

تحلیل پدیده‌ی سنگ‌افت در دیواره‌ی پرشیب با استفاده از مدل‌سازی با روش توده‌ای - کلوخه‌ای Rocfall و روش المان مجزا PFC^{3D} - مطالعه‌ی موردی *

مقاله پژوهشی

حسین قائدی^(۲)میلاذ صادقی گواری^(۳)هادی فتاحی^(۱)

چکیده سنگ‌افت یکی از انواع ناپایداری دامنه‌ای است که در اکثر مناطق کوهستانی رخ می‌دهد و موجب صدمات جانی و خسارات سنگین به تأسیسات، مناطق مسکونی، جاده‌ها، مزارع و وسایل نقلیه می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از صدمات مالی - جانی، پیش‌بینی و مدل کردن پدیده‌ی سنگ‌افت در دیواره‌های پرشیب برای انجام اقدامات پیش‌گیرانه ضروری می‌باشد. در این راستا در مقاله‌ی حاضر، به منظور ارزیابی خطر سنگ‌افت ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Rocfall مسیر حرکت سقوط سنگی بلوک‌های جدا شده به صورت منفرد و جدا از هم در بحرانی‌ترین مقطع از ارتفاعات شمال باختری شهر شاهرود مورد تحلیل قرار گرفت. سپس به منظور در نظر گرفتن فعل و انفعالات بین ذرات در مسیر حرکت، شکل، اندازه و وزن قطعات از روش المان مجزای PFC^{3D} استفاده شد. با تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک دو نرم‌افزار مذکور، این نتیجه حاصل شد که اگر سنگ‌افت اتفاق بیفتد، تعداد زیادی از قطعات در محدوده‌ی جاده‌ها و مناطق مسکونی توقف دارند که این توقف‌ها راه‌بندان در جاده و خطرات مالی - جانی را در پی خواهد داشت. به عبارتی دیگر با توجه به این‌که بیشترین فاصله‌ی افقی طی شده توسط قطعات ۳۹۳ متر و فاصله‌ی افقی مناطق مسکونی ۳۴۰ متری می‌باشد، لذا احتمال حادثه در اثر سنگ‌افت بسیار بالا است. در ادامه‌ی پیشنهاداتی از جمله نصب توری‌های فلزی، ضربه‌گیرها، کاهش انرژی جنبشی در قطعات، تغییر در ابعاد قطعات، ایجاد تغییر در هندسه‌ی شیب جهت کاهش خطر و خسارات ناشی از سنگ‌افت در مقطع مورد نظر ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی سنگ‌افت، روش توده‌ای - کلوخه‌ای، نرم‌افزار Rocfall، روش المان مجزا، نرم‌افزار PFC^{3D}

Analysis of Rock Fall Phenomenon in Steep Wall Using Modeling by Rocfall Mass-Lump Method and PFC^{3D} Discrete Element Method - Case Study

H. Fattahi M. Sadeghi H. Ghaedi

Abstract Rock fall is a type of slope instability that occurs in most mountainous areas and causes casualties and severe damage to facilities, residential areas, roads, farms and vehicles. Therefore, to prevent financial damage, it is necessary to predict and model the phenomenon of rock fall in steep walls to take preventive measures. In this paper, in order to assess the risk of falling rocks, first using Rocfall software, the path of rock fall of isolated blocks was analyzed individually and separately in the most critical section of the northwestern heights of Shahrood. In order to consider the interactions between particles in the path, shape, size and weight of the parts, the distinct element method PFC^{3D} was used. Analyzing the simulation results with the help of these two softwares, it was concluded that if the rock falls, a large number of parts will stop in the area of roads and residential areas, which will result in traffic jams and financial-human risks. In other words, considering that the maximum horizontal distance traveled by the plots is 393 meters and the horizontal distance between residential areas is 340 meters, so the probability of an accident due to falling rocks is very high. In the following, suggestions such as installation of metal grids, shock absorbers, reduction of kinetic energy in the parts, change in the dimensions of the parts, change of the slope geometry to reduce the risk and damage caused by falling rock in the desired section are presented.

Key Word: Rock fall, Rocfall software, PFC^{3D} software, Mass-lump method, Distinct element method.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۱۲/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۲/۲۲ می‌باشد.

Email: h.fattahi@arakut.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.

مقدمه

تحلیل پایداری بلوک‌های سنگی منفصل واقع بر شیب‌ها و دامنه‌ها که تحت عنوان سنگ‌افت نامیده می‌شود امروزه سبب شده‌است تا بسیاری از مهندسان و طراحان به پیش‌بینی رفتار این پدیده در شیب‌های سنگی روی آورند. عوامل متعددی در رخداد سنگ‌افت نقش دارند که از جمله‌ی آنها می‌توان به افزایش آب حفره‌ای در توده‌ی سنگ، فرسایش مصالح دربرگیرنده، هوازدگی در سنگ، زمین‌لرزه، اثر گوه‌ای ریشه‌ی درختان، تجزیه‌ی شیمیایی سنگ، فرآیند سریع یخ‌زدن و آب‌شدن اشاره کرد. اثرات ناپایداری دامنه‌ها به صورت حرکات توده‌ای در مقیاس کوچک تا وسیعی می‌باشد. حرکات دامنه‌ای ممکن است جزئی و منحصر به ریزش یک قطعه سنگ منفرد بوده یا این‌که بسیار بزرگ و فاجعه‌آفرین باشد. مکانیسم حرکتی رفتار سنگ بعد از جدا شدن از سطح شیب‌دار، در حقیقت ترکیبی از چهار فاز مختلف و اصلی لغزش، سقوط آزاد، چرخش و جهش می‌باشد. بنابراین می‌توان با تعیین درست مسیر ریزش قطعات که به صورت ارتفاع و طول مسیر، سرعت و انرژی قطعات طی ریزش بیان می‌شود، برای تعیین محل نصب سازه‌های حفاظتی مناسب اقدام کرد. انتهای مسیر حرکت قطعات به عواملی نظیر زبری، شیب، ارتفاع ریزش مربوط به دامنه و سه فاکتور استحکام، شکل و حجم قطعات بستگی دارد. در طول سالیان اخیر در ارتباط با پدیده‌ی سنگ‌افت پژوهش‌های متعددی انجام شده که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره خواهد شد.

آزونی (Azzoni) و همکاران [1] با استفاده از مدل ریاضی و براساس مکانیزم جسم صلب و آنالیز آماری در یک فضای دوبعدی به بررسی بعضی از پارامترهای کاربردی سنگ‌افت پرداختند. آزونی و فریتاس (Azzoni & Freitas) [2] با استفاده از آزمایش‌های برجا، با پرتاب قطعات سنگی و فیلم‌برداری از تمام مراحل حرکت آنها، پارامترهای مناسبی را برای تحلیل‌های ریزش سنگی ارزیابی کردند. این پارامترها شامل ضریب ارتجاعی،

ضریب اصطکاک غلتشی، سرعت‌های انتقالی و غلتشی و ارتفاع جهش می‌باشد. آنها همچنین تأثیر شکل و ابعاد بلوک‌ها را روی سرعت غلتشی و اثر وجود گودال را بر روی مسیرهای ریزش بررسی کردند. نیکت (Nicot) و همکاران [3] با استفاده از روش‌های تحلیل و آزمایشگاهی، تأثیر شبکه‌های فلزی (Anti-Sub-Marine) در توقف سنگ‌افت را بررسی کردند. آنها نشان دادند که این شبکه‌ها، در برابر نیروی دینامیکی افت سنگ انعطاف‌پذیری بالایی دارند. کوزتی (Guzzetti) و همکاران [4] به منظور بررسی سقوط سنگ در مقیاس ناحیه‌ای و منطقه‌ای و به صورت سه‌بعدی برنامه‌ی STONE را طراحی کردند که قابلیت مدل کردن سنگ‌افت را به صورت سه فاز سقوط آزاد، غلتش و جهش دارد. داده‌های ورودی این برنامه در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه شد که شامل نقشه‌ی توپوگرافی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، ژئومورفولوژی، سرعت ابتدایی، ضرایب دینامیکی ارتجاعی و اصطکاک می‌باشند. برنامه‌ی مذکور دارای قابلیت مدل کردن منبع سقوط سنگ به سه حالت خطی، نقطه‌ای و ناحیه‌ای می‌باشد که نتایج حاصل به دو شکل دوبعدی و سه‌بعدی در محیط GIS ارائه می‌شوند. دوارت و مارکوئیز (Marquinez & Duarte) [5] تأثیر فاکتورهای محیطی و لیتولوژیکی را بر ایجاد ریزش‌های سنگی در مقیاس ناحیه‌ای و با استفاده از نهشته‌های واریزه‌ای در محیط GIS بررسی نمودند. در این مطالعه از واریزه‌های جدید که توسط پوشش گیاهی دربرگرفته نشده‌اند، به‌عنوان نشانی برای فعالیت سقوط سنگ استفاده شده‌است. واریزه‌هایی که توسط گیاهان پوشیده شده‌اند، دال بر پایداری شیب‌ها و عدم فعالیت آنها می‌باشد. در تحقیق مذکور نقشه‌ی حوضه‌های سقوط سنگ با نقشه‌های متغیرهای محیطی (دما و باران)، ساختمانی و ژئومورفولوژی هم‌پوشانی شده‌است. نتایج حاصل حاکی از آن است که متغیرهای محیطی تأثیرات عمده‌ای بر فعالیت دامنه‌ها دارند. به‌خصوص که این متغیرها در

برای ارزیابی ناپایداری‌های دامنه در ریودوژانیروی برزیل، از منطق فازی استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که در این مدل چون به صورت صفر و یکی نیست، نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌ها به دست می‌آید [11]. باترسون (Batterson) و همکاران [12] در مطالعه‌ای ارزیابی خطرات زمین‌شناسی از جمله سنگ ریزش را در دره‌ی هامبر در شمال شرق آوالون در کانادا انجام دادند، و به این نتیجه دست یافتند که در شیب‌های ۲۲ تا ۳۰ درجه بیشترین ریزش‌های منطقه اتفاق افتاده است. توپال (Topal) و همکاران به بررسی سنگ‌افت در شهر افیون ترکیه پرداختند. قلعه‌ی افیون یک مکان توریستی در شهر افیون ترکیه است که در یک تپه‌ی شیب‌دار قرار گرفته است و در مجاورت قلعه سکونتگاه‌هایی وجود دارد که در معرض خطر سنگ‌افت قرار دارند. آنها با استفاده از نرم‌افزار Rocfall به بررسی سنگ‌افت و محاسبه‌ی ارتفاع جهش، انرژی جنبشی، سرعت سنگ‌ها و نقطه‌ی توقف بلوک‌ها در طول مسیر پرداختند. نتایج تجزیه و تحلیل‌ها نشان داد که برای مناطقی که مستعد خطر ریزش سنگین هستند، اقداماتی نظیر پیچ‌سنگ و نرده‌های محافظ قابل پیشنهاد است [13]. لان (Lan) و همکاران [14] برای تسهیل ارزیابی خطرات ریزش سنگی در محیط GIS، زیربرنامه‌ای را تحت عنوان Rockfall Analyst ارائه نمودند که ترکیبی از یک مدل‌سازی سه‌بعدی فرآیند ریزش سنگی با مدل‌سازی GIS است. جیکومینی (Giacomini) و همکاران [15] با انجام ۲۰ آزمایش سقوط سنگ، دید تازه‌ای در مورد قطعه‌قطعه شدن بلوک‌های سقوط کرده به‌خصوص بلوک‌های دارای فولیاسیون، هنگام برخورد با سطح زمین ایجاد کردند. این آزمایش‌ها در معدنی در شمال‌غرب ایتالیا بر روی دو نوع سنگ با شیب‌سوزیته‌ی متفاوت صورت گرفت. چوی (Choi) و همکاران [16] با استفاده از مدل بارتون و نرم‌افزار Rocfall به حل مشکل خطر ریزش ایالت سوک‌گای‌اوراک در کره‌ی جنوبی پرداختند و بیان کردند ۸۰ درصد تخته‌سنگ‌های در حال سقوط، دارای وزن

لیتولوژی‌های مختلف تأثیرات متفاوتی را ایجاد می‌کنند. نتایج به‌دست‌آمده فعالیت شدید سقوط سنگ در نقاط مرتفع‌تر را تأیید می‌کند. در مناطقی که لیتولوژی‌های مقاوم و نامقاوم به‌طور متناوب قرار دارند، سقوط سنگ‌ها بیشتر مشاهده می‌شود. چائو (Chau) و همکاران با استفاده از یک سری آزمایش‌های آزمایشگاهی ضرایب واجهشی برای بلوک‌های کروی‌شکل در شیب‌های سنگی را به‌دست آوردند. آنها هم‌چنین دریافتند که ضرایب واجهشی با افزایش زاویه‌ی شیب افزایش می‌یابد. هم‌چنین به‌طور کلی نسبت انرژی سیستماتیک چرخشی به انتقالی با افزایش زاویه‌ی شیب تا ۴۰ درجه، افزایش و سپس تا زاویه‌ی شیب ۷۰ درجه کاهش می‌یابد [6]. بیل‌فرد (Baillifard) و همکاران نقشه‌ی خطر سقوط سنگ را با استفاده از عوامل توپوگرافی، ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی و با استفاده از GIS تهیه نمودند [7]. کوزتی و همکاران یک روش براساس افزایش حوادث ناشی از سنگ‌افت با استفاده از تاریخچه و حجم سنگ‌افت و برپایه‌ی نتایج فیزیکی و مدل فضایی شبیه‌سازی سنگ‌افت برای تعیین خطر سنگ‌افت ارائه کردند. آنها اطلاعات مربوط به محل و نوع اقدامات مقابله‌ای در برابر سنگ‌افت را بیان و این روش را در دره‌ی رودخانه‌ی نرا در منطقه‌ی Umbria ایتالیای مرکزی مورد استفاده قرار دادند [8]. چائو و همکاران با استفاده از نرم‌افزار GIS به پهنه‌بندی خطر سقوط سنگ در هنگ‌کنگ پرداختند. آنها در تحقیق خود از چهار لایه‌ی اطلاعاتی زمین‌شناسی، مقدار و جهت شیب و طبقات ارتفاعی به‌عنوان عوامل اصلی در وقوع پدیده‌ی سقوط سنگ در این منطقه استفاده کردند [9]. پرت (Perret) و همکاران به مطالعه‌ی فعالیت مکانی و زمانی ریزش در مناطق جنگلی کوه‌های آلپ سوئیس پرداختند و نتیجه گرفتند وقوع ریزش فصلی در طول خواب درختان، در اوایل بهار به اوج می‌رسد. علاوه‌بر این، وقوع ریزش با درجه‌ی حرارت تابستان و زمستان در ارتباط است، ولی هیچ هم‌بستگی با بارش سالانه یا فصلی ندارد [10]. سابویا (Saboya) و همکاران

سازه‌های حفاظتی در برابر سنگ‌افت در نظر گرفته شود. یوسف (Youssef) و همکاران [23] در تحقیق خود به بررسی و آنالیز سنگ‌افت در کوه النور در عربستان پرداختند. کوه النور یکی از مناطقی است که به دلیل وجود غار هیرا، پیست اسکاریمنت و مناطق شهری اطراف آن به علت ریزش سنگ بسیار پرخطر است. محققان دست یافتند که شیب تند، هوازدگی، فرسایش، اثرات انسانی و بارندگی از دلایل سنگ‌افت در این منطقه است. بنابراین آنها سعی کردند که با استفاده از سنجش از راه دور، نرم‌افزارهای عددی و مطالعات میدانی، مناطق ناپایدار را شناسایی کنند. تجزیه و تحلیل نشان داد که ریزش سنگ در منطقه‌ی ۱ و ۲ کوه النور ممکن است به مناطق شهری برسد، در حالی که ریزش سنگ در منطقه‌ی ۳ به منطقه‌ی شهری نخواهد رسید و ریزش سنگ در امتداد جاده‌ی پیست آل‌نور تأثیر زیادی بر روی گردشگران دارند و بایستی در هر ۳ منطقه اقدامات پیشگیرانه‌ای انجام شود. کسکین (Keskin) و همکاران به بررسی خطر سنگ‌افت در جاده‌ای می‌پردازند که در پایین دست آن مناطق مسکونی عبور می‌کند. تجزیه و تحلیل سنگ‌افت در جاده‌ی زونگولداک- کلیملی در ترکیه براساس تحقیقات میدانی، مطالعات آزمایشگاهی و با استفاده از نرم‌افزار Rocfall انجام شده است. آنها به این نتیجه رسیدند برای جلوگیری از خطرات ساختمان‌های مسکونی در پایین دست، از آنجا که تغییر هندسه‌ی شیب امکان‌پذیر نیست، سد بتنی در کنار جاده را به عنوان یک اقدام پیشگیرانه توصیه کردند [24]. هی (He) و همکاران با بررسی‌های دقیق میدانی، نقشه‌برداری زمین‌شناسی، تجزیه و تحلیل حرکتی و مدل‌سازی عددی خطر ریزش سنگ‌ها را در شهر میانسی از شهرستان ونچوان، استان سیچوان چین تحت تأثیر زلزله بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سنگ‌های درزه‌دار پس از زلزله سبب جدایش شده و علاوه بر ریزش در جاده سبب تحریک سنگ‌های بدون درزه در پایین دست می‌شوند. آنها همچنین اثر بارندگی بر روی سنگ‌افت را مورد بررسی

حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم هستند، میانگین سرعت آنها ۸/۴ متر در ثانیه است و حداکثر انرژی جنبشی این سنگ‌ها ۱۲/۵ کیلوژول است. تونسول اوغلو و زورلو (Zorlu Tunusluoglu &) [17] به کمک مشاهدات میدانی و با استفاده از نرم‌افزار Rocfall نقشه‌ی پهنه‌بندی وقوع ریزش قلعه‌ی اورتا حصار در منطقه‌ی کاپادوکیه در کشور ترکیه را ترسیم کردند. آندریس و لکاس (Antoniou & Lekkas) [18] در تحقیق خود به بررسی و آنالیز پدیده‌ی سقوط سنگ در قسمتی از جزیره‌ی Santorini در کشور یونان پرداختند. در این بخش از جزیره، سقوط سنگ در اطراف جاده خطرانی را برای وسایل نقلیه و ساکنان محلی ایجاد کرده بود. آنها با استفاده از نرم‌افزارهای ArcView و Rocfall منطقه‌ی مورد مطالعه را پهنه‌بندی و آن را به سه زون با خطر کم، متوسط و زیاد تقسیم کردند. رممر (Rammer) و همکاران [19] در رشته کوه‌های آلپ از مدار اتریش تا سوئیس با استفاده از مدل Rocfall به بررسی خطر ریزش پرداختند. هوانگ (Huang) و همکاران [20] با مطالعه در مورد اثرات بارندگی‌ها بر گسیختگی‌های کم عمق دامنه‌ای به روش تجربی بدین نتیجه رسیدند که با پیدایش هرگونه گسیختگی در پای دامنه تحت هر عاملی، گسیختگی‌های متوالی به بخش بالادست دامنه سرایت می‌کند و ارتباط تنگاتنگی بین عوامل درونی و بیرونی در شکل‌گیری گسیختگی و ریزش سنگ‌ها در جاده‌ها وجود دارد. ولکوین (Volkwein) و همکاران [21] در مطالعه‌ای به بررسی کلی، انواع مدل‌های مطرح در پهنه‌بندی ریزش و نیز اقدامات حفاظتی در راستای مقابله با این خطر پرداختند. اسپاداری (Spadari) و همکاران [22] ارزیابی آماری از محدوده‌ی انرژی سنگ‌افت برای پنج شرط زمین‌شناسی مختلف در استرالیا را بررسی کردند. آنها با آنالیز آماری تصادفی دریافتند که برای دو مطالعه‌ی موردی سنگ‌افت، میانگین انرژی ضربه ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوژول و برای سه مورد دیگر کمتر از ۱۰۰ کیلوژول می‌باشد که ۹۵ درصد این مقدار انرژی، باید برای طراحی

قرار دادند [25].

ورودی را کاهش می‌دهد. خروجی‌های این برنامه به صورت منحنی‌ها و نمودارهای توزیع ماکزیمم سرعت، انرژی جنبشی، ارتفاع پرش و مکان توقف سنگ در سرتاسر طول شیب می‌باشد [26]. از نتایج این نرم‌افزار می‌توان برای طراحی دیوارهای حائل استفاده کرد. تغییرات جزئی در مقدار ضریب ارتجاعی تأثیرات کاملاً آشکاری در مقدار متغیرهای خروجی این برنامه از جمله ارتفاع پرش سنگ‌ها و مسافت طی شده دارد و محاسبه‌ی مقدار دقیق آن نتایج شبیه‌سازی را صحیح‌تر می‌کند که براساس آن می‌توان محل، اندازه و استحکام مورد نیاز دیوار حائل را تخمین زد [26].

این برنامه از سه الگوریتم برای آنالیز و محاسبه‌ی حرکت سنگ استفاده می‌کند که عبارتند از الگوریتم ذره، الگوریتم جهش و الگوریتم لغزش. الگوریتم ذره همه‌ی پارامترهای شبیه‌سازی را دریافت می‌کند و شرایط اولیه را برای الگوریتم سقوط و الگوریتم پرتاب فراهم می‌نماید. الگوریتم پرتاب برای محاسبه‌ی حرکت سنگ در حالت جهش و الگوریتم سقوط برای محاسبه‌ی حرکت در زمانی که سنگ با سطح شیب‌دار برخورد و به سمت پایین حرکت می‌کند، استفاده می‌شود. از تلاقی خط شیب مقطع مدل‌شده و مسیر سهمی توده‌سنگ در لحظه‌ی برخورد و حل معادله‌ی درجه‌ی دوم می‌توان سرعت، انرژی و ارتفاع پرش را در هر نقطه تعیین نمود [26].

مطابق با تحقیقات انجام‌شده، تاکنون مطالعات زیادی در این خصوص انجام شده‌است، اما از آنجا که نرم‌افزار Rocfall تنها مسیر حرکت را شبیه‌سازی می‌کند و عواملی نظیر شکل، اندازه، وزن قطعات و هم‌چنین فعل و انفعالات بین ذرات در مسیر حرکت (ذرات به صورت منفرد و جدا از هم) را در نظر نمی‌گیرد و شبیه‌سازی نمی‌کند از واقعیت سنگ‌افت فاصله دارد. در صورتی که در واقعیت، قطعات در حال ریزش و سقوط بر روی یکدیگر تأثیرگذار هستند. بنابراین در این تحقیق به منظور تطابق بیشتر با محیط واقعی منطقه‌ی شاهرود، و برای پوشش و رفع نواقص نرم‌افزار Rocfall از نرم‌افزار پر قدرت PFC^{3D} استفاده شده‌است تا علاوه بر شناسایی سرعت و مسیر سنگ‌ها، فعل و انفعالات بین ذرات و دیواره‌ها و بین ذرات با یکدیگر در حین حرکت در پایین‌دست در نظر گرفته شود تا به شرایط موجود در طبیعت نزدیک‌تر باشند و بتوان نتایج قابل قبول و مطمئن‌تری را از شبیه‌سازی به دست آورد. بنابراین در این مقاله با استفاده از دو نرم‌افزار مذکور به منظور کامل‌تر شدن اطلاعات در جهت بررسی خطر سنگ‌افت، به شبیه‌سازی مکانیسم ریزش سنگی، تعیین میزان جابه‌جایی توده‌های ریزشی و هم‌چنین بررسی راهکارهای مقابله و جلوگیری از این ریزش‌ها و خطرات ناشی از آن‌ها در منطقه‌ی شاهرود پرداخته شده‌است.

معرفی نرم‌افزار المان مجزای PFC

نرم‌افزار PFC از مجموعه نرم‌افزارهای گروه ITASCA است که برای محیط‌های ناپیوسته تهیه شده‌است. این نرم‌افزار از روش المان مجزا برای شبیه‌سازی مدل‌های خود استفاده می‌کند. در این روش توده‌سنگ به صورت یک محیط ناپیوسته و بر مبنای روش اجزای گسسته و ذره‌ای در نظر گرفته می‌شود که رفتار مواد را با استفاده از محیط ذره‌ای و دایره‌ای در حالت دوبعدی و سه‌بعدی تحلیل می‌کند. بنابراین تأثیر عوارض ساختاری نظیر

معرفی نرم‌افزار Rocfall

نرم‌افزار Rocfall یک برنامه‌ی تحلیلی- آماری دوبعدی است که توسط استیونز (Stevens) برای شبیه‌سازی سقوط سنگ ایجاد شده‌است. استفاده از این روش تحلیل احتمالی و متغیرهای تصادفی در متغیر جرم، شرایط اولیه و سرعت سنگ و هم‌چنین در متغیرهای ضرایب ارتجاعی، زاویه‌ی اصطکاک و موقعیت رئوس شیب‌ها، در شبیه‌سازی این برنامه نتایج آماری مفیدی در اختیار قرار می‌دهد و مشکلات مرتبط با عدم قطعیت داده‌های

در شمال هتل جهانگردی، شماری از منازل مسکونی پایین‌دست، بخشی از فضای سبز حاشیه‌ی جنوبی محل تفریحی آبشار و حاشیه‌ی باختری جاده‌ی کاج نیز در این محدوده قرار دارد، بنابراین بررسی پدیده‌ی سنگ‌افت و راهکارهای مقابله با آن برای این منطقه بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

منطقه‌ی مورد مطالعه، ارتفاعات شمال باختری شهر شاهرود است. برای مطالعه‌ی دقیق‌تر نقشه‌ی زمین‌شناسی بزرگ‌مقیاس منطقه (۱/۱۰۰۰۰) از عکس‌های هوایی استفاده شده‌است. شکل (۱) نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰ منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

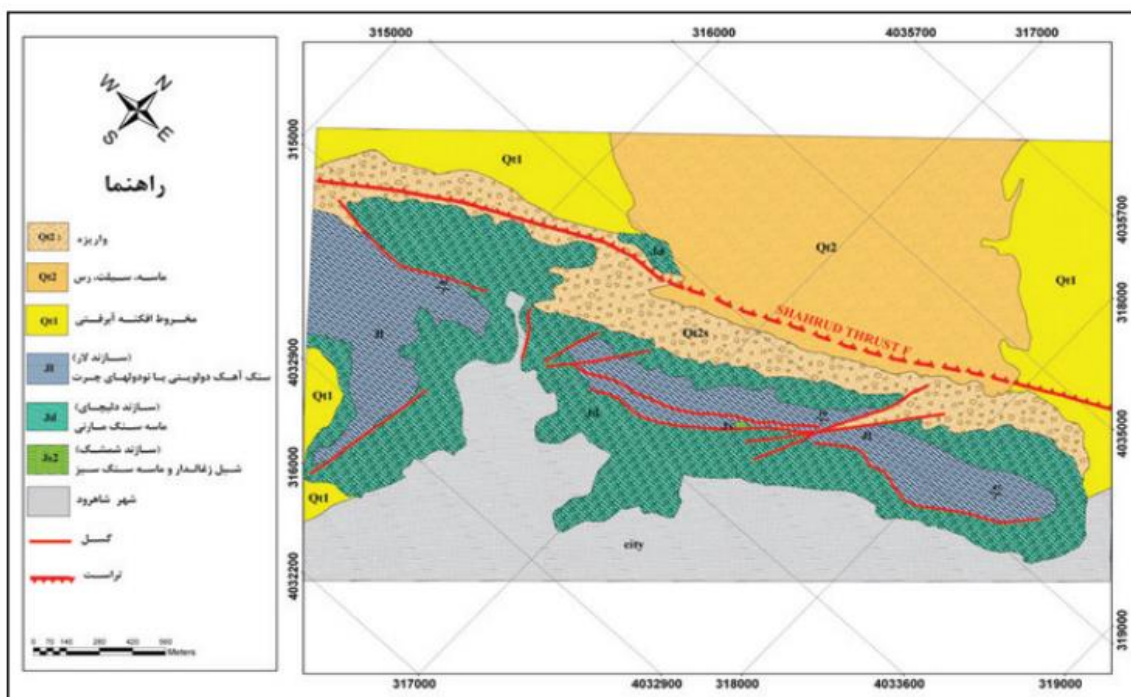
قله‌ها و بخش مرتفع ارتفاعات، متعلق به سازند آهکی صخره ساز لار است. در زیر آهک لار، سازند دلپچای (تناوب آهک مارنی و مارن) قرار دارد که نسبت به فرسایش مقاومت کمتری دارد. رخنمون کوچکی از شیل زغال‌دار شمشک نیز در زیر سازند لار به صورت فرسایش یافت می‌شود. در همبری سازندها اختلاف فرسایش سبب شده‌است که آهک‌های لار به صورت معلق درآیند. علاوه بر عامل فرسایش، حضور دو گسل موازی با روند ارتفاعات یکی در مرز سازند لار با دلپچای و شمشک و یکی درون سازند لار سبب به وجود آمدن پرتگاه‌هایی به ارتفاع ۳ تا ۴ متر شده‌است. تکنیزه بودن سازندها، هوازگی ناشی از اختلاف دمای شبانه‌روزی و وجود شمار زیاد روزهای یخبندان در طول سال و فرایند ذوب و انجماد آب در درزه و شکاف‌ها سبب شده‌است تا پرتگاه‌های موجود استعداد بالایی برای ریزش قطعات سنگی داشته باشند. شکل (۲) نمایی از واریزه‌ها را در محل نشان می‌دهد. در برخی از مناطق نیز قطعاتی بسیار بزرگ به ابعاد چند ده متر مکعب دیده می‌شود.

درزه‌های سنگی، لایه‌بندی، گسل‌ها و انواع ناپیوستگی‌ها قابل بررسی است. این روش با توجه به ماهیت ناپیوسته بودن محیط‌های سنگی روش کاملاً مناسبی برای بررسی تغییر شکل و شکست توده‌های سنگی می‌باشد. در این روش برای شبیه‌سازی مسیرهای توده سنگ و محاسبه‌ی انرژی سنگ در حال سقوط و روابط برخورد بین عناصر استفاده می‌شود. نرم‌افزار PFC حرکت و تعامل با سطح مقطع دایره‌ای (2D) و یا کروی (3D) ذرات و عناصر دیوار را با استفاده از قوانین حرکت و نیروی جابه‌جایی مدل‌سازی می‌کند. در طول محاسبه، تماس بین ذرات با ذرات یا ذرات با دیوارها به طور خودکار شناسایی می‌شود. ذرات ممکن است در نقاط تماس باهم پیوند داشته باشند و این پیوند به سبب برخورد می‌تواند شکسته شود. بنابراین می‌توان با استفاده از دستورات نرم‌افزار PFC^{3D} انواع حرکت (جهشی، لغزشی، غلتشی و سقوط آزاد یک توده سنگ منفرد) و تعامل بین بلوک‌ها را در سقوط توده سنگ مدل‌سازی کرد [27,28].

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده‌ی

مطالعاتی

شهر شاهرود بزرگ‌ترین شهرستان استان سمنان می‌باشد که از شمال به ارتفاعات سلسله جبال البرز و شهرستان گنبد کاووس و گرگان، از شرق به شهرستان سبزوار، از جنوب به دشت کویر و استان اصفهان و از غرب به شهرستان دامغان مرتبط می‌شود. شاهرود به لحاظ موقعیت ممتاز و ویژه‌ی جغرافیایی و قرار گرفتن بین رشته‌کوه‌های البرز و سرزمین‌های کویری همواره از جمله جاذبه‌های گردشگری ایران بوده‌است. از آنجایی که این منطقه یک مکان تفریحی در شمال شهر شاهرود می‌باشد هر ساله گردشگرانی برای بازدید از این منطقه به این شهر سفر می‌کنند اما از آنجا که این محدوده در معرض برخورد قطعات سنگی است در مواردی ریزش توده‌سنگ در جاده‌ها سلامتی گردشگران را به خطر می‌اندازد. هم‌چنین مزار شهدای گمنام در پایین‌دست منطقه، فضای سبز واقع



شکل ۱ نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ منطقه‌ی مورد مطالعه



شکل ۲ واریزه‌های موجود در دامنه‌ی مشرف به جاده و مناطق مسکونی

همان‌طور که ذکر شد منطقه‌ی مورد مطالعه متعلق به ایالت زمین ساختی البرز شرقی است. البرز شرقی در طی ادوار زمین‌شناسی متحمل رویدادهای مختلفی از جمله رخداد کوه‌زایی، چین‌خوردگی و گسلش‌های متعدد بوده‌است. در ورقه‌ی زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شاهرود چین‌خوردگی‌ها شامل ساختمان‌های تاقدیسی و

همان‌طور که ذکر شد منطقه‌ی مورد مطالعه متعلق به ایالت زمین ساختی البرز شرقی است. البرز شرقی در طی ادوار زمین‌شناسی متحمل رویدادهای مختلفی از

صحرائی، مناطق بحرانی شناسایی شدند. وجود نقاط منشأ ریزش سنگی، اصلی‌ترین معیار برای بحرانی بودن شرایط در نظر گرفته شدند. از ویژگی‌های چنین مناطقی، شیب تند و گاهی معلق یا شیب منفی، حضور قطعات ریزشی بسیار بزرگ در پای دامنه یا بر روی دامنه و وجود مناطق مسکونی در فاصله‌ی نزدیک به دامنه می‌باشد. با این اوصاف مقطعی مورد ارزیابی قرار گرفت که به دلیل وجود منطقه‌ی مسکونی در پایین دست این مقطع، در صورت ریزش سنگ‌افت، شرایط بحرانی را برای ساکنان آن ایجاد می‌کند. خصوصیات درزه‌ها در مقطع مدنظر که سبب ریزش سنگ‌افت شده مطابق جدول (۱) و (۲) می‌باشد.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، از نرم‌افزار RocFall برای شبیه‌سازی پدیده‌ی سنگ‌افت در مقطع مورد نظر استفاده شده‌است. این مقطع باتوجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده به صورت شکل (۳) می‌باشد.

ناودیسی با روند شمال شرقی - جنوب غربی و یا شرقی - غربی و از انواع متقارن یا نامتقارن می‌باشد. سیستم اصلی گسل‌ها به صورت راندگی‌ها و سپس گسل‌های امتداد لغز است. راندگی‌های موجود دارای امتداد شرقی - غربی است و حرکات قابل توجهی را از شمال به جنوب انجام داده‌اند. این راندگی‌ها در جایی که شیب گسل به صفر نزدیک شده‌است، سفره‌های رورانده را به وجود آورده‌اند. در محدوده‌ی مورد مطالعه نیز واحدهای مختلف چینه‌شناسی دارای چین‌خوردگی‌های واضح و مشهودی می‌باشد. از آنجا که توده سنگ به صورت یکپارچه نیست و دارای درزه و شکستگی‌های متعدد می‌باشد و از طرفی در تنش‌های پایین که در اعماق کم وجود دارد، رفتار توده سنگ توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود، لذا شناخت خصوصیات درزه‌ها در ارزیابی پایداری شیب‌های سنگی ضروری می‌باشد. به این منظور، ارتفاعات شاهرود که دارای درزه‌های مستعد ریزشی می‌باشد با رس و سیلت پر شده‌اند.

نتایج حاصل از مدل‌سازی با روش توده‌ای -

کلوخه‌ای RocFall

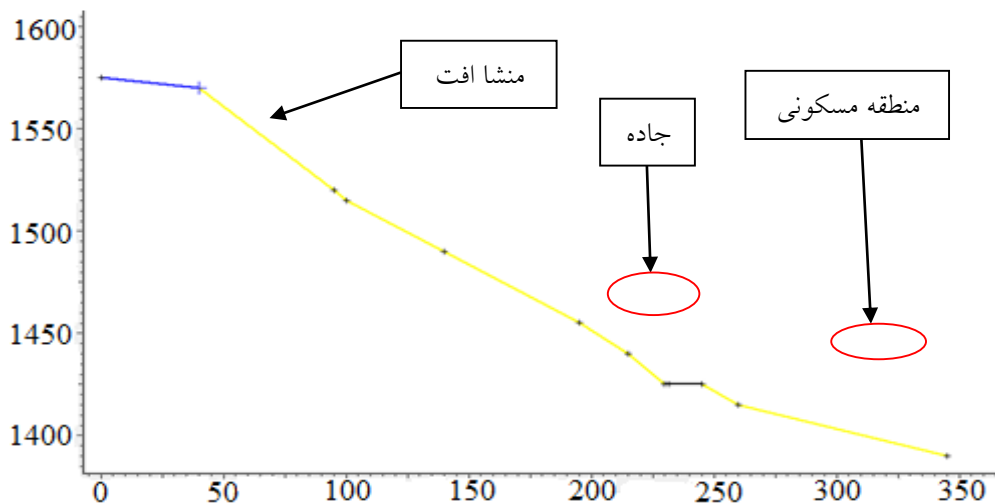
به منظور بررسی وضعیت پایداری دامنه در منطقه‌ی مورد مطالعه باتوجه به نقشه‌ی توپوگرافی و بازدیدهای

جدول ۱ خصوصیات درزه‌های اصلی در مقطع مورد نظر

حداکثر بازشدگی (cm)	پرشدگی	فاصله‌داری (cm)			جهت شیب	میانگین شیب	دسته درزه
		مینیمم	میانگین	ماکزیمم			
۲	رس	۳۰	۹۴	۱۸۰	۱۳۷	۴۴	۱
۱	رس	۱۶	۷۸	۴۰۶	۳۵۰	۶۶	۲
۱۰	سیلت	۱۶	۵۴۶	۱۲۷	۳۱	۸۱	۳
۲	رس	۷/۳	۴۷	۱۸۳	۲۴۲	۷۴	۴
۳	رس	۳۰	۹۴	۱۸۰	۳۰۲	۴۸	۵

جدول ۲ خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی در مقطع مورد نظر

φ_p (میانگین)	مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ضریب زبری (JRC)			φ_b	دسته درزه
	مینیم	میانگین	ماکزیمم	مینیم	میانگین	ماکزیمم		
۴۹/۹	۳۶۰	۵۳۴	۵۹۵	۴	۶/۳۳	۸	۳۱	۱
۵۲/۸	۳۹۵	۴۶۷	۵۶۰	۵	۷	۹	۳۱	۲
۵۶/۹	۵۴۰	۵۵۲	۵۶۵	۵	۷	۸	۳۱	۳
۵۴/۸	۱۸۰	۴۴۶	۵۹۰	۴	۶/۴۶	۸	۳۱	۴
۵۱/۷	۳۴۰	۴۷۰	۵۸۵	۶	۷/۲	۸	۳۱	۵



شکل ۳ نیم‌رخ مقطع مورد نظر (واحد محورهای مختصات به متر است)

در شکل (۳) نقاط منشأ ریزش تعیین شده‌اند و برای بخش‌های مختلف دامنه مطابق جدول (۳)، ضرایب ارتجاعی، ضریب اصطکاک و زبری متناسب با ویژگی‌های آن تعیین و وزن بزرگ‌ترین قطعات در هر مقطع با استفاده از برداشت‌های صحرایی برپایه‌ی فاصله‌داری درزه‌ها مشخص شده‌است.

مطابق شکل (۴) در این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی ۱۰۰۰ ریزش در طی هر بار اجرای برنامه تنظیم شده‌است و بزرگ‌ترین قطعه در مقطع دارای وزن معادل ۳۶۰۰ کیلوگرم می‌باشد. باتوجه به تعداد سنگ‌های در طول مسیر سقوط می‌توان مشاهده کرد که پس از ریزش محل توقف تعداد زیادی از سنگ‌ها در فاصله‌ی ۲۶۰ متری تا ۳۴۰ متری که محل عبور جاده است می‌باشد، هم‌چنین تعدادی از

قطعات در مسیر جاده توقف دارند، در صورت سنگ‌افت، این توقف‌ها، باعث بسته شدن جاده و ایجاد حوادث و خطرات جبران‌ناپذیری برای ساکنان این مناطق می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است، تغییرات در سرعت اولیه و وزن قطعات تأثیر قابل توجهی در تعداد و محل توقف قطعات ندارد.

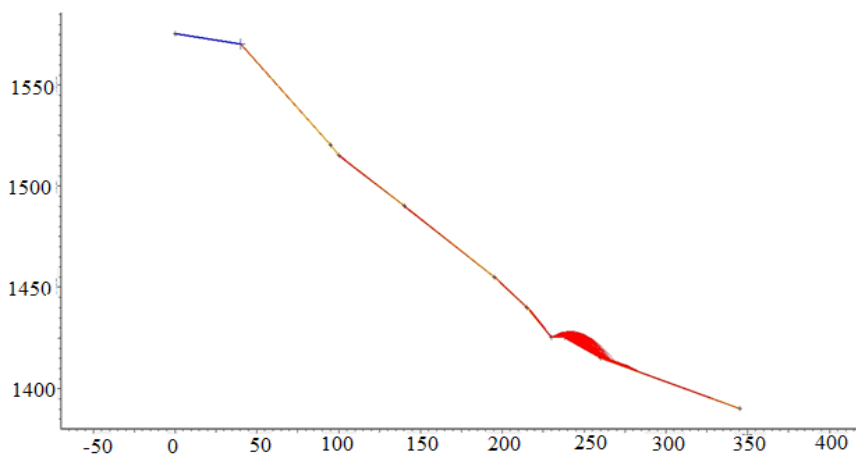
در این منطقه و مطابق شکل (۶)، باتوجه به ارتفاع پرش قطعات سنگی در طول مسیر می‌توان محدوده‌هایی که قطعات لغزش، غلتش یا جهش دارند را مشخص کرد؛ از نمودارهای به‌دست‌آمده به‌کمک نرم‌افزار مشخص می‌شود که قطعات در حد فاصل ۹۵ تا ۱۱۰ متری با جهشی حدود ۰/۷۵ متر و در فاصله‌ی ۲۵۰ متری جهشی بالای ۷ متر دارد. ابتدا و انتهای مسیر حرکت، قطعات به‌صورت لغزش یا غلتش حرکت می‌کنند. هم‌چنین

باتوجه به تعداد سنگ‌های در طول مسیر سقوط می‌توان مشاهده کرد که پس از ریزش محل توقف تعداد زیادی از سنگ‌ها در فاصله‌ی ۲۶۰ متری تا ۳۴۰ متری که محل عبور جاده است می‌باشد، هم‌چنین تعدادی از

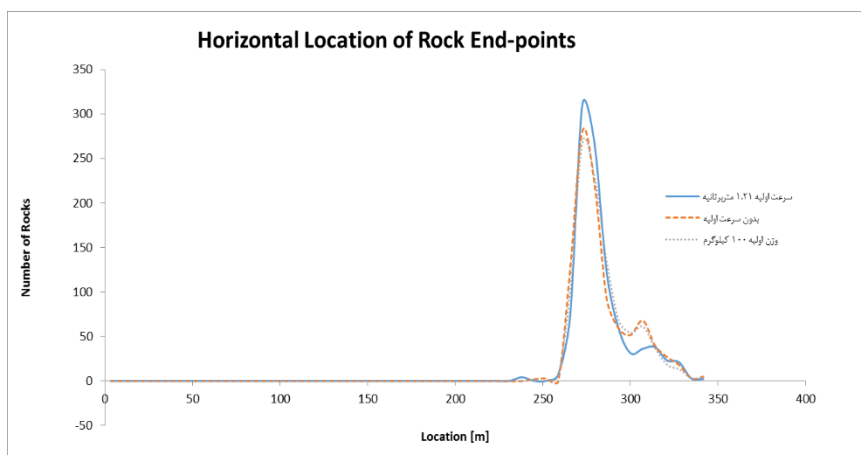
باتوجه به تغییرات در وزن و سرعت اولیه و نمودارهای حاصل از آنها می‌توان به این نتیجه رسید که این تغییرات نقش زیادی در تعیین ارتفاع پرش ندارند.

جدول ۳ ویژگی‌های مواد سازنده‌ی دامنه‌ی مورد نیاز در ورودی برنامه

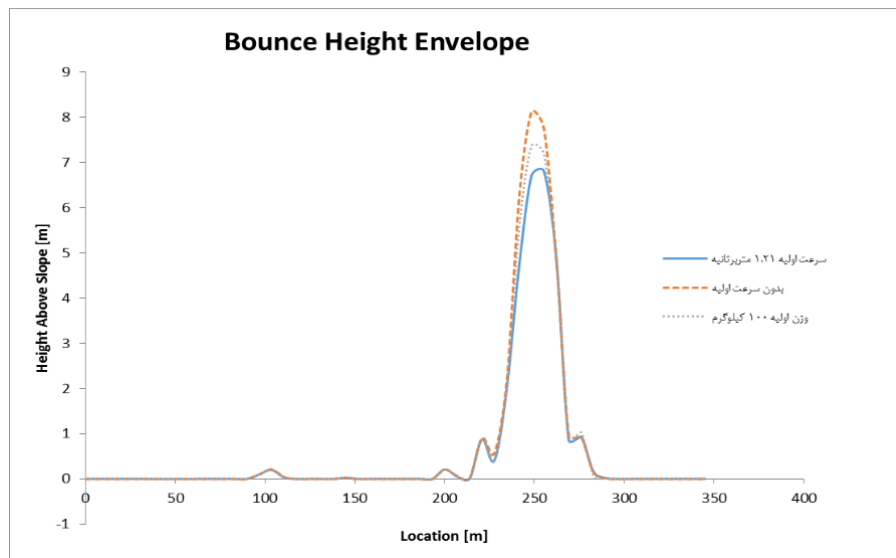
بخش پایینی دامنه	بخش بالایی دامنه	نوع سنگ‌های دامنه
سنگ آهک مارنی پوشیده با مقدار زیادی سنگ‌ریزه و کمی پوشش گیاهی	سنگ آهک‌های توده‌ای و مقاوم لار	زبری دامنه (انحراف معیار از شیب میانگین)
۲	۲	زاویه‌ی اصطکاک دامنه (درجه)
۳۰	۳۰	ضریب ارتجاعی عادی (بدون واحد)
۰/۳۳	۰/۵	ضریب ارتجاعی مماسی (بدون واحد)
۰/۸۷	۰/۹۵	



شکل ۴ مسیرهای طی‌شده‌ی قطعات در مقطع در طی ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی



شکل ۵ مسافت طی‌شده



شکل ۶ ارتفاع پرش قطعات در طول مسیر (متر)

ایجاد شده در منشأ افت به عنوان عوامل تعیین کننده ی نوع و میزان متغیرهای مختلف حرکت نام برد. باتوجه به منشأ سنگافت و توپوگرافی دامنه ی موجود، همه ی نقاط میان منشأ سنگافت و محل توقف قطعات ریزشی، مستعد برخورد قطعات سنگی است که می تواند سبب خسارت های زیادی شود. بدیهی است که برخورد قطعات در پهنه های بالاتر بیشتر است، از این رو باتوجه به محل توقف مصالح ریزشی می توان محدوده ی در معرض خطر را تعیین کرد.

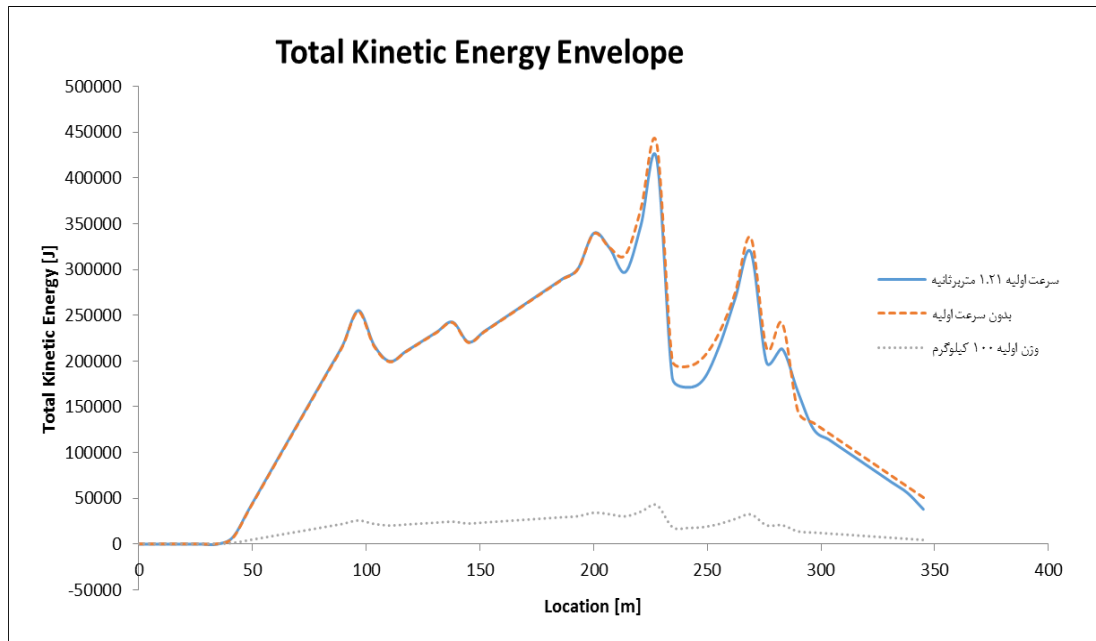
مطابق نمودارهای به دست آمده و محل قرار گرفتن جاده و تأسیسات انسانی در دامنه ی شیب، در صورت وقوع سنگافت در منطقه ی مورد نظر قطعه سنگ های جدا شده از منشأ سنگافت، با ارتفاع جهش ۷ متر، سرعت ۱۶ متر بر ثانیه و هم چنین انرژی جنبشی ۱۷۰ کیلوژول است و باعث ایجاد خطر ریزش در جاده می شود. هم چنین باتوجه به ماکزیمم مسافت طی شده، سرعت ۳ متر بر ثانیه و انرژی جنبشی ۵۰ کیلوژول قطعه سنگ باعث به وجود آمدن خسارت های جانی و مالی در صورت سنگافت در منطقه خواهد شد. برای جلوگیری

قطعات سنگ در مسیر حرکت در طی ریزش انرژی جنبشی آن افزایش می یابد که بعد از جهش و برخورد با سطح شیب مقداری از انرژی جنبشی کاسته می شود. این کاهش به دلیل تغییر محسوس در ضریب ارتجاعی سطح جاده نسبت به سطوح دیگر شیب در محدوده ی جاده بیشترین مقدار را دارد. انرژی جنبشی در انتهای مسیر به دلیل کم شدن شیب دامنه و تغییر نوع حرکت از حالت جهشی به غلتشی و لغزشی، با کاهش روبه رو می شود. شکل (۷) انرژی جنبشی در طی ریزش را نشان می دهد. هم چنین مطابق شکل (۸) سرعت انتقالی در طی مسیر رفتاری شبیه به رفتار انرژی جنبشی دارد و تغییر نوع حرکت باعث نوسانات سرعت می شود.

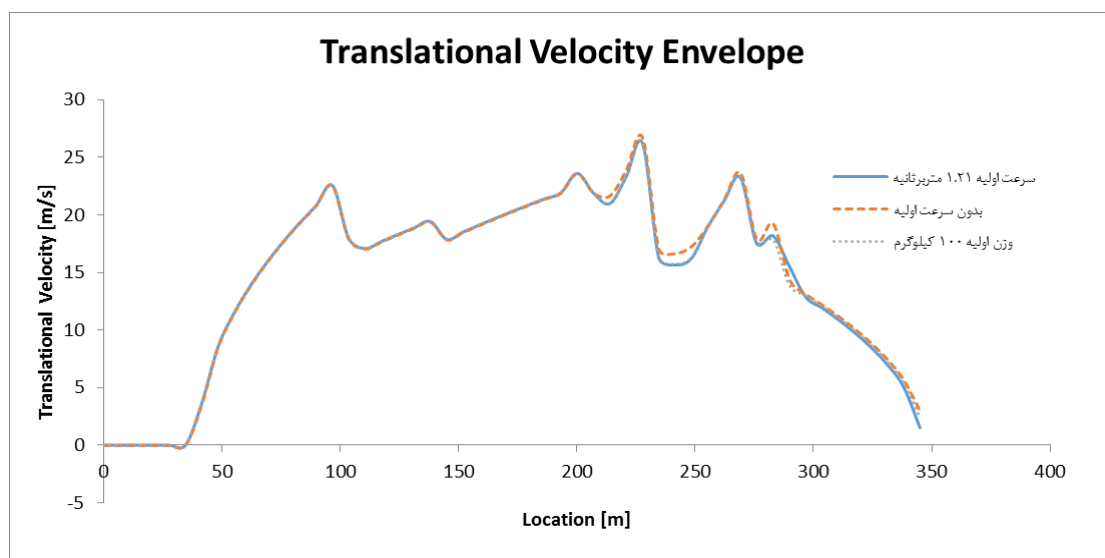
باتوجه به نمودارهای به دست آمده از شبیه سازی سنگافت می توان به این نتیجه رسید که با افزایش وزن قطعه سنگ، تغییر خاصی در میزان بیشترین مسافت طی شده و سرعت، حاصل نشده است و انرژی جنبشی کل قطعه تنها عاملی است که دست خوش تغییرات شده و به طور آشکاری افزایش یافته است. بنابراین می توان از ویژگی های توپوگرافی های دامنه و وزن قطعه سنگ های

جلوگیری کرد. هم‌چنین باتوجه به شکل (۱۰) و ارتفاع پرش، ارتفاع مانع حداقل باید ۱/۵ متر در نظر گرفته شود. ظرفیت مورد نیاز این مانع پس از شبیه‌سازی ۲۰۰ کیلوژول به دست آمده است.

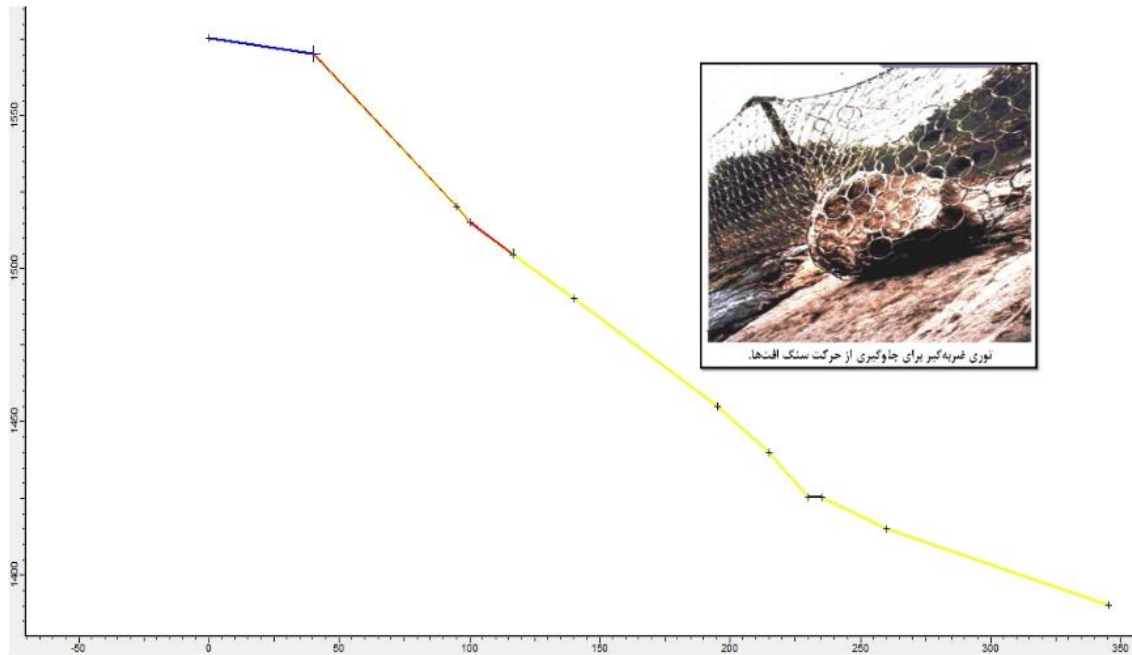
از رسیدن قطعات به جاده، می‌توان از دیوار حائل استفاده کرد. باتوجه به نتایج شبیه‌سازی به منظور جلوگیری از سنگ‌افت، مطابق شکل (۹)، محل قرار گرفتن مانع باتوجه به افت انرژی در بالای جاده در ارتفاع ۱۵۰۷ متری می‌باشد تا بتوان از رسیدن سنگ‌ها به مسیر جاده



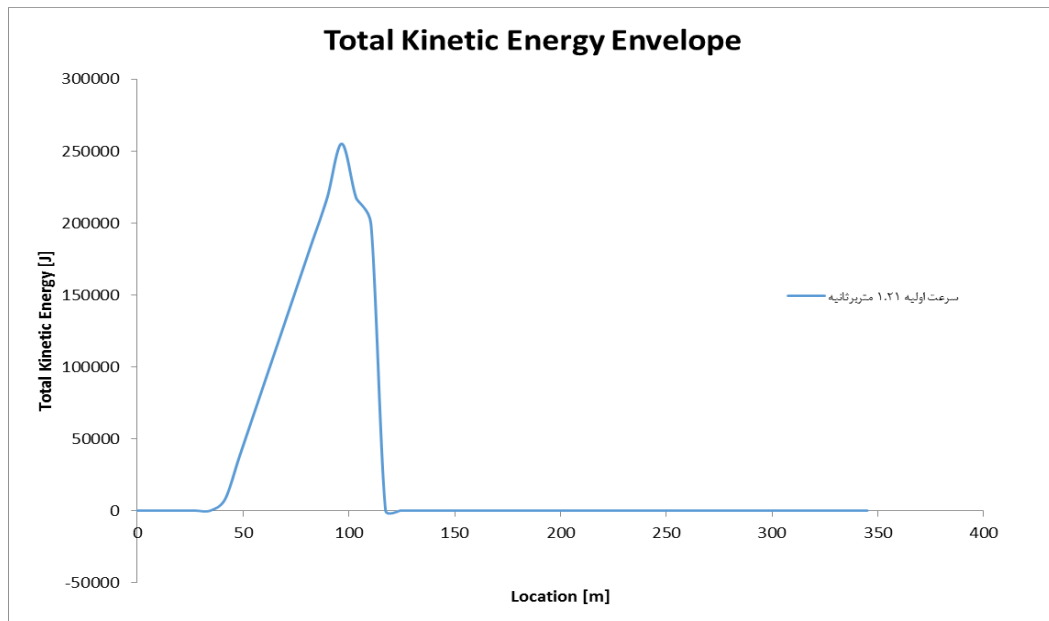
شکل ۷ انرژی جنبشی در طی ریزش (ژول)



شکل ۸ سرعت انتقالی در طی مسیر (متر بر ثانیه)



شکل ۹ محل قرار گرفتن مانع



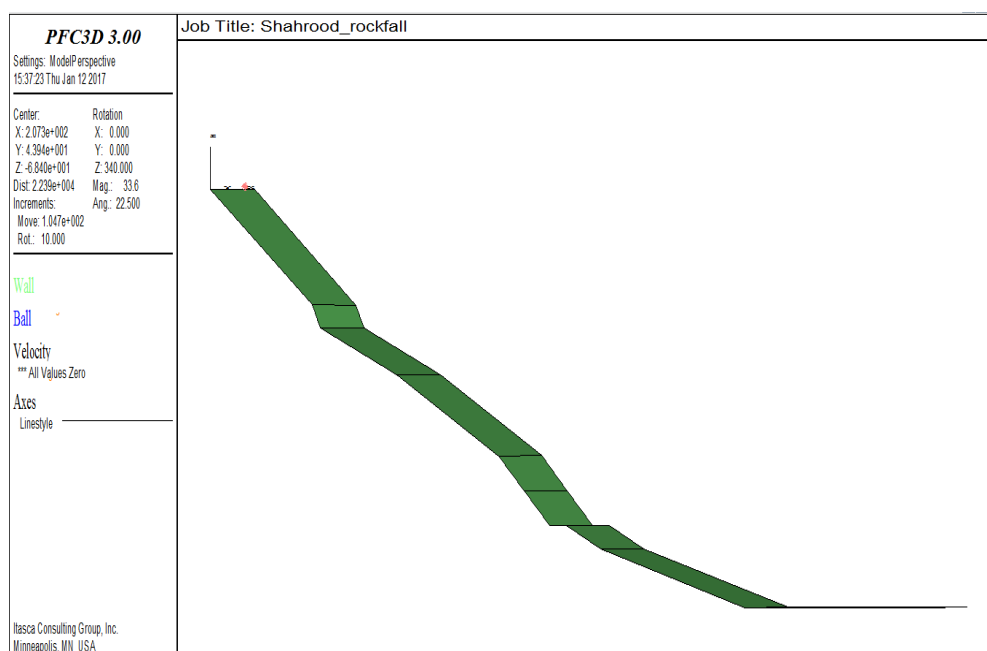
شکل ۱۰ انرژی جنبشی کل بعد از اجرای مانع

به وسیله‌ی مجموعه‌ای از عناصر کروی شکل و باتوجه به خواص آنها مطابق شکل (۱۱) تنظیم شده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش المان مجزا

PFC^{3D}

شبیه‌سازی مقطع دیواره و بلوک جداشده در تراز بالایی

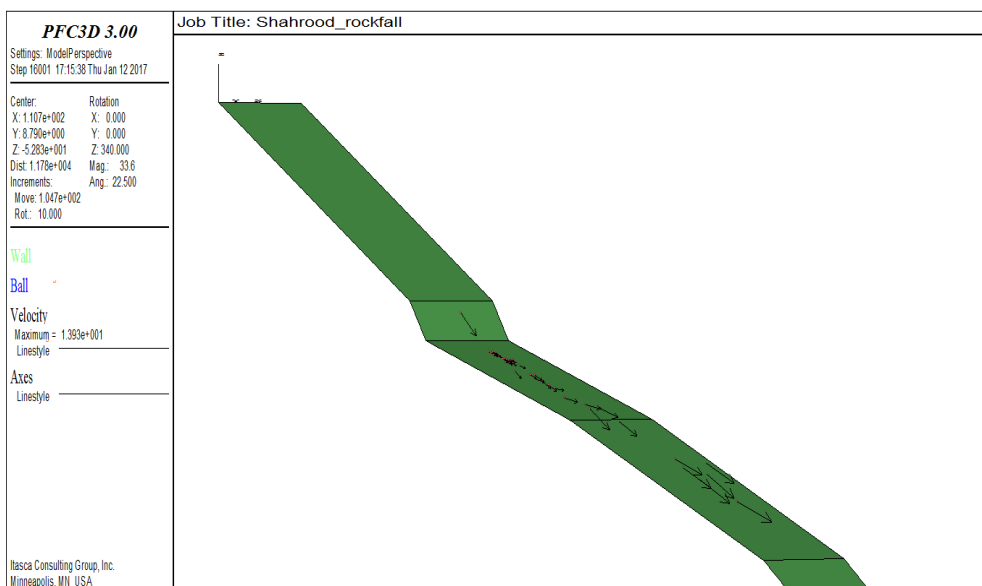


شکل ۱۱ شبیه‌سازی مقطع دیواره و بلوک جداشده در نرم‌افزار PFC^{3D}

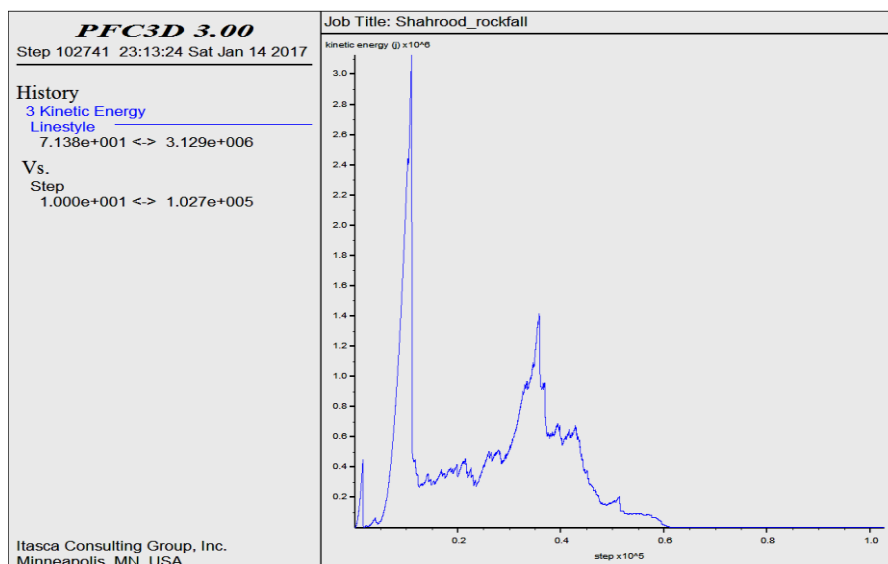
است؛ این انرژی پس از برخورد بلوک با سطح دامنه و تبدیل شدن آن به قطعات کوچک‌تر (شکل ۱۳) به شدت کاهش می‌یابد و نیز مقداری از انرژی ذخیره شده در بلوک به دلیل برخورد کاهش می‌یابد. پس از این کاهش انرژی قطعات حاصل شروع به حرکت در سطح دامنه می‌کنند که این حرکت همراه با افزایش انرژی جنبشی است. اما این افزایش تا زمانی ادامه می‌یابد که قطعات با برخورد به سطح دامنه انرژی و سرعت خود را از دست می‌دهند و نوع حرکت آنها از غلتش به غلتش با سرعت کمتر و لغزش تغییر می‌کند؛ و یا این که قطعات به سطح جاده می‌رسند و بعد از برخورد با سطح جاده تعدادی از قطعات متوقف می‌شوند، اما بقیه‌ی قطعات به حرکت خود ادامه می‌دهند که این حرکت باعث افزایش انرژی جنبشی آنها می‌شود ولی این افزایش بعد از مدتی رو به کاهش و صفر شدن می‌گذارد و دلیل آن کم شدن شیب دامنه و کوچک‌تر شدن قطعات می‌باشد.

در شبیه‌سازی با استفاده از روش المان مجزا و نرم‌افزار PFC^{3D} می‌توان با تحلیل نمودارهای به دست آمده از شبیه‌سازی، به بررسی بیشتر فرایند سنگ‌افت و تحلیل مسیر حرکت، انرژی و سرعت قطعات پرداخت. در این فرایند با توجه به این که شبیه‌سازی در سه بعد انجام می‌شود، در طول محاسبه تماسی که بین ذرات با ذرات و ذرات با دیواره وجود دارد به صورت خودکار شناسایی می‌شوند. در این نرم‌افزار می‌توان حرکت قطعات در طی مراحل مختلف را به دست آورد؛ به عنوان مثال شکل (۱۲) محل قرارگیری قطعات بعد از ۱۶۰۰ گام را نشان می‌دهد. در این مقاله، فرایند شبیه‌سازی در ۴۰۰۰۰ مرحله برای بررسی حرکت قطعات در طول دامنه انجام شده است.

با توجه به نمودار انرژی جنبشی کل در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود بلوک پس از جدا شدن از جایگاه ابتدایی خود به دلیل وزن زیاد بلوک، دارای انرژی جنبشی بالایی



شکل ۱۲ محل قرارگیری قطعات بعد از ۱۶۰۰ گام



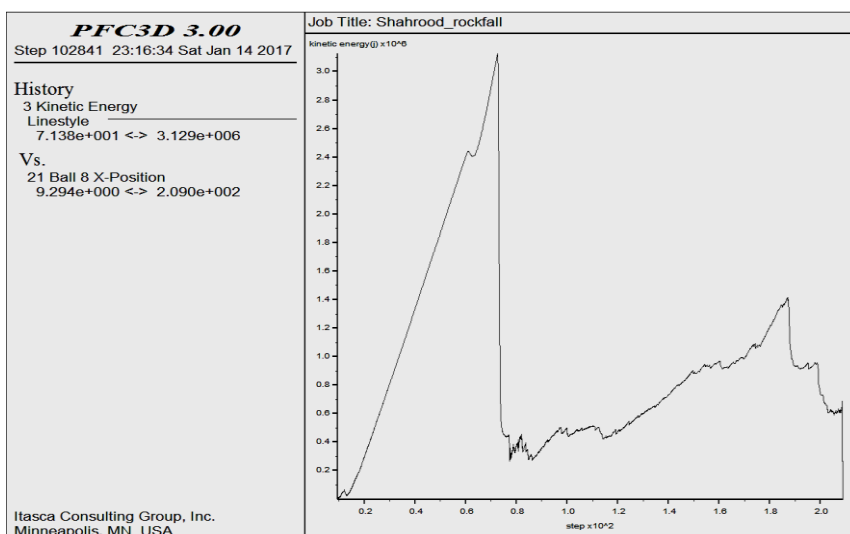
شکل ۱۳ انرژی جنبشی کل (ژول)

صعودی در انرژی جنبشی حرکت می‌کند و پس از برخورد به سطح جاده انرژی آن به شدت کاهش می‌یابد و با عبور از سطح جاده انرژی جنبشی آن تا رسیدن به پایین شیب افزایش می‌یابد و پس از آن انرژی آن کاسته می‌شود و در فاصله‌ی ۳۵۰ متری به توقف کامل می‌رسد و انرژی جنبشی آن صفر می‌شود. همان‌طور که در نمودار شکل‌های (۱۶) و (۱۷)

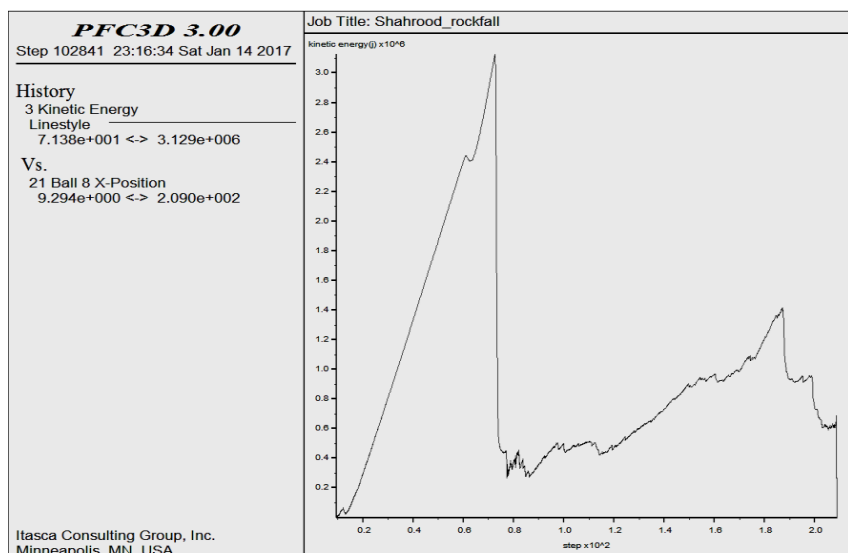
انرژی جنبشی دو توپ با محل توقف متفاوت در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده‌است. در نمودار شکل (۱۴)، توپ شماره‌ی ۸ در محدوده‌ی جاده، انرژی جنبشی برابر با صفر دارد که نشان‌دهنده‌ی این است که در سطح جاده متوقف می‌شود و قبل از آن انرژی جنبشی معادل ۴۰۰ کیلوژول دارد؛ نمودار شکل (۱۵) انرژی جنبشی توپ ۲۹ را نشان می‌دهد که این توپ با یک سیر

این، قطعاتی هم بدون این‌که توفقی در طول مسیر داشته باشند به سمت پایین دامنه حرکت می‌کنند؛ به دلیل عدم توقف، انرژی جنبشی در این قطعات افزایش می‌یابد و این افزایش باعث می‌شود قطعات مسیر طولانی‌تری را نسبت به دیگر قطعات طی کنند. به علاوه با توجه به شبیه‌سازی انجام‌شده که در شکل (۱۶) نشان داده شده‌است، بیشترین جابه‌جایی اتفاق افتاده در فاصله‌ی افقی ۳۹۳ متری از منشأ ریزش می‌باشد.

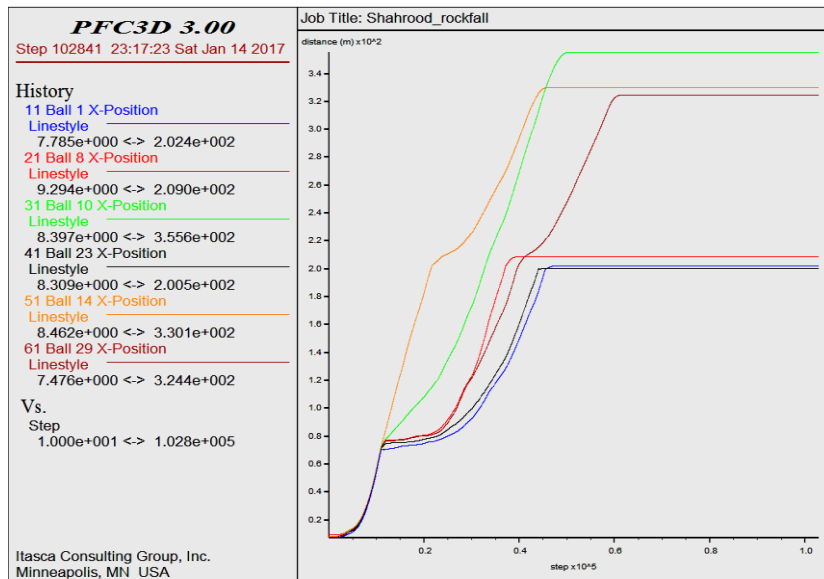
مشخص است توپ‌ها (بیانگر قطعات سنگ می‌باشند)، حالت و مکان توقف‌های متفاوتی را دارند. براساس این شکل‌ها مشاهده می‌شود که قطعات جداشده در مسیر دامنه به حرکت خود ادامه می‌دهند و تعدادی از آنها در محدوده‌ی جاده توقف دارند؛ هم‌چنین تعدادی از قطعات که در جاده متوقف شده بودند، با نیرویی که دیگر قطعات در حال افت به آنها وارد می‌کنند، به حرکت خود در دامنه ادامه می‌دهند و در انتهای دامنه متوقف می‌شوند. علاوه‌بر



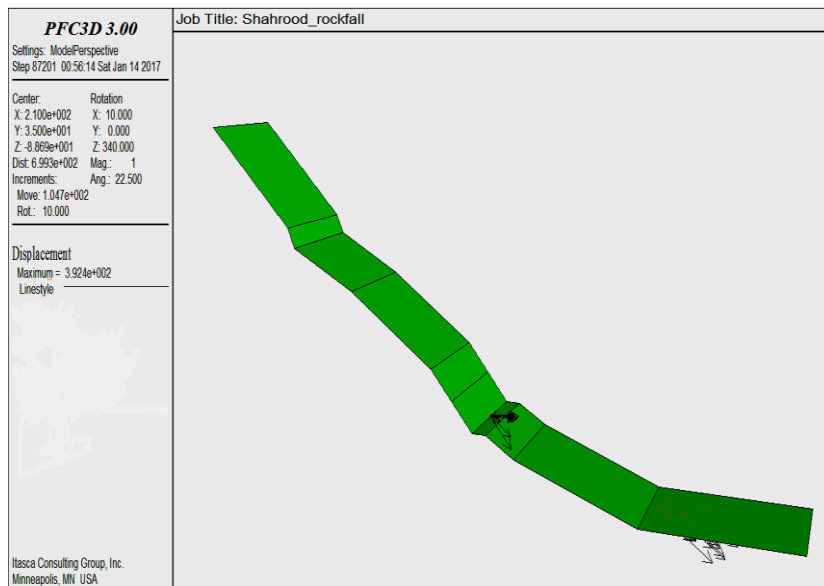
شکل ۱۴ انرژی جنبشی توپ ۸



شکل ۱۵ انرژی جنبشی توپ ۲۹



شکل ۱۶ محل توقف توپ‌های مختلف بر روی دامنه



شکل ۱۷ بیشترین مسافت طی شده توسط توپ‌ها

با انرژی جنبشی معادل ۱۰۰ کیلوژول به مناطق مسکونی می‌رسند که در صورت سنگ‌افت خسارت‌های جبران‌ناپذیری در پی خواهد داشت.

۲. همان‌طور که در نمودار انرژی جنبشی مشخص است، وقتی بلوک به صورت یکپارچه شروع به حرکت می‌کند انرژی جنبشی زیادی دارد و وقتی به قطعات کوچک‌تر تبدیل می‌شود انرژی آن به شدت کاهش

بر اساس نمودارهای به دست آمده از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار المان مجزا PFC^{3D} می‌توان نتایج زیر را به دست آورد:

باتوجه به نمودار انرژی جنبشی کل حاصل از سنگ‌افت

۱. در طول مسیر حرکت مشاهده می‌شود که وقتی قطعات به مسیر جاده می‌رسند، انرژی جنبشی آنها معادل ۴۰۰ تا ۶۰۰ کیلوژول است و هم‌چنین قطعات

خلاصه کرد:

۱. از جمله عواملی که در ارزیابی پدیده‌ی سنگ‌افت تأثیر دارند می‌توان به عوامل توپوگرافی نظیر هندسه‌ی شیب، وزن قطعات سنگی، منشأ ریزش سنگ‌ها و خواص مکانیک سنگی دامنه اشاره کرد. باتوجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت اصلی‌ترین عامل کنترل‌کننده‌ی حرکت قطعه سنگ بر روی شیب، عامل توپوگرافی است.

۲. باتوجه به این‌که انرژی قطعات سنگی با میزان مخرب و خطرناک بودن آن رابطه‌ی مستقیم دارد، از این‌رو هر چه انرژی جنبشی در قطعات بیشتر باشد میزان خسارات ناشی از آن بیشتر خواهد شد. بنابراین باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی‌ها، می‌توان با ایجاد تغییرات مناسب در عواملی که در سنگ‌افت مؤثر هستند میزان خسارت‌های احتمالی از آن را کاهش داد یا به صفر رساند. ایجاد تغییر در هندسه‌ی شیب، تغییر در ابعاد قطعات، ایجاد موانع در مکان مناسب در مسیر حرکت قطعات از راهکارهای مناسب به‌شمار می‌روند.

۳. در این مقاله سنگ‌افت با استفاده از نرم‌افزار Rocfall شبیه‌سازی شده‌است و باتوجه به نتایج حاصل از آن این پدیده مورد بررسی قرار گرفته‌است. از آنجایی که این نرم‌افزار فقط مسیر حرکت را شبیه‌سازی می‌کند و عواملی نظیر شکل، اندازه و وزن قطعات در شبیه‌سازی تأثیری ندارد و فعل و انفعال بین ذرات در مسیر حرکت در نظر گرفته نشده‌است و ذرات را جدا از هم و منفرد در نظر گرفته‌است و باتوجه به این‌که در واقعیت قطعات در حال ریزش و سقوط بر روی یکدیگر تأثیر گذارند، نتایج حاصل از شبیه‌سازی این نرم‌افزار با واقعیت سنگ‌افت فاصله دارد. از این‌رو برای پوشش و رفع نواقص و ضعف‌های این نرم‌افزار از نرم‌افزار PFC^{3D} استفاده شده‌است. در این نرم‌افزار علاوه بر در نظر گرفتن فعل و انفعال بین ذرات و دیواره‌ها، فعل و انفعال بین یک ذره با ذرات دیگر نیز

می‌یابد؛ از این کاهش انرژی می‌توان به این نتیجه رسید که کاهش ابعاد و وزن قطعات یک روش مناسب برای کم کردن انرژی جنبشی قطعات، خسارات و خطرات ناشی از آنها است.

۳. باتوجه به نمودارها و شکل توقف توپ‌ها در دامنه، اگر سنگ‌افت اتفاق بیافتد، تعداد زیادی از قطعات در محدوده‌ی جاده‌ها و مناطق مسکونی توقف دارند که این توقف‌ها راه‌بندان در جاده و خطرات مالی و جانی را در پی دارند.

۴. باتوجه به این‌که بیشترین فاصله‌ی افقی طی شده توسط قطعات ۳۹۳ متر می‌باشد، احتمال حادثه در اثر سنگ‌افت بسیار بالا می‌رود چرا که فاصله‌ی افقی مناطق مسکونی ۳۴۰ متری می‌باشد و تعداد زیادی از قطعات به این فاصله خواهند رسید.

برای جلوگیری از رسیدن قطعات به سطح جاده همان‌طور که گفته شد یکی از روش‌ها می‌تواند کم کردن وزن و ابعاد قطعات در منشأ ریزش باشد. روش دیگری که می‌شود از آن استفاده کرد ایجاد یک دیواره‌ی حائل در مسیر است که باتوجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار Rocfall می‌توان محل قرار گرفتن آن را مشخص کرد. از طرفی چون قطعات در مسیر حرکتی خود به سطح جاده برخورد می‌کنند و بعد از این برخورد به صورت جهش به حرکت ادامه می‌دهد، برای جلوگیری از ادامه‌ی این حرکت می‌توان از جوی ضربه‌گیر که کف آن با ماسه پوشیده شده و یک دیواره در کنار جاده استفاده کرد. این کار باعث می‌شود انرژی قطعات در برخورد با ماسه کاسته شود و با استفاده از دیواره‌های فلزی یا بتنی کنار جوی از ادامه‌ی حرکت آنها جلوگیری کرد و قطعات را در کنار جاده به دام انداخت. باتوجه به این‌که توپوگرافی شیب عامل مهمی در سنگ‌افت به‌شمار می‌رود، تغییر در توپوگرافی با ایجاد یک پله در دامنه نیز می‌تواند روش کارآمدی برای جلوگیری از سنگ‌افت باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق را می‌توان در موارد زیر

در جهت کاهش این خطرات انجام داد و خسارت‌های جانی و مالی ناشی از آنها را به حداقل رساند.

۵. ضمناً پیشنهاد می‌شود به‌عنوان تحقیق بعدی برای اندرکنش داخلی توده در نرم‌افزار PFC مجموعه‌ای از دانه‌ها (با اندازه‌ی کوچک‌تر) و انتخاب پارامترهای متناسب با سنگ منطقه مدل‌سازی شود تا انعکاس واقعی‌تری از سقوط سنگ در منطقه به‌دست آید.

در نظر گرفته شده‌است تا به شرایط موجود در طبیعت نزدیک‌تر باشد تا بتوان نتایج قابل قبول و مطمئن‌تری را از شبیه‌سازی به‌دست آورد.

۴. با استفاده از این دو نرم‌افزار که مکمل هم هستند می‌توان تحلیل بهتری از سنگ‌افت در یک دیواره داشت و براساس نتایج حاصل از آنها خطرات احتمالی در صورت سنگ‌افت را مشخص کرد و اقدامات حفاظتی و پیشگیرانه‌ی لازم و مناسب را

مراجع

1. Azzoni, A., La Barbera, G., and Zaninetti, A., "Analysis and Prediction of Rocfalls Using a Mathematical Model", in *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* Vol. 32, No. 7, pp. 709-24, (1995).
2. Azzoni, A., and De Freitas, M., "Experimentally Gained Parameters, Decisive for Rock Fall Analysis", *Rock mechanics and rock engineering*, Vol. 28, No. 2, pp. 111-124 ,(1995).
3. Nicot, F., Cambou, B., and Mazzoleni, G., "Design of Rocfall Restraining Nets from a Discrete Element Modelling", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 34, No. 2, pp. 99-118 ,(2001).
4. Guzzetti, F., et al., "STONE: A Computer Program for the Three-dimensional Simulation of Rock-falls", *Computers & Geosciences*, Vol. 28, No. 9, pp. 1079-1093 ,(2002).
5. Duarte ,R. M. and Marquinez, J., "The Influence of Environmental and Lithologic Factors on Rocfall at a Regional Scale: An Evaluation Using GIS", *Geomorphology*, Vol. 43, No. 1-2, pp. 117-136 ,(2002).
6. Chau, K. T., Wong, R., and Wu, J., "Coefficient of Restitution and Rotational Motions of Rocfall Impacts", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 39, No. 1, pp. 69-77 , (2002).
7. Baillifard, F., Jaboyedoff, M., and Sartori, M., "Rocfall Hazard Mapping Along a Mountainous Road in Switzerland Using a GIS-based Parameter Rating Approach", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 3, No. 5, pp. 435-442 ,(2003).
8. Guzzetti, F., Reichenbach, P., and Ghigi, S., "Rocfall Hazard and Risk Assessment Along a Ortattranspion Corridor in the Nera Valley, Central Italy", *Environmental management*, Vol. 34, No. 2, pp. 191-208 ,(2004).
9. Chau, K. T., Tang, Y., and Wong, R. H., "GIS Based Rocfall Hazard Map for Hong Kong", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41 ,No. SUPPL. 1 ,(2004).
10. Perret, S., Stoffel, M., and Kienholz, H., "Spatial and Temporal Rocfall Activity in a Forest Stand in the Swiss Prealps—a Dendrogeomorphological Case Study", *Geomorphology*, Vol. 74, No. 1-4, pp.

- 219-231 ,(2006).
11. Saboya Jr ,F., da Glória Alves, M., and Pinto, W. D., "Assessment of Failure Susceptibility of Soil Slopes Using Fuzzy Logic", *Engineering geology*, Vol. 86, No. 4, pp. 211-224 ,(2006).
 12. Batterson, M., McCuaig, S., and Taylor, D., "Mapping and Assessing Risk of Geological Hazard on the Northeast Avalon Peninsula and Humber Valley, Newfoundland", *Current Research. Government of Newfoundland and Labrador, Department of Natural Resources, Geological Survey*, Report, No. pp. 06-1 ,(2006).
 13. Topal, T., Akin, M., and Ozden, U. A., "Assessment of Rocfall Hazard around Afyon Castle, Turkey", *Environmental Geology*, Vol. 53, No. 1, pp. 191-200 ,(2007).
 14. Lan, H., Martin, C. D., and Lim, C. H., "Rocfall Analyst: A GIS Extension for Three-dimensional and Spatially Distributed Rocfall Hazard Modeling", *Computers & Geosciences*, Vol. 33, No. 2, pp. 262-279 ,(2007).
 15. Giacomini, A., et al., "Experimental Studies on Fragmentation of Rock Falls on Impact with Rock Surfaces", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 46, No. 4, pp. 708-715 ,(2009).
 16. Choi, Y., et al., "Engineering Geological Investigation into Rocfall Problem: A Case Study of the Seated Seokgayeorae Image Carved on a Rock Face at the UNESCO World Heritage Site in Korea", *Geosciences Journal*, Vol. 13, No. 1, pp. 69-78 ,(2009).
 17. Tunusluoglu, M., and Zorlu, K., "Rocfall Hazard Assessment in a Cultural and Natural Heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey)", *Environmental geology*, Vol. 56, No. 5, pp. 963-972 ,(2009).
 18. Antoniou, A. A., and Lekkas, E., "Rocfall Susceptibility Map for Athinios Port, Santorini Island, Greece", *Geomorphology*, Vol. 118, No. 1-2, pp. 152-166 ,(2010).
 19. Rammer, W., et al., "Evaluation of a 3-D Rocfall Module within a Forest Patch Model", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, No. 4, pp. 699-711 ,(2010).
 20. Huang, C.-C. and Yuin, S.-C., "Experimental Investigation of Rainfall Criteria for Shallow Slope Failures", *Geomorphology*, Vol. 120, No. 3-4, pp. 326-338 ,(2010).
 21. Volkwein ,A., et al., "Rocfall Characterisation and Structural Protection– A Review", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 11, No. 9, pp. 2617-2651 ,(2011).
 22. Spadari, M., et al., "Statistical Evaluation of Rocfall Energy Ranges for Different Geological Settings of New South Wales, Australia", *Engineering geology*, Vol. 158, No. pp. 57-65 ,(2013).
 23. Youssef, A. M., et al., "Assessment of Rocfall hazard at Al-Noor Mountain, Makkah City (Saudi Arabia) Using Spatio-temporal Remote Sensing Data and Field Investigation", *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 101, No. pp. 309-321 ,(2015).
 24. Keskin, B., et al., "Investigation of Rocfall Potential of Zonguldak-Kilimli Roadway (Turkey)",

-
- Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 13, No. 16, pp. 1-11 ,(2020).
25. He, K., et al., "Failure Mode Analysis of Post-seismic Rocfall in Shattered Mountains Exemplified by Detailed Investigation and Numerical Modelling", *Landslides*, Vol. 18, No. 1, pp. 425-446 ,(2021).
26. Stevens, W. D., RocFall, A Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rocfalls, (1998).
27. Preh, A. and Poisel, R., 3D Modelling of Rock Mass Falls Using the Particle Flow Code PFC3D. 2007: na.
28. Lee, J.-H., et al., "Evaluation of Land Subsidence Risk Depending on Grain Size and Verification Using Numerical Analysis", *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No. 2, pp. 133-141,(2017).

