



# Analysis and simulation of affecting factors on snow avalanche occurrence using RAMMS model, Velayat Rood in Central Alborz, Alborz Province

#### Majid Kazemzadeh\*\*, Zahra Noori<sup>2</sup> and Mohammad Jahantigh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Range and Watershed Management Department, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup> Graduated Ph.D. in Watershed Science and Engineering, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup> Msc Degree in Soil Chemistry and Fertility, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Iran

Received: 30 July 2022 Accepted: 29 November 2022

# Extended abstract

### Introduction

One of the natural disasters that threaten residential areas and roads in mountainous regions is mountain falls, including rockfalls, avalanches, and landslides. Avalanches carry large amounts of snow, rocks, ice, and debris downstream in mountainous areas. The occurrence of avalanches is a significant natural hazard that results in considerable human and financial losses, making the study of factors influencing avalanches and their simulation crucial for managing this phenomenon.

### Materials and methods

In this study, the factors affecting snow avalanches (both terrestrial and meteorological) were examined using the RAMMS simulation model in the Central Alborz Velayat Rood (Dizin Road), Alborz Province. Topographic and geomorphological factors, such as slope, aspect, curvature, topographic position index (TPI), terrain roughness index (TRI), and topographic wetness index (TWI), were analyzed using a digital elevation model (DEM) with a  $6 \times 6$  cm<sup>2</sup> pixel size obtained by drone. Meteorological factors, including rainfall, temperature, and wind, were also considered. The RAMMS simulation model was then used to estimate avalanche components such as speed, pressure, and height within the study area.

### **Results and discussion**

The results indicated that slope and aspect, as topographic indicators, have a significant impact on snow avalanche formation and occurrence. The largest portion of the region, covering 5.7 hectares (54.6% of the study area), with a northeast aspect and slopes of 60 to 120%, was identified as having the highest avalanche potential. Additionally, the RAMMS simulation model results showed that the average and maximum avalanche speeds in the region were 5.3 m/s and 16 m/s, respectively. The average effective avalanche pressure was 7 kPa, with a maximum of 45 kPa. The estimated avalanche height indicated that the average avalanche height in the runout area (residential areas) was 4.5 meters, with a maximum height of 10 meters, categorizing it as a large avalanche.

### Conclusion

Understanding avalanches and their dynamic characteristics is essential for predicting and controlling this hazardous natural phenomenon. Identifying avalanche types (wet, slab, or powder) can greatly assist experts in managing and proposing control methods. In this study, maps, meteorological data, and geomorphological parameters such as curvature, TPI, TRI, and TWI, along with field observations, were used to identify accumulation areas, track zones, and runout zones. The study identified the key factors influencing avalanche occurrence in the region, including high slopes (60-120%), slope orientation (north and northeast), and climatic factors such as precipitation and temperature. The average avalanche height in the runout area (residential areas) was 4.5 meters, with a maximum of 10 meters. This study indicates a high potential for avalanches and associated damage in the area, underscoring the need for management and control programs to mitigate possible harm.

<sup>\*</sup> Corresponding author: Kazemzadeh@um.ac.ir

Keywords: Avalanche risk, Avalanche components, Climatic factors, Modeling, Snow

Cite this article: Kazemzadeh, M., Noori, Z., Jahantigh, M., 2024. Analysis and simulation of affecting factors on snow avalanche occurrence using RAMMS model, Velayat Rood in Central Alborz, Alborz Province. Watershed Engineering and Management 16(3), 450-468.

© 2024, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0)





# RAMMS تحلیل و شبیه سازی عوامل مؤثر بر وقوع بهمن با استفاده از مدل RAMMS مطالعه موردی: جاده ولایت رود البرز مرکزی، استان البرز

مجيد كاظم زاده"\*، زهرا نورى ً و محمد جهان تيغ ً

<sup>۱</sup> استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیطزیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران <sup>۲</sup> فارغ التحصیل دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران <sup>۳</sup> فارغالتحصیل کارشناسی ارشد شیمی و حاصلخیزی خاک، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۸ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۸

# چکیدہ مبسوط

## مقدمه

یکی از بلایای طبیعی که مناطق مسکونی و محورهای جادهای را در مناطق کوهستانی تهدید می کند، ریزشهای دامنهای شامل ریزش سنگ، وقوع بهمن و لغزش است. بهمن، یک حجم عظیمی از برف، سنگ، یخ و واریزهها را به پاییندست مناطق کوهستانی حمل می کند. وقوع بهمن در مناطق کوهستانی، یکی از مهم ترین مخاطرات طبیعی است که خسارتهای جانی و مالی بسیاری را ایجاد می کند و مطالعه عوامل مؤثر در وقوع بهمن و شبیه سازی آن جهت مدیریت این پدیده از اهمیت زیادی برخوردار است.

# مواد و روشها

در این پژوهش، به تحلیل شاخصهای مؤثر بر وقوع بهمن (شاخصهای زمینی و هواشناسی) و شبیه سازی وقوع بهمن و مؤلفههای آن با استفاده از مدل RAMMS در جاده ولایت رود البرز مرکزی (جاده دیزین)، استان البرز پرداخته شده است. شاخصهای توپوگرافی و ژئومورفولوژیکی ازجمله شیب، جهت، انحنای دامنه (Curvature)، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص ناهمواری زمین (TRI) و شاخص رطوبت توپوگرافی (TVI) با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با اندازه پیکسل ۶ × ۶ سانتی متر مربع با کمک پهباد تهیه شد. از شاخصهای هواشناسی هواشناسی نیز بارش، دما و باد (DEM) با اندازه پیکسل ۶ × ۶ سانتی متر مربع با کمک پهباد تهیه شد. از شاخصهای هواشناسی نیز بارش، دما و باد (DEM) با اندازه پیکسل ۶ × ۶ سانتی متر مربع با کمک پهباد تهیه شد. از شاخصهای هواشناسی نیز بارش، دما و باد مورد بررسی قرار گرفت. سپس، با استفاده از مدل شبیه سازی RAMMS مؤلفههای بهمن ازجمله سرعت، فشار و ارتفاع بهمن در منطقه مورد مرابع با اندازه یهمن در منطقه مورد مرابع ما کمک پهباد تهیه شد. از شاخصهای هواشناسی نیز بارش، دما و باد مورد بررسی قرار گرفت. سپس، با استفاده از مدل شبیه سازی RAMMS مؤلفههای بهمن از جمله سرعت، فشار و ارتفاع مورد بررسی قرار گرفت. سپس، با استفاده از مدل شبیه مازی کا

## نتايج و بحث

نتایج نشان داد که مقدار و جهت شیب و شاخصهای توپوگرافی تأثیر زیادی بر روی شکل گیری و وقوع بهمن داشتند. مهمترین گذرگاه بهمن با مساحت ۵/۷ هکتار و ۵۴/۶ درصد از منطقه موردمطالعه که شامل منطقه تجمع و گذرگاه اصلی با شیب ۶۰ تا ۱۲۰ درصد و جهت شمال شرقی است که بیشترین پتانسیل ایجاد بهمن را دارد. همچنین، نتایج مدل شبیهسازی RAMMS نشان داد که سرعت متوسط و حداکثر سرعت بهمن در منطقه ۵/۳ متر بر ثانیه و ۱۶ متر بر ثانیه

\* مسئول مكاتبات: Kazemzadeh@um.ac.ir

بوده است. متوسط فشار مؤثر بهمن هفت و حداکثر فشار بهمن در منطقه نیز ۴۵ کیلو پاسکال بوده است. برآورد ارتفاع بهمن در منطقه نیز نشان داد که متوسط ارتفاع بهمن در منطقه توقفگاه (مناطق مسکونی) ۴/۵ متر و حداکثر ارتفاع بهمن در منطقه ۱۰ متر است که جز بهمنهای بزرگ طبقهبندی میشود.

## نتيجهگيرى

شناخت بهمن و ویژگیهای دینامیک بهمن، یکی از عوامل بسیار مهم در پیشبینی و کنترل این پدیده طبیعی و خطرناک است. همچنین، شناسایی نوع بهمن (مرطوب، قطعهای و پودری) میتواند کارشناسان را تا حد بسیاری زیادی در مدیریت و پیشنهاد روشهای کنترل آن راهنمایی و کمک کند. در این پژوهش، با استفاده از نقشهها و اطلاعات پایهای و هواشناسی و عاملهای ژئوموروفولوژیکی مانند انحنای دامنه، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص ناهمواری زمین (TRI) و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) بههمراه بازدیدهای میدانی، مناطق تجمع، گذرگاه عبور و توقفگاه بهمن شناسایی شد. سپس، مهمترین شاخصهای مؤثر در ایجاد و وقوع بهمن در منطقه تعیین شد. شیب بالای منطقه بین ۲۰۱–۶۰ درصد و همچنین، جهت دامنه (شمالی و شمال شرقی) و عوامل اقلیمی مانند بارش و دما، مهمترین عوامل وقوع بهمن در منطقه موردمطالعه بوده است. متوسط ارتفاع بهمن در منطقه توقفگاه (مناطق مسکونی)، ۴/۵ متر و حداکثر ارتفاع بهمن در در این منطقه مار دمانه و احرای برنامههای مدیرای بهمن و خسارت در منطقه مین ۱۲۰–۶۰ درصد

واژههای کلیدی: برف، خطر بهمن، عوامل اقلیمی، مدلسازی، مؤلفههای بهمن

#### مقدمه

یکی از بلایای طبیعی که مناطق مسکونی و محورهای جادهای را در مناطق کوهستانی تهدید میکند، ریزشهای دامنهای شامل ریزش سنگ، وقوع بهمن و لغزش است. بهمن یک حجم عظیمی از برف، سنگ، یخ و واریزهها را به پاییندست مناطق کوهستانی حمل میکند. وقوع بهمن میتواند ناشی از فعالیتهای طبیعی مانند بارشهای سنگین برف یا بارش باران روی برف، زلزله، تغییرات دما و یا فعالیتهای انسانی مانند اسکی و انفجارها و فعالیتهای ساختوساز باشد.

وقوع بهمن پودری همراه با فشار هوای ایجاد شده در جلوی بهمن منجر به ایجاد تخریب گستردهای در هر آنچه که در مسیر بهمن قرار دارد می شود ( Singh (et al., 2018). شکل گیری بهمن بستگی به شاخص های مختلفی از جمله عامل های استاتیک و دینامیکی دارد (Schweizer and Bruce Jamieson, 2003).

عاملهای استاتیک شامل ویژگیهای زمین که در وقوع بهمن مهم هستند و این ویژگیها از نظر ماهیت ثابت و به سختی با زمان تغییر میکنند که شامل شیب زمین، ارتفاع، جهت، انحنای دامنه، پوشش زمین، خاک و غیره هستند. عاملهای دینامیک نیز شامل

ویژگیهای پوشش برف مانند ضخامت لایههای برف، پایداری، چگالی، محتوی آب برف، اندازه ذرات و عوامل هواشناسی شامل دمای هوا، بارش، سرعت و جهت باد و غیره است. شکل گیری و وقوع بهمن ترکیبی از شاخصهای مختلف است (Singh et al., 2018).

بسته به شرایط آبوهوایی تغییرات مهمی در برف (نوع بلورها و مقاومت لایهها) در نتیجه نیروهای مختلف مکانیکی (خزش و نشست) و ترمودینامیکی (انتقال جرم) رخ میدهد. این امر موجب تغییرات قابل ملاحظه در ویژگیهای مکانیکی برف (چسبندگی و مقاومت برشی) میشود. همچنین، پوشش برف بهدلیل داشتن ساختمان لایهای، در معرض لغزشهای داخلی بین خود لایهها (بر اثر نیروی ثقل) است.

این امر موجب ایجاد تغییر شکل برشی در ساختمان برف و وقوع بهمن میشود (Kumar et al., 2017). (Kumar et al., 2017، گزارش کردند که تجمع برف جدید از عمق ۳۰ تا ۵۰ سانتیمتر دلیل اصلی وقوع بهمن در منطقه ۵۰ تا ۵۰ سوئیس بوده است. Hirashima et al., و Wilbour and Conway (1999) و (2008)، در مطالعات خود نشان دادند که بیشترین دلیل وقوع بهمن، ریزش برف سنگین و افزایش تجمع

برف است. در مناطقی که بهمن رخ میدهد، سه منطقه بر اساس مسیر بهمن تعیین میشود که عبارت است از منطقه شروع<sup>۱</sup> یا منطقه آزادشدن<sup>۲</sup> جایی است که برف ناپایدار شده و شروع به حرکت میکند و شیب بیشتر از ۳۰ درجه دارد. گذرگاه<sup>۲</sup>مسیر شیبداری است که منطقه شروع را از منطقه توقفگاه یا منطقه تجمع بهمن جدا میکند.

در این منطقه بهمن کاملاً توسعهیافته و به حداکثر سرعت خود رسیده است. این منطقه دارای شیب کاهشی و حداقل آن ۱۵ درجه و بهطور معمول دارای شیب ۲۰ تا ۲۵ درجه است (Maggioni, 2005). گذرگاههایی که طول آنها از منطقه شروع تا محل توقف بیش از ۲۰۰ متر باشد، میتوانند بهمنهای خطرناکی را ایجاد نمایند. منطقه توقف<sup>†</sup> یا تجمع بهمن، در این منطقه سرعت بهمن کاهش مییابد و متوقف میشود.

درصورتی که در این منطقه تأسیسات، منازل مسکونی و یا مزارع وجود داشته باشد، بهمن آنها را تخریب می کند. وقوع بهمن در شیبهای بین ۵۵–۲۸ درجه رخ می دهد و مناطقی با سطح مقعر بیشتر در معرض ایجاد بهمن هستند (Akay, 2021).

در سالهای اخیر، فراوانی وقوع مخاطرات هواشناسی بهدلیل اثرات شدید تغییرات اقلیمی افزایش یافته است. وقوع بهمن یکی از مخربترین بلایای طبیعی ناشی از تغییر اقلیم است که بهطور قابل توجهی زندگی بشر را تهدید می کند (Akay, 2021). در خصوص وقوع بهمن و پیامدهای آن مطالعات مختلفی Kurt, funçel, 1990) است (Koçyigit et al., 2016

همچنین، مدلسازی وقوع بهمن توسط محققان بسیاری در سطح جهان توسط نرمافزارهای مختلفی Sampl, ،Zwinger et al., 2003) SamosAT<sup>۵</sup> ازجمله and Granig, 2008 ،Zwinger and 2004 ،(Fischer, 2013 ،Granig et al., 2009 ،Oberndorfer Lushchik et ) LPY<sup>9</sup> مدل جریان متلاطم سه عاملی Eglit and Yakubenko, 2014 ،al., 1978

<sup>1</sup> Starting zone

<sup>3</sup> Track

christen et al., 2002) Aval 1D هدل، (al., 2020) Christen et ) RAMMS<sup>V</sup> و مدل (Oller et al., 2010) (Gądek et al., 2017 ؛Blahut et al., 2017 ;al., 2010) انجام شده است.

مدل RAMMS، یک مدل پیوستگی عددی است که توسط مرکز پژوهش برف و بهمن سوئیس ارائه شده است. این نرمافزار قادر به شبیهسازی جریان بهمن، جریان واریزهای و همچنین، روشهای کنترل بهمن است که امروزه توسط محققان بسیاری مورداستفاده قرار می گیرد. (2013) Turchaninova، به بررسی کاربرد قرار می گیرد. (2013) Turchaninova، به بررسی کاربرد مدلهای تجربی و دینامیکی مانند مدل RAMMS در بررسی خطر وقوع بهمن در روسیه پرداخت. نتایج نشان داد، این مدل کارایی مناسبی در مدل سازی بهمن دارد و نتایج می تواند برای توسعه روشهای کنترل بهمن در آینده مورداستفاده قرار گیرد.

در کوههای آلپ با استفاده از مدل Christen et al., (2010) در کوههای آلپ با استفاده از مدل RAMMS پرداختند. نتایج نشان داد، این مدل قادر به تولید نقشههای بزرگمقیاس خطر بهمن است. (2011) (Bühler et al., (2011) مدل به ارزیابی حساسیت مدل RAMMS در شبیهسازی وقوع بهمن با در نظر گرفتن کیفیت و دقت مکانی مدل رقومی ارتفاع در سوئیس پرداختند. نتایج نشان داد که مهمی در مدل سازی مسیر جریان، فاصله حمل و میزان (2012) به بررسی تأثیر انحنای دامنه در مدل سازی بهمن با استفاده از مدل RAMMS بهمنظور ارزیابی ریسک بهمن در سوئیس پرداختند و آنها نشان دادند که انحنای دامنه تأثیر زیادی بر روی دینامیک جریان و توزیع فشار بهمن در امتداد دامنه دارد.

Akay, (2021) بنشان داد که شیب، ارتفاع، شاخص Akay, (2021) ناهمواری زمین و انحنای دامنه مهم ترین شاخصها در Choubin et al., (2019) و شبیه سازی و شبیه سازی و قوع بهمن با استفاده از مدل AHP و RAMMS با

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Release zone

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Runout zone

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Snow Avalanche Modeling and Simulation – Advanced Technology

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Lushchik-Paveliev-Yakubenko

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Rapid Mass Movements Simulation

کمک GIS در رشته کوههای هیمالیا پرداختند. نتایج نشان داد که AHP یک روش مفید برای پهنهبندی مناطق در معرض خطر مناطق کوهستانی است و مدل RAMMS نیز ابزاری مفید برای پیش بینی وقوع مخاطرات طبیعی ازجمله بهمن است. Gilany and Gilany and در جوزه AMMS در پاکستان با استفاده از مدل RAMMS پرداختند. نتایج نشان داد که این مدل قادر به شناسایی مناطق در معرض خطر وقوع بهمن است.

ازجمله مزیت این مدل سهولت کاربرد آن و نیاز به ورودیهای کمتر و همچنین دقت مناسب مدل است. این مدل مبتنی بر کامپیوتر، برای شبیهسازی بهمن بسیار قابل اعتماد است و برای بسیاری از بهمنهای رخداده در جهان کالیبره و صحت سنجی شده است (Gilany and Iqbal, 2019).

در راستای ایمنسازی و کاهش اثرات ناشی از بهمن، باید در ابتدا نقاط دارای پتانسیل بهمن و شرایط ایجاد بهمن در منطقه مطالعه و شناسایی شوند و پس از ارزیابی این نقاط، اولویتبندی این نقاط بهمنظور اجرای اقدامات مدیریتی و ایمنسازی صورت پذیرد. در منطقه موردمطالعه به گزارش ساکنان محلی و بازدیدهای نویسندگان، بهمنهای متعددی (آخرین بهمن نیز در اسفندماه سال ۱۳۹۹) رخ دادهاست، که ضرورت انجام پژوهش را به اثبات می ساند.

به عبارتی این پژوهش به دنبال مطالعه و مدلسازی بهمن وقوع یافته زمستان سال ۱۳۹۹ جاده دیزین در روستای ولایت رود است. از آنجایی که ویژگی استاتیک نقش مهمی در شکل گیری وقوع بهمن دارد، در این

پژوهش ابتدا به بررسی ویژگیهای استاتیک منطقه (شیب، جهت، ارتفاع، انحنا و غیره) و تاثیر آنها در وقوع بهمن پرداخته میشود و مناطق شروع، حمل و توقفگاه بهمن مشخص میشود و سپس وقوع بهمن و ویژگیهای آن در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل RAMMS شبیه سازی میشود.

# مواد و روشها

منطقه موردمطالعه: محدوده مطالعاتی در موقعیت جغرافیایی ۲۱<sup>°</sup> ۵۱<sup>°</sup> تا ۲۲<sup>°</sup> ۵۱<sup>°</sup> طول شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸<sup>°</sup> ۵<sup>°</sup> تا ۳۲<sup>°</sup> ۵<sup>°</sup> شمالی با مساحت ۲۰/۴۴ هکتار واقع شده است. محدوده مطالعاتی بخشی از منطقه ولایت رود (جاده دیزین) البرز مرکزی، از توابع بخش آسارای شهرستان کرج استان البرز محسوب می شود. حداکثر و حداقل ارتفاع این منطقه از سطح دریا در ۲۳۶۵ و ۲۵۷۸ متر است.

شیب منطقه در محدوده ۱۰ تا ۵۰ درجه متغیر است. میانگین بارش سالانه در منطقه موردمطالعه ۲۴۰ میلیمتر و متوسط دمای هوای سالانه ۵/۴ درجه سانتی گراد است. اقلیم منطقه موردمطالعه بر اساس روشهای دومارتن و آمبرژه بهترتیب خیلی مرطوب فراسرد یا ارتفاعی و اقلیم ارتفاعات است. راههای ارتباطی منطقه شامل جاده کوهستانی کرج-چالوس و سپس، جاده فلایترود-دیزین است که به روستای ولایت رود و منطقه موردمطالعه منتهی میشوند. نقشه ۱، موقعیت محدوده موردمطالعه را نشان میدهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه Fig. 1. Geographical location of the study area

روش پژوهش: شکل گیری و وقوع بهمن به ویژگیهای توپوگرافی، سنگشناسی و هواشناسی منطقه بستگی دارد. محققان از این متغیرها و عاملها برای شناسایی دینامیک مخاطرات طبیعی و برآورد نقشههای حساسیت استفاده میکنند. شاخصهای هواشناسی از جمله بارش، دما و باد، از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر روی وقوع بهمن هستند. عوامل اقلیمی نظیر بارش، وزش باد و تغییرات دما میتواند موجب تغییرات در روی برفهای قدیمی و بارش باران منجر به ناپایداری توده برف و ایجاد بهمن میشود. افزایش عمق برف پشته از عوامل ناپایداری آن و افزایش احتمال وقوع بهمن است.

تأثیر دما در ایجاد و وقوع بهمن از طریق ذوب برف و ایجاد لایههای ناپایدار در توده برف و شکست توده برف است. تأثیر دما در تغییرات برف پشته را می توان با ویژگیهای هواشناسی از اطلاعات آماری نزدیک ترین ایستگاههای هواشناسی شامل کرچ، شهرستانک، نساء و شمشک در دوره آماری همگن سال ۲۰–۶۹ تا ۹۲–۹۶ استفاده شد و همچنین جهت مطالعه بهمن وقوع یافته زمستان ۱۳۹۹ از آمار ایستگاه دیزین که دارای آمار روزانه طی سالهای ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ بود، استفاده شد. بعد از انتخاب دوره زمانی همگن و تکمیل نواقص آماری، مؤلفههای مختلف هواشناسی شامل مقدار بارندگی متوسط ماهانه و سالانه و اقلیم منطقه بررسی شد.

همچنین، برای مشخص کردن و تحلیل ویژگیهای برف مانند عمق پشته، ذوب برف و غیره و در کنار آن مقدار بارش ۷۲ ساعته از آمار نزدیک ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه موردمطالعه یعنی ایستگاه شمشک استفاده شد.

با استفاده از نقشههای مطالعات زمینشناسی البرز مرکزی ویژگیهای سنگشناسی منطقه موردمطالعه تعیین شد و همچنین، برای بررسی پوشش گیاهی و

<sup>1</sup> Topographic position index (TPI)

<sup>4</sup> Flow Direction

خاک منطقه تعداد ۱۰ نقطه نمونه برداری شده و سپس درصد مساحت هریک از خصوصیات خاک (بافت، سنگریزه، عمق) و پوشش گیاهی منطقه مشخص شد. لازم به ذکر است وجود درختان و درختچهها با سطح تاج پوشش زیاد در منطقه رهاسازی بهمن میتواند وقوع بهمن را کاهش دهد ولی وجود علفزارها و گیاهان علفی کوچک تاثیر چندانی بر وقوع بهمن ندارند (Feistl, 2015).

**ویژگیهای توپوگرافی**: شیب یکی از شاخصهای اساسی و مهم در ایجاد و شکلگیری بهمن است. بهطورکلی دامنههای بهمنخیز و یا گذرگاه مناطقی که شیب آن بین ۶۰ تا ۱۲۰ درصد است خطرناک بوده و ایجاد بهمن مینماید (Maggioni, 2005). شاخصهای توپوگرافی ازجمله شیب، جهت، انحنای دامنه، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)<sup>1</sup>، شاخص زبری توپوگرافیک طریق نقشههای توپوگرافی بهدست میآیند از مهم ترین شاخصهای تأثیرگذار بر روی شکلگیری و وقوع بهمن Mosavi et al., 2020 ;Kumar et al., 2020 Yariyan

در این پژوهش، شاخصهای توپوگرافی با استفاده از نرمافزار ArcGIS با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با اندازه پیکسل ۶×۶ سانتیمتر مربعی تولید شد. لازم به ذکر است، در پژوهش حاضر برداشت اطلاعات ارتفاعی منطقه برای تولید مدل رقومی ارتفاع با دقت بالا از پهپاد استفاده شده است. قبل از تولید نقشهها، MEM با دستور Sinks در نرمافزار MEM مورد پیش پردازش قرار گرفت و سپس نقشههای شیب، جهت، جهت جریان<sup>†</sup>و جریان تجمعی<sup>۵</sup> محاسبه شد. با استفاده از لایههای تولید شده، نقشههای انحنای دامنه<sup>5</sup>، شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص ناهمواری زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی و طول شیب<sup>۷</sup> تولید که روابط آنها در ادامه ارائه شده است.

سپس با استفاده از نقشههای تولید شده و روش طبقهبندی نظارت شده و تلفیق و روی هم گذاری

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Topographic ruggedness index (TRI)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Topographic Wetness index (TWI)

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Flow Accumulation

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Curvature

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> length and slop (LS)

لايه هاى مختلف توليد شده، نقشه مناطق شروع، گذرگاه و توقفگاه بهمن در منطقه تعیین شد و سپس با بازدید میدانی در عرصه مورد صحت سنجی قرار گرفت.

شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI): یکی از شاخص های مورفومتری، شاخص زبری توپوگرافی است و آن عبارت است از تفاوت بین ارزش هر پیکسل در مدل رقومی ارتفاع با متوسط ارتفاع در فیلتر و همسایگیهای مجاور آن پیکسل (رابطه ۱). با توجه به اعداد بەدستآمدە مناطق با TPI منفى نشاندھندە توپوگرافی کمارتفاع (کم) (تقعرها و گودالها) است درحالی که TPI مثبت نشاندهنده توپوگرافی زیاد (محدب و یا ستیغها) است (Samadi et al., 2016) .(Mokram and Darvishi, 2017

 $TPI_i = Z_0 - \overline{Z}$ (1) $\overline{Z}$  که در آن،  $Z_0$  ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، ارتفاع میانگین پیکسلهای اطراف نقطه موردنظر است. شاخص ناهمواری زمین (TRI): شاخص ناهمواری زمین در واقع بهنوعی اختلاف ارتفاع یک پیکسل با هشت پیکسل اطراف خود است (رابطه ۲). این شاخص توپوگرافیک نشاندهنده میزان ناهمگنی زمین و تقعر و تحدب دامنهها است (Kern et al., 2017). مناطق دارای ناهمواری زیاد مقادیر بالایی از TRI دارند.

$$TRI = \gamma \sqrt{\sum_{p=1}^{6} (X_{ij} - X_{00})^2}$$
 (٢)

که در آن، P تعداد پیکسل های اطراف، X<sub>00</sub> ارتفاع پیکسل موردنظر و <sub>ال</sub>ارتفاع پیکسلهای اطراف پیکسل موردنظر است.

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI): شاخص رطوبت توپوگرافی ابزاری مفید و رایج برای توصیف شرایط رطوبتی در مقیاس حوضه است و بنابراین، مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک در حوضهها را با فرض برابر بودن شیب آب زیرزمینی با شیب سطح زمین، تقریب میزند. هرچه مقادیر مثبت این شاخص بزرگتر باشد نشاندهنده بیشتر بودن رطوبت است. این شاخص از رابطه (۳) محاسبه می شود ( ۲) 2016). lpha شيب بالادست دامنه و eta زاويه شيب در هر ييكسل است.

(٣)

 $TWI = ln\left(\frac{\alpha}{tan\beta}\right)$ مدلسازی بهمن با استفاده از مدل RAMMS: مدل عددی-دینامیکی RAMMS<sup>۱</sup> یک مدل پیوستگی عددی سه بعدی برای شبیهسازی برف و بهمن است که توسط مرکز پژوهش برف و بهمن سوئیس ارائه شده است ( Gruber et al., 2007). این نرمافزار قادر به شبیه سازی جریان بهمن، جریان واریزهای و همچنین روشهای کنترل بهمن است. بررسی مؤلفههای بهمن ازجمله سرعت بهمن، فشار بهمن و قدرت تخريب بهمن، مسافت طى شده توسط بهمن و ارتفاع جريان بهمن در قالب دینامیک بهمن در منطقه موردمطالعه توسط مدل شبیهسازی RAMMS انجام شد.

این مدل با استفاده از مدل پیوستگی وولمی-سالم و حل معادلات سهبعدی اجزای محدود به شبیهسازی سرعت، فشار، ارتفاع بهمن و حتى اقدامات كنترل بهمن و تأثیر آن در کاهش خطر بهمن می پردازد. لازم به ذکر است تمام معادلات و شبیهسازی برای بهمن مرطوب انجام شده است و این مقادیر برای بهمنهای پودری بسیار بیشتر و بزرگتر خواهد بود.

دادههای ورودی به مدل RAMMS: تصاویر زمین مرجع شده و عکسهای هوایی نیز در این مدل استفاده می شود. عوامل ورودی مدل RAMMS شامل شرایط ابتدایی، ضرایب اصطکاک، ویژگیهای پوشش برف و عوامل محاسباتی است.

شرایط ابتدایی شامل ویژگیهای بهمن در منطقه شروع است و یک فرایند نیمهخودکار برای تعریف سطوح مستعد لغزش بهمن به کار می رود. برای استخراج مناطق مستعد لغزش از ورودي DEM استفاده مي شود. در این مدل عمق گسیختگی hr که به عنوان ورودی در مدل لازم است از رابطه (۴) محاسبه می شود.  $h_r = hr. f(\omega)$ (۴)

که در آن، hr حداکثر ارتفاع برف سه روزه یا ۷۲ ساعته در دوره بازگشت معین و  $f(\omega)$  نیز ضریب شیب است. در این مدل با استفاده رابطه (۵) از زاویه شیب Salm et ) مقدار ضریب شیب محاسبه می شود ( $\omega$ ) .(al., 1990

$$f(\omega) = \frac{0.291}{\sin\omega - 0.202 \cos\omega} \tag{(b)}$$

<sup>1</sup> Rapid Mass Movement Simulation (RAMMS)

چگالی بهمن آزاد شده نیز یکی از عاملهای مهم مدل است، زیرا هم در محاسبه چگالی و هم در تعیین فشار بهمن استفاده می شود. چگالی بهمن (p) معمولاً بین ۱۵۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر است. برای بهمنهایی که چگالی آنها در دسترس نیست، Rafaat می شود (Salm et al., 1990 ¿Zarei, 2009).

ویژگیهای پوشش برف شامل ارتفاع برف قابل تخریب، طول گذرگاه بهمن، چگالی بهمن، مقاومت لایه برف بهعنوان ورودی به مدل RAMMS وارد میشوند و براساس آن جرم بهمن محاسبه میشود. این مدل براساس DEM وارد شده و تعیین منطقه شروع گذرگاههای بهمن را تعیین میکند. هرچه این منطقه کوچکتر باشد شبیهسازی سریعتر انجام میشود. فرایب اصطکاک μ (ضریب اصطکاک خشک) و £

ضریب اصطکاک متلاطم یا ویسکوز با ویژگیهای

فیزیکی ارتباط دارند. ضریب اصطکاک خشک نمایانگر نسبت بین تنش عمودی و تنش برشی است که توسط بهمن روی سطح لغزش وارد میشود.

ضریب اصطکاک متلاطم بیانگر اصطکاکی است که با گردبادهای متلاطم و زبری و ناهمواری سطح زمین به وجود میآید. این ضرایب در مدل RAMMS بر اساس حجم بهمن آزاد شده، دوره بازگشت، ارتفاع و درجه آبراههای بودن گذرگاه تعیین و به مدل وارد میشوند.

پس از واردکردن تمام ورودیهای مدل، مدل اجرا شده و نتیجه محاسبات عددی مدل، ارتفاع جریان بهمن، سرعت بهمن، حجم بهمن و فشار آن ارائه شده است. مدل این نتایج را میتواند بر روی نقشه دو یا سهبعدی نشان دهد. دادههای ورودی مدل RAMMS در جدول ۱، ارائه شده است.

ندول ۱- دادههای ورودی مدل RAMMS در منطقه مورد مطالعه	÷
Table 1. RAMMS model input data in the study area	

Row	Inputs	Features		
1	Digital Elevation Model (DEM)	6×6 cm <sup>2</sup> pixel size		
2	Characteristics and height of the starting area	Polygon area of snow accumulation		
3	$(\mu)$ Coefficient of friction	0.22		
4	*(£) Turbulent friction coefficient snow	2000		
5	Avalanche return period	100-200 years		
6	Avalanche volume classification	Large		
7	Avalanche density	300 Kg/m <sup>3</sup>		
8	Parameters of forest areas	-		
9	Affected area	Polygon of area		

\*: ضرایب اصطکاک و اصطکاک متلاطم از جدول راهنمای مدل RAMMS ویرایش سال ۲۰۱۷ بددست آمده است (2017) (RAMMS Manual, 2017)

صحت سنجی مطالعات و مدلسازی بهمن: اطلاعات ورودی مدل اعم از مرز محدوده مطالعاتی، تعیین مناطق مؤثر در بهمن (منطقه رهاسازی برف، گذرگاه، تجمع) و تعیین وضعیت ژئومورفولوژی منطقه موردمطالعه بهوسیله چندین بار بازدید از محدوده موردنظر صحتسنجی و مطابقت داده شد. همچنین، از طریق اندازه گیری مستقیم، بهمن موجود در منطقه تجمع (ناشی از بهمن رخداده در محدوده موردمطالعه، زمستان ۱۳۹۹) حجم بهمن نیز اندازه گیری شد و با مشاهده تصاویر اخذ شده از وقوع بهمن و آثار بهمن و خسارتهای ناشی از آن نتایج مدلسازی بهمن صحت سنجی شد.

## نتايج و بحث

تحلیل مهم ترین عوامل مؤثر بر وقوع بهمن در منطقه: نتایج هواشناسی نشان داد که بارش در منطقه موردمطالعه در یک دوره متوسط از ماه آبان تا بهمن به صورت برف بوده و ارتفاع برف از ۳۳ سانتیمتر در آبان به ۱۱۵ سانتی متر در فروردین افزایش یافته است. نتایج برآورد عمق برف پشته برای ماههای آبان تا فروردین (شکل ۲) با دوره بازگشتهای مختلف نیز نشان داد که بیشترین عمق برف پشته در محدوده موردمطالعه در ماههای اسفند و اوایل فروردین رخ میدهد. بر اساس برآورد، بهدلیل دمای پایین در ماههای آبان، آذر، دی و بهمن ذوب برف نزدیک به صغر بودهاست. در ماههای

بهمن و اسفند بهدلیل افزایش تجمع برف پشته و

Hirashima et al., ،Conway and Wilbour (1999) د دارد. (2008) و (2008) (2018) همخوانی دارد.



شکل ۲- برآورد عمق پشته برف از آبان تا فروردین ماه Fig. 2. Estimated snowpack depth from November to April

هوا و ضریب برفی منطقه در ماههای اسفند و فروردین بخشی از بارشها بهصورت باران بوده است که این خود منجر به ناپایداری برف پشته و مستعد شدن شرایط ناپایداری برف در منطقه و اتفاقافتادن بهمن شده است. ناپایداری برف در منطقه و اتفاقافتادن بهمن شده است. (2016) Graveline and Germain (2016) روزهای وقوع بهمن در کانادا با ریزش شدید برف یا بارش باران روی برف و در دمای بیش از صفر درجه سانتی گراد در ارتباط بوده است. بارش باران نیز موجب مرطوب شدن برف پشته و افزایش دانسیته آن می شود. رطوبت حاصل از آب باران ساختمان برف را تغییر داده و موجب کاهش مقاومت آن و ایجاد بهمن می گردد. شکل ۳، بارش روزانه ششماهه دوم سال ۱۳۹۹ (سال وقوع بهمن) را بر اساس آمار ایستگاه دیزین (نزدیک ترین ایستگاه به منطقه موردمطالعه) را نشان می دهد. بیشترین بارندگی در منطقه مربوط به اسفند، آذر و سپس بهمن ماه بوده است. همچنین بررسی ها نشان داد که با توجه به دمای



شکل ۳– نمودار بارش روزانه در منطقه مورد مطالعه Fig. 3. Daily precipitation graph in the study area

بدین منظور، دمای متوسط روزانه در ایستگاه دیزین تهیه شد که تغییرات آن در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به ارتفاع منطقه و نمودار مذکور نشان میدهد که تغییرات دما بهطور عمده زیر صفر درجه سانتیگراد است. همچنین از آبانماه تا پایان دیماه روند دما نزولی است، اما اسفندماه تا فروردین دما افزایش مییابد.

همان طور که در شکل مشخص است افزایش دما در اواخر ماههای اسفند تا فروردین تأثیر به سزایی در ذوب برف و ایجاد بارش به صورت باران و ایجاد ناپایداری در توده برف می تواند داشته باشد. (2004) Rooming نشان داد که افزایش دما از ۲۰° – تا ۲۰ ۲۱ مهم ترین عامل

ایجاد بهمن مرطوب در مونتانا بوده است. بهطورکلی میتوان گفت بارش برف و تغییرات دما از دلایل اصلی وقوع بهمن در کنار سایر عوامل تأثیرگذار بر این پدیده است که توسط مطالعات بسیاری گزارش شده است Joshi 'Peitzsch et al., 2012 'Wastl et al., 2011) Hao .(Gauthier et al., 2017 and Srivastava, 2014 باه در بررسی عوامل مؤثر بر وقوع بهمن در غرب کوهستان تیانشان در چین نشان دادند که ریزش برف جدید و افزایش دما از مهم ترین عوامل در ایجاد بهمن هستند.



شکل ۴- تغییرات دمای متوسط روزانه در ایستگاه دیزین از مهر ماه لغایت فروردین ماه سال ۱۳۹۹ Fig. 4. Average daily temperature changes at Dizin station from October to April 2019

بررسی آمار باد در منطقه موردمطالعه نشان داد، جهت باد غالب در منطقه غربی و شمال غربی است که با توجه به نقشه جهت دامنه منطقه موردمطالعه، بیشترین بخش منطقه دارای دامنههای شمالی و شمال شرقی است که با توجه به جهت بادهای غالب، بادروبی برف پشته در دامنههای غربی و جنوبی صورت می گیرد و تجمع آن در دامنههای شرقی و شمالی اتفاق می افتد. Meister در امامه ای شرقی و شمالی اتفاق می افتد. تأثیر مهمی در برفروبی و تجمع برف در دامنهها و ایجاد بهمن دارد.

تحلیل ویژگیهای خاک و پوشش گیاهی: نتایج بررسی تیپهای پوشش گیاهی منطقه موردمطالعه در جدول ۲، نشان داد که از کل ۱۰/۴۴ هکتار عرصه

مطالعاتی ۵۱/۷ درصد آن تیپ غالب I که شامل گراسهای چندساله، جارو و علف چای و ۱۵/۳ درصد آن تیپ غالب II و ۲۳/۴ درصد نیز تیپ پوشش گیاهی غالب III بودهاست.

با توجه به بررسی پوشش گیاهی و تیپبندی پوشش، منطقه موردمطالعه از نظر پوشش گیاهی دارای وضعیت مناسبی است بهطوری که بهطور متوسط درصد تاج پوشش گیاهی در منطقه ۵۰ درصد است. اما با توجه به تیپبندی پوشش گیاهی نتایج نشان داد که حدود ۷۰ درصد از پوشش گیاهی از نوع گونههای گراسهای چندساله است که همانطور پیش تر گفته شد پوشش گیاهی گراسها به دلیل ارتفاع زیاد و ساقه کم مقاومتی که دارند با اولین برف روی زمین خوابیده

و یک سطح صاف و صیقلی از ساقههای خود ایجاد میکنند. این سطح مانند یک سطح لغزنده عمل میکند و همین امر حرکت برف و ایجاد بهمن را تشدید میکند. نتایج بررسی ویژگیهای خاک نیز نشان داد که ۷۶/۷ درصد از مساحت خاک منطقه موردمطالعه دارای بافت لوم شنی بوده است. همچنین نتایج بررسی سنگریزه سطحی نیز نشان داد که ۶۰ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی که شامل بالادست عرصه مطالعاتی بود

بیشترین مقدار سنگریزه با میزان ۴۰ تا ۵۰ درصد را دارا بود. بخش عمده خاک منطقه دارای خاک با بافت سبک و عمق کم بوده که نشاندهنده ظرفیت کم خاک در نفوذ دادن آب بوده و به سرعت اشباع خواهد شد با اشباع شدن خاک لایه آبدار بین پروفیل برف و خاک تشکیل شده که میتواند باعث ایجاد بهمنهای مرطوب شود (Ceaglio, 2017).

Table 2. Percentage values of vegetation cover in each of the vegetation types								
Code	Type name	Area (ha)	Percentage					
Ι	Perennial Grassess-Scariola Orientalis-Hypericum Perforatum	5.4	51.7					
Π	Astragalus spp Perennial Grasses -Ferula Ovina	1.6	15.3					
Ш	Perennial Grassess-Ferula Ovina-Hypericum Perforatum	2.44	23.4					
Others	Residential areas	1	9.6					

**جدول ۲**– مقادیر درصد تاج پوشش گیاهی در هر یک از تیپهای پوشش گیاهی

تحلیل شاخصهای توپوگرافی: شاخصهای توپوگرافی: شاخصهای توپوگرافی منطقه موردمطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است. بررسی شیب منطقه مورد مطالعه نشان داد گد بیشترین مساحت منطقه (با ۶۹/۸ درصد) که شامل گذرگاه اصلی و منطقه تجمع است دارای شیب بین ۶۰ تا ۲۱ درصد بوده که مهمترین محدوده شیب در شکل گیری و وقوع بهمن است. جهت دامنه نقش اساسی در جذب حرارت و در نتیجه تغییرات در پوشش برف و ایجاد بهمن دارد. دامنههای شمالی و شمال شرقی به جذب کرده و بنابراین در ذوب برف زیاد مؤثر نیست، اما در صورتی که ضخامت برف در این دامنهها قابل ملاحظه باشد و سایر شرایط نیز مساعد شود، بهمن دار ملاط نیز مساعد شود، بهمن ایجاد میشود ( Mott et al., 2008).

از نظر جهت دامنه، بیشترین بخش منطقه دارای جهت شمال شرقی و شمالی است. همچنین با توجه به نقشه تلفیق جهت و شیب، بیشترین بخش منطقه که شامل منطقه تجمع و گذرگاه اصلی است دارای شیب شامل منطقه تجمع و گذرگاه اصلی است دارای شیب دهنده بیشترین پتانسیل جهت ایجاد بهمن است. این بخش با مساحت ۵/۲ هکتار، ۵۴/۶ درصد از منطقه مورد مطالعه را شامل میشود. سپس دامنههای شمالی با

شیب ۶۰ تا ۱۲۰ درصد با مساحت ۱/۳ هکتار و ۱۲/۵ درصد از کل منطقه، از نظر ایجاد بهمن خطرناک هستند. در مجموع ۶۷ درصد منطقه دارای پتانسیل بالایی از نظر ایجاد بهمن و دارای خطر وقوع بهمن است. نقشه انحنای دامنه (Curvature) مناطق محدب و مقعر دامنه را نشان می دهد و در مناطق مقعر تجمع

برف صورت می گیرد. انحنای دامنه برای ارزیابی ریسک بهمن بسیاری مهم است، زیرا بهطور مستقیم بر روی تنش برشی و حرکت توده برف تاثیر می گذارد ( Mott Kumar and Srivastava, 2018 :et al., 2008).

مناطق با شاخص TPI منفی نشاندهنده توپوگرافی کمارتفاع (کم) (تقعرها و گودالها) و محل تجمع برف است درحالی که TPI مثبت نشاندهنده توپوگرافی زیاد (محدب و یا ستیغها) است. نتایج نشان داد که ۷۸ درصد منطقه موردمطالعه دارای TPI منفی و محل تجمع برف است. شاخص TRI نیز نشاندهنده میزان ناهمگنی زمین است. مناطق دارای ناهمواری زیاد مقادیر بالایی از TRI دارند و شاخص رطوبت توپوگرافی است و هرچه مقادیر مثبت این شاخص بزرگتر باشد نشاندهنده بیشتر بودن رطوبت است. مناطق آبراههها و مناطقی که دارای تقعر هستند دارای رطوبت بیشتری

نسبت به ستیغها هستند و ۴۵ درصد منطقه دارای Choubin مثبت و بیشتر از یک است که با نتایج TWI متبت و بیشتر از یک است که با نتایج Mosavi et al., (2020) همخوانی دارد.

مطالعات بخش زمینشناسی و ژئومورفولوژی منطقه مطالعاتی نشان داد که از لحاظ چینهشناسی بیش از ۹۰ درصد مساحت منطقه از سازند کرج عضو میانی با مشخصات توفهای سبز ضخیم لایه، گدازه، شیل، آذرآواریها، کنگلومرا، سنگ آهک تشکیل شده است. از لحاظ روشن بودن جنس سنگها در منطقه به نظر می رسد تاثیر سازند زمینشناسی در بهمن به آن اندازه که سازندهای با رنگ تیره ایجاد می کند، نیست. از لحاظ وضعیت تکتونیک منطقه، وجود گسلها و درزه ها و چین خوردگیهای (ناودیس و تاقدیسها) موجود در منطقه، می تواند عامل مهمی در وقوع بهمن در منطقه باشد.

به علت لرزش مدوام اطراف گسلها در طول سال این امکان وجود دارد که وقوع بهمن در منطقه تحتتأثیر گسلهای موجود در منطقه قرار گیرد. همچنین، در منطقه مورد مطالعاتی تعداد کافی از رخنمون سنگی و گیلوئی وجود دارد که خود آنها نیز میتوانند در ناپایداری پشته برف و وقوع بهمن مؤثر باشد. به لحاظ ژئومورفولوژی، مهمترین رخساره در

منطقه مورد مطالعه، دامنه منظم با برونزدگی کمتر از ۲۵ درصد است.

با توجه به نقشهها و شاخصهای بهدستآمده از بخش قبل زونبندی منطقه موردمطالعه از نظر بهمن انجام شد. شکل (۶) مناطق بهمنخیز و گذرگاه اصلی و منطقه تجمع و توقف را در منطقه موردمطالعه نشان میدهد. تشخیص منطقه تجمع برف بهدلیل اینکه محل شروع و حرکت و سقوط بهمن است، بسیار با اهمیت است. این منطقه با مساحت ۵/۵ هکتار، ۵۲/۷ درصد از منطقه موردمطالعه را شامل میشود.

گذرگاههایی که طول آنها از نقطه شروع تا توقفگاه بیش از ۲۰۰ متر باشد، می توانند بسیار خطرناک باشند، بنابراین اندازه گیری این طول می توانند اطلاعاتی را در خصوص خطرناک بودن بهمن ارائه دهد. منطقه گذرگاه در منطقه موردمطالعه با طول ۲۷۶ متر است که نشان دهنده پتانسیل زیاد این گذرگاه در ایجاد بهمنهای بزرگ و خطرناک است. منطقه توقف در منطقه موردمطالعه دارای مساحت ۷/۰ هکتار و ۶/۷ درصد از سطح منطقه موردمطالعه را به خود اختصاص داده است. سپس نتایج حاصل از زون بندی منطقه با بازدید میدانی صحت سنجی شد (شکل ۶).



شکل ۵- شاخصهای توپوگرافی منطقه مورد مطالعه Fig. 5. Topographical factors of the studied area





Cathering area Crossing

Stay Residential areas

N...8.5.98

0 0.04 0.08

0.16

533000 شکل ۶-موقعیت مناطق تجمع برف، گذرگاه و توقفگاه بهمن در منطقه موردمطالعه Fig. 6. The location of snow accumulation areas, track and runout areas in the study area

مدلسازی بهمن با مدل RAMMS: بررسی مؤلفههای بهمن ازجمله سرعت بهمن، فشار بهمن و قدرت تخریب بهمن، مسافت طی شده توسط بهمن و ارتفاع جریان بهمن در قالب دینامیک بهمن و توسط مدل شبیهسازی RAMMS انجام گردید و نتایج آنها در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که سرعت متوسط بهمن در منطقه ۳/۵ متر بر ثانیه و حداکثر سرعت بهمن ۱۶ متر بر ثانیه در منطقه بوده است. شکل ۷ سرعت و حداکثر ارتفاع بهمن قابل وقوع در منطقه براساس دوره بازگشت ۳۰۰ ساله را نشان میدهد.

نتایج نشان داد که سرعت متوسط بهمن از مقدار ۱۸۰ متر بر ثانیه در بخشهای بالادست و منطقه شروع تا بیش از ۱۶ متر بر ثانیه در پاییندست منطقه افزایش مییابد. ارتفاع جریان بهمن در واقع تصویر قائم ارتفاع برف در منطقه است. ارتفاع بهمن در حین حرکت بهمن به سمت پایین به تدریج افزوده میشود و در منطقه توقفگاه، به حداکثر مقدار خود میرسد.

ارتفاع بهمن محاسبه شده در این بخش برای بهمن مرطوب است و برای بهمنهای پودری که دارای سرعت فوق العاده و قدرت تخریب و ویرانی زیادی هستند، این مقادیر بیشتر خواهد بود. نتایج نشان داد که ارتفاع متوسط بهمن در منطقه توقفگاه (مناطق مسکونی) ۴/۵

متر است و دارای حجم ۳۸۷۱۸ مترمکعب است. همچنین حداکثر ارتفاع بهمن که در منطقه توقفگاه (مناطق مسکونی) رخ میدهد ۱۰ متر است و دارای حجم ۸۶۰۴۰ مترمکعب است (جدول ۳).

فشار مؤثر بهمن تابعی از چگالی بهمن ضرب در مربع سرعت است که بهصورت نیرو در واحد سطح عمود بر جهت جریان تعبیر می شود. فشار حادث شده در اثر سقوط بهمن در بحرانی ترین حالت به عنوان حداکثر فشار وارده مطرح می شود.

شکل ۸ فشار متوسط بهمن و حداکثر فشار مؤثر بهمن در منطقه موردمطالعه را نشان میدهد. نتایج نشان داد که فشار متوسط بهمن در منطقه از ۰/۱ تا ۴۵ کیلوپاسکال در منطقه افزایش مییابد و دارای فشار متوسط ۲ کیلوپاسکال است.

حداکثر فشار بهمن در منطقه نیز از ۱ تا ۴۵ کیلوپاسکال افزایش مییابد و در پاییندست گذرگاه عبور بهمن به حداکثر مقدار خود میرسد. مطالعات بسیاری کارایی مدل RAMMS را در شبیه سازی بهمن و مؤلفه های آن نشان دادهاند (RAMOS را در شبیه سازی بهمن wilbur et al., 2010 ; 1013 ; 2013 Schmidtner et al., 2018 ; 2018 data et al., 2018 Schwa et al., 2018.

Table 3. Avalanche velocity values in the study area						
Factors	٤	ψ	μ	Mean	Max	
Velocity(m/s)				5.3	16	
Pressure (KPa)	2000	33	0.2	7	45	
Height (m)				4.5	10	

جدول ۳ – مقادیر سرعت بهمن در منطقه مورد مطالعه



**شکل ۷** – سرعت (a) و حداکثر ارتفاع (b) بهمن در منطقه مورد مطالعه Fig. 7. Velocity (a) and maximum height (b) of avalanche in the studied area



شکل ۸ – حداکثر فشار (a) و فشار متوسط (b) بهمن در منطقه مورد مطالعه Fig. 8. Maximum pressure (a) and average pressure (b) of avalanche in the studied area

## نتيجهگيرى

شناخت بهمن و ویژگیهای دینامیک بهمن یکی از عوامل بسیار مهم در پیش بینی و کنترل این پدیده طبیعی و خطرناک است. همچنین شناسایی نوع بهمن (مرطوب، قطعهای و پودری) میتواند کارشناسان را تا حد بسیاری زیادی در مدیریت و پیشنهاد روشهای کنترل آن راهنمایی و کمک کند. اولین اقدام در مطالعه بهمن در منطقه، شناسایی مناطق تجمع برف، گذرگاه عبور و توقفگاه بهمن است.

در این پژوهش با استفاده از نقشهها و اطلاعات پایهای و هواشناسی و عاملهای ژئوموروفولوژیکی مانند انحنای دامنه، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص ناهمواری زمین (TRI) و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) بههمراه بازدیدهای میدانی، مناطق تجمع، گذرگاه عبور و توقفگاه بهمن شناسایی گردید. سپس مهمترین شاخصهای مؤثر در ایجاد و وقوع بهمن در منطقه تعیین شد.

نتایج نشان داد که شیب بالای منطقه بین ۱۲۰-۲۰ درصد و همچنین جهت دامنه (شمالی و شمال شرقی) و عوامل اقلیمی مانند بارش و دما مهمترین عوامل وقوع بهمن در منطقه موردمطالعه بوده است. سپس متغیرهای دینامیکی بهمن در منطقه موردمطالعه با استفاده از مدل شبیهسازی RAMMS

منابع مورداستفاده

Akay, H., 2021. Spatial modelling of snow avalanche susceptibility using hybrid and ensemble machine learning techniques. Catena 206, 105524.

برآورد شد. نتایج نشان داد که سرعت متوسط بهمن ۵/۳ متر بر ثانیه و حداکثر سرعت بهمن ۱۶ متر بر ثانیه در منطقه بوده است. همچنین فشار مؤثر متوسط بهمن ۲ کیلوپاسکال و حداکثر فشار بهمن در منطقه نیز ۴۵ کیلوپاسکال است.

برآورد ارتفاع بهمن در منطقه نشان داد که متوسط ارتفاع بهمن در منطقه توقفگاه (مناطق مسکونی) ۴/۵ متر و حداکثر ارتفاع بهمن در این منطقه ۱۰ متر است. با توجه به نتایج عوامل تأثیرگذار بر وقوع بهمن و مدلسازی، احتمال وقوع بهمن و خسارت در منطقه موردمطالعه بسیار بالا بوده و نیازمند ارائه و اجرای برنامههای مدیریتی و کنترلی برای جلوگیری از خسارت احتمالی است.

تشكر و قدردانی

بدینوسیله از کلیه افرادی که در ارتقا کیفیت مقاله نقش مؤثری ایفا کردند، صمیمانه قدردانی میشود.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان است.

Blahut, J., Klimes, J., Balek, J., Hajek, P., Cerven, L., Lysak, J., 2017. Snow avalanche hazard of the Krkonose National Park Czech Republic. J. Maps 13 (2), 86-90.

- Bühler, Y., Christen, M., Kowalski, J., Bartelt, P., 2011. Sensitivity of snow avalanche simulations to digital elevation model quality and resolution. Annals Glaciol. 52(58), 72-80.
- Conway, H., Wilbour, C., 1999. Evolution of snow slope stability during storms. Cold Regi. Sci. Technol. 30(1-3), 67-77.
- Christen, M., Bartelt, P., Gruber, U., 2002. AVAL-1D: An avalanche dynamics program for the practice. In International Congress Interpraevent, 715-725.
- Christen, M., Kowalski, J., Bartelt, P., 2010. RAMMS: numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Regi. Sci. Technol. 63 (1-2), 1-14.
- Choubin, B., Borji, M., Mosavi, A., Sajedi-Hosseini, F., Singh, V.P., Shamshirband, S., 2019. Snow avalanche hazard prediction using machine learning methods. J. Hydrol. 577, 123929.
- Ceaglio, E., Mitterer, C., Maggioni, M., Ferraris, S., Segor, V., Freppaz, M., 2017. The role of soil volumetric liquid water content during snow gliding processes. Cold Regi. Sci. Technol. 136, 17-29.
- Eglit, M., Yakubenko, A., 2014. Numerical modeling of slope flows entraining bottom material. Cold Regi. Sci. Technol. 108, 139-148.
- Eglit, M., Yakubenko, A., Zayko, J., 2020. A review of Russian snow avalanche models from analytical solutions to novel 3D models. Geosci. 10 (2), 77.
- Feistl, T., 2015. Vegetation effects on avalanche dynamics. phD. dissertation, Technische Universität München, 139 pages.
- Fischer, J.T., Kowalski, J., Pudasaini, S.P., 2012. Topographic curvature effects in applied avalanche modeling. Cold Regi. Sci. Technol. 74, 21-30.
- Fischer, J.T., 2013. A novel approach to evaluate and compare computational snow avalanche simulation. Nat. Hazards Earth Sys. Sci. 13(6), 1655-1667.
- Gądek, B., Kaczka, R.J., Rączkowska, Z., Rojan, E., Casteller, A., Bebi, P., 2017. Snow avalanche activity in Zleb Zandarmerii in a time of climate change (Tatra Mts., Poland). Catena 158, 201-212.
- Granig, M., Oberndorfer, S., 2008. Development and calibration of the dense and powder snow avalanche model SamosAT. Interpraev. Dornbirn 493-504.
- Granig, M., Sampl, P., Tollinger, C., Jörg, P., 2009. Experiences in avalanche assessment with the powder snow avalanche model SamosAT. In International Snow Science Workshop Proceedings, Davos, Switzerland, 514-518
- Graveline, M.H., Germain, D., 2016. Ice-block fall and snow avalanche hazards in northern Gaspésie (eastern Canada): Triggering weather scenarios and process interactions. Cold Regi. Sci. Technol. 123, 81-90.
- Gruber, U., Bartelt, P., 2007. Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS. Environ. Modell. Sof. 22(10), 1472-1481.
- Gilany, N., Iqbal, J., 2019. Simulation of glacial avalanche hazards in Shyok Basin of upper Indus. Sci. Reports 9(1), 1-14.
- Gürer, I., Tunçel, H., Yavas, O.M., Erenbilge, T., Sayin, A., 1995. Snow avalanche incidents in northwestern Anatolia, Turkey during December 1992. Nat. Hazards 11 (1), 1-16.
- Gauthier, F., Germain, D., Hétu, B., 2017. Logistic models as a forecasting tool for snow avalanches in a cold maritime climate: northern Gaspésie, Québec, Canada. Nat. Hazards 89(1), 201-232.
- Hao, J.S., Huang, F.R., Liu, Y., Amobichukwu, C.A., Li, L.H., 2018. Avalanche activity and characteristics of its triggering factors in the western Tianshan Mountains, China. J. Mount. Sci. 15(7), 1397-1411.
- Hirashima, H., Nishimura, K., Yamaguchi, S., Sato, A., Lehning, M., 2008. Avalanche forecasting in a heavy snowfall area using the snowpack model. Cold Regi. Sci. Technol. 51(2-3), 191-203.
- Joshi, J.C., Srivastava, S., 2014. A hidden markov model for avalanche forecasting on Chowkibal-Tangdhar road axis in Indian Himalayas. J. Earth Sys. Sci. 123(8), 1771-1779.
- Kern, A.N., Addison, P., Oommen, T., Salazar, S.E., Coffman, R.A., 2017. Machine learning based predictive modelling of debris flow probability following wildfire in the intermountain Western United States. Mathemati. Geosci. 49, 717-735.
- Kumar, S., Snehmani, P.K., Srivastava, A., Singh, M.K., 2016. Fuzzy–frequency ratio model for avalanche susceptibility mapping. Int. J. Digital Earth 9(12), 1168-1184.
- Koçyiğit, Ö., Tekin, E., Arslan, G., 2016. Avalanche research studies at bozdağ. Disaster Sci. Engineer. 2(2), 40-45.
- Kumar, S., Srivastava, P.K., 2017. GIS-based MCDA–AHP modelling for avalanche susceptibility mapping of Nubra valley region, Indian Himalaya. Geocarto Int. 32(11), 1254-1267.
- Kumar, S., Srivastava, P.K., 2018. Geospatial modelling and mapping of snow avalanche susceptibility. J. Indian Soci. Remote Sens. 46(1), 109-119.
- Kumar, S., Srivastava, P.K., Bhatiya, S., 2019. Geospatial probabilistic modelling for release area mapping of snow avalanches. Cold Regi. Sci. Technol. 165, 102813.

Kurt, T., 2018. Assessment of avalanche hazard situation in Turkey during years 2010s. Nat. Hazards Earth Sys. Sci. Discussions, 1-27.

Kulikovskii, A., Sveshnikova, E., 1977. A model for simulation of a powder snow avalanche. Mater. Glyatsiologicheskikh Issled. (Data Glaciol. Stud.) 53, 108-112 (in Russian with English Summary).

- Lushchik, V.G., Pavel'Ev, A.A., Yakubenko, A.E., 1978. Three-parameter model of shear turbulence. Fluid Dyn. 13 (3), 350-360.
- Mahdavi, M., 2016. Applied Hydrology 1. University of Tehran Press, 342 pages (in Persian).
- Maggioni, M., 2005. Avalanche release areas and their influence on uncertainty in avalanche hazard mapping. PhD Thesis, 146 pages.
- Mokarram, M., Darvishi, A., Negahban, S., 2017. The relation between morphometric characteristics of watersheds and erodibility at different altitude levels using Topographic Position Index (TPI), case study: Nazloochaei Watershed. J. Geographi. Data (SEPEHR), 26(1), 131-142 (in Persian).
- Mosavi, A., Shirzadi, A., Choubin, B., Taromideh, F., Hosseini, F.S., Borji, M., Shahabi, H., Salvati, A. Dineva, A.A., 2020. Towards an ensemble machine learning model of random subspace based functional tree classifier for snow avalanche susceptibility mapping. IEEE Access, 8, 145968-145983.
- Mott, R., Faure, F., Lehning, M., Henning, L., Hynek, B., Michlmayer, G., Prokop, A., Schöner, W., 2008. Simulation of seasonal snow-cover distribution for glacierized sites on Sonnblick, Austria, with the Alpine3D model. Annals Glaciol. 49, 155-160.
- Meister, R., 1989. Influence of strong winds on snow distribution and avalanche activity. Annals Glaciol. 13, 195-201.
- Oller, P., Janeras, M., de Buen, H., Arnó, G., Christen, M., García, C., Martínez, P., 2010. Using AVAL-1D to simulate avalanches in the eastern Pyrenees. Cold Regi. Sci. Technol. 64(2), 190-198.
- Peitzsch, E.H., Hendrikx, J., Fagre, D.B., Reardon, B., 2012. Examining spring wet slab and glide avalanche occurrence along the Going-to-the-Sun Road corridor, Glacier National Park, Montana, USA. Cold Regi. Sci. Technol. 78, 73-81.
- Rooming, J.M., 2004. March wet avalanche prediction at Bridger Bowl ski area, Montana. PhD thesis, Montana State University-Bozeman, College of Letters and Science. p 46-60.
- RAMMS. 2017. Avalanche user manual v1.7. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.
- Salm, B., Burkard, A., Gubler, H.U., 1990. Calculating flowing avalanches: a guide for practitioners with examples. Federal Institute for Snow and Avalanche Research, Weissfluhjoch / Davos, 44 pages.
- Sampl, P., Zwinger, T., 2004. Avalanche simulation with SAMOS. Annals Glaciol. 38, 393-398.
- Sardar, T., Xu, A., Raziq, A., 2017. Snow avalanche susceptibility based assessment of release zones over complex terrain of siachen glacier applying ramms and dsr as active macroclimatic factor. Procedia Computer Sci. 107, 427-435.
- Samadi M., Jalali, S., Kornejadi, A., Samadi Gheshlaghchaee, M., 2016. Investigation of morphometric indexes with GIS in Chel-Chay Watershed, Golestan Province. Geospa. Engineer. J. 7(4), 37-48.
- Sethya, K.K., Pandey, P., Chattoraj, S., Manickam, S., 2018. Mapping, modelling and simulation of snow avalanche in Alaknanda Valley, Central Himalaya: Hazard Assessment. In IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 5150-5153.
- Singh, V., Thakur, P.K., Garg, V., Aggarwal, S.P., 2018. Assessment of snow avalanche susceptibility of road network-a case study of Alaknanda Basin. Int. Archives Photogram. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 425, 461-468.
- Schweizer, J., Bruce Jamieson, J., Schneebeli, M., 2003. Snow avalanche formation. Reviews Geophy. 41(4), 1016.
- Schweizer, J., Mitterer, C., Techel, F., Stoffel, A., Reuter, B., 2018. Quantifying the obvious: the avalanche danger level. In Proceedings International Snow Science Workshops, 1052-1058.
- Schmidtner, K., Bartelt, P., Fischer, J.T., Sailer, R., Granig, M., Sampl, P., Bühler, Y., 2018. Comparison of powder snow avalanche simulation models (RAMMS and SamosAT) based on reference events in Switzerland. In International Snow Science Workshop Proceedings, 740-745.
- Turchaninova, A.S., 2013. Application of empirical calculations and dynamics models for snow avalanche hazard assessment in Russia. In International Snow Science Workshop: Grenoble Chamonix-Mont-Blanc France, 7-11.
- Tunçel, H., 1990. Avalanches as Natural Hazard and Avalanches in Turkey. Cografya Aras,tırmaları Dergisi 1(2), 71-98.
- Wastl M., Stötter, J., Kleindienst, H., 2011. Avalanche risk assessment for mountain roads: a case study from Iceland. Nat. Hazards, 56(2), 465-480.
- Wilbur, C., Mears, A., Margreth, S., Burak, S., 2014. Avalanche dynamics model RAMMS applied in two north american climates. International Snow Science Workshop, Banff, Alberta, Canada.

- Yariyan, P., Avand, M., Abbaspour, R.A., Karami, M., Tiefenbacher, J.P., 2020. GIS-based spatial modelling of snow avalanches using four novel ensemble models. Sci. Total Environ. 745, 141008.
- Zarei Bidaki, R., 2009. Investigation of avalanche conditions using climatic factors, geomorphology and snow cover. PhD Thesis, 135 pages (in Persian).
- Zwinger, T., Kluwick, A., Sampl, P., 2003. Numerical simulation of dry-snow avalanche flow over natural terrain. In Dynamic response of granular and porous materials under large and catastrophic deformations. Springer, Berlin, Heidelberg, 161-194