources exploitation in Karun basins And Zayandehrud, Shahrekord, 14-15 September 2006, 1081-1090. (In Persian)
- [26]. Tapia R.P., Cornejo M.T., Arellano L.R., Diaz C.J., and Daz C.F., 2006. Instantaneous runoff coefficients for Tutuven river basin, Maule Region, Chile, *Bosque (Valdivia)*, 27(2): 83-91.
- [27]. Yuan, Z., Yan, D., Xu, J., Wang, Y., Yao, L., Yu, Z., 2019. Effects of the precipitation pattern and vegetation coverage variation on the surface runoff characteristics in the eastern Talhang

- Mountain. *Applied Ecology and Environmental Research*. 17, 5753–5764.
- [28]. Martiny, N., Camberlin, P., Richard, Y., Philippon, N., 2006. Compared regimes of NDVI and rainfall in semi-arid regions of Africa. *International Journal of Remote Sensing*. 27, 5201–5223.
- [29]. Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Guo, Q., Henderson, M., Ji, W., Li, Y., Tao, S., 2003. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 108.
- [30]. Tokar A.S., and Markus M. 2000. Precipitation runoff modeling using artificial neural network and conceptual models. *Journal of Hydrologic Engineering*. ASCE. 5: 156-161.
- [31]. Maria, C.V.R., Haroldo, F.C.V., and Nelson, J.F. 2005. Artificial neural network technique for rainfall forecasting applied to the São Paulo region, *Journal of Hydrology*. 301: 1-4. 146-162.
- [32]. Jimeno-Sáez, P., Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J. and D. Pulido-Velazquez. 2018. A Comparison of SWAT and ANN Models for Daily Runoff Simulation in Different Climatic Zones of Peninsular Spain. *Water Journal*. 10, 192; doi:10.3390/w10020192
- [33]. Dastorani, M. T., Sharifi Darani, H., Talebi, A., & Moghadam Nia, A. (2011). Evaluation of the application of artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems for rainfall-runoff modeling in Zayandeh-rood dam basin. *Journal of Water and Wastewater*. 80, 114-125.