

## کاربرد هوش مصنوعی در شبیه‌سازی توزیع مکانی چگالی برف در مناطق نیمه خشک (مطالعه موردی: سرشاخه‌های دشت یزد - اردکان)

علی فتح‌زاده<sup>۱</sup>، استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه اردکان، ایران  
سمانه قرایی‌منش، دانشجوی کارشناس ارشد آبخیزداری، دانشگاه یزد، ایران

### چکیده

مناطق خشک و نیمه‌خشک همواره با بحران آب مواجه بوده‌اند، به همین دلیل ذخایر هرچند اندک برفی در سرشاخه‌های کوهستانی این مناطق، نقش شایان توجهی در تغذیه و تعادل هیدرولوژیکی مناطق مذکور ایفا می‌کنند. چگالی برف از جمله پارامترهایی است که به عنوان پارامتر مبدل عمق برف به آب معادل برف، اهمیت فراوانی دارد. در این مقاله، کارایی یکی از روش‌های هوش مصنوعی در شبیه‌سازی پراکنش مکانی چگالی برف در یکی از سرشاخه‌های دشت یزد - اردکان ارزیابی شده است. به همین منظور، ابتدا داده‌های چگالی برف با استفاده از نمونه‌بردار مدل مونت - رز در ۲۱۶ نقطه از منطقه سخوید یزد برداشت گردید. سپس با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و در محیط جغرافیایی ساگا ۳۲ پارامتر ژئومرفومتری، به عنوان داده‌های ورودی استخراج شد. الگوریتم مورد استفاده در هوش مصنوعی، شبکه عصبی مصنوعی بوده که جهت دستیابی بهینه به آن، مدل‌ها و توابع متفاوت با آرایش نورون‌های مختلفی بررسی گردیدند. بهترین شبکه به صورت ۱-۹-۳۲ و حاوی مدل پرسپترون چند لایه و با الگوریتم پس انتشار خطا و تابع فعالیت سیگموئید و خروجی خطی بود. نتایج پژوهش نشان داد که میزان ضریب همبستگی داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده ۸۶ درصد و مجذور میانگین مربع خطا برابر ۵/۱ است. بدین ترتیب استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی به خوبی توانسته است توزیع مکانی چگالی برف را برآورد نماید.

کلمات کلیدی: چگالی برف، نقشه‌برداری رقومی، میان‌یابی، شبکه عصبی مصنوعی، مناطق نیمه‌خشک.

### مقدمه

بخش عظیمی از ایران، شامل مناطق خشک و نیمه خشک است به گونه‌ای که تمامی این مناطق کم و بیش با بحران آب مواجهند. در همین مناطق و در حوضه‌های آبخیز کوهستانی، بخشی از بارش‌های سالانه به صورت برف نازل می‌شود. طبق برآوردهای موجود، حدود یک‌سوم آب مورد نیاز برای کشاورزی در جهان از ذوب برف‌های باریده شده در زمستان تأمین می‌شود. علاوه بر کشاورزی، برف در تأمین آب مورد نیاز برای شرب نیز نقش بسیار مهمی را ایفا می‌نماید. این مسأله در سال‌هایی که خشکسالی در منطقه حکم فرماست اهمیت دو چندانی می‌یابد. بدیهی است رشد جمعیت در بسیاری از شهرها نیز تابعی از میزان دسترسی به منابع آب است (استفان، ۱۹۸۱) و در مناطق کوهستانی ایران، بخش قابل توجهی از بارش به صورت برف است که منبع مهم جریان رودخانه‌ای محسوب می‌گردد.

ذخایر برفی حوضه‌های کوهستانی از منابع مهم و قابل اطمینان کشور است که شناخت دقیق کمیت این منابع، به لحاظ ارزش روزافزون آب شیرین و هم به واسطه بهره‌برداری بهینه از منابع آب ضروری است (حجام و شرعی‌پور، ۱۳۸۲). برآورد دقیق رواناب حاصل از برف، نیاز به توزیع مکانی ذخایر برفی دارد اما دستیابی به توزیع مکانی چگالی برف باید از راه اطلاعات مشاهده‌ای و در مقیاس فشرده صورت گیرد (کلین<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۸) که با توجه به محدودیت‌های عملی در جمع‌آوری اطلاعات، دشوار و گاهی غیرممکن است (الدر<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۹۱). بنابراین استفاده از روش‌هایی که بتوانند عمق و چگالی برف را در مناطق فاقد آمار، برآورد نمایند، ضروری است. الگو و ساختار تغییرات مکانی عمق برف از الزام‌های پهنه‌بندی برف به شمار می‌آید (الدر و همکاران، ۱۹۹۸). در مطالعات صورت گرفته، کمتر به چگالی برف اشاره شده است؛ بنابراین با توجه به پیچیدگی برآورد چگالی و مشکلات موجود برای اندازه‌گیری و ناکافی بودن ایستگاه‌های برف‌سنجی در مناطق مرتفع، استفاده از

---

1- Steppuhn

2- Cline

3- Elder

روش‌های غیرمستقیم و استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی همچون شبکه عصبی مصنوعی توصیه می‌شود.

در همین راستا، بالک و الدر<sup>۱</sup> (۲۰۰۰)، توانستند صحت و درستی تخمین‌های عمق برف را با اجرای روش‌های کوکریجینگ و آنالیز رگرسیون درختی بهبود بخشند. مدل رگرسیون درختی در ارتباط با جزءبندی بازگشتی دوتایی است، که به وسیله آن داده‌ها به دو نیمه متوالی تبدیل می‌شوند و زیرمجموعه‌ها به طور هم‌جنس و زیاد شونده، قرار می‌گیرند.

بررسی تأثیرات عوامل ژئومرفومتری بر توزیع چگالی برف نیز مسأله‌ای است که از چشم پژوهشگران دور نمانده است. مارچند و کلینگ‌ویت<sup>۲</sup> (۲۰۰۱) برای برآورد عمق برف از روش معادله خطی و غیرخطی از عوامل توپوگرافی شامل ارتفاع، جهت شیب، زاویه شیب و شکل انحنای سطح زمین در سطوح نزدیک به ۳۶ کیلومتر مربع، استفاده کردند. آن‌ها در سطوحی غیرجنگلی توانستند مقدار ۱۵/۶ درصد از تغییرات مربوط به مشاهدات عمق برف را با ترکیب خطی، و حداکثر ۲۰/۱ درصد از تغییرات یاد شده را با ترکیب غیر خطی از عوامل توپوگرافی مدل نمایند.

همچنین تِدسکو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۴) در پژوهش خود از شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد آب معادل برف و عمق برف از طریق تصاویر مایکروویو با سنسور ویژه (SSM/I)<sup>۴</sup> استفاده نمودند و نتایج آن را با الگوریتم SDP، چانگ و الگوریتم مبتنی بر HUD مقایسه کردند. نتایج حاصل از ضریب تبیین و ضرایب رگرسیون در این پژوهش نشان دادند که روش‌های شبکه عصبی مصنوعی مبنای بهتر از نتایج الگوریتم‌های ذکر شده است.

---

1- Balk and Elder  
 2- Marchand and Killingtveit  
 3- Tedesco  
 4- Special Sensor Microwave Imager

اما گروه مهندسی ارتش آمریکا (۱۹۵۶) در تحقیقات انجام شده خود دریافتند که ضخامت برف با ارتفاع زمین، رابطه خطی دارد. این در حالی است که اریکسون و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که رابطه‌ای معکوس بین ارتفاع و ضخامت برف وجود دارد.

در همین راستا، وفاخواه و همکاران (۱۳۸۷) به کاربرد زمین‌آمار در برآورد عمق و چگالی برف در حوضه آبخیز اورازان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که واریانس تصادف نمونه‌ها، در رابطه با عمق برف، کم بوده و برآورد مناسبی از عمق برف را نشان می‌دهد. برآورد مقادیر عمق و چگالی برف با تحلیل واریوگرام به دست آمد، سپس به روش کریجینگ معمولی انجام گرفت. پژوهش آن‌ها نشان داد که روش زمین-آمار با تحلیل واریوگرام به روش کریجینگ برای عمق برف و چگالی برف مناسب است.

کازاما و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهش خود به توزیع مکانی و زمانی آب معادل برف، عمق و چگالی برف با یک روش ترکیبی تکنولوژی سنجش از راه دور و روش درجه روز، در یک منطقه مطالعاتی با ۳۷۰۰۰۰ کیلومتر مربع مساحت، در ژاپن پرداختند. مزایای این مدل شبیه‌سازی، سادگی آن و در دسترس بودن پارامترهای درجه روز است، که می‌تواند به صورت پی در پی با اشاره به نقشه منطقه برف ایجاد شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ارزیابی کند. این شبیه‌سازی برای برآورد آب معادل برف، بسیار خوب کار می‌کند و به جدا کردن مناطق با پوشش برفی سبک و سنگین کمک می‌کند. مدل توسعه یافته در این مطالعه، پتانسیل لازم برای کمک به فعالیت‌های مدیریت آب و فرایندهای تصمیم‌گیری را دارد که با توجه به آن سازگاری‌های لازم را برای آب و هوای آینده تغییر دهد.

همچنین طبری و همکاران (۱۳۸۷) در پژوهش خود به مقایسه سه روش کریجینگ معمولی همراه با مدل‌سازی روند به وسیله رگرسیون خطی چند متغیره، کریجینگ

معمولی همراه با مدل‌سازی روند به وسیله تابع تشخیص و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد آب معادل برف در زیر حوضه صمصامی پرداختند. سپس با در نظر گرفتن مقادیر ضخامت برف و میانگین وزنی چگالی برف منطقه مورد مطالعه، آب معادل آن را محاسبه نمودند و با مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی، مقایسه کردند. نتیجه این تحقیق نشان داد که شبکه عصبی با مدل پرسپترون چند لایه و تابع فعالیت سیگموئید و قانون یادگیری مرحله‌ای و آرایش ۱-۴-۷، بهترین روش برآورد آب معادل برف برای منطقه مورد مطالعه است.

طبری و همکاران (۱۳۸۸) در پژوهش خود در برآورد توزیع مکانی آب، معادل برف و عمق برف در سراب کارون مؤثرترین پارامترها را به ترتیب ارتفاع زمین، شاخص بادپناهی، جهت شیب‌های شمالی - جنوبی معرفی نموده‌اند. در زمینه استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی با تعداد نرون‌های متفاوت در لایه مخفی، می‌توان به پژوهش تقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) اشاره کرد که در آن از پیش‌بینی پارامتر CEC خاک استفاده شده است.

هدف از این تحقیق، بررسی کارایی روش شبکه عصبی مصنوعی در برآورد چگالی برف و همچنین تعیین مهم‌ترین پارامترها جهت برآورد چگالی برف است که در این کار، تمام ۳۲ پارامتر نام برده شده، به صورت سلول به سلول و با قدرت تفکیک ۲۰ متر در ۲۰ متر در حوضه انجام پذیرفته که این از مزایای این تحقیق محسوب می‌شود.

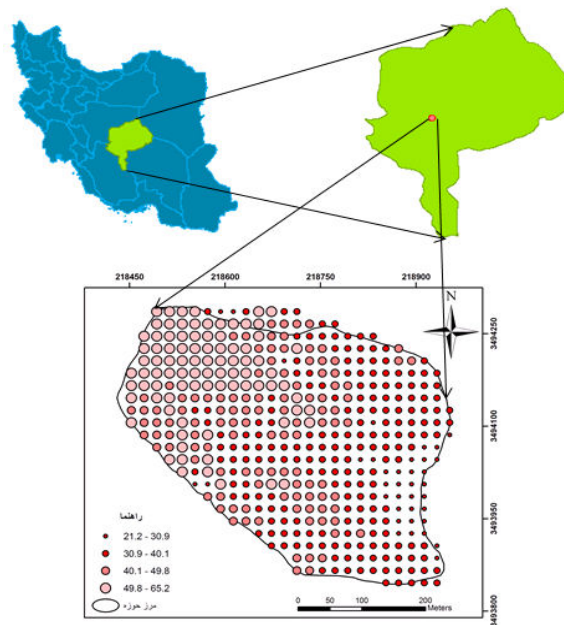
## داده‌ها و روش‌ها

### موقعیت جغرافیایی محدوده

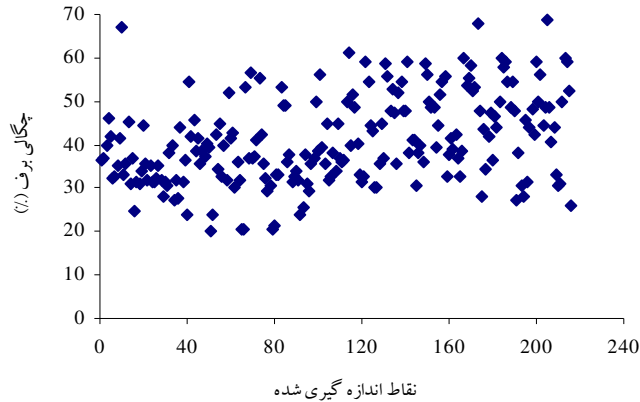
حوضه آبخیز سخوید در شرق شهرستان تفت و در استان یزد واقع شده است و از نظر تقسیم‌بندی کل حوضه‌های آبخیز کشور به عنوان زیرحوضه‌ای از حوضه آبخیز سانچ محسوب می‌گردد. این حوضه در محدوده، ۵۴ درجه و ۰۲ دقیقه و ۱۴ ثانیه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۳۲ دقیقه و ۵۱ ثانیه عرض شمالی واقع شده و یکی از برف-

گیرترین مناطق استان یزد بوده که بارش برف در آن، سهم بسیار عمده‌ای در رژیم هیدرولوژیکی منطقه پایین‌دست آن ایفا می‌کند. شکل (۱) موقعیت مکانی و پراکنش نقاط چگالی این محدوده را نشان می‌دهد.

مساحت این حوضه، ۱۶ هکتار و محیط آن ۱/۶۲ کیلومتر است. این حوضه در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و به دلیل این‌که در بسیاری از موارد در مناطق خشک و نیمه‌خشک، آب قابل دسترس برای مصارف کشاورزی، از مناطق کوهستانی تأمین می‌شود، آگاهی از ذخیره‌یاد شده، از اساسی‌ترین نیازهای مدیران منابع آب است. بخش عمده این حوضه کوهستانی بوده و میانگین ارتفاع منطقه ۲۹۰۰ متر است. پس از تعیین زمان مناسب برای برف‌سنجی، به صورت عملیات میدانی ضخامت برف در ۲۱۶ نقطه مطابق شکل (۲) نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها در شبکه‌ای با فواصل تقریباً ۳۰ متری اندازه‌گیری شد و سپس به منظور دستیابی به توزیع مکانی چگالی برف، با روش شبکه عصبی مصنوعی در نقاط مختلف برآورد گردید.



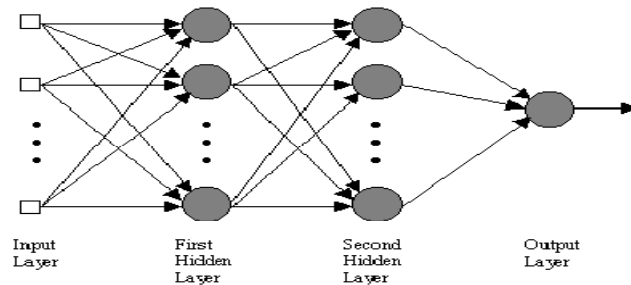
شکل ۱. موقعیت مکانی محدوده مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده.



شکل ۲. مقادیر چگالی برف در نقاط اندازه‌گیری شده.

### اجرای شبکه عصبی مصنوعی

روش‌های داده‌کاوی، روش‌های مدل کردن رابطه نهفته در داده‌ها هستند که به صورت خودکار به دسته‌بندی مجموعه داده‌ها (معمولاً مجموعه‌های بزرگ) و کشف ارتباط نهفته در بین آن‌ها، به منظور قابل فهم شدن و در نتیجه سودمند شدن آن‌ها، می‌پردازد (هند<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۱). داده‌کاوی را می‌توان با روش‌های مختلف یادگیری همچون شبکه عصبی به دست آورد. در حالت کلی در شبکه‌های عصبی سه نوع لایه نرونی وجود دارد که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. ساختار کلی شبکه عصبی مصنوعی.

شبکه عصبی مصنوعی به عنوان یک ابزار ریاضی مناسب برای برآورد چگالی برف با استفاده از اطلاعات توپوگرافی و اقلیمی و هیدرولوژی و مورفومتری مرتبط با ضخامت برف انتخاب شده است. پارامترهای انتخاب شده، جهت ورودی شبکه عصبی مصنوعی شامل ۳۲ پارامتر هستند که در جدول (۱) مشخص شده است.

### استخراج پارامترهای زمین‌نما (ژئومورفومتری)

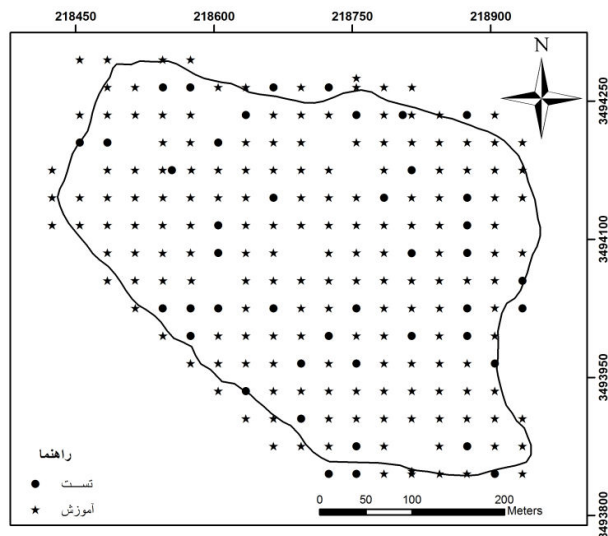
در تحقیق حاضر، از مدل رقومی ارتفاع (با قدرت تفکیک ۲۰ متر) استفاده شده است. بعد از آماده کردن مدل رقومی ارتفاع، از آن برای استخراج اطلاعات کمکی استفاده می‌شود. پارامترهای زمین‌نما به صورت زیر است؛ در محیط سامانه جغرافیایی ساگا (SAGA) که از امکانات متعلق به نرم‌افزار قدرتمند سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) است، محاسبه و استخراج شدند.

داده‌های به کار رفته در شبکه عصبی، به دو بخش آموزش با ۸۰ درصد و تست با ۲۰ درصد تقسیم و سپس وارد نرم‌افزار Neurosolution 5 شدند. تعداد داده‌های موجود برای آموزش ۱۷۴ عدد و داده‌های اعتبارسنجی ۴۳ عدد از مجموع ۲۱۶ داده برداشت شده است. در شکل (۴) موقعیت قرارگیری نقاط آموزشی و تست نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای به کار رفته در شبکه عصبی

سایه‌اندازی	انحنا	طول جغرافیایی
جهات جغرافیایی	نیمرخ طولی انحنا	عرض جغرافیایی
شاخص همگرایی	نیمرخ عرضی انحنا	شیب
مساحت- حوضه آبخیز	توازن سلولی	طول شیب
مساحت تعدیل شده حوضه آبخیز	شاخص رطوبتی	موقعیت میانی شیب
اثر باد	درجه‌بندی آبراهه‌ها موجود	فاکتور طول شیب
شاخص همواری دره	قدرت آبراهه	شیب حوضه آبخیز
شاخص همواری قله	تراکم جریان	ارتفاع شیب
ارتفاع بالای شبکه زهکشی	جهت جریان	ارتفاع از سطح دریا
سطح اساس شبکه زهکشی	اتصال جریان	ارتفاع نرمال شده
	عمق چاله‌ها	ارتفاع استاندارد شده





شکل ۴. موقعیت قرارگیری نقاط آموزشی و تست.

شبکه عصبی دارای توابع فعالیّت مختلفی است که تابع فعالیّت مورد استفاده در لایه پنهان این شبکه، سیگموئید است و خروجی شبکه به صورت خطی است که از طریق سعی و خطا انتخاب می‌شود. برای ارزیابی کارایی مدهای مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی با توپولوژی متفاوت و همچنین برای تعیین تکرارهای مطلوب، از آماره‌های ضریب همبستگی (r: Correlation Coefficient)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE: Root Mean Square Error)، میانگین خطا (ME: Mean Error) و میانگین خطای مطلق (MAE: Mean Absolute Error) استفاده شده است.

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum [\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)]^2} \quad (2)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum (X_i - Y_i) \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (۴)$$

که در فرمول (۱ تا ۳)  $X_i$  و  $Y_i$ ،  $i$  امین داده واقعی یا برآورد شده و  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  متوسط داده‌های  $X_i$  و  $Y_i$  هستند و در رابطه (۲)،  $Z(X_i)$  مقدار مشاهده شده در نقطه  $i$  ام،  $\hat{Z}(X_i)$  مقدار برآورد شده در نقطه  $i$  ام،  $n$  تعداد نمونه‌های ارزیابی  $X_i$  و  $Y_i$  است.

## نتایج و بحث

### نتایج شبکه عصبی مصنوعی

جهت دستیابی به بهترین شبکه عصبی مصنوعی، مدل‌ها و توابع متفاوت با آرایش نوروهای مختلفی آزمایش شدند. برای ارزیابی و مقایسه عملکرد شبکه‌ها با یکدیگر نیز از داده‌های آزمون استفاده شد. مقادیر خروجی از هر شبکه با مقادیر مشاهده‌ای متناظر آن مقایسه شد و جزئیات آن بر اساس ضریب همبستگی، میانگین خطای مطلق و میانگین مربع خطا به دست آمد. بهترین شبکه با مدل پرسپترون چند لایه (Multilayer Perceptron: MLP) و با الگوریتم پس انتشار خطا به عنوان شبکه‌ای ساده و پرکاربرد و تابع فعالیت سیگموئید انتخاب شده و خروجی آن خطی است.

همچنین تدمسکو و همکاران (۲۰۰۴) در پژوهش خود، از شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد آب معادل برف و عمق برف استفاده نمودند و نتایج حاصل از ضرایب رگرسیون نشان داد که روشهای شبکه عصبی مصنوعی مینا بهتر از نتایج دیگر است. در حالی که اریکسون و همکاران (۲۰۰۵) به منظور مدل کردن تأثیر عوامل توپوگرافی روی عمق برف از روش معادله همبستگی خطی استفاده نمودند. مطالعات آنها نشان داد که اگر علاوه بر استفاده از ترکیب خطی عوامل توپوگرافی، از آثار متقابل آنها نیز به صورت ترکیب‌های غیرخطی استفاده شود، توانایی بیشتری در مدل کردن روند موجود در مشاهدات، ایجاد می‌شود.

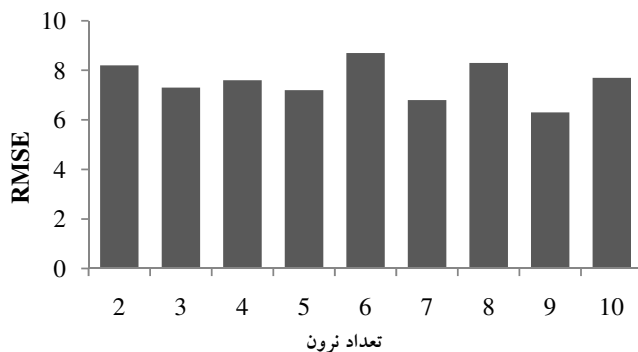
در این تحقیق مقادیر ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطا و میانگین خطای مطلق مطابق با جدول (۲) است که میزان ضریب همبستگی ۸۶ درصد

محاسبه شده است و این نشان‌دهنده کارایی بالای شبکه عصبی در محاسبه چگالی برف است.

جدول ۲- ملاک‌های آماری برای سنجش کارایی شبکه

ملاک آماری	r(%)	RMSE(cm)	ME(cm)	MAE(cm)
چگالی برف	۸۶	۵/۱	۱/۵	۳/۹

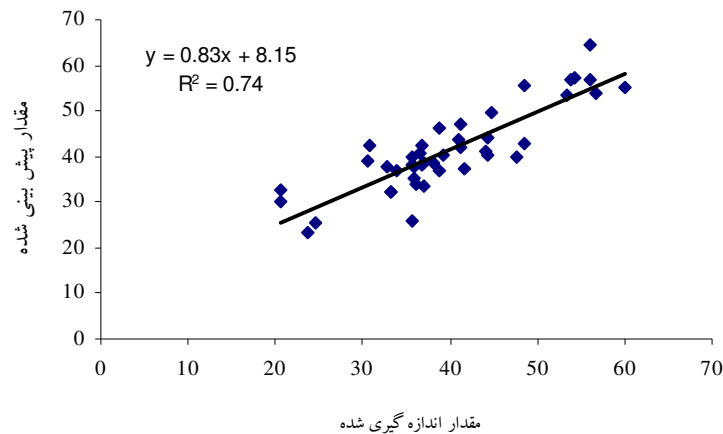
برای پیش‌بینی چگالی برف، ورودی‌های شبکه که شامل ۳۰ پارامتر نام برده است مقدار r را برای تعداد نرون لایه‌های مخفی از ۲ تا ۱۰ مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، بیشترین میزان I و کمترین میزان RMSE مربوط به ۹ لایه مخفی است که به ترتیب برابر با ۷۶ درصد و ۶/۳ سانتی‌متر است.



شکل ۵. مقادیر r برای تعداد نرون‌های متفاوت لایه مخفی در پیش‌بینی پارامتر چگالی برف.

بهترین آرایش برای لایه پنهان ۱-۹-۳۲ است که نشان می‌دهد تعداد داده‌های ورودی ۳۲، تعداد نرون‌های لایه‌های مخفی ۹ و تعداد داده‌های خروجی‌ها یکی است. روش انجام شده مشابه پژوهش تقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) است که از ۲ تا ۲۰ نرون را برای پیش‌بینی پارامتر CEC آزمایش نمودند و بهترین پاسخی که به دست آوردند ۸ نرون بوده است.

تعداد تکرار (Epoch) ۱۰۰۰ است و ضریب گشتاور (Momentum Coefficient) برای بهترین شبکه ۰/۷ است که در شکل (۶) نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده داده‌های تست در شبکه عصبی را نشان می‌دهد.



شکل ۶. نمودار پراکنش برای مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده داده‌های تست آزمون در شبکه عصبی.

### تعیین مؤثرترین عوامل بر چگالی برف

با توجه به نتایج آنالیز حساسیت انجام شده با استفاده از شبکه عصبی می‌توان دریافت که مهم‌ترین عامل به دست آمده متعلق به انحنا (Curvature) است. بنابراین از میان پارامترهای نام برده شده مؤثرترین پارامترها عبارتند از انحنا، نیمرخ طولی انحنا، نیمرخ عرضی انحنا، اثر باد، موقعیت میانی شیب، شاخص همواری قلّه، شاخص همواری درّه، سایه‌اندازی، ارتفاع نرمال شده و شیب که میزان تأثیر هر یک از پارامترها در شکل (۷) نمایش داده شده است. لازم است ذکر شود که به علت تأثیر بسیار کمی که دیگر پارامترها دارد، از نمایش آن‌ها چشم‌پوشی شده است.

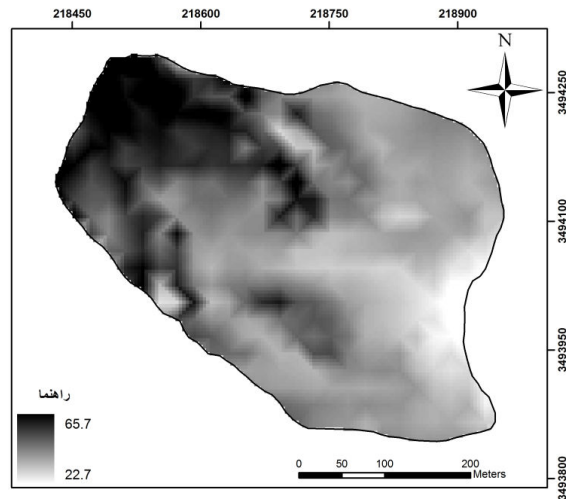
همان‌گونه که آنالیز حساسیت نشان می‌دهد، انحنا مهم‌ترین پارامتر معرفی شده است و بیان‌کننده این موضوع است که هرچه میزان فرورفتگی و انحنا بیشتر باشد میزان برف جمع‌شده در آن منطقه بیشتر است و چگالی برف در آن ناحیه کمتر خواهد بود. همچنین نیمرخ طولی انحنا هرچه بیشتر باشد میزان چگالی برف کمتر خواهد شد اما رابطه چگالی با نیمرخ عرضی انحنا، مستقیم است.



شکل ۷. آنالیز حساسیت در بین ورودی‌ها.

برای مقایسه تحقیق صورت گرفته با دیگر پژوهش‌ها لازم است نظری اجمالی به این پژوهش‌ها و نتایج آن‌ها بیفکنیم. به عنوان نمونه طبری و همکاران (۱۳۸۸) در پژوهش خود که به منظور برآورد توزیع مکانی آب معادل برف و عمق برف در سراب کارون، انجام گرفت، مؤثرترین پارامترها را به ترتیب ارتفاع زمین، شاخص بادپناهی، جهت شیب‌های شمالی- جنوبی معرفی نمودند. همچنین مارچند و کلینگ‌ویت (۲۰۰۱) برای برآورد عمق برف از عوامل توپوگرافی شامل ارتفاع، جهت شیب، زاویه شیب و شکل انحنا سطح زمین استفاده نمودند و مهم‌ترین عوامل مورد استفاده در این مقیاس را شیب و انحنا معرفی کردند. در تحقیق حاضر نیز انحنا از مؤثرترین پارامترهاست و در تکمیل پژوهش‌های قبلی، پروفیل طولی و عرضی انحنا نیز از مؤثرترین داده‌های کمکی معرفی شده‌اند.

با توجه به تمامی داده‌های کمکی مورد بحث در این مقاله، نقشه نهایی زیر در شکل (۸) رسم شده است. نقشه ترسیم شده نشان می‌دهد که بیشترین میزان چگالی برف مربوط به قسمت‌های شمال غربی است که در این مناطق، ارتفاعات کم است و کمترین میزان آن، مربوط به قسمت‌های شرقی منطقه است که ارتفاع زیادی نیز دارند.



شکل ۸. نقشه توزیع مکانی چگالی برف رسم شده با استفاده از تمامی داده‌های کمکی.

### نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روش شبکه عصبی مصنوعی از دقت خوبی برای برآورد چگالی برف برخوردار است؛ به طوری که این مدل توانسته است ۸۶ درصد از تغییرات برف را مدل کند و در نهایت حدود ۱۴ درصد از این تغییرات در منطقه تبیین نگردد که این موضوع، احتمالاً تا اندازه‌ای به پارامترهایی برمی‌گردد که در نظر گرفته نشده‌اند.

همچنین بهترین آرایش برای لایه پنهان ۱-۹-۳۲ است که در واقع نشان می‌دهد از پارامتر ورودی برای برآورد چگالی استفاده شده و نرون‌های لایه‌های مخفی ۹ عدد است.

در تحقیق حاضر، مؤثرترین پارامترها شامل انحنا، نیمرخ طولی انحنا، نیمرخ عرضی انحنا، اثر باد، موقعیت میانی شیب، شاخص همواری قلّه، شاخص همواری درّه، سایه-اندازی، ارتفاع نرمال شده و شیب است و چون در مکان‌هایی که دارای فرورفتگی و انحنا هستند، برف تجمع یافته و از آسیب‌های باد و پراکندگی توسط باد در امان است، می‌توان توجیه نمود که به همین علت این فاکتور، مؤثرتر معرفی شده است.

### منابع

- تقی‌زاده مهرجردی، روح‌الله، شهلا محمودی علی اکبرزاده و هادی رحیمی‌لاکه، (۱۳۹۰)، بررسی روش‌های مختلف برای ایجاد توابع انتقالی خاک‌های بخشی از مناطق مرطوب شمال ایران. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۹۹ - ۱۰۷.
- حجام، سهراب و زهرا شرعی‌پور، (۱۳۸۲)، ذوب برف در حوضه آبریز طالقان. پژوهش‌های جغرافیایی. ۶۲-۴۹، ۴۶.
- معروفی، صفر، حسین طبری حمید، زارع ابیانه و محمدرضا شریفی، (۱۳۸۹)، بررسی تأثیر باد بر توزیع مکانی برف انباشت در یکی از زیرحوضه‌های کارون (مطالعه موردی: زیرحوضه صمصامی). فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی.
- طبری، حسین، صفر معروفی حمید، زارع ابیانه رضا امیری چایجان و محمدرضا شریفی، (۱۳۸۷)، مقایسه روش‌های ترکیبی و شبکه عصبی مصنوعی در تخمین آب معادل برف در زیرحوضه صمصامی. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران.
- Balk, B., & Elder, K. (2000). Combining binary decision tree and geostatistical methods to estimate snow distribution in a mountain watershed. *Water Resources Research*, 36, 13 – 26.
- Cline, D. W., Bales, R. C., & Dozier, J. (1998). Estimating the spatial distribution of snow in mountain basins using remote sensing and energy balance modeling. *Water Resources Research*, 34(5), 1275-1285.

- Erikson, T. A., Williams, M. W., & Winstral, A. (2005). Persistence of topographic controls on the spatial distribution of snow in rugged mountain, Colorado, United States. *Water Resources Research*, 41, 1-17.
- Elder, k., Dozier, J., & Michaelsen, J. (1991). Snow accumulation and distribution in an Alpin Watershed. *Water Resources Research*, 27(7), 1541-1552.
- Elder, K., Rosenthal, R., & Davis, R. E. (1998). Estimating the spatial distribution of snow water equivalent in a mountain watershed. *Hydrology Processes*, 12, 3627 – 3649.
- Kazama, S., Izumi, H., Sarukkalige, P. R., Nasu, T., & Sawamoto, M. (2008). Estimating snow distribution over a large area and its application for water resources. *Hydrological Processes*, 22(13), 2315-2324.
- Marchand, W. D., & Killingtveit, A. (2001). Analyses of the Relation Between Spatial Snow Distribution and Terrain Characteristics. 58<sup>th</sup> Eastern Snow Conference Ottawa, Ontario, Canada.
- Tedesco, M., Pulliainen, J., Takala, M., Hallikainen, M., & Pampaloni, p. (2004). Artificial neural network- based techniques for the retrieval of SWE and snow depth from SSM/I data. *Remote Sens. Environ.* 90, 76 – 85.
- Steppuhn, H. (1981). Snow and Agriculture, In *Handbook of Snow: Principles, Processes, Management and Use*, The Blackburn Press, 776 pages.
- U. S. Army Corps of Engineers. 1956. *Snow Hydrology*, N. Pac. Div.,Portland, Oregon.