



امکان‌سنجی گروه‌بندی هیدرولوژیکی سازندهای زمین‌شناسی در حوزه آبخیز سفیدرود

- علی رضائی، عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی زنجان
- محمد مهدوی، استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
- سادات فیض‌نیا، استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
- کارو لوکاس، استاد دانشکده فنی دانشگاه تهران
- محمد حسین مهدیان، استادیار پژوهشی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

تاریخ دریافت: بهمن ماه ۱۳۸۲ تاریخ پذیرش: دی ماه ۱۳۸۳

Email: rezaei_ali@hotmail.com

چکیده

گروه سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی با الگوگیری از چهار گروه هیدرولوژیکی خاک، در گروه‌های هیدرولوژیکی معادل آنها تقسیم‌بندی شده و درصد مساحت هر یک در حالت چهارگانه و یا تلفیقی از آنها در ۱۲ زیر حوزه در محدوده البرز جنوبی حوزه سفیدرود محاسبه شده‌اند. تعداد ۶۲۸ آبنمود برای آموزش و ۵۴ مورد دیگر برای آزمون شبکه عصبی انتخاب گردیده و بارندگی روزانه سیل‌زا، بارندگی پنج روز قبل و عمق رواناب نظیر محاسبه شده‌اند. رابطه عمق رواناب به عنوان متغیر خروجی با متغیرهای ورودی شامل مساحت حوزه، درصد مساحت هر یک از گروه‌های هیدرولوژیکی معادل در حالت‌های چهارگانه و تلفیقی سه و دو گانه، میزان بارندگی یک روزه سیل‌زا، بارندگی پنج روز قبل نظیر در قالب معادله همبستگی چند متغیره خطی و شبکه عصبی مصنوعی پیشخور مدل گردیده‌اند. عمق رواناب با استفاده از مدل‌های ریاضی بدست آمده و با فرض اینکه کل مساحت حوزه تنها توسط یکی از گروه‌های هیدرولوژیکی معادل پوشیده شده باشد، شبیه‌سازی شده و توسط آزمون t دو دامنه باهم مقایسه شده است. نتایج آزمون نشانگر تفاوت سری عمق‌های رواناب برآورد شده با همدیگر می‌باشد. به دلیل وجود تفاوت معنی‌دار در میزان رواناب شبیه‌سازی شده ولی وجود بعضی ضرایب رگرسیونی غیر معنی‌دار در معادلات رگرسیون چند متغیره خطی، دوباره با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی آموزش یافته، نیم‌رخ تغییرات عمق رواناب نظیر بارندگی یک روزه سیل‌زا و با رعایت فرض مذکور ترسیم و بصورت چشمی تفسیر گردیده است. نتایج حاصله بیانگر آشوب در رفتار هیدرولوژیکی برخی از گروه‌های هیدرولوژیکی و در نتیجه ابهام در مرز گروه‌بندی‌ها و لزوم کاهش در تعداد آنها و تغییر در نحوه مجتمع‌سازی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی است.

کلمات کلیدی: ایران، بارندگی، رواناب، سفیدرود، شبکه عصبی، گروه‌بندی هیدرولوژیکی.

Pajouhesh & Sazandegi No:70 pp: 10-22

Possibility of hydrological grouping of geological formations by neural network in Sefidrood basin

By: A. Rezaei; Instructor of Agriculture and Natural Resources Research Center of Zanjan.

M. Mahdavi: Prof. Of Tehran University.

S.Feiznia: Prof. Of Tehran University.

C. Lucas: Prof. Of Tehran University.

M. Mahdian: Assi. Prof. Of Soil Conservation and Watershed Management Institute.

The Geological formations and Rock Units (GFRUs) of 12 sub-basins in south zone of Sefidrood basin have been classified to four or some combination of them by inspiration of four soil hydrologic groups and measured their occupied area. The 628 hydrographs have been selected for training and 54 other for testing and their similar daily flooding rainfall and five days antecedent rainfall depths were extracted and runoff depths was calculated. The relations among runoff depths with sub basins areas, daily flooding rainfall depths, five days antecedent rainfall depths and percent occupied by any of Geological Formations units (GFRUs) have been modeled based on Multiple Linear Regression (MLR) and Artificial Perceptron Neural Networks (APNN). The results show significance differences among (GFRUs) at error level of %1 and occasionally %5 for producing of runoff based on (APNN) and (MLR). The rainfalls depths have been simulated by (APNN) with stabilize of all entrances exclusive of rainfall depths and hypothesis of sub basins area was occupied only by one type of (GFRUs). The conclusion states that there are some chaos hydrologic behaviors and vague borders among (GFRUs) and will better to decline number of hydrologic groups to three and changing the form of complexity of them.

Keywords: Hydrological grouping, Iran, Neural network, Rainfall runoff Sefidrood.

مقدمه

مطالعه رابطه بارش - رواناب یکی از مباحث مهم در هیدرولوژی و مدیریت حوزه‌های آبخیز و انجام اقدامات حفاظت خاک و آب می‌باشد. بدین منظور مطالعات زیادی در دنیا صورت گرفته و روش‌هایی برای برآورد رواناب حاصل از یک بارندگی مشخص ارائه شده است. از جمله این روش‌ها، روش سازمان حفاظت منابع طبیعی آمریکا (NRCS) با استفاده از شماره منحنی (CN) است (۱۶). در این روش عامل‌های مؤثر بر وقوع رواناب شامل ویژگی‌های پوشش گیاهی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، نحوه استفاده از سرزمین و رطوبت پیشین خاک است. اما نکته قابل ذکر آنکه به کارگیری آن در حوزه‌های آبخیز کوهستانی و تپه ماهور کشور با توجه به شرایط آب و هوایی موجود با مشکلاتی از نظر گروه‌بندی هیدرولوژیکی خاک‌ها مواجه می‌باشد. دلیل این مشکل آن است که در چنین شرایط آب و هوایی و پستی و بلندی و فرسایش خاک، سنگ مادر برون‌زد داشته و یا آنکه ویژگی خاک سطحی موجود نیز شدیداً متأثر از ویژگی‌های سنگ مادر و در دید کلان سازندهای زمین‌شناسی است (۱۲). در حال حاضر نیز نقشه‌های خاک‌شناسی مؤسسه خاک و آب کشور شامل دشت‌ها و دشت‌های دامنه‌ای است و کوه‌ها را در بر نمی‌گیرد (۱۵). به دلیل فرسایش خاک و سایر عوامل محیطی، کوهستان‌ها دارای خاک بسیار کم عمق و یا فاقد آن هستند (۱)، و بیشترین وسعت حوزه آبخیزها را نیز در البرز جنوبی از جمله در زیر حوزه‌های مورد تحقیق در حوزه آبخیز سد سفیدرود، کوهستان‌ها و تپه ماهورها اشغال نموده‌اند.

گروه‌بندی هیدرولوژیکی خاک اساساً برای حوزه‌های آبخیز کوچک و کشاورزی ارائه شده است. مثلاً برای گروه هیدرولوژیکی خاک D، وجود لایه محدود کننده را تنها در عمق ۵۰ سانتی‌متر تعریف کرده‌اند (۲۱). به این جهت اگر بتوان سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی را به‌جای چهار گروه هیدرولوژیکی خاک معادل‌سازی کرد و در چند گروه هیدرولوژیکی معین بیان نمود، انتظار می‌رود در مقایسه با به کارگیری روش شماره منحنی در مقیاس یک حوزه آبخیز نتیجه بهتری حاصل شود. همچنان

که ذکر شد مؤسسه خاک و آب کشور اصولاً انجام مطالعات خاک‌شناسی و طبقه‌بندی خاک‌ها را در دشت‌ها و دشت‌های دامنه‌ای به انجام رسانده و تپه‌ها و کوه‌ها را لحاظ نمی‌نماید. دلیل این کار عمدتاً به خاطر پراکندگی و تغییرات زیاد در خاک‌های کوهستان و تپه ماهور می‌باشد. همچنین در روش شماره منحنی اهمیتی به شدت و دوام بارندگی داده نشده است، به طوری که مقدار تلفات از یک عمق مشخص بارندگی در تداوم زمانی مثلاً یک تا ۲۴ ساعت برابر است.

زمین‌شناسی یکی از عوامل بسیار مهم در یک حوزه آبخیز بوده و بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی شامل عمق میانگین رواناب سالانه، جریان پایه و آبنمود یک واقعه سیلابی اثر می‌گذارد (۲۴). ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک در یک فرآیند تولید رواناب تابعی از شرایط زهکشی و مشخصات بارندگی بوده و در نتیجه میزان نفوذپذیری نهایی آن متغیر خواهد بود، به طوری که امکان دارد رفتار گروه هیدرولوژیکی خاک A به رفتار گروه هیدرولوژیکی خاک D تغییر یابد. اصولاً معادل قرار دادن کلیه واحدهای سنگی پیوسته (توده‌های) با گروه هیدرولوژیکی خاک D منجر به خطا می‌گردد (۱۱). به‌طور مثال با توجه به اینکه میزان خلل و فرج مؤثر گرانیب بسیار جزئی و در حد ۰/۰۹ درصد حجمی است (۲۶) اما ممبر آمدن از سازند کرج (سنگ‌های آذرین) در شمال شهر زنجان به دلیل هوازگی و تا حدودی خردشدگی نفوذپذیر شده و همین امر موجب پیدایش آب پایه در آبراهه‌ها شده است.

شبکه‌های عصبی مصنوعی^۳ از حدود سال ۱۹۹۰ برای مدل‌سازی وارد علم هیدرولوژی شده است. از جمله توانایی‌های این روش قدرت تکرار و یادگیری روابط غیر خطی در مقایسه با روش‌های معمول می‌باشد (۳۱). به‌طور کلی شبکه‌های عصبی مصنوعی به شبکه‌های عصبی با روش آموزش با ناظر و بدون ناظر تقسیم‌بندی می‌شوند. به نحوی که روش اول برای ساخت مدل‌های پیش‌بینی و روش دوم برای انجام خوشه‌بندی و طبقه‌بندی داده‌ها می‌باشد. در این تحقیق با توجه به ماهیت مسئله نوع شبکه عصبی مورد استفاده از نوع آموزش با ناظر انتخاب شده است. اصولاً رابطه بارش - رواناب یک رابطه غیر

دارد (شکل ۱). عرض جغرافیائی این حوزه آبخیز، از ۳۴ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۹ دقیقه و طول جغرافیائی آن از ۴۶ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴ دقیقه می‌باشد. حداکثر ارتفاع حوزه در کوه‌های بالادست شمالی آبادی جوستان در طالقان (بال مشترک البرز جنوبی و شمالی) برابر با ۴۴۰۷ متر و حداقل آن ۳۵۰ متر در محل سد سفیدرود می‌باشد. رودخانه سفیدرود از به هم پیوستن دو شاخه اصلی به نام‌های قزل اوزن و شاهرود در موقعیت سد شکل می‌گیرد. بنابراین در محدوده حوزه آبخیز سد می‌توان از دو حوزه آبخیز بزرگ به نام‌های قزل اوزن با مساحت برابر با ۴۹۴۷۰ کیلومتر مربع در ایستگاه آب‌سنجی گیلوان و شاهرود با مساحت ۴۹۷۵ کیلومتر مربع در ایستگاه آب‌سنجی لوشان نام برد (۱۳). متوسط بارندگی سالانه حوزه مذکور (ناحیه غیر خزری) از ۲۰۰ میلیمتر در اطراف مخزن سد تا حدود ۶۰۰ میلیمتر در ارتفاعات زنجان (طارم)، استان‌های کردستان، آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و قزوین متغیر می‌باشد. لازم به یادآوری است که این تحقیق در داخل این دو حوزه و برای تعدادی از زیر حوزه‌های آنها در محدوده غیر خزری اجراء شده است (جدول ۱ و شکل ۱).

شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی در واقع یک ابزار ریاضی قدرتمند قابل انعطافی هستند که با تقلیدی بسیار ساده از سیستم عصبی بیولوژیک ساخته شده‌اند (۲۳). این شبکه‌ها قدرت انعطاف و تصحیح پذیری بالایی برای انطباق خود با داده‌های موجود به‌ویژه در سامانه‌های غیر خطی را دارند (۳۰). سامانه‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند مجهز به سازماندهی شوند که نظم و هماهنگی موجود در داخل داده‌ها را پیدا نموده (۱۴) و بر اساس یک سری شواهد (بردارهای ورودی) وقوع و بزرگی یک پدیده‌ای را پیش‌بینی نمایند (۱۹). مهمترین موضوع در مورد این سامانه‌ها

خطی است و مدل‌سازی این روابط با هوش مصنوعی بر روش‌های سنتی برتری دارد (۱۸). Hsu و همکاران (۲۷) شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای مدل‌سازی بکار برده و اعلام نموده‌اند که به منظور انجام پیش‌بینی‌ها این روش گزینه مناسب و مؤثری برای شبیه‌سازی رابطه ورودی‌ها با خروجی‌ها بوده و نیازی به مدل نمودن روابط داخلی حوزه آبخیز نمی‌باشد. همچنین در مدل‌سازی سامانه‌های اکولوژیکی کاربرد شبکه‌های عصبی برای انجام پیش‌بینی‌های با کیفیت و اطمینان بیشتر مورد قبول واقع شده است (۲۵).

به نظر می‌رسد گروه‌بندی هیدرولوژیکی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی و جایگزینی آنها به جای گروه‌های هیدرولوژیکی خاک می‌تواند متضمن چندین فایده باشد: اول آنکه انجام مطالعات هیدرولوژی در ارتباط با اهداف منابع طبیعی و آبخیزداری را به دلیل وجود اطلاعات بیشتر و روش‌های کلاسیک مطالعه، ساده‌تر می‌نماید. دوم آنکه با قرار دادن واحدهای سنگ‌شناسی در داخل گروه‌های هیدرولوژیکی از تنوع آنها کاسته شده و از پیچیدگی مدل نمودن پدیده‌های هیدرولوژیکی با استفاده از سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگ‌شناسی کاسته می‌شود. با توجه به بررسی منابع علمی معلوم می‌گردد که تاکنون تلاشی در جهت این معادل‌سازی و تعریف معیارهای کمی برای گروه‌بندی هیدرولوژیکی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی صورت نگرفته و هدف عمده این مقاله بررسی امکان طبقه‌بندی هیدرولوژیکی سازندهای زمین‌شناسی از دید تولید رواناب بر اساس بارش‌های یک روزه سیل‌زا^۴ می‌باشد.

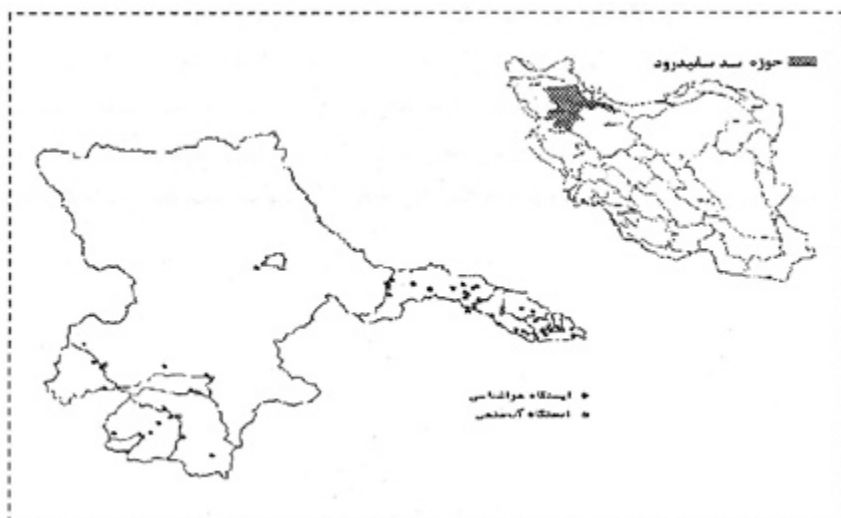
مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

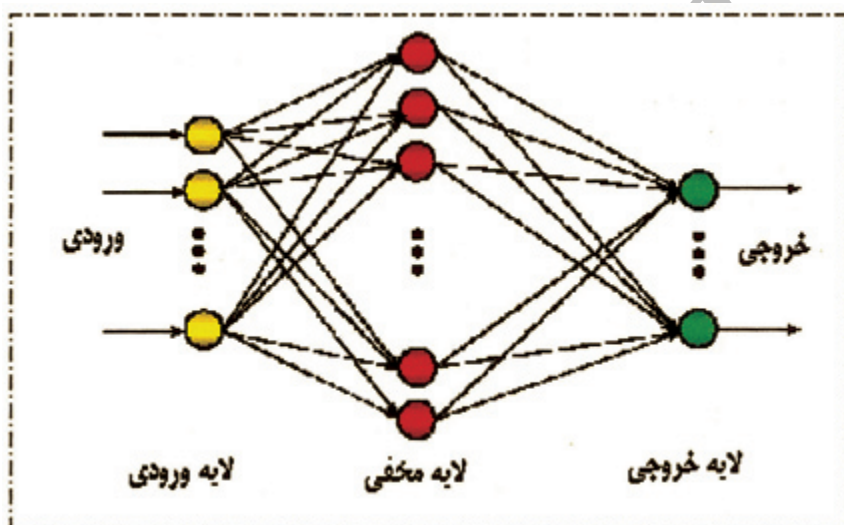
حوزه آبخیز سفیدرود در شمال غرب کشور و در محدوده سیاسی استان‌های همدان، کردستان، زنجان، آذربایجان شرقی، قزوین و گیلان قرار

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیوگرافی زیر حوزه‌های انتخابی دارای ایستگاه‌های اندازه‌گیری

حوزه	وسعت (Km)	ارتفاع میانگین (m)	شیب طولی (S) (۸۵-۱۰)	ضریب گردی	زمان تمرکز از رابطه چاو (h)	تعداد ایستگاه‌های هواشناسی	موقعیت مکانی ایستگاه آب‌سنجی		
							طول	عرض	ارتفاع (m)
علیزان - جوستان	۶۴/۴	۲۸۴۰	۶/۲	۱/۴۹	۱/۸۳	۲	۲۷-۵۳-۵۰	۳۷-۱۱-۳۶	۱۹۹۰
مهران - جوستان	۹۸	۲۹۰۰	۶/۸	۱/۳۷	۱/۸۸	۲	۰۷-۵۵-۵۰	۲۱-۱۱-۳۶	۲۰۰۰
تهم - پالدلو	۱۶۹/۶	۲۱۶۰	۳	۱/۳۲	۲/۵۴	۱	۰۴-۲۷-۴۸	۲۶-۴۶-۳۶	۱۷۰۰
تلوار - دهگلان	۲۳۸	۱۹۲۰	۱/۲	۱/۳۵	۴/۸۵	۳	۴۷-۲۴-۲۴	۳۵-۱۶-۳۵	۱۸۰۰
طالقانرود - جوستان	۴۲۸	۲۸۳۰	۳/۰۲	۱/۳۸	۳/۴۱	۴	۵۷-۵۳-۵۰	۲۵-۱۱-۳۶	۱۹۹۰
الموت رود - باغ کلابه	۶۳۵	۲۵۲۰	۳/۹	۱/۲۸	۳/۸۷	۳	۱۵-۲۹-۵۰	۵۰-۲۳-۳۶	۱۱۵۰
طالقانرود - گلینک	۸۳۸	۲۷۲۰	۲/۱	۱/۳۹	۵/۱۷	۹	۲۰-۴۳-۵۰	۲۱-۱۰-۳۶	۱۷۵۰
قزل اوزن - نساوه	۱۵۶۸	۲۰۸۰	۰/۴۱	۱/۴۲	۱۳/۱۰	۴	۰۸-۰۵-۴۷	۲۲-۵۲-۳۵	۱۷۲۵
شاهرود - رجایی دشت	۲۲۷۰	۲۳۸۰	۱/۳	۱/۳۸	۱۲/۳۶	۱۸	۴۵-۱۷-۵۰	۳۵-۲۷-۳۶	۹۵۰
تلوار - حسن خان	۲۴۶۵	۱۹۰۰	۰/۴۴	۱/۱۹	۱۳/۲۲	۷	۱۷-۴۱-۴۷	۱۸-۲۶-۳۵	۱۷۰۰
شاهرود - لوشان	۴۸۶۴	۱۸۷۰	۰/۹۸	۲/۰۰	۲۲/۳۰	۲۸	۵۶-۳۰-۴۹	۳۴-۳۷-۳۶	۳۲۰
تلوار - مهرآباد	۶۵۳۸	۱۸۹۰	۳/۱	۱/۳۸	۲۹/۶۳	۱۲	۵۵-۵۳-۴۷	۲۲-۵۱-۳۵	۱۵۸۰



شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی، آبرسنجی و زیر حوزه‌های انتخابی در حوزه سد سفیدرود



شکل ۲: ساختمان شبکه عصبی پیش‌خور با یک لایه مخفی

چهار گروه هیدرولوژیکی، از معیارهای توصیف فیزیکی و تطبیق آنها با خصوصیات فیزیکی گروه‌های اصلی هیدرولوژیکی خاک و مخصوصاً از ویژگی‌های ضریب هدایت هیدرولیکی (ضریب آبگذری) و آبدهی مخصوص اندازه‌گیری شده، استفاده گردیده است (۹). روش کار بدین صورت بوده است که ابتدا کل گروه سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی در دو طبقه کلی به نام‌های گروه سازندهای رسوبات ناپیوسته (عمدتاً کواترنری) و گروه سازندهای پیوسته تقسیم شده‌اند. سازندها و یا واحدهای سنگی موجود در داخل این گروه‌ها بر اساس شناخت از وضعیت فیزیکی و تاریخی زمین‌شناسی و به‌ویژه وضعیت آبدهی و ضریب هدایت هیدرولیکی (آبگذری) آنها در یکی از گروه‌های هیدرولوژیکی معادل چهارگانه قرار گرفته‌اند (جدول ۲). عمدتاً در ارتباط با

انتخاب متغیرهای ورودی اثرگذار، نوع شبکه عصبی، معماری مناسب ساختمان شبکه و نوع توابع انتقال^۵ برای اخذ متغیر (متغیرهای) خروجی مطلوب است. ساختمان شبکه‌های عصبی از یک لایه ورودی^۶، یک یا چند لایه پنهان^۷ و یک لایه خروجی^۸ تشکیل شده است. هر لایه نیز متشکل از تعدادی نرون^۹ یا گره (واحد حسابگر) می‌باشد. البته با این تفاوت که نرون‌های واقع در لایه ورودی تنها هدایت داده‌ها را به‌سوی لایه مخفی عهده دار بوده و فاقد قدرت پردازش بر آنها هستند (شکل ۲). ضمناً در این تحقیق نرم افزار مورد استفاده جعبه ابزار شبکه عصبی MATLAB بوده است. پارامترهای ورودی شبکه مورد استفاده شامل مساحت هر زیر حوزه، عمق بارندگی پنج روز قبل، عمق بارندگی یک روز سیل‌زا و مساحت هر یک از گروه‌های هیدرولوژیکی به تفکیک هر یک از زیر حوزه‌ها و پارامتر خروجی عمق رواناب نظیر بوده است. معماری شبکه به صورت یک شبکه عصبی پیش‌خور با یک لایه ورودی با تعداد گره برابر با تعداد پارامترهای ورودی، یک لایه مخفی به تعداد سه نرون و یک لایه خروجی به تعداد یک نرون همراه با الگوریتم آموزشی از نوع پس انتشار خطا^{۱۰} انتخاب گردیده است. در انتخاب معماری شبکه از روش تعداد نرون‌های لایه مخفی برابر با جذر حاصل ضرب تعداد پارامترهای ورودی در پارامتر خروجی استفاده شده است (۲۸). تابع انتقال لایه مخفی از نوع تانژانت سیگموئید^{۱۱} و لایه خروجی از نوع تابع خطی^{۱۲} تعریف شده است. برای آموزش شبکه با الگوریتم پس انتشار خطا از روش (TRAINLM) موجود در نرم افزار استفاده شده و تعداد لایه‌های مخفی برابر با واحد است. ضمناً دسته داده‌های ورودی بین (۰) و (۱+) معیار^{۱۳} شده‌اند.

روش تحقیق

با الگوبرساری از روش شماره منحنی در ارتباط با گروه‌بندی خاک در چهار گروه هیدرولوژیکی اصلی (A, B, C, D) و سه گروه حدواسط (۲۲) A/D, B/D, C/D، گروه‌بندی هیدرولوژیکی اولیه سازندهای زمین‌شناسی نیز تنها در چهار گروه هیدرولوژیکی انجام شده است. تشخیص نوع و وسعت سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ کشور انجام گرفته است (۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷). برای قرار دادن این سازندها و واحدهای سنگی در

تلفیقی از آنها می‌باشد (جدول ۳).

برای تعریف شرایط مرزی به مدل، ۳۱ داده عمق بارندگی یک روزه و پنج روز قبل برابر با صفر به صورت تصادفی به کل داده‌های موجود افزوده شده و عمق رواناب نظیر نیز صفر لحاظ گردیده است. به عبارت دیگر کل تعداد داده‌ها مورد استفاده برای آموزش و آزمون شبکه به ۶۸۹ مورد افزایش پیدا کرده است.

ساختمان شبکه عصبی از نوع پرسپترون (۱۴) و با مشخصات فنی ارائه شده در بند قبلی انتخاب گردیده است. انتخاب معماری شبکه و انجام تغییرات در آن بر اساس سعی و خطا و تجربه می‌باشد. این معماری انتخاب شده بر اساس تجربه و توصیه‌ها در کاربرد شبکه عصبی برای حل چنین مسائلی بوده است (۱۷، ۲۹). برای انجام آموزش شبکه، ابتدا به تعداد ۵۸ دسته از داده‌ها به‌طور اتفاقی برای آزمون شبکه انتخاب شده و باقی مانده یعنی ۶۳۱ مورد برای آموزش آن استفاده شده است.

با ثابت نگهداشتن نوع ورودی‌های مدل به‌جز نوع گروه‌های هیدرولوژیکی معادل، چهار نوع مدل رگرسیون چند متغیره خطی و شبکه عصبی با وزن‌های تثبیت یافته ساخته شده است. برای نوع اول مدل‌های ساخته شده گروه‌های هیدرولوژیکی معادل شامل چهار گروه A, B, C, D برای نوع دوم A, B, C, D برای نوع سوم A, B, C, D و برای نوع چهارم A, B, C, D می‌باشد.

با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی ساخته شده برای حالت اصلی و تلفیقی گروه‌های هیدرولوژیکی سازندها و واحدهای سنگی (چهارگانه، A, B, C, D، سه گانه شامل A, B, C, D و A, B, C, D و دوگانه A, B, C, D) عمق رواناب با فرض اینکه کل سطح زیر حوزه‌ها با هر یک از گروه‌های هیدرولوژیکی معادل مذکور اشغال شده باشد، شبیه‌سازی شده‌اند. این اقدام برای درک رفتار غیر خطی گروه‌های هیدرولوژیکی معادل در قبال تغییرات بارندگی یک روزه سیل‌زا برای قضاوت در خصوص صحت تجمیع سازندها زمین‌شناسی و واحدهای سنگی در هر یک از آنها می‌باشد.

برای درک بهتر از وضعیت پارامترهای ورودی در داخل شبکه عصبی و تفسیر رابطه عمق رواناب شبیه‌سازی شده با تک تک پارامترهای ورودی، ابتدا داده‌ها بر اساس یک همبستگی خطی چندگانه تحلیل شده‌اند (۲۰، ۳۲). از نظر تئوری، در صورت صفر بودن بارندگی روزانه سیل‌زا، مقدار عمق رواناب نیز برابر با صفر بوده لذا در ساخت معادله رگرسیون چند متغیره خطی، میزان عرض از مبدأ برابر با صفر در نظر گرفته شده است.

نتایج

معادلات رگرسیون خطی با مشارکت کل تعداد داده‌های اصلی (۶۵۸) آبنمود) برای چهار حالت مختلف گروه‌بندی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی با استفاده از نرم افزار SPSS) برای شبیه‌سازی عمق رواناب ایجاد شده‌اند. حالت اول عبارت از این است که تمام سازندها زمین‌شناسی و واحدهای سنگی موجود در محدوده تحقیق به چهار گروه هیدرولوژیکی معادل به نام‌های A, B, C, D تقسیم شده باشند (معادله ۱). حالت دوم عبارت از این است که تمام سازندها زمین‌شناسی و واحدهای سنگی به سه گروه هیدرولوژیکی معادل تقسیم شده باشند. در این وضعیت سازندهای قرار گرفته در گروه‌های هیدرولوژیکی معادل A و B با همدیگر تلفیق شده و به صورت A, B نامیده شده‌اند (معادله ۲). حالت سوم هم

سازندهای ناپیوسته از معیار هدایت هیدرولیکی و در ارتباط با سازندهای پیوسته از معیار آبدهی ویژه استفاده شده است. دامنه تغییرات این معیارها هم بطور نظری انتخاب شده است. به طور مثال بر اساس معیارهای مذکور گروه سازندهای زمین‌شناسی ناپیوسته که دارای هدایت هیدرولیکی بیشتر از ۱۰ متر بر روز و گروه سازندهای زمین‌شناسی پیوسته که دارای دبی متوسط ویژه سالانه بیشتر از ۳ لیتر بر ثانیه در کیلومتر مربع هستند در گروه هیدرولوژیکی A قرار گرفته‌اند. تقسیم‌بندی کامل گروه سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی همراه با دامنه تغییرات معیارهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی سالانه در جدول شماره دو آورده شده است. با توجه به گروه‌های هیدرولوژیکی اولیه تعیین شده، نقشه آنها تهیه و مساحت یا درصد مساحت هر یک از آنها نسبت به سطح زیر حوزه آبخیز مربوطه محاسبه گردیده است (جدول ۳).

به منظور بررسی و اثبات وجود اختلاف آماری معنی‌دار در بین گروه‌های هیدرولوژیکی تفکیک شده از نظر تولید رواناب (ضریب رواناب) و بررسی امکان شبیه‌سازی واکنش حوزه به تغییر پارامترهای مختلف هیدرولوژیکی از روش ایجاد معادلات ریاضی به روش رگرسیون چند متغیره خطی و آموزش و تثبیت وزن‌های شبکه عصبی معماری شده استفاده شده است. از آنجا که رابطه غیر خطی^{۱۴} بین بارش و رواناب حاکم است برای درک رفتار هیدرولوژیکی گروه‌های هیدرولوژیکی معادل (تولید رواناب در مقابل بارش) از روش رسم نیمرخ تغییرات تنها یک پارامتر ورودی (با ثابت نگهداشتن مقادیر سایر ورودی‌ها) در مقابل متغیر خروجی برآورد شده توسط مدل ساخته شده با شبکه عصبی برای تفسیر چشمی آنها بهره‌گرفته و نیمرخ تابع عمق رواناب در مقابل تغییرات عمق بارندگی یک روزه سیل‌زا برای هر یک از گروه‌های هیدرولوژیکی معادل رسم گردیده است. البته برای فراهم نمودن امکان مقایسه واکنش هیدرولوژیکی گروه‌های هیدرولوژیکی معادل تعیین شده بر مبنای نیمرخ‌های رسم شده، در هر بار شبیه‌سازی مساحت حوزه به‌طور ۱۰۰٪ پوشیده از یک نوع گروه هیدرولوژیکی فرض گردیده است. مراحل محاسباتی بطور اجمال عبارتند از:

در تمام زیر حوزه‌های مورد بررسی و در کل دوره آماری، آبنمود سیل‌ها جمع آوری شده و بارندگی نظیر یک روز و پنج روز قبل آنها با استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در سطح هر زیر حوزه مورد محاسبه قرار گرفته است. تعداد کل آبنمودهای بدست آمده پس از حذف موارد مشکوک ۶۵۸ مورد بوده است (جدول ۳).

حجم سیلاب برای هر یک از آبنمودها و عمق رواناب نظیر بر اساس مساحت هر یک از زیر حوزه‌ها مورد محاسبه قرار گرفته است.

ضریب رواناب هر آبنمود محاسبه و در مواقعی که میزان درصد ضریب رواناب بالاتر از یک و بعضاً ۰/۸ بوده است به‌عنوان داده‌های غیر قابل استناد و پرت حذف گردیده‌اند.

متغیرهای انتخاب شده مؤثر بر تولید رواناب که به عنوان ورودی‌های رگرسیون چند متغیره خطی و شبکه عصبی محسوب می‌شوند، برای هر واقعه سیلابی محاسبه و معیار شده و همراه با عمق رواناب نظیر معیار شده به عنوان خروجی به نرم افزار ارائه شده است. پارامترهای ورودی شامل بارندگی یک روزه نظیر هر آبنمود^{۱۵}، بارندگی پنج روز قبل نظیر هر بارندگی یک روزه مورد انتخاب و اندازه مساحت معیار شده هر یک از گروه‌های هیدرولوژیکی متناظر با گروه‌های هیدرولوژیکی خاک A, B, C, D و یا

سیل‌زا نشان می‌دهد. همچنین هر چهار منحنی دو به دو دارای نقطه تلاقی هستند.

نقطه شروع منحنی‌های گروه هیدرولوژیکی معادل A و گروه هیدرولوژیکی معادل C، D در شکل چهار تقریباً نشانگر نقطه شروع مناسب (نزدیک به صفر بودن عمق رواناب) می‌باشند. مخصوصاً گروه هیدرولوژیکی معادل A آستانه شروع رواناب را برابر با ۱۰ میلی‌متر عمق بارندگی یک روزه سیل‌زا نشان می‌دهد. با روی هم گذاری شکل‌های چهار و پنج مشخص می‌گردد که ریخت هر سه منحنی تقریباً شبیه بهم می‌باشند. منتها منحنی مربوط به گروه هیدرولوژیکی معادل B در شکل چهار منطبق بر منحنی مربوط به گروه هیدرولوژیکی C شده است. مقایسه دو منحنی گروه هیدرولوژیکی معادل A و A، B نشان می‌دهد که گروه هیدرولوژیکی معادل A از نظر تولید رواناب تا مقدار بارندگی یک روزه برابر با حدود ۳۷ میلی‌متر دارای مقدار نفوذپذیری بالاتر از گروه هیدرولوژیکی معادل A، B بوده ولی با عبور میزان بارندگی از این حد حالت معکوس اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر

بمانند حالت دوم بوده ولی با این تفاوت که گروه‌های هیدرولوژیکی معادل C، D با همدیگر تلفیق شده است (معادله ۳). حالت چهارم عبارت از شرایطی است که تمام سازندها زمین‌شناسی و واحدهای سنگی به دو گروه هیدرولوژیکی معادل به نام‌های A، B و C، D تقسیم شده باشند. لازم به یادآوری است که مجموع درصد مساحت گروه‌های هیدرولوژیکی معادل در داخل هر یک از معادلات رگرسیون چند متغیره خطی برابر با ۱۰۰ است. بر اساس آزمون F عمق رواناب برآوردی توسط هر یک از معادله‌های رگرسیون چند متغیره خطی (معادله‌های ۱، ۲، ۳ و ۴) در سطح احتمال یک درصد خطا دارای تفاوت معنی‌دار با یکدیگر هستند. اما وضعیت معنی‌دار بودن و به عبارت دیگر اثر گذار بودن هر یک از گروه‌های هیدرولوژیکی معادل در داخل هر یک از معادلات رگرسیون چند متغیره خطی به شرح جدول چهار است.

با استفاده از مدل‌های ریاضی ساخته شده به روش شبکه عصبی مصنوعی پاسخ مدل‌ها (برآورد عمق رواناب) برای حالت ثابت مساحت

$$\begin{aligned} (1) \quad R &= -0.000118 S + 0.104 p1 + 0.00413 p5 - 0.0149 A + 0.0027 B + 0.00887 C + 0.0078 D \\ (2) \quad R &= -0.000104 S + 0.104 p1 + 0.00429 p5 - 0.0151(A+B) + 0.00887 C + 0.0104 D \\ (3) \quad R &= -0.000118 S + 0.104 p1 + 0.00414 p5 - 0.0147 A + 0.0014 B + 0.00877(C+D) \\ (4) \quad R &= -0.000101 S + 0.104 p1 + 0.00431 p5 - 0.0156 (A+B) + 0.00905 (C+D) \end{aligned}$$

R = عمق رواناب (میلیمتر)، S = مساحت زیر حوزه (کیلومتر مربع)، P1 = بارندگی یک روزه سیل‌زا (میلیمتر)، P5 = بارندگی پنج روز قبل نظیر (میلیمتر)،

A = درصد مساحت گروه هیدرولوژیکی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی معادل گروه هیدرولوژیکی خاک A

B = درصد مساحت گروه هیدرولوژیکی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی معادل گروه هیدرولوژیکی خاک B

C = درصد مساحت گروه هیدرولوژیکی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی معادل گروه هیدرولوژیکی خاک C

D = درصد مساحت گروه هیدرولوژیکی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی معادل گروه هیدرولوژیکی خاک D

سرعت نفوذپذیری ۱۶ و نگهداشت سطحی ۱۷ گروه هیدرولوژیکی معادل A در قیاس با دیگری تا یک مقداری از بارندگی یک روزه سیل‌زا بیشتر و بعد از آن کمتر می‌شود.

در شکل شش دو منحنی دارای نقطه تلاقی نبوده و روند منحنی‌ها نیز از یکنواختی قابل قبول برخوردار نیستند. به‌ویژه آنکه منحنی مربوط به گروه هیدرولوژیکی معادل A، B در حالتی که عمق بارندگی یک روزه سیل‌زا بین ۳۸ الی ۵۰ میلی‌متر است، نشانگر عمق رواناب منفی است. ضمناً در همه منحنی‌های ایجاد شده به‌جز منحنی‌های شکل شش، نقطه شروع منحنی‌ها دارای عرض از مبدا می‌باشند. به عبارت دیگر در حالی که عمق بارندگی یک روزه سیل‌زا برابر با صفر است، عمق رواناب در سطح حوزه وجود دارد.

میانگین سری‌های عمق رواناب برآورد شده توسط مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی دارای اختلاف آماری معنی‌دار با یکدیگر در سطح یک درصد و بعضاً در سطح پنج درصد احتمال خطا بر اساس آزمون t استیودنت می‌باشند.

حوزه برابر با ۶۵ کیلومتر مربع و بارندگی پنج روز قبل برابر با ۲۰ میلی‌متر، برای مقادیر مختلف بارندگی روزانه سیل‌زا (بین صفر الی ۷۰ میلی‌متر) و با فرض این که کل مساحت حوزه تنها دارای یکی از گروه‌های هیدرولوژیکی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی باشد، استخراج گردیده و در نمودارهایی نشان داده شده است (شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶).

در شکل سه گروه هیدرولوژیکی معادل B تقریباً دارای هیچ واکنشی به تغییرات بارندگی یک روزه سیل‌زا نشان نداده است. گروه هیدرولوژیکی معادل D از یک عرض از مبدا غیر واقعی شروع شده و با شیب بسیار اندک ادامه یافته و با یک تغییر موقعیت به مقدار عمق رواناب بالای سه میلی‌متر دوباره موازی محور بارندگی یک روزه سیل‌زا ادامه می‌یابد. متعادل‌ترین حالت در مقایسه با سایر منحنی‌ها تنها در گروه هیدرولوژیکی معادل C وجود داشته و از یک روند قابل قبولی پیروی می‌کند. منحنی مربوط به گروه هیدرولوژیکی معادل A تقریباً از نقطه شروع نزدیک به صفر برخوردار بوده و حد شروع تولید رواناب را برابر با پنج میلی‌متر بارندگی یک روزه

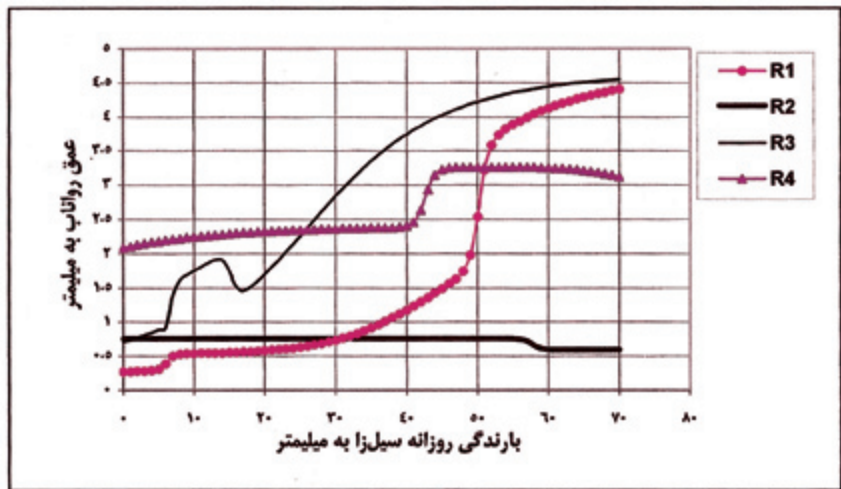
شکل ۳: نمودار رابطه بارندگی روزانه سیل‌زا با گروه‌های هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شده با شبکه عصبی

R1 بیانگر عمق رواناب با فرض اینکه کل مساحت حوزه با گروه هیدرولوژیکی معادل A پوشیده شده باشد.

R2 بیانگر عمق رواناب با فرض اینکه کل مساحت حوزه با گروه هیدرولوژیکی معادل B پوشیده شده باشد.

R3 بیانگر عمق رواناب با فرض اینکه کل مساحت حوزه با گروه هیدرولوژیکی معادل C پوشیده شده باشد.

R4 بیانگر عمق رواناب با فرض اینکه کل مساحت حوزه با گروه هیدرولوژیکی معادل D پوشیده شده باشد.

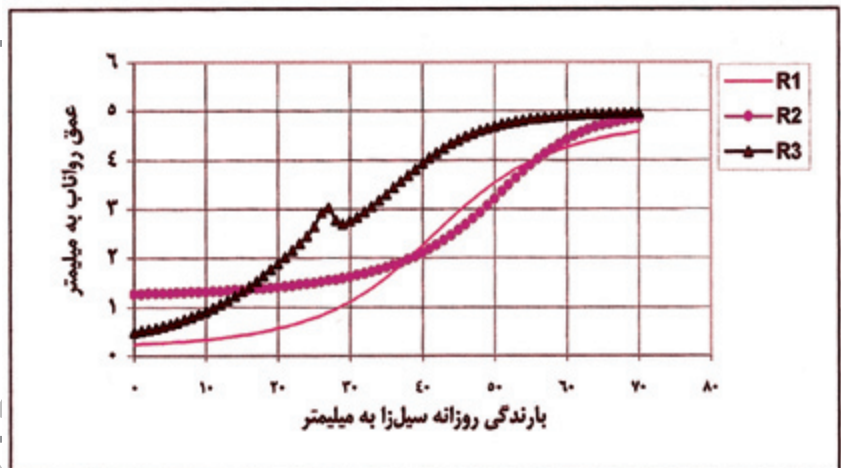


شکل ۴: نمودار رابطه بارندگی روزانه سیل‌زا با هر یک از گروه‌های هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شده با شبکه عصبی

R1 بیانگر عمق رواناب با فرض اینکه کل مساحت حوزه با گروه هیدرولوژیکی معادل A پوشیده شده باشد.

R2 بیانگر عمق رواناب با فرض اینکه کل مساحت حوزه با گروه هیدرولوژیکی معادل B پوشیده شده باشد.

R3 بیانگر عمق رواناب با فرض اینکه کل مساحت حوزه با گروه هیدرولوژیکی معادل C&D پوشیده شده باشد.



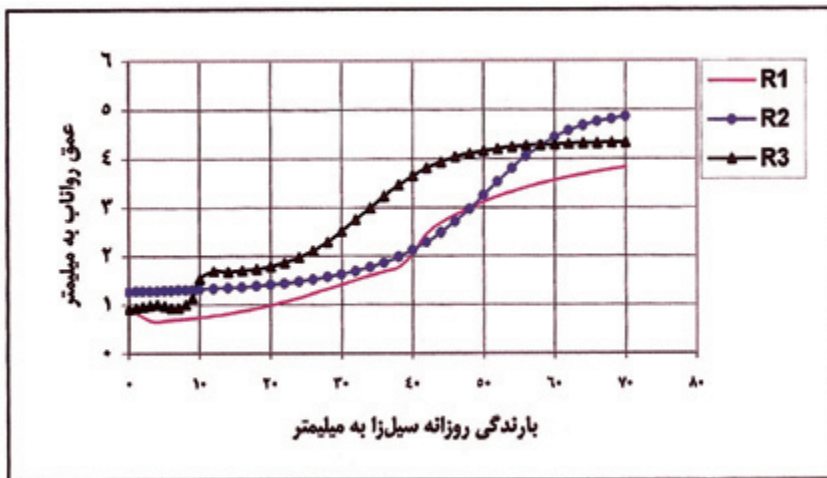
منطقی آن است که منحنی مربوط به گروه هیدرولوژیکی معادل A در شکل چهار کلاً در ذیل منحنی گروه هیدرولوژیکی معادل A,B در مقابل پنج واقع شود، اما تقریباً دارای شکل مشابه هم بوده ولی در مقابل دارای نقطه تلاقی می‌باشند. وقوع چنین پدیده‌ای می‌تواند ناشی از تأثیر افزایش سطح گسترش سازندهای آهکی در داخل گروه هیدرولوژیکی معادل A,B باشد. چرا که اصولاً سازندهای آهکی دارای اشکال ریخت شناسی مربوط به خود بوده و با افزایش مقدار بارندگی یک روزه سیل‌زا نگهداشت سطحی آن کم و یا صفر نمی‌شود در صورتی که در سازند کوتاه‌تر با افزایش زمان و مقدار بارندگی مقدار نگهداشت سطحی به صفر رسیده و سرعت نفوذ نیز تا مرحله رسیدن به سرعت نفوذ یکنواخت کاهش می‌یابد.

در ستون سوم جدول چهار گروه هیدرولوژیکی معادل B در هر دو حالت در ردیف‌های دوم و چهارم فاقد تأثیر معنی‌دار است. این موضوع گویای آن است که دادن نقش مستقل و اثرگذار بر این گروه از سازندها تأثیری در افزایش دقت مدل رگرسیونی در برآورد متغیر وابسته یعنی عمق رواناب ندارد. این امر با توجه به منحنی مربوط به این گروه هیدرولوژیکی

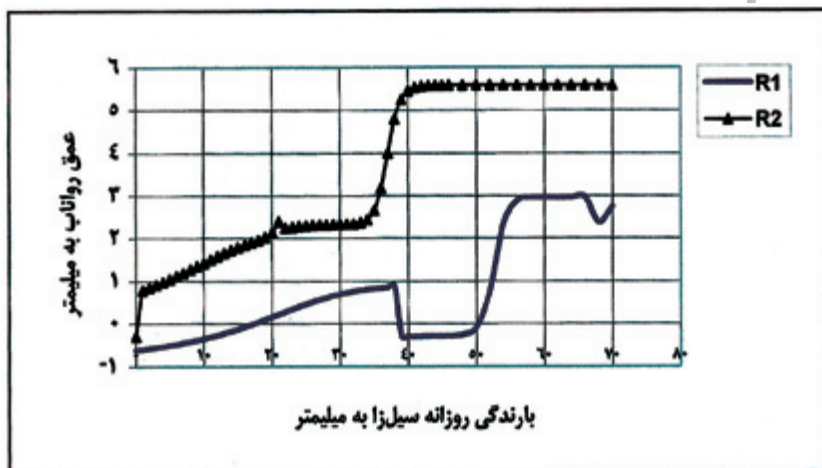
بحث

در شبیه‌سازی به روش شبکه عصبی مصنوعی روابط درون شبکه در توزیع وزن‌ها در گره‌ها نهفته است، لذا برای درک بهتر از ارتباط متقابل بین پارامترهای ورودی و خروجی، نتایج حاصل از تحلیل آماری رگرسیون چند متغیره خطی برای تفسیر نتایج شبکه عصبی مورد توجه قرار گرفته است (۲۵). با توجه به جدول چهار روشن است که اثر گروه هیدرولوژیکی معادل A در ستون مربوط به خود در هر دو حالت یعنی در ردیف‌های یک و سه دارای ضریب رگرسیونی معنی‌دار با علامت منفی است، وضعیت منفی در واقع تأیید کننده داشتن تأثیر معنی‌دار و کاهنده در مقایسه با گروه‌های هیدرولوژیکی معادل دیگر بر عمق رواناب است. به بیان دیگر نفوذپذیری قابل توجه در این گروه هیدرولوژیکی از سازندها و واحدهای زمین‌شناسی وجود دارد. همچنین در شکل‌های سه و چهار نیز، حالت منحنی گروه هیدرولوژیکی معادل A این امر را نشان می‌دهد.

با توجه به معیارهای در نظر گرفته شده برای مجتمع‌سازی و گروه‌بندی هیدرولوژیکی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی انتظار



شکل ۵: نمودار رابطه بارندگی روزانه سیل‌زا با هر یک از گروه‌های هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شده با شبکه عصبی R1 بیانگر عمق رواناب با فرض اینکه کل مساحت حوزه با گروه هیدرولوژیکی معادل A&B پوشیده شده باشد. R2 بیانگر عمق رواناب با فرض اینکه کل مساحت حوزه با گروه هیدرولوژیکی معادل C پوشیده شده باشد. R3 بیانگر عمق رواناب با فرض اینکه کل مساحت حوزه با گروه هیدرولوژیکی معادل D پوشیده شده باشد.



شکل ۶: نمودار رابطه بارندگی روزانه سیل‌زا با هر یک از گروه‌های هیدرولوژیکی تلفیقی شبیه‌سازی شده با شبکه عصبی R1 بیانگر عمق رواناب با فرض اینکه کل مساحت حوزه با گروه هیدرولوژیکی معادل A&B پوشیده شده باشد. R2 بیانگر عمق رواناب با فرض اینکه کل مساحت حوزه با گروه هیدرولوژیکی معادل C&D پوشیده شده باشد.

بهرتر و بیشتر نمایان سازد. همچنین انتظار می‌رود با انجام تغییراتی در مجتمع‌سازی سازندها و واحدهای سنگی در داخل این گروه هیدرولوژیکی، از درهمی رفتار هیدرولوژیکی آن کاسته شود. در ستون چهارم جدول مزبور گروه هیدرولوژیکی C در هر دو حالت دارای تأثیر مستقیم و معنی‌دار است. این وضعیت بیانگر تأثیر مثبت آن بر افزایش عمق رواناب در مقایسه با گروه هیدرولوژیکی معادل A است. همچنین این گروه دارای نقش غیر قابل حذف در مدل نمودن رابطه عمق رواناب با مقدار بارندگی یک روزه سیل‌زا می‌باشد. این امر به وضوح در شکل‌های سه و چهار قابل مشاهده است. به ویژه منحنی گروه هیدرولوژیکی C در شکل دو با توجه به محدب بودن آن برای مقادیر بارندگی روزانه سیل‌زای کمتر از ۴۵ میلی‌متر نشانگر واکنش شدید به بارندگی برای تولید رواناب در مقایسه با گروه هیدرولوژیکی معادل A است. در واقع چنین استنباط می‌گردد که هر دو گروه هیدرولوژیکی A و C دارای ماهیت نفوذپذیری متفاوت و معنی‌دار بوده و مرز این دو تقریباً از شفافیت خوبی برخوردار شده‌اند. این موضوع بیانگر درست بودن مجتمع‌سازی

در شکل سه کاملاً مشهود بوده ولی در شکل چهار گویای تأثیرگذاری آن بر عمق رواناب در بارندگی‌های روزانه سیل‌زا بیشتر از حدود ۲۰ میلی‌متر است و برای مقادیر کمتر از آن واکنشی نشان نمی‌دهد. این ویژگی در واقع تطابق کامل آن بر گروه هیدرولوژیکی A بین ۲۰ الی ۴۰ میلی‌متر و تفوق یافتن بر آن پس از این مقدار است. به عبارت دیگر این گروه هیدرولوژیکی دارای رفتارهای متفاوت نفوذپذیری با توجه به عمق‌های مختلف بارندگی روزانه سیل‌زا است و به نوعی دارای ناهم‌انگهی در مقایسه با گروه هیدرولوژیکی معادل A است. این ویژگی می‌تواند منتج از خصوصیات مورفولوژیکی و زمین‌شناسی خود سازندها و واحدهای سنگ‌شناسی و همچنین تغییر الگوی رفتاری توزیع زمانی شدت بارندگی در طول ۲۴ ساعت باشد. به عبارت دیگر توزیع متفاوت مقدار و شدت بارندگی در طول یک روز با ثابت فرض نمودن سایر شرایط عمق رواناب‌های متفاوتی ایجاد می‌نمایند. در نتیجه می‌توان دریافت که مدل ساخته شده توسط شبکه عصبی مصنوعی توانسته است ویژگی‌های رفتاری نفوذپذیری سازندها و واحدهای سنگ‌شناسی را در مقایسه با روابط رگرسیونی چند متغیره

برابر با صفر است، حتماً عمق رواناب نظیر نیز برابر با صفر خواهد بود. مقایسه این دو بیانگر میزان نفوذپذیری بسیار کم گروه هیدرولوژیکی D در مقایسه با گروه هیدرولوژیکی B می‌باشد. در ستون ششم همان جدول، تا وقتی که گروه‌های هیدرولوژیکی A و B با یکدیگر جمع گردیده و به عنوان یک گروه مستقل در نظر گرفته می‌شوند، در ردیف سوم و پنجم جدول دارای تأثیر معنی‌دار و منفی برای تولید رواناب هستند. از این واقعه چنین استنباط می‌گردد که جمع نمودن دو گروه هیدرولوژیکی A و B با یکدیگر نایستی منجر به اغتشاش

سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی در این دو گروه هیدرولوژیکی معادل است.

گروه هیدرولوژیکی معادل D مندرج در ستون پنجم جدول شماره چهار تفسیرهای مشابه گروه هیدرولوژیکی B را دارد. البته در شکل سه مشاهده می‌شود که عمق رواناب تولیدی این گروه تقریباً به اندازه ۲/۱ میلیمتر در فاز بالاتر از گروه هیدرولوژیکی معادل B قرار گرفته است که بیانگر خطا در مدل و نحوه مجتمع‌سازی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی است. به دلیل آنکه در هر حالت زمانی که بارندگی

جدول ۲: معادل‌سازی انواع سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی در حوزه آبخیز سد سفیدرود با گروه‌های هیدرولوژیکی خاک

معدل گروه‌های هیدرولوژیکی خاک	معدل دبی ویژه سالانه lit/s/km ^۲	ضریب هدایت هیدرولیکی m/day	علائم واحدهای زمین‌شناسی	مواد تشکیل دهنده	نوع ریخت‌شناسی	گروه سازندهای زمین‌شناسی
A	-	>۱۰	Qa1, Qt۲, Qr	درشتدانه، ضخامت زیاد، سطح ایستابی در ژرفای کم	مخروط افکنه و دشت سر فرسایشی (۱)	سازندهای ناپیوسته (عمدتاً کواترنری)
			Qt۱	درشتدانه تا متوسط، ضخامت زیاد، سطح ایستابی در ژرفای کم		
			Qt	دانه متوسط، ضخامت نسبتاً زیاد، سطح ایستابی در ژرفای کم		
			Qt	دانه متوسط، ضخامت کم، سطح ایستابی نسبتاً پائین		
			Qs	درشتدانه، ضخامت کم، سطح ایستابی در ژرفای زیاد	واریزه‌ها (۴)	
A	۳/۵۸	-	OMq, OM, En, OMI۲, l, ku, kp۳, k۱۰, kv, k۳, kln, Jl, Tre, Jkl, Jd, l, Pr, pd, r, pz, pz۲	سنگ آهک، دولومیت، دولومیت آهکی کارست با شکاف‌های زیاد	کربنات (۸)	پیوسته
	۳/۱۵		oM۱, Ez, En, Om۱, Pel, Kll, kllr, kl-۲ls, klt, J, Jsh, TR, Eml, Cm, Es, pl, Gn, pEs, pd	سنگ آهک، دولومیت، دولومیت آهکی و کارست با شکاف‌های متوسط		
B	-	۱۰-۵	Qt۲	دانه درشت تا متوسط، ضخامت زیاد، سطح ایستابی در ژرفای کم	آبرفت میان‌دشتی (۲)	سازندهای ناپیوسته (عمدتاً کواترنری)
			Qt۲	دانه متوسط، ضخامت نسبتاً زیاد، سطح ایستابی در ژرفای کم		
			Qt۲	دانه متوسط تا ریز، ضخامت نسبتاً زیاد، سطح ایستابی در ژرفای کم		
	۱/۸۶	-	L, n, Pgz, EZ, Plf, kl, k, k1, Jm, Jd1, Jl, J d, l, pzll, sv/Dl	توف آهکی، دولومیت، سنگ آهک دولومیتی با مقدار کم شیل و مارن، با درز و شکاف‌های کم	کربنات (۸)	پیوسته
۱/۰۳	K۲ls, k۲l, pEd		سنگ آهک ماسهای، ماسه سنگ آهکی، سنگ آهک، ماسه سنگ دارای درز و شکاف سطحی و نسبتاً زیاد	کربنات تخریبی (۹)		

C	-	۵-۲	Q ₂ le	دانه متوسط تا ریز، ضخامت نسبتاً زیاد، سطح ایستایی در ژرفای کم	آبرفت پایان دشتی (۳)	سازندهای ناپیوسته (عمدتاً کواترنر)	
			Q ₂ le	نسبتاً ریز دانه و یکنواخت، ضخامت نسبتاً کم، سطح ایستایی بالا			
			Q ₂ le	ریز دانه و یکنواخت، ضخامت کم، سطح ایستایی بالا			
	-	-	-	,Om _{qm} , TRs, Ol	سنگ آهک، دولومیت، ماسه سنگ، کنگلومرا، شیل، مارن، سیلتستون	کربنات تخریبی کلونیدی (۱۰)	پیوسته
				,Ml, Om _l , Ngl, m, Eko, k _{ym}	سنگ آهک، شیل‌های مارنی ماسه‌ای، آهک شیلی، مارن شیل آهکی، سنگ آهک مارنی	کربنات کلونیدی (۱۱)	
				,Ng _z , kp ₁	سنگ آهک مارنی، مارن، مارن سیلتی، تناوب آهک و مارن	تخریبی (۱۲)	
				Omc, M _{yc} , O, Pec, Ngc, OM, Or, M, E, S, k _{yc} , k _d , k _v , k _{ycs} , s, C, ms, k, C, El	کنگلومرا، ماسه سنگ، درز و شکاف سطحی نسبتاً زیاد	تخریبی (۱۲)	
				Ec, P _{gks} , M, M ₁ , k-pf, Js, Eom, pd, pd, pdr, pE, pEz	کنگلومرا، ماسه سنگ، شیل، سیلتستون یا ضخامت زیاد، درز و شکاف سطحی متوسط	تخریبی کلونیدی (۱۳)	
				Ngm, , Mm _r , Mm _v , Ng _z , Es, Mms, Mml, PE, M, M _z , Ng, Pm, kls, k _l , k _v , ksh, Jks, Jsh, iEbr, S, Ebt, Ebr, pbs, Ez	شیل، ماسه سنگ، مارن‌های سیلتی، کنگلومرا، مارن با ضخامت نسبتاً زیاد	تخریبی کلونیدی (۱۳)	
				M ₁ , Ml, OMm, Ng ₁ , Omq, Mm, Pl, k _f , Es, ch	مارن، مارن سبز، رس‌های قرمز و مارن با لایه‌های ژیبس، شیل آرزلی، خاکستری، لایه‌های رسی پلیوسن	کلونیدی (۱۴)	
				agb, ?E, g, PgKd, gr, Og, iE, tE, Et, Ev, t, M _z P _r , M _z P _v , M _z P ₁ , tM ₁ , Pev, Et, g, gr, Og, E, Ek, Ek ₁ - ₅ , gd, g, kj, Jv, mv, gd, p _{zrv} , v, Gr	توفه‌های سبز کرج، گدازه‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی، ضخامت زیاد، درز و شکاف فراوان	آذرین (۱۷)	
				Pgkvi, Pgkv, Vp, t, r, Pgkt, Pgkl, V, Es, EP _r , Ev, dal _t m _r m _r , m ₁ d, m ₁ b, OMd, OMb, Eo ₁ , Eor, Ea ₁ - ₆ , a, s, dm, ap, trE, E _z V, E ₁ V, Ng _z - _r V, Pgua, Pgrt, Omq _v , Ev ₁ , Ekt _v , Ek _t ag, Ev, omv ₁ , OMr, Pb, Ekv _t , Ek _{sl} , Mv, b, M _z r, P _r , M, P, d, m, k _v V, klv, k _q , k _f , k _v Vs, kv, kv _v , kv ₁ , Jv, P _f v, Dv, d, gb, d-gp, gp, im, ip, is, bg-bb, b, p _{zlv} , To, rh	گدازه‌های بازیک توف شیلی، شیل‌های سازند کرج، ماسه سنگ توفی، تراکیت، داسیت	آذرین (۱۷)	
Ks, k _{ym} , kmsh, kml, Jml, Jm, Jmv, Jas, P _J m, a, d, mb, ?TR, sp, q, Gd, Ga, ps, p _{zrs} , mb	فیلیت، اسلیت، شیست میکا دار، آهک مرمری، کوارتز	دگرگونی (۱۸)					
Nda _r , q, Jq, Jam, PEgn, Us, pEg, E _q , Em, Cph, mt, q, a	آمفیبولیت، گنایس، سربانتینت‌های اولترا بازیکی، کمپلکس دگرگونی	دگرگونی (۱۸)					
D	-	-	Pzls, S, Cm, Plc, Pgf, c M _z , c M _r	کنگلومرا و ماسه سنگ فجن، کنگلومرا و ماسه سنگ، آگلومرا	تخریبی (۱۲)	پیوسته	
			gy ₁ , gy _z , m, M ₁ , M ₁ L, Ng _z , Ng ₁ , Mg, gy, Ng _g	ژیبس قرمز، مارن ژیبس‌دار، طبقات قرمز ژیبس‌دار، نمک طعام	تبخیری (۱۹)		

جدول ۳: درصد مساحت گروه‌های هیدرولوژیکی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی معادل چهارگانه و تعداد آبنمود مورد استفاده در هر یک از زیر حوضه‌ها

شماره حوضه	گروه‌های هیدرولوژیکی معادل زیر حوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	A	B	C	D	تعداد آبنمود
۱	علیزان - جوستان	۶۴/۴	۰	۰	۹۱/۱۶	۸/۸۴	۲۲
۲	مهران - جوستان	۹۸	۰	۰	۸۶/۸۰	۱۳/۲۰	۳۸
۳	تهم - پالدلو	۱۶۹/۶	۰	۰	۱۰۰	۰	۲۳
۴	تلوار - دهگلان	۲۳۸	۵۵/۱۶	۰	۴۴/۸۴	۰	۱۱
۵	طالقانرود - جوستان	۴۲۸	۶/۰۲	۰	۹۰/۲۱	۳/۷۷	۴۱
۶	الموت رود - باغ کلايه	۶۳۵	۲/۰۳	۱/۹۱	۸۰/۸۶	۱۵/۱۹	۸۵
۷	طالقانرود - گلینک	۸۳۸	۴/۲۹	۳/۷۸	۸۲/۶۸	۹/۲۵	۱۴۴
۸	قزل اوزن - نساره	۱۵۶۸	۲۰/۵۲	۰/۹۵	۷۸/۵۳	۰	۲۳
۹	شاهرود - رجایی دشت	۲۲۷۰	۲/۰۸	۴/۳۴	۷۵/۲۲	۱۸/۳۶	۱۳۶
۱۰	تلوار - حسن خان	۲۴۶۵	۳۷/۷۸	۰/۱۱	۶۲/۱۱	۰	۲۲
۱۱	شاهرود - لوشان	۴۸۶۴	۵/۶۲	۶/۵۰	۷۵/۵۹	۱۲/۲۹	۹۸
۱۲	تلوار - مهرآباد	۶۲۱۲	۳۵/۱۰	۰/۶۰	۶۴/۲۳	۰	۱۵

جدول ۴: حالات معنی‌دار بودن ضرایب رگرسیونی گروه‌های هیدرولوژیکی چهارگانه در حالت‌های ساده و تلفیقی

شماره معادله	A	B	C	D	A&B	C&D
۱	معنی‌دار معکوس	معنی‌دار نیست	معنی‌دار مستقیم	معنی‌دار نیست	-	-
۲	-	-	معنی‌دار مستقیم	معنی‌دار نیست	معنی‌دار معکوس	-
۳	معنی‌دار معکوس	معنی‌دار نیست	-	-	-	معنی‌دار مستقیم
۴	-	-	-	-	معنی‌دار معکوس	معنی‌دار مستقیم

منطقی باشد اما در مقابل گروه هیدرولوژیکی معادل A,B تولید اعوجاج قابل توجه می‌نماید (شکل ۶). تفسیرهای مذکور نیز تا حدودی توسط شکل سه تأیید می‌گردد. به دلیل آنکه ضمن وجود تفاوت قابل توجه در تولید رواناب، ریخت منحنی‌های مربوط به گروه‌های هیدرولوژیکی معادل A و C و رفتار منطقی آنها از بین رفته و دچار بی‌نظمی شده‌اند. به ویژه آنکه منحنی مربوط به گروه هیدرولوژیکی A,B در شکل شش عمق رواناب را در میزان بارندگی‌های روزانه سیلوا تا ۲۰ میلی‌متر و همچنین بین ۳۸ تا ۵۰ میلی‌متر منفی نشان می‌دهد و این روند رفتاری با منطق هیدرولوژی

رفتار هیدرولوژیکی این گروه ترکیب شده گردد. در صورتی که با توجه به شکل پنج چنین اتفاقی حادث می‌گردد. لذا به نظر می‌رسد برای ترکیب نمودن درست آنها پالایشی از نظر خارج نمودن تعدادی از سازندها و واحدهای زمین‌شناسی از داخل آنها بایستی صورت گیرد. در ستون هفتم جدول مزبور، گروه هیدرولوژیکی معادل تلفیقی C,D در معادلات رگرسیون چند متغیره خطی سه و چهار در هر دو حالت دارای تأثیرات مثبت و معنی‌دار در تعیین عمق رواناب است. از این موضوع استنتاج می‌گردد که ترکیب گروه‌های هیدرولوژیکی معادل C با D می‌تواند

جزئی از آن در داخل گروه هیدرولوژیکی معادل A و جزء دیگر در داخل گروه هیدرولوژیکی معادل C قرار گیرد. بدین لحاظ توصیه می‌شود، گروه سازندهای پیوسته مندرج در گروه هیدرولوژیکی B یعنی کربنات‌ها و کربنات‌های تخریبی جزء گروه هیدرولوژیکی C قرار گرفته و ما بقی موجود در این گروه به گروه هیدرولوژیکی A انتقال یابد. همچنین از گروه هیدرولوژیکی C، با توجه به جدول ۲ گروه کربنات‌های کلونیدی دارای مارن و گروه تخریبی کلونیدی دارای شل و مارن و کل گروه کلونیدی کد (۱۴) جدا شده و به گروه هیدرولوژیکی D اضافه شوند.

به نظر می‌رسد انجام تحقیق مشابه با تعداد بیشتر زیرحوزه‌ها و آنمودها و انتخاب گروه‌های هیدرولوژیکی با ترکیبات متفاوت از سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی و استفاده از ساختمان شبکه‌های عصبی پودمانی برای کاستن از شدت پراکندگی‌ها و رسیدن به مرزهای صاف گروه‌های هیدرولوژیکی مفید واقع شود. ضمناً در انجام مطالعات هیدرولوژی از دیدگاه رواناب سطحی و تولید سیل در مقیاس حوزه‌های آبخیز متوسط و بزرگ و کوهستانی از گروه‌های هیدرولوژیکی سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی به‌جای گروه‌های هیدرولوژیکی خاک استفاده شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همکاری‌های خوب و صمیمانه مسئولین و کارمندان محترم سازمان تحقیقات منابع آب وابسته به وزارت نیرو مخصوصاً آقای بابائی (مسئول آمار)، سازمان هواشناسی کل کشور، سازمان آب زنجان و کردستان، اداره کل امور آب قزوین و مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان به‌ویژه مهندس سید سعید موسوی، مهندس فرزاد بیات موحد و علیرضا زینعلی کمال تشکر و امتنان را دارد.

- 1- Natural Resources Conservation Service
- 2- Curve Number
- 3- Artificial Neural Network
- ۴- عبارت از بارندگی یک روزه‌ای است که منجر به تولید آبنمود در خروجی حوزه شده است.
- 5- Transfer Function
- 6- Input Layer
- 7- Hidden Layer(s)
- 8- Output Layer
- 9- Neuron
- 10- Feed Forward Back propagation Error
- 11- Tansig
- 12- purelin
- 13- Standardized
- 14- Nonlinear
- 15- Hydrograph
- 16- Infiltration Rate
- 17- Surface Storage

سازگاری ندارد. در تمامی حالت‌های تجمیع گروه سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی هیدرولوژیکی معادل، با عبور میزان بارندگی روزانه سیل‌زا از مرز حدود ۶۰ میلیمتر سرعت نفوذپذیریشان به همدیگر نزدیک می‌شود. به‌عبارت دیگر با رسیدن بارندگی روزانه سیل‌زا به یک مقدار مشخص، رفتار هیدرولوژیکی کلیه سازندها و واحدهای سنگ‌شناسی موجود در محدوده تحقیق برای تولید رواناب تقریباً به هم نزدیکتر شده‌اند. دلایل این اتفاق می‌تواند اشباع شدن لایه‌های سطحی، وجود لایه‌های محدود کننده نزدیک به سطح، وجود شیب‌های تند و عدم فرصت کافی برای نفوذ بیشتر بیان شود. هر چند که مقدار تفاوتشان باز بیانگر وجود اختلاف ذاتی در بین آنها می‌باشد.

وجود عرض از مبدأ در بخشی از نمودارهای تولید شده توسط مدل ساخته شده با شبکه عصبی مصنوعی به اِزاء میزان بارندگی روزانه سیل‌زا برابر با صفر توجیه منطقی و علمی ندارد و بایستی این امر در ایجاد مدل پیش‌بینی عمق رواناب به صفر کاهش داده شود. البته اعمال چنین محدودیتی در ایجاد روابط رگرسیون چند متغیره خطی امکان پذیر بوده و لحاظ شده است ولی در ساخت مدل‌های شبکه عصبی مقصور نبوده است. لذا در مدل‌های شبکه عصبی ساخته شده در حالتی که کلیه ورودی‌های مدل برابر با صفر در نظر گرفته شده، میزان عمق روانابی برابر با حدود $(+2/1)$ تا $(-0/6)$ میلیمتر و به‌طور متوسط $0/21$ میلیمتر را نشان می‌دهند. با توجه به توانایی‌های شبکه عصبی در شبیه‌سازی روابط غیر خطی و در مقابل ناتوان بودن در تطبیق خود با این واقعیت هیدرولوژیکی، قابل نتیجه‌گیری است که وقوع چنین امری بیانگر پراکندگی و اغتشاش در برآورد میزان بارندگی در سطح حوزه، عمق رواناب بارندگی نظیر و احیاناً عدم توانایی مدل در برون‌یابی مقادیری از پارامترهای ورودی است که در خارج از محدوده کمی داده‌های به‌کار گرفته شده برای آموزش شبکه قرار دارند. همچنین این خطا می‌تواند به دلیل عدم توزیع یکنواخت شدت و مقدار بارندگی از نظر زمانی و مکانی و تغییر در الگوی بارندگی روزانه سیل‌زا (10) ، عدم توزیع مکانی مناسب ایستگاه‌های هواشناسی در زیر حوزه‌ها، بعضاً ناتوانی در تشخیص و جداسازی آنمودهای ذوب برف یا آنمودهایی منتج از بارندگی و ذوب برف و در نهایت تعیین نادرست دبی پایه و جداسازی حجم سیلاب به دلیل نقص در جداول آبنمود سیل استخراج شده توسط سازمان‌های آب منطقه‌ای بوده باشد. البته آنمودهایی که بیانگر ضریب روانابی بیشتر از $0/8$ بوده‌اند، از سری داده‌ها برای تحلیل رگرسیون چند متغیره خطی همچنین آموزش و آزمون مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی حذف شده‌اند.

نتیجه‌گیری

گروه‌بندی هیدرولوژیکی سازندها زمین‌شناسی و واحدهای سنگی تنها با لحاظ نمودن معیارهای ضریب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه با دامنه تغییرات لحاظ شده کافی نبوده و بهتر است ویژگی‌های فیزیکی ذاتی آنها نیز در دسته‌بندی‌ها دخالت داده شود. بهتر است گروه‌بندی‌های هیدرولوژیکی معادل حداکثر در سه و حداقل در دو گروه هیدرولوژیکی معادل دسته‌بندی شوند. سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی مجتمع یافته در گروه هیدرولوژیکی B تجزیه شده و با توجه به ساختار فیزیکی و کلیه ویژگی‌های زمین‌شناسی به دو جزء تقسیم شود، به‌طوری که

and dissolved O in a complex, tidally affected river basin. Proceedings of the South Carolina Environmental Conference, pp: 1-15.

20- Cravener, T. L. and W. B. Roush, 1999; Improving neural network prediction of amino acid levels in feed ingredients, Poultry Science, (78), pp: 983-991.

21- Engineering Staff. 1986; Urban hydrology for small watersheds, Technical Release 55. USDA-NRCS, Engineering Division. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC. Part 630, Section 4, Chapter 7.

22- Engineering Staff. 1993; National engineering handbook. USDA-NRCS, Engineering Division. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC. Part 630, Section 4, Chapter 7.

23- Fulop, I. A., J. Jozsa, and T. Kramer, 1998; A neural network application in estimating wind induced shallow lake motion", proceedings of the Hyd. 98, pp: 753-757.

24- Goodwin C., 1996; Watershed analysis and management: The Importance of Geology. Watershed 96 proceeding.

25- Gevrey M., I. Dimopoulos, S. Lek, 2003, Review and comparison of methods to study the contribution of variables in artificial neural network models, Ecological Modelling (160), pp: 249-264.

26- Heath, R.C., 1989; The piedmont groundwater system, in Proceedings, Conference on Ground Water in the Piedmont of the Eastern United States, published by Clemson University, Clemson, SC 29634-0357, (803), pp: 656-4073.

27- Hsu, K. L., Gupta, H. V., and Sorooshian, S. 1995, Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process." Water Resour. Res., 31(10), pp: 2517-2531.

28- Masters, T. 1993; Practical neural network recipes in C 1 1. Academic Press, San Diego, CA.

29- Minns, A. W. and Hall, M. J., 1996; Artificial neural networks as rainfall-runoff models, Hydrological science Journal , 41(3), pp: 399-417.

30- Ranjithan, J., W. Eheart and J. H. Garrett, Jr. 1995; Application of neural network in groundwater remediation under conditions of uncertainty" New Uncertainty Concepts in Hydrology and Water Resources, Cambridge University Press, pp: 133-140.

31- Singh, Vijay P., D. A. Woolhiser, 2002; Mathematical modeling of watershed hydrology, Journal of Hydrologic Engineering, 7(4), pp: 270-292.

32- Setiono, R., W. K. Leow, and J. M. Zurada, 2002; Extraction of rules from artificial neural networks for nonlinear regression, IEEE Transactions on Neural Networks, 13(3), pp: 564-577.

منابع مورد استفاده

- ۱- احمدی، حسن و سادات فیض نیا. ۱۳۷۸؛ سازندهای دوره کوتاه‌تر (مبانی نظری و کاربردی آن در منابع طبیعی). انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۵۵۷ صفحه.
- ۲- سازمان زمین‌شناسی کشور. ۱۳۶۱؛ زمین‌شناسی چهار گوش تکاب - صائین قلعه. گزارش شماره ۵۰.
- ۳- سازمان تحقیقات زمین‌شناسی و معدنی کشور. ۱۳۵۸؛ پژوهش زمین‌شناسی چهار گوش کیوتر آهنگ.
- ۴- سازمان زمین‌شناسی کشور. ۱۹۶۹؛ زمین‌شناسی چهار گوش زنجان.
- ۵- سازمان زمین‌شناسی کشور. ۱۳۵۵؛ زمین‌شناسی چهار گوش بندر انزلی.
- ۶- سازمان زمین‌شناسی کشور. ۱۳۶۴؛ زمین‌شناسی چهار گوش سنندج.
- ۷- سازمان زمین‌شناسی کشور. ۱۳۵۶؛ زمین‌شناسی چهار گوش میانه.
- ۸- شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان - معاونت مطالعات پایه منابع آب. ۱۳۷۹؛ گزارش تلفیق مطالعات منابع آب حوزه آبریز سفیدرود و شرق و غرب گیلان. جلد اول (آمار و اطلاعات و بررسی مقدماتی آن - ضمیمه های ۱-۲ و ۳-۱).
- ۹- شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان - معاونت مطالعات پایه منابع آب. ۱۳۸۰؛ گزارش تلفیق مطالعات منابع آب حوزه آبریز سفیدرود و شرق و غرب گیلان. جلد دوم (بررسی‌ها و مشخصات عمومی).
- ۱۰- شریفی، فرود، شبنم صفارپور، سید علی ایوبزاده و جعفر وکیلپور. ۱۳۸۳؛ بررسی عوامل مؤثر در تعیین آستانه شروع رواناب در مناطق خشک و نیمه خشک کشور به کمک استفاده از شبیه‌سازی و داده‌های بارش - رواناب، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۷ شماره ۱: ص ۴۳-۳۳.
- ۱۱- عبدالهی معمارزاده، سید حمید رضا. ۱۳۷۸؛ مطالعه تأثیر عوامل اقلیمی (بارش) و زمین‌شناسی (لیتولوژی) در برآورد دبی حداکثر لحظه‌ای در منطقه البرز مرکزی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.
- ۱۲- فیض نیا، سادات. ۱۳۷۸؛ پتانسیل رسوب زائی سازندها. جزوه درسی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.
- ۱۳- مهندسین مشاور فرانسوی سوگره. ۱۹۷۲؛ طرح حفاظت خاک و مبارزه با فرسایش در سد حوزه سد سفیدرود. گزارش هیدرولوژی.
- ۱۴- منهای، محمد باقر. ۱۳۷۷؛ مبانی شبکه‌های عصبی (هوش محاسباتی). مرکز نشر پروفیسور حسایی، تهران، جلد اول، ۵۰۲ صفحه.
- ۱۵- مؤسسه تحقیقات خاک و آب. ۱۳۷۳؛ مطالعات خاکشناسی و طبقه‌بندی اجمالی منطقه گرماب استان زنجان. نشریه فنی شماره ۹۱۶.
- ۱۶- مهدوی، محمد. ۱۳۷۸؛ هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه تهران، جلد دوم.
- 17- Abrahart, R. J. and See, L., 2000; Comparing neural network and autoregressive moving average techniques for the provision of continuous river flow forecasts in two contrasting catchments, Hydrological Processes, (14), pp: 2157-2172.
- 18- Babovic, Valadan, and Ventzi Hirstov Bojkov, 2001; Runoff Modelling with genetic programming and artificial neural networks, D2K Technical Report D2K TR 0401-1. pp: 1-131.
- 19- Conrads, P. A. and E. A. Roehl. 1999; Comparing physics-based and neural network mo simulating salinity, temperature,