

جغرافیا و توسعه شماره ۳۲ پاییز ۱۳۹۲  
وصول مقاله : ۱۳۹۰/۵/۱۱  
تأیید نهایی : ۱۳۹۱/۹/۱۴  
صفحات : ۱۲۶ - ۱۰۳

## مدل سازی مسیر ریزش و پهنه بندی خطر آن در محیط GIS مورد: محور هراز، دامنه امامزاده علی - آمل

سعید مدلل دوست<sup>۱</sup>، سارا اولادزاده<sup>۲</sup>، سید محمود میثاقی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مقاله مدل سازی سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی در تلفیق با مدل سازی ۳ بُعدی جهت ارزیابی خطر سنگ ریزش مورد استفاده قرار گرفت. مدل ۳ بُعدی سنگ ریزش فرآیندهای پویا و دینامیک را بر اساس یک سطح سلولی بررسی می نماید. این مدل از داده های ورودی به شکل پارامترهای توزیعی رستری و عوارض پلی گونی که در محیط GIS ایجاد شده اند استفاده می کند. نتایج حاصل از شبیه سازی فرآیند سنگ ریزش، مسیر ۳ بُعدی سنگ ریزش و سرعت عوارض آن، یا به صورت نقطه ای یا خطی در Shp فایل های سه بُعدی ذخیره شد. مدل سازی توزیعی رستری بر پایه مسیرهای ۳ بُعدی سنگ ریزش و تکنیک زمین آمار مکانی، بیانگر توزیع فراوانی مکانی، ارتفاع پرش و یا ارتفاع جهش، و انرژی جنبشی سنگ های در حال ریزش می باشد که بر این اساس توزیع خطر سنگ ریزش و مسیر حرکت سنگ با احتساب این قبیل ویژگی های سنگ ریزشی برای منطقه ی مورد مطالعه به دست آمد. نتایج نشان داد که تنها ۱۵ درصد از مناطق مستعد سنگ ریزش از شدت خطر متوسط به بالا برخوردار بوده که همگی آنها در شیب بالای ۶۰ درصد قرار داشته و از نوع دامنه های واریزه ای می باشند. کلیدواژه ها: توده برآمده، فرآیند ۳ بُعدی سنگ ریزش، مدل سازی توزیعی، GIS.

## مقدمه

وقوع بلایا و سوانح طبیعی هر ساله در نقاط مختلف جهان خسارات جانی، مالی و زیست‌محیطی قابل توجهی به بار می‌آورد. حرکت‌های توده‌ای نیز نوع خاصی از سوانح طبیعی و فرمی از فرآیندهای دامنه‌ای هستند که زاینده‌ی شرایط ژئومورفولوژیک، هیدرولوژیک و زمین‌شناسی محلی می‌باشند. این شرایط به همراه فرآیندهای ژئودینامیک، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، مقدار، شدت، و تداوم بارندگی و زمین‌لرزه‌ها می‌توانند باعث شکل‌گیری سنگ‌ریزش شوند (مدلل‌دوست، ۱۳۸۷: ۵۶). استراتژی مطالعه‌ی سنگ‌ریزش شامل شناخت فرایند، تحلیل خطر و پیش‌بینی آن در آینده برای کاهش پیشرفت و خسارات ناشی از آن می‌باشد (پورقاسمی و همکاران، ۱۳۸۶: ۷۳). گرچه میزان خسارت اقتصادی ناشی از حرکات توده‌ای در کشورهای پیشرفته بیشتر است، ولی طبق مطالعات انجام شده توسط مرکز مطالعات بلایای طبیعی سازمان ملل متحد برای بسیاری از کشورهای در حال توسعه این خسارات یک تا دو درصد تولید ناخالص ملی آنهاست (مهدوی فر، ۱۳۷۶: ۷). نظر به تأثیرات نامطلوبی که وقوع حرکات توده‌ای و سنگ‌ریزش‌ها بر روی سامانه‌های اجتماعی-اقتصادی و طبیعی دارند، لزوم شناخت مناطق حساس به سنگ‌ریزش برای اجتناب از خطر و جلوگیری از بروز خسارات مالی، جانی، زیست‌محیطی و شروع اقدامات حفاظتی و پیشگیری امری بسیار ضروری به نظر می‌رسد (کرم، ۱۳۸۰: ۱۳). امروزه در کشورهای درگیر با مسأله‌ی سنگ‌ریزش تمایل زیادی جهت پهنه‌بندی خطرات آن در نقاط مختلف دنیا وجود دارد که با توجه به هدف، مقیاس، تجارب محققین، و تکنیک مورد استفاده از دقت و صحت متفاوتی برخوردار است (قائم‌مقامی و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۱۳). البته مطالعات نشان داده است که در بررسی سنگ‌ریزش در محیط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی به دلیل قابلیت اعمال

فاکتورهای متعدد تأثیرگذار بر روی آن از دقت و کارایی بیشتری برخوردار است (مرادی و همکاران، ۱۳۸۶: ۹۴). همچنین در بررسی نقش حرکات توده‌ای در ناپایداری دامنه تحقیقات زیادی در داخل کشور انجام شده است که به چندی از آنها اشاره می‌شود: (احمدی، ۱۳۷۴: ۵۳؛ شادفر و همکاران، ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴: ۴۶؛ فاطمی عقدا و همکاران، ۱۳۸۲: ۲۷؛ گرایبی و همکاران، ۱۳۸۶: ۳۱۱؛ محمدی و همکاران، ۱۳۸۶: ۱۹۲).

در اغلب اوقات خطرات ناشی از سنگ‌ریزش را نمی‌توان دفع کرد (Hants at all, 2003: 653). به دلیل این‌که وقوع این قبیل خطرات هم از نظر مکانی و هم از نظر زمانی متنوع می‌باشد، روش‌های آمار مینا که اغلب به کمک مدل‌سازی رایانه‌ای انجام می‌شود به ابزاری استاندارد برای ارزیابی خطر سنگ‌ریزش و طراحی اقدامات حفاظتی تبدیل شده است. مدل‌سازی فرآیندهای فیزیکی سنگ‌ریزش نیاز به بررسی از هم-گسیختگی اجزاء سنگی، افتادن یا پرش و جهش بعدی، خرد شدن، چرخش یا لغزش و نشست انتهایی دارد (Evans & Hanger, 1993: 622; Hutchinson, 1988: 7; Guzzetti at all, 2002: 1080; Frayssines & Hants, 2006: 259; Grasmueck, 1996: 1052; Pipan at all, 2003: 41; Benson, 1995: 179) بدون در نظر گرفتن محدودیت حجمی، سنگ‌ریزش‌ها با انرژی و تحرک بالای خود توصیف می‌شوند. فرآیندهای دینامیکی سنگ‌ریزش‌ها تحت الشعاع خصوصیات توزیعی مکانی و زمانی، مانند شرایط از هم-گسیختگی، ویژگی‌های هندسی و مکانیکی بلوک‌های سنگی و دامنه‌های سنگی قرار گرفته است (Algiardi & Crosta, 2003: 459; Jaboyedoff at all, 2005: 625; Grasmueck at all, 2005: 17; Pettinelli at all, 1996: 279; Toshioka at all, 1995: 120; Stevens at all, 1995: 127).

بنابراین، توانایی برنامه‌ریزی رایانه در مدیریت و استفاده‌ی پربازده از اطلاعات مکانی نقش مؤثری را در تحلیل خطر سنگ‌ریزش ایفا می‌کند. صرفاً انتخاب پروفیل دو بُعدی برای به دست آوردن نتایج تحلیلی

سنگ‌ریزش و تعیین مسیر حرکت سنگ در منطقه‌ی امام‌زاده علی جاده هراز استفاده شده است.

### مواد و روش‌ها

#### نحوه‌ی مدل‌سازی مسیر ۳ بُعدی سنگ‌ریزش در GIS

این کار در ۲ بخش اصلی انجام شد: ۱- شبیه‌سازی ۳ بُعدی مسیر سنگ‌ریزش و ۲- مدل‌سازی رستری توزیع مکانی سنگ‌ریزش. ابتدا یک توده‌ی برآمده یا نقطه‌ی ورود را برای شبیه‌سازی مسیر سنگ‌ریزش مورد استفاده قرار دادیم. نقطه‌ی ورود عبارت است از مکان جغرافیایی بر روی دامنه‌ای که احتمال ریزش سنگ در آن به لحاظ کلیه‌ی شرایط طبیعی (زمین‌ساختی، ژئومورفولوژیکی، سنگ‌شناسی، شیب و شرایط اقلیمی) بالاست. این نقطه (نقاط) با دید کارشناسی در منطقه‌ی مورد مطالعه شناسایی شد و به صورت یک فایل وکتوری نقطه‌ای وارد GIS شد. اتوکورولیشن مکانی فاکتورهای تأثیرگذار بر سنگ‌ریزش (شیب هندسی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و ...)، کورولیشن مکانی رویدادهای سنگ‌ریزشی را از نقطه نظر میزان به‌کارگیری توزیع سرعت و انرژی تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. بنابراین مدل‌سازی رستری مبتنی بر زمین‌آمار مکانی، در رابطه با تنوع فراوانی مکانی و انرژی سنگ‌ریزش با در نظر گرفتن عدم قطعیت آن‌ها به‌کار گرفته می‌شود. نمایش سطوح پیش‌بینی قابل اطمینان توزیع مکانی فراوانی سنگ‌ریزش و انرژی را می‌توان با استفاده از انواع روش‌های زمین‌آمار (ترجیحاً کریجینگ) انجام داد. در پایان، اندازه‌گیری خطر سنگ‌ریزش با احتساب تمامی این لایه‌های رستری انجام گرفت.

#### سامانه‌ی مختصاتی و صفحه‌ی سلولی

مورفولوژی سطح چگونگی ریزش سنگ را تعیین می‌کند. مدل‌سازی رقومی ارتفاعی ابزاری قدرتمند در توصیف شاخصه‌های فیزیکی سطحی است که دارای توپوگرافی و مشتقات آن مانند (شیب، جهت و انحنا

واقعی با استفاده از مدل‌های دو بُعدی سنگ‌ریزش قابل اطمینان نمی‌باشد. توانایی این مدل‌ها محدود به تهیه‌ی نمونه‌های مکانی توزیع مسیر سنگ‌ریزش، یا ارتفاع و انرژی پرش و جهش سنگ‌ریزش می‌باشد.

تنها تعداد کمی برنامه‌ی سه بُعدی سنگ‌ریزش جهت مدل‌سازی سه بُعدی موجود می‌باشد (Desceudres & Zimmermann, 1987: 340). این مدل‌ها معمولاً از داده‌های توپوگرافی که خود از دیگر منابع داده‌ای، مثل داده‌های مکان زمین در شبکه نامنظم مثلثاتی (TIN) یا شبکه‌ی منظم (GRID) به دست آمده‌اند، استفاده می‌کنند که البته ساختارهای داده‌ای استاندارد در اکثر نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌باشند. همچنین طیفی از داده‌های توصیفی موجود، از قبل در پایگاه داده‌ی GIS، نظیر زمین‌شناسی، کاربری اراضی یا پوشش گیاهی و نوع سنگ که به‌طور خودکار در تحلیل قرار نگرفته‌اند، ذخیره می‌شود.

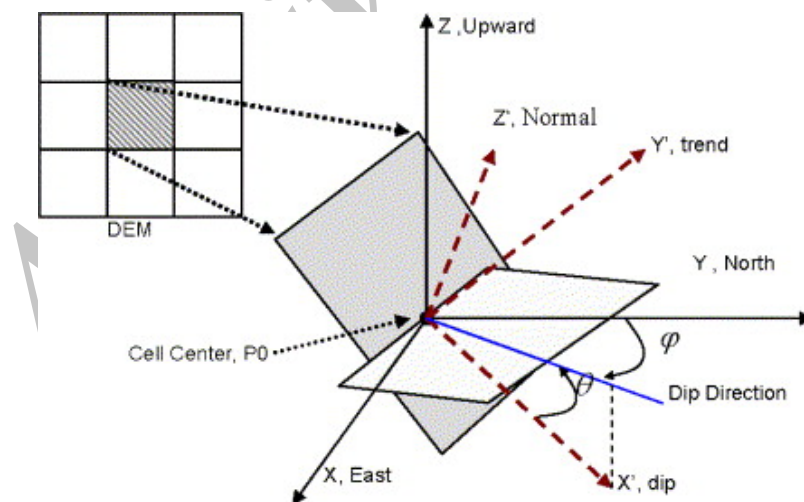
سرانجام، کنترل کیفی و تضمین کیفی به هنگام انتقال داده‌ها در بین برنامه‌های مختلف مد نظر قرار می‌گیرد. مدل‌سازی توزیعی GIS مبنا در تلفیق با مدل‌سازی سه بُعدی فرآیند فیزیکی سنگ‌ریزش به ابزاری کارآمد در ارزیابی خطر سنگ‌ریزش در مناطق بزرگ تبدیل شده است (Mc Neil at all, 2002: 35; Dorren, 2003: 71; Dorren at all, 2004: 159; Guzzetti at all, 2004: 196). تکنیک مدل‌سازی رستری توزیعی (یا GRID) برای نمایش توزیع فراوانی مکانی سنگ‌ریزش، ارتفاع جهش یا پرتاب (انرژی پتانسیل) و انرژی جنبشی بر پایه‌ی نتایج حاصل از فرآیند مدل‌سازی ۳ بُعدی سنگ‌ریزش به‌کار گرفته می‌شود. هر سه این فاکتورها باید در تلفیق با یکدیگر برای نائل شدن به یک برآورد واقعی از توزیع مکانی خطر سنگ‌ریزش مورد بررسی و توجه قرار گیرد (Jaboyedoff at all, 2005: 628). در این مقاله از منطق به کار گرفته شده در برنامه RA در تحلیل خطر

می‌باشد. این مدل اغلب همانند GIS با دقت بالا، مدل‌سازی ۳ بعدی سطح پیوسته‌ی توپوگرافی را انجام می‌دهد. استفاده از مدل رقومی ارتفاعی سلول مینا (DEM) به عنوان ورودی، توصیف فرآیند فیزیکی سنگ‌ریزش را امکان‌پذیر ساخته، سپس ویژگی‌های این فرآیند را از نقطه نظر مسیر ۳ بعدی سنگ‌ریزش که شامل آفت یا پرتاب آزاد (مسیر پرتاب) و جهش، چرخش یا لغزش و نشست نهایی می‌باشد کمی می‌سازد. برای شبیه‌سازی مسیر ۳ بعدی سنگ‌ریزش، دو سامانه‌ی مختصاتی راست گرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دو سامانه عبارتند از سامانه‌ی مختصاتی پایه (سامانه‌ی کارت‌زین جهانی) و سامانه‌ی مختصات شیب محلی (شکل ۱). در سامانه‌ی مختصاتی پایه، محور  $X$  رو به شرق، محور  $Y$  رو به شمال و محور  $Z$  رو به بالا می‌باشد. در سامانه‌ی مختصاتی شیب محلی، محورهای  $X'$  و  $Y'$  مماس با سطح شیب محلی هستند

که بر روی صفحه‌ی سلولی ساخته شده از DEM قرار گرفته است. هر صفحه‌ی سلولی شیب هندسی را با ترسیم توپوگرافی پیوسته نشان می‌دهد. سامانه‌ی مختصاتی محلی برای هر صفحه‌ی سلولی به صورت محور  $X'$  با جهت رو به پایین، محور  $Y'$  با جهت مایل و محور  $Z'$  به صورت عمود بر صفحه تعریف می‌شود. نقطه مبدأ، نقطه‌ی مرکزی در شبکه‌ی سلولی است. سطح صفحه برای هر سلول با معادله زیر تعریف می‌شود:

$$Ax + By + Cz + D = 0$$

که  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ضرایب بردار نرمال در صفحه و  $D$  فاصله از مبدأ می‌باشند. در تحلیل سنگ‌ریزش این مسأله حائز اهمیت است که تعیین کنیم چگونه سنگ پس از برخورد به سطح عکس‌العمل نشان می‌دهد.



شکل ۱: تعیین سامانه مختصاتی و صفحه سلولی

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۰

برداری که ۲ لبه صفحه را نشان می‌دهند تعیین می‌شود. زاویه‌ی شیب  $\theta$  و زاویه‌ی جهت  $\varphi$  برای ایجاد بردار نرمال هر صفحه سلولی به کار می‌رود. واحد بردار

دو سامانه‌ی مختصاتی  $(X, Y, Z)$ ,  $(X', Y', Z')$  تعریف شده است. صفحه‌ی سلولی با استفاده از مرکز سلولی (PO) تعریف می‌شود، زاویه‌ی جهت  $\varphi$  و زاویه‌ی شیب  $\theta$  می‌باشد. معمولاً نرمال بودن صفحه از حاصل ضرب ۲

زاویه‌ی شیب و زاویه‌ی جهت با استفاده از زوایای Euler در انتقال بین این دو سامانه‌ی مختصاتی طراحی می‌شوند. در سامانه‌ی راست‌گرد، ماتریس انتقال از سامانه‌ی مختصاتی جهانی به سامانه‌ی مختصاتی محلی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\varphi\cos(90-\varphi) & \cos\theta\cos\varphi\sin(90-\varphi) & -\sin\theta & 0 \\ -\sin(90-\varphi) & \cos(90-\varphi) & \cos(90-\varphi) & 0 \\ \sin\theta\sin\varphi\cos(90-\varphi) & \sin\theta\sin\varphi\sin(90-\varphi) & \sin\theta\sin\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(شیب) در امتداد محور Y می‌نماید. ماتریس انتقال برگشت به سامانه مختصاتی جهانی عبارت است از:

$$a'_{ij} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi-90)\cos\theta & \sin(\varphi-90) & \cos(\varphi-90)\sin\theta & 0 \\ -\sin(\varphi-90)\cos\theta & \cos(\varphi-90) & -\sin(\varphi-90)\sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

در مدل‌سازی ۳ بُعدی، تکنولوژی بسیار پیشرفته‌ای برای مدیریت اثر ۳ بُعدی شکل سنگ طراحی شده است. در حقیقت، بررسی جداگانه اندازه و شکل سنگ نیاز به محاسبات پیچیده و دشواری در ارزیابی خطر سنگ‌ریزش در پی خواهد داشت. به دلیل محدودیت تحقیقات نظری در زمینه‌ی تأثیر شکل سنگ‌ریزش در حالت ۳ بُعدی، از شیوه‌ی معمول و متداول "توده برآمده" برای مدیریت شبیه‌سازی مسیر سنگ‌ریزش بدون در نظر گرفتن اثر شکل سنگ استفاده شد. مدل‌سازی حرکتی فرآیند سنگ‌ریزش در مراحل زمانی ناپیوسته و به‌طور خودکار هم توسط اندازه سلول و هم با سرعت ذره تعیین شد. الگوریتم‌های حرکتی امکان مدل‌سازی پرتاب یا سقوط آزاد، حرکات کوبشی، جهشی، لغزشی و چرخشی را در فضایی ۳ بُعدی فراهم نمودند (شکل ۲).

نرمال را می‌توان در سامانه‌ی کارترین جهانی به صورت معادله‌ی مذکور نشان داد:

$$Un = (\sin\theta\sin\varphi, \sin\theta\cos\varphi, \sin\theta)$$

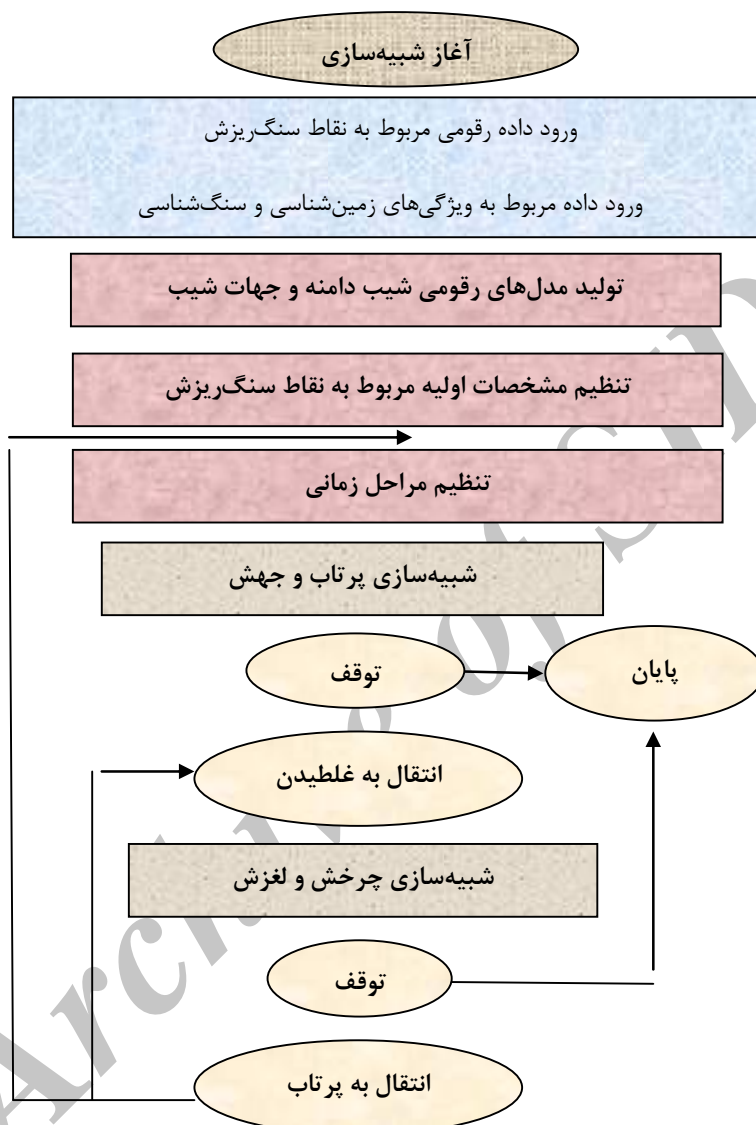
که  $\theta$  زاویه شیب و  $\varphi$  زاویه جهت می‌باشد. جهت کسینوس‌ها یا ماتریس‌های انتقال نیز توسط میانگین‌های

این ماتریس اقدام به اولین چرخش  $90-\varphi$  (زاویه چرخش) در امتداد محور Z، و سپس چرخش  $\theta$

به منظور ایجاد سطح معنی‌دار برای نمایش توپوگرافی واقعی، از مجموعه همسایگی ماتریس  $3 \times 3$  یا  $5 \times 5$  برای محاسبه ارزش میانگین زاویه‌ی جهت و زاویه‌ی شیب استفاده می‌شود. این مقدار میانگین بیانگر شاخص شیب محلی است. سپس از شیب و جهت میانگین برای ایجاد سطح هندسی استفاده می‌شود. این روش از وقوع نتایج غیر واقعی که ممکن است به خاطر سلول‌های غیرقطعی به‌هنگام سقوط ایجاد شده باشد جلوگیری می‌نماید.

### الگوریتم حرکتی

در اکثر برنامه‌های شبیه‌سازی سنگ‌ریزش، یک توده‌ی برآمده برای محاسبه‌ی مسیر ۳ بُعدی سنگ‌ریزش مورد استفاده قرار می‌گیرد (Stevens, 1998: 81; Jones at all, 2000: 18; Guzzetti at all, 2002, 1086, 2004: 200).



شکل ۲: الگوریتم تعیین مسیر سنگ‌ریزش  
مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

به‌عنوان مثال، این امکان وجود دارد که بردارهای شیب، چرخش یا لغزش را در هر جهتی بالا یا پایین برد. به‌طور کلی می‌توان رفتار سنگ‌ریزش را به‌صورت برداری نمایش داد:

$$v = xi + yj + zk$$

که  $i$  بردار یک‌ه در محور  $x$ ،  $j$  بردار یک‌ه در محور  $y$ ، و  $k$  بردار یک‌ه در محور  $z$  می‌باشد.

عملیات برداری ۳ بُعدی سنگ‌ریزش یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی ۳ بُعدی سنگ‌ریزش است. این بردار کمیت فیزیکی سنگی را که در فضای ۳ بُعدی جهت‌دار می‌باشد نشان داده و می‌تواند برای نمایش وضعیت، جابجایی، سرعت، شتاب، نیرو و حرکت سنگ مورد استفاده قرار گیرد.

بردار ۳ بُعدی را می‌توان برای پیش‌بینی چگونگی رفتار سنگ در هنگام برخورد مورد استفاده قرار داد.

برای هر سلول گریدی (شبکه‌ای) در صفحه، دو فاکتور خسارت در نظر گرفته می‌شود: ۱- ضریب خسارت نرمال  $R_N$  ۲- ضریب خسارت مماسی  $R_T$ . در سامانه مختصاتی شیب محلی، بردارهای سرعت جهش به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$V'_{Dip} = V_{Dip} R_T,$$

$$V'_{Trend} = V_{Trend} R_T,$$

$$V'_N = V_N R_N,$$

که  $(V'_{Dip}, V'_{Trend}, V'_N)$  بردارهای سرعت جهش بدون هدررفت انرژی،  $V_{Dip}$  مؤلفه‌ی سرعت سنگ در راستای شیب پایینی سلول،  $V_{Trend}$  مؤلفه‌ی سرعت سنگ در راستای مایل،  $V_N$  مؤلفه‌ی سرعت سنگ در راستای شیب نرمال سلول،  $R_N$  ضریب خسارت نرمال در بازه  $[0,1]$  و  $R_T$  ضریب خسارت مماسی در بازه  $[0,1]$  می‌باشد. الگوریتم چرخش یا لغزش برای محاسبه حرکت سنگ‌ها پس از خروج از الگوریتم پرتاب مورد استفاده قرار می‌گیرد. سنگ‌ها می‌توانند بر روی هر قسمتی از شیب و بر روی هر مانعی لغزش نمایند. چنانچه سرعت تا مقدار کمی (مثلاً  $0.5$  متر بر ثانیه) کاهش یابد، پس از برخورد سنگ با زمین، چرخش یا لغزش اتفاق می‌افتد. فرض می‌کنیم که حرکت چرخشی یا لغزشی سنگ در پایین دست در راستای پرشیب‌ترین مسیر سلول شیب و حرکت چرخشی یا لغزشی سنگ در بالادست در راستای مسیری در صفحه سلولی (نمایش در صفحه  $XY$ ) هدایت می‌شود. جزء چرخشی/لغزشی در هر صفحه‌ی سلولی شامل خط ۳ بُعدی منفردی است که طول آن در وهله‌ی اول به وسیله‌ی زاویه‌ی شیب  $\theta$  و زاویه اصطکاک  $\varphi$  تعیین می‌شود. در هر سلول، سنگ در مرز یک سلول شروع به چرخش/لغزش کرده و در مرز سلول دیگر در امتداد مسیر لغزش پایان می‌یابد. سرعت نهایی حرکت لغزشی سنگ در اولین صفحه سلولی به بزرگی سرعت اولیه حرکت در صفحه سلولی بعدی بستگی دارد.

مسیر سقوط یا پرتاب سنگ به‌وسیله‌ی معادله سهمی به صورت پارامتری محاسبه می‌شود. هم‌چنین مسیر را می‌توان به‌صورت بردار ۳ بُعدی زیر نمایش داد:

$$v_p = \begin{bmatrix} V_{x0t} + X_0 \\ V_{y0t} + Y_0 \\ -\frac{1}{2}gt^2 + V_{z0t} + Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{2}gt^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{x0} \\ V_{y0} \\ V_{z0} \end{bmatrix} t + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

که  $g$  شتاب حاصل از نیروی جاذبه ( $9.8m/s^2$ )،  $X_0, Y_0, Z_0$  وضعیت اولیه سنگ در فضای ۳ بُعدی، و  $V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}$  سرعت اولیه سنگ در جهات  $X, Y, Z$  می‌باشد. بردار سرعت تخته‌سنگ به‌صورت زیر می‌باشد:

$$v_p = \begin{bmatrix} V_{x0} \\ V_{y0} \\ V_{z0} - gt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -gt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{x0} \\ V_{y0} \\ V_{z0} \end{bmatrix}$$

دشواری در استفاده از الگوریتم پرتاب، تعیین نقطه‌ی برخورد در انتهای مسیر پرتاب سنگ می‌باشد. نقطه‌ی برخورد، محل تقاطع سهمی مسیر پرتاب با سطح سلولی گرید (شبکه‌ای) می‌باشد. برای مشخص کردن نقطه‌ی برخورد با صفحه‌ی سلولی، در ابتدا نمونه‌هایی از نقاط با موقعیت داخلی/خارجی نسبت به صفحه برای تعیین این‌که آیا برخوردی رخ داده یا خیر، انتخاب شد. نقطه‌ی برخورد از طریق معادله درجه دوم ایجاد شده از تلاقی معادلات سهمی و خطی به‌دست می‌آید. با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، نقطه‌ی برخورد را می‌توان با محاسبه‌ی محل برخورد نقطه بین خط و صفحه در مراحل زمانی بسیار کوتاه به‌دست آورد. ابتدا محل تقاطع مشخص شده، بردار جهش با استفاده از قانون هندسه نور تعیین می‌شود. سپس بردار سرعت جهش بر اساس ضرایب خسارت محاسبه می‌شود.

سلول مسطح یا شیب بالادست، نخست فاصله توقف سنگ محاسبه می‌شود. اگر فاصله‌ی توقف بیشتر از طول مسیر باشد، سرعت خروج محاسبه شده و لغزش تا سلول بعدی ادامه می‌یابد.

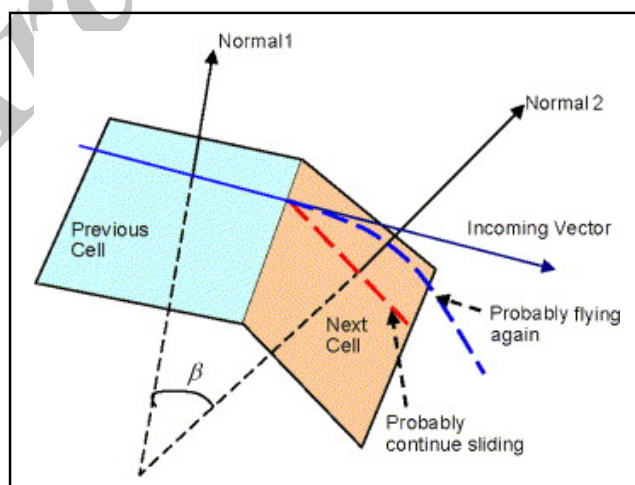
اگر فاصله‌ی توقف کمتر از طول مسیر باشد، سرعت خروج صفر می‌شود و شبیه‌سازی متوقف خواهد شد. اگر زاویه‌ی  $\beta$  بین بردارهای نرمال ۱ و نرمال ۲ بزرگ‌تر از زاویه‌ی بحرانی مثلاً  $45^\circ$  (شکل ۳) باشد و سرعت بیشتر از مقدار بحرانی، مثلاً ۵ متر بر ثانیه شود، حرکت سنگ از حالت چرخش/ لغزش به پرتاب تبدیل می‌شود. در منطقه‌ی امامزاده علی سرعت سنگ به هر دو صورت بحرانی و غیر بحرانی مورد محاسبه قرار گرفت و بر اساس آن مسیر سنگ‌ریزش برای هر دو سرعت به دست آمد.

مسیرهای ۳ بعدی سنگ‌ریزش به دست آمده مرتبط با مؤلفه‌های سرعت، تمامی فرآیند رفتار سنگ‌ریزش را شرح می‌دهند. آنها همچنین در مرحله‌ی بعد به عنوان ورودی‌های اولیه برای مدل‌سازی رستری سنگ‌ریزش به کار گرفته شدند.

معادلات محاسبه‌ی لغزش یا چرخش سنگ شامل هر دو حرکت پایین‌دستی و بالادستی است. حالت چرخشی یا لغزشی سنگ (حرکت پایین‌دستی یا بالادستی) از بر هم کنش بین بردار سرعت سنگ و بردار نرمال صفحه سلولی به دست می‌آید.

بررسی پرشیب‌ترین مسیر دامنه‌ی زمانی انجام می‌شود که سنگ دارای حرکت پایین‌دستی است. اگر شتاب بیش از صفر باشد، سنگ با افزایش سرعت می‌لغزد. اگر شتاب برابر صفر شود، سنگ با سرعت ثابت درحالی‌که سرعت می‌گیرد می‌لغزد. در این دو مورد، سرعت خروج در انتهای پرشیب‌ترین خط سیر محاسبه می‌شود. فاصله‌ی لغزش با طول پرشیب‌ترین بخش در این سلول برابر خواهد شد. چنانچه شتاب زیر صفر باشد، سنگ با کاهش سرعت می‌لغزد.

فاصله‌ی توقف با اعمال سرعت خروج صفر محاسبه می‌شود. اگر فاصله‌ی توقف بیشتر از طول پرشیب‌ترین مسیر باشد، سرعت خروج مجدداً در انتهای بخش محاسبه می‌شود. اگر فاصله‌ی توقف کمتر از طول پرشیب‌ترین مسیر باشد، سرعت خروج صفر شده و شبیه‌سازی متوقف می‌شود. در مورد لغزش یا چرخش



شکل ۳: شمایی از برآورد حرکتی سنگ در صورتی که از حالت غلطیدن به حالت پرتاب انتقال یابد

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

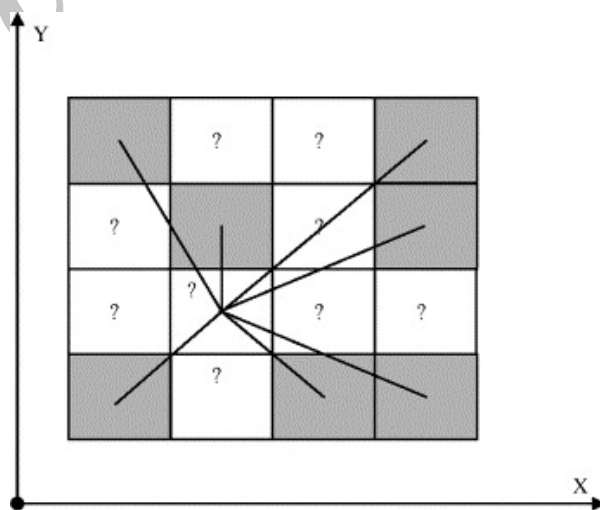


### مدل‌سازی رستری توزیعی جهت آنالیز خطر سنگ‌ریزش شیوه مدل‌سازی

اگرچه مدل ۳ بُعدی فرآیند سنگ‌ریزش که پارامترهای توزیعی را مورد استفاده قرار می‌دهد فرآیند فیزیکی پتانسیل رویدادهای سنگ‌ریزشی را بهتر مشخص می‌کند، اما بیشتر به مدل‌سازی غیرقطعی و تغییرات مکانی رویدادهای سنگ‌ریزشی توجه دارد و لذا، تجزیه و تحلیل خطا با نتایج پیش‌بینی شده دشوار است. برخی برنامه‌های پیشرفته نظیر پراکنش مکانی و توزیع خطر، خارج از توانایی‌های این قبیل مدل‌هاست. مدل‌هایی که از تکنیک‌های زمین‌آمار استفاده می‌نمایند، نتیجه‌ی بهتری می‌گیرند زیرا از طریق ریاضی همبستگی مکانی را به‌خوبی مدیریت می‌نمایند. از دیدگاه مکان‌آمار، موضوعاتی که به هم نزدیک‌تر هستند نسبت به آن‌هایی که با هم تفاوت دارند، تمایل بیشتری را برای همسان شدن نشان می‌دهند سنگ-ریزش‌ها هم با اتوکورلیشن مکانی مشخص می‌شوند، چون فاکتورهای مؤثر بر آن از نظر مکانی با یکدیگر همبستگی دارند. بنابراین منطقه‌ای که عاری از حوادث سنگ‌ریزشی است نیاز به حفاظت ندارد مگر این‌که

مناطق هم‌جوار آن در معرض خطر سنگ‌ریزش باشند. توانمندی‌های آنالیز آماری ایجاد شده در GIS ما را در توسعه ساختاری برای مدل‌سازی توزیعی رستری جهت آنالیز خطر سنگ‌ریزش در ترکیب با مدل‌سازی ۳ بُعدی فرآیند سنگ‌ریزش قادر می‌سازد. شکل ۴ یک مدل مفهومی از مدل‌سازی رستری را با استفاده از تکنولوژی درون‌یابی زمین‌آمار نشان می‌دهد. سلول‌های سایه‌دار، نمونه داده‌های معلومی را که موقعیت مکانی آنها در مرکز هر سلول می‌باشد نمایش می‌دهند. این مقادیر به صورت تصادفی از مدل‌سازی ۳ بُعدی سنگ‌ریزش و داده مبنای مکانی سنگ‌ریزش به‌دست می‌آیند.

سلول‌های با علامت سؤال، مناطق نامعلومی هستند که تحت پوشش شبیه‌سازی یا بازدید صحرائی قرار نگرفته‌اند. این مسأله در مورد مطالعه‌ی سنگ‌ریزش در مناطق وسیع بسیار متداول است. مقدار این سلول‌های نامعلوم با درون‌یابی مکان‌آمار پیش‌بینی می‌شود. سرانجام، آنالیز همسایگی برای کل داده رستری جهت تولید سطح پیش‌بینی شده پیوسته صورت می‌پذیرد.



شکل ۴: نقشه شماتیکی از مدل‌سازی رستری با استفاده از روش درون‌یابی زمین‌آمار

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

ندارند، به‌عنوان مثال، سلول‌هایی که در مجاورت سلول‌های با ارزش ۲ هستند مشخصاً در معرض خطر می‌باشند. درون‌یابی مکان آماری در مرحله‌ی ۳ برای پیش‌بینی خطر این مناطق نامعلوم انجام می‌شود. یک رستر جدید در این مرحله تولید می‌شود. در مرحله‌ی ۴، آنالیز تمرکز همسایگی بر روی این رستر جدید به منظور به‌دست آمدن سطح پیش‌بینی پیوسته جدید از فراوانی مکانی سنگ‌ریزش انجام می‌شود.

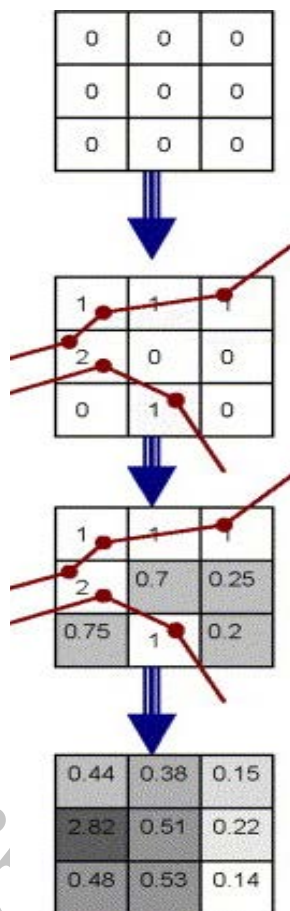
ارزش هر سلول نشان‌دهنده‌ی احتمال مکانی وقوع سنگ‌ریزش می‌باشد. سلول‌های تیره‌تر نشان‌دهنده‌ی فراوانی مکانی بیشتر بوده و سلول‌های روشن‌تر مشخص‌کننده‌ی امنیت نسبی است. مراحل مشابه به این برای ایجاد رستر ارتفاع پرتاب یا جهش و رستر انرژی جنبشی با تنها تفاوت در انجام مرحله‌ی ۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رستر ارتفاع پرتاب یا جهش که انرژی پتانسیل زمین را نشان می‌دهد، ارتفاع ماکزیمم مسیر برای سلول‌هایی که در آن‌ها پرتاب یا جهش اتفاق می‌افتد تعیین می‌شود. سرعت و جرم سنگ‌ریزش برای تولید رستر انرژی جنبشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. انرژی حداکثر سنگ برای هر سلول تعیین می‌شود. از این مرحله به بعد، روش کار مشابه با ادامه تولید رستر فراوانی مکانی است. سرانجام، سطح رستری پیش‌بینی خطر سنگ‌ریزش توسط مدل‌سازی مکانی که تمامی جنبه‌های رستری خصوصیات سنگ‌ریزش را در نظر می‌گیرد تولید می‌شود. شکل ۶، مراحل مورد نیاز برای تولید رستر نهایی خطر سنگ‌ریزش را نشان می‌دهد.

سلول‌های سایه‌دار بیانگر نمونه داده‌های ناشناخته‌ای هستند که موقعیت مکانی آنها در مرکز سلول قرار دارد. سلول‌هایی که دارای علامت سؤال هستند مقادیر آنها با درون‌یابی IDW پیش‌بینی می‌شود. خطوط، همبستگی مکانی بین سلول‌های ناشناخته و سلول‌های نمونه را نشان می‌دهد

### مدل‌سازی رستری خطر سنگ‌ریزش

چندین سطح رستری برای اعمال مدل‌سازی رستری تولید می‌شود تا توزیع مکانی شاخص‌های مکانی سنگ‌ریزش نظیر فراوانی مکانی، ارتفاع پرتاب یا ارتفاع جهش (انرژی پتانسیل) و انرژی جنبشی مشخص شود. برای رستر پیش‌بینی شده خطر نهایی، حد آستانه‌ای وجود دارد. شکل ۵ روند کار تولید رستر فراوانی مکانی سنگ‌ریزش را نشان می‌دهد. این روش شامل چهار مرحله‌ی استاندارد می‌باشد:

ابتدا رستری با ارزش پیش فرض صفر تولید می‌شود. معمولاً رستر اولیه دارای مقدار، اندازه سلول و سامانه زمین مرجعی مشابه با لایه‌ی ورودی DEM می‌باشد. در مرحله‌ی ۲ آنالیز توپولوژیکی در ۲ مرحله برای تعیین هم‌بستگی مکانی بین مسیرهای ۳ بُعدی با هر سلول DEM انجام می‌شود. در این مرحله ارزش نمونه‌ها برای هر سلول تعیین می‌گردد. ارزش هر سلولی که از مسیری غیر از مسیر سنگ‌ریزش عبور می‌کند صفر باقی می‌ماند. اگر سنگ‌ریزش از یک مسیر بگذرد عدد ۱ و اگر از ۲ مسیر بگذرد برای سلول‌ها عدد ۲ درج می‌شود. بعد از مرحله‌ی ۲، هنوز بسیاری از سلول‌ها صفر باقی مانده است. البته این بدان معنی نیست که آن‌ها با محل ریزش برخوردی



شکل ۵: روند تولید رستر فراوانی مکانی سنگ‌ریزش که شامل ۴ مرحله فوق می‌باشد  
 مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲



شکل ۶: روند تولید رستر خطر سنگ‌ریزش  
 مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

سنگ‌ریزش برای نمایش ترازهای مختلف خطر، طبقه‌بندی می‌شود.

### منطقه‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد مطالعه در ناحیه‌ی زمین‌شناختی البرز مرکزی، بر گستره‌ای از سنگ‌های کامبرین تا کواترنری واقع شده است. مسأله‌ی تنوع‌سازندی، ویژگی‌های زمین‌ساختی، خصوصیات آب و هوایی، ارتفاع از سطح دریا، دوری و نزدیکی به گسل‌های بزرگ، سبب شده تا تحلیل ناپایداری در این جاده مهم ارتباطی کشور، در هر قسمت ویژگی خاص خود را دارا باشد. منطقه‌ی امامزاده علی - آب اسک در بخش لاریجان از شهرستان آمل استان مازندران، در مختصات جغرافیایی  $35^{\circ}51'37''$  عرض شمالی و  $52^{\circ}8'40''$  طول شرقی واقع شده است (شکل ۷ و ۸).

ابتدا رسترهایی را که بیانگر فراوانی مکانی، ارتفاع پرتاب یا جهش و انرژی جنبشی می‌باشند وارد کرده و در مرحله‌ی دوم این لایه‌های رستری با معیارهای طبقه‌بندی مکانی مجدداً طبقه‌بندی می‌شوند. روش‌های طبقه‌بندی متنوعی همچون تقسیم برابر و شکست طبیعی در GIS وجود دارد. رسترهای جدید که مقادیر سلول‌های آن‌ها تغییر کرده برای نمایش تراز شاخص‌های فیزیکی هر سنگ‌ریزش تولید می‌شوند. مثلاً اگر رستر فراوانی مکانی به ۵ کلاس طبقه‌بندی شود، ارزش ۵، نشان‌دهنده‌ی بالاترین فراوانی مکانی و ارزش ۱ بیانگر پایین‌ترین فراوانی است.

در مرحله‌ی سوم، مدل مکانی با تعیین وزن‌دهی‌های مختلف برای لایه‌های رستری طبقه‌بندی شده تثبیت می‌شود. از این طریق، لایه‌ی جدید خطر سنگ‌ریزش تولید می‌شود. در مرحله‌ی نهایی، رستر خطر



شکل ۷: موقعیت جغرافیایی محدوده امامزاده علی - آب اسک بر روی تصویر ماهواره‌ای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

ایجاد طیف وسیعی از سنگ‌ریزش‌ها داراست. دامنه‌ی امامزاده علی در منطقه‌ی فعال تکتونیکی قرار دارد. واحدهای زمین‌شناسی آن عمدتاً رسوبی است و شامل

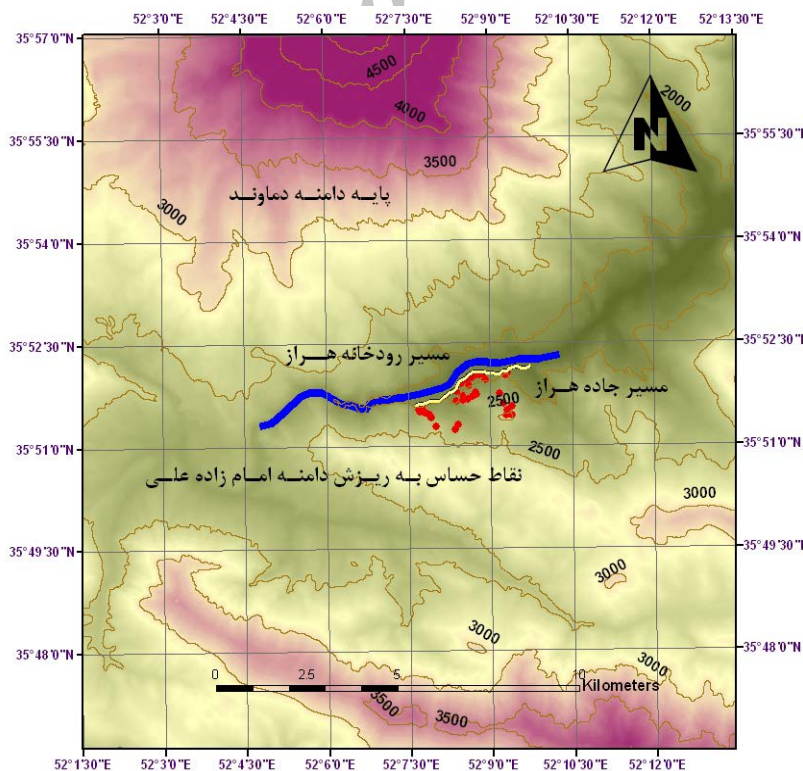
این منطقه با توپوگرافی کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، عمده شرایط طبیعی را برای

و رسوبی تحت تأثیر هوازدگی واقع شده و به ویژه هوازدگی فیزیکی در آن قابل توجه است. بر پایه‌ی توضیحات داده شده خطر سنگ‌ریزش به طریق مسیریابی ۳ بُعدی در منطقه امامزاده علی از طریق مدل‌سازی ۳ بُعدی و به صورت توزیع مکانی در GIS انجام گرفت. یکی از مهمترین ورودی‌ها برای تهیه‌ی مدل توزیعی سنگ‌ریزش توپوگرافی زمینی است (Woolard & Colby, 2002: 279; Nagihara et al., 2004: 394)

در این مطالعه از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان نقشه‌برداری کشور و نقاط ارتفاعی برداشت شده با دوربین نقشه‌برداری توتال برای دقت بیشتر و مناطق گپ استفاده شد. سپس مدل رقومی ارتفاعی DEM با قدرت تفکیک ۵×۵ متر مربع با روش درونیابی به‌دست آمد (شکل ۸).

آهک‌های لار، کرتاسه و آبرفت‌های کواترنری است. ترکیبات سنگی آن از نوع آهکی است که به صورت ضخیم لایه تا توده‌ای است و به صورت پرتگاه‌های بلند دیده می‌شود. بر روی واریزه‌های آن و در ستون ارتفاعی آن در پایین‌دست ندول‌های چرتی دیده می‌شود ولی چرت لایه‌ای در آهک‌ها دیده نشده است. هیچ ماکروفسیلی بر روی این آهک‌ها مشاهده نشده است. امتداد لایه‌ها شمالی-جنوبی است که با شیب ملایمی به سمت شمال متمایل شده است.

کنتاکت تحتانی آن با سازند دلیچای پیوسته و تدریجی است ولی کنتاکت فوقانی آن با سازند تیزکوه می‌باشد. رنگ آن کرم تا قهوه‌ای روشن می‌باشد. حرکات دامنه‌ای در آن قابل توجه می‌باشد و لغزش‌های وسیع همراه با ریزش‌های گسترده و دامنه‌های واریزه‌ای در آن وجود دارد. واحدهای سنگی



شکل ۸: مشخصات سنگ ریزش محدوده‌ی مورد مطالعه (مسیر جاده هراز به رنگ زرد، مسیر رودخانه به رنگ آبی و نقاط حساس به ریزش به رنگ قرمز) به همراه مدل رقومی ارتفاعی آن

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

برحسب متر بر ثانیه، فاصله‌ی انتقال (از پرتاب به غلطیدن) برحسب متر، زاویه انتقال (از غلطیدن به پرتاب) برحسب درجه. دسته دوم پارامترها به مشخصات ژنتیکی سنگ مربوط می‌شود. این مشخصات به صورت یک پایگاه داده‌ای هم برای سطح منطقه‌ی مورد مطالعه و هم برای تک‌تک نقاط (۳۸ نقطه موجود در جدول ۱) محاسبه شد.

این مشخصات عبارتند از: ضریب خسارت نرمال، ضریب خسارت مماسی و زاویه اصطکاک داخلی. سپس برای ۳۸ نقطه برداشت شده مدل را ۷۰۹۸ بار اجرا کرده و تعداد ۵۰۰ نمونه برای بررسی و مقایسه انتخاب شد. مقایسه‌ی مقدماتی به شیوه‌ی آماره‌های توصیفی انجام پذیرفت (جدول ۲).

یک نمونه انتخابی از اجرای مدل به صورت ۳ بُعدی و ۲ بُعدی در شکل‌های ۹ و ۱۰ آمده است. برای تعیین شدت خطر سنگ‌ریزش، طبق جدول ۲، حداقل، حداکثر و متوسط جابجایی هر یک از نقاط سنگ‌ریزشی به دست آمد. با در نظر گرفتن فاصله‌ی ثابت هر یک از نقاط تا جاده، نقطه توقف سنگ‌هایی که در فاصله  $\pm 10$  متر از جاده قرار دارند به عنوان پهنه‌ی بسیار خطرناک، نقاطی که تا فاصله  $\pm 20$  متر از جاده قرار دارند به عنوان پهنه‌ی خطرناک، تا  $\pm 50$  متر متوسط، تا  $\pm 100$  متر پهنه‌ی کم و بیشتر و کمتر از  $\pm 100$  متر را به عنوان پهنه با خطرناکی ضعیف طبقه‌بندی نمودیم (شکل‌های ۱۱، ۱۲). برای به دست آوردن فواصل فوق‌الذکر، مقادیر حداقل و حداکثر حرکت سنگ را از فواصل نقطه برداشت تا جاده کسر نمودیم (جدول ۳).

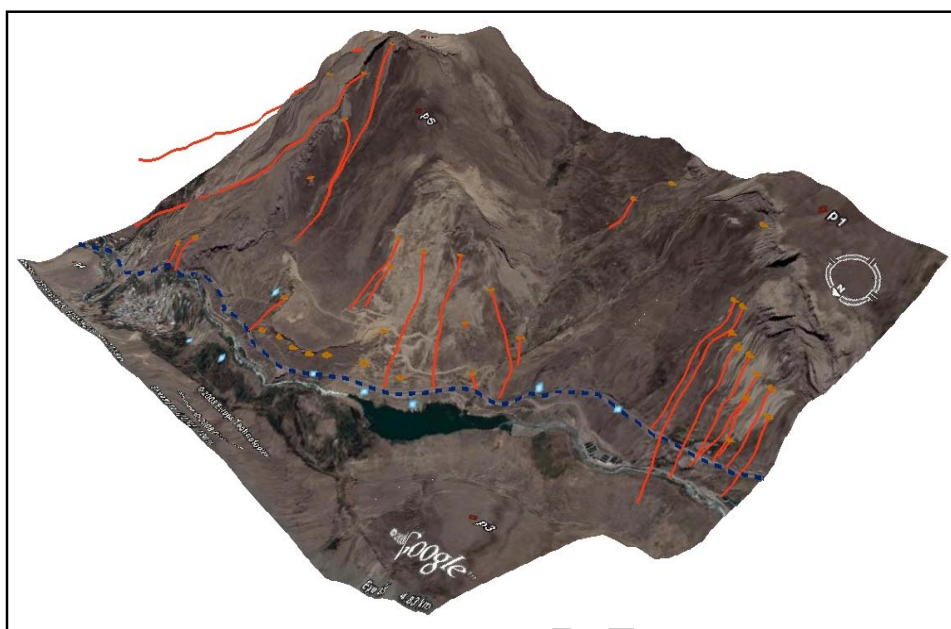
ویژگی‌های توپوگرافی، مناطق مستعد سنگ‌ریزش، مسیر جاده و حریم رودخانه را به روشنی می‌توان از DEM مزین به تصویر ماهواره‌ای یا عکس هوایی رنگی تشخیص داد. در این جا تصویر ماهواره‌ای آیکنوس مربوط به منطقه‌ی مورد مطالعه مربوط به سال ۲۰۰۸ اخذ شد. از این تصویر به دلیل قدرت تفکیک بالا و برای تشخیص چشمی استفاده شد. شایان ذکر است که تصویر فوق مربوط به ماهواره‌ی آیکنوس می‌باشد. برای استفاده بهینه از این تصویر، با زدن نقاطی که دارای مختصات جغرافیایی بودند اقدام به ژئورفرنس (زمین مرجع) کردن تصویر نموده و سپس مدل رقومی ارتفاعی تهیه شده را در زیر تصویر مذکور قرار داده تا بهتر بتوان در محیط ۳ بُعدی روند تحقیقات را ادامه داد. جزئیات مربوط به نقاط حساس به سنگ‌ریزش (۳۸ مورد) شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، ضریب اصطکاک سنگ با بستر، تراکم پوشش خاک و ... مربوط به منطقه مورد مطالعه در یک پایگاه داده‌ای ثبت شد. این پایگاه داده‌ای اطلاعات قابل ملاحظه‌ای را برای مدل‌سازی واقعی پتانسیل خطر سنگ‌ریزش فراهم می‌نماید. مناطق مستعد سنگ‌ریزش واقعی را می‌توان بر اساس مجموعه داده‌های تلفیق شده در GIS تعریف کرد (Dorren, 2003: 81).

جدول ۱ مشخصات مربوط به نقاط برداشت شده حساس به سنگ‌ریزش را نشان می‌دهد. برای اجرای مدل به مشخص نمودن پارامترهای زیر نیازمندیم. بخشی از این پارامترها مربوط به وضعیت سنگ در حال حرکت می‌باشد که عبارتند از: سرعت اولیه سنگ (متر بر ثانیه)، سرعت انتقال (از پرتاب به غلطیدن)

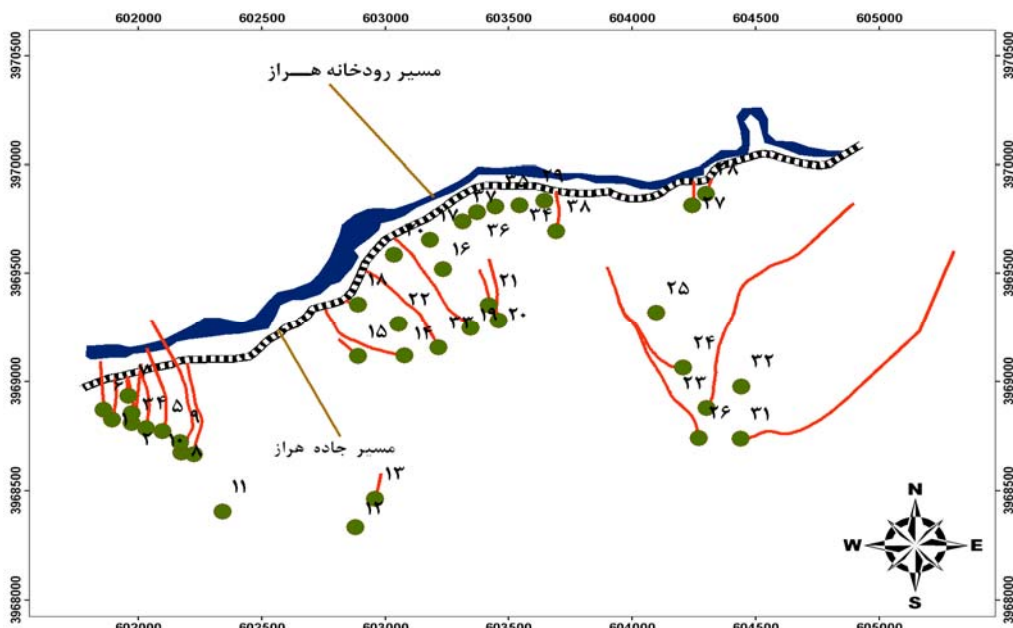
جدول ۱: مشخصات مربوط به نقاط برداشت شده حساس به سنگ‌ریزش

ردیف	طول (متریک)	عرض (متریک)	ارتفاع (متر)	شیب (درجه)	نوع بستر	ضریب خسارت نرمال	ضریب خسارت مماسی	زاویه اصطکاک (درجه)
1	601893	3968826	2192.3	30	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
2	601974	3968809	2200.5	53	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
3	601972	3968853	2131.5	66	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
4	602032	3968787	2225.1	59	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
5	602097	3968774	2215.0	36	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
6	601859	3968870	2127.0	68	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
7	601959	3968935	2012.9	44	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
8	602175	3968675	2288.5	60	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
9	602169	3968723	2214.2	41	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
10	602223	3968666	2284.7	62	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
11	602340	3968406	2422.8	21	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
12	602879	3968333	2336.9	19	دامنه سنگی سخت	0.20	0.50	30,00
13	602959	3968464	2284.8	30	دامنه خاکی با پوشش مناسب	0.20	0.50	30,00
14	603078	3969120	2089.4	21	دامنه خاکی با پوشش مناسب	0.30	0.70	20,00
15	602890	3969117	1986.0	34	واریزه	0.30	0.70	20,00
16	603235	3969520	1994.4	18	واریزه	0.30	0.70	20,00
17	603180	3969654	1942.7	8	واریزه	0.30	0.70	20,00
18	602890	3969356	1935.6	43	واریزه	0.30	0.70	20,00
19	603343	3969247	2168.3	38	واریزه	0.30	0.70	20,00
20	603460	3969280	2180.0	27	واریزه	0.30	0.70	20,00
21	603420	3969353	2109.6	30	واریزه	0.30	0.70	20,00
22	603053	3969266	2024.3	38	واریزه	0.30	0.70	20,00
23	604301	3968878	2431.5	31	واریزه	0.35	0.80	15,00
24	604206	3969064	2319.4	38	دامنه سنگی هوازده	0.35	0.80	15,00
25	604097	3969318	2183.0	20	دامنه سنگی هوازده	0.35	0.80	15,00
26	604270	3968742	2532.4	32	دامنه سنگی هوازده	0.35	0.80	15,00
27	604242	3969812	2019.1	16	دامنه سنگی هوازده	0.35	0.80	15,00
28	604297	3969867	1989.4	35	دامنه سنگی هوازده	0.35	0.80	15,00
29	603644	3969835	1913.6	16	دامنه سنگی هوازده	0.30	0.70	20,00
30	603036	3969585	1935.2	16	واریزه	0.30	0.70	20,00
31	604438	3968737	2491.4	43	واریزه	0.25	0.60	25,00
32	604442	3968978	2406.9	23	واریزه	0.25	0.60	25,00
33	603216	3969156	2179.9	48	دامنه خاکی با پوشش ضعیف	0.30	0.70	20,00
34	603542	3969813	1929.2	20	دامنه خاکی با پوشش ضعیف	0.30	0.70	20,00
35	603445	3969809	1932.1	12	واریزه	0.30	0.70	20,00
36	603370	3969783	1933.8	10	واریزه	0.30	0.70	20,00
37	603313	3969738	1940.6	7	واریزه	0.30	0.70	20,00
38	603692	3969694	1974.3	30	واریزه	0.30	0.70	20,00
					واریزه			

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲



شکل ۹: نمایش ۳ بُعدی مسیر سنگ‌ریزش. همانطور که مشاهده می‌شود برخی از نقاط فاقد مسیر، برخی دارای مسیر کوتاه و نرسیده به جاده، برخی دارای مسیر تا جاده اصلی و برخی دارای مسیرهای طولانی هستند که حتی از جاده عبور کرده و تا رودخانه امتداد می‌یابند.  
 مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲



شکل ۱۰: نمایش ۲ بُعدی مسیر سنگ‌ریزش‌ها به همراه شماره نقاط برداشت شده  
 مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲



## نتایج

جدول ۲: آماره توصیفی مربوط به نقاط سنگ‌ریزشی

فاصله نقطه تا جاده (متر)	متوسط طول مسیر (متر)	حداکثر طول مسیر	حداقل طول مسیر	اختلاف در طول (متر)	نقاط سنگ‌ریزش
۱۰۰۰	1370.6	1585.60	227.5	1358.1	P1
۷۹۹	509.1	522.10	479.4	42.7	P2
۵۳۰	30.1	40.80	16.7	24.1	P3
۱۱۲۷	971.4	1035.40	494.8	540.6	P4
۱۱۲	173.9	175.30	169.5	5.8	P5
۶۱	129.5	287.90	113.1	174.8	P6
۸۹۲	17.3	21.50	6.5	15.0	P7
۸۲۷	224.9	363.00	133.3	229.7	P8
۱۸۱	329.6	893.20	264.8	628.4	P9
۲۲۰	352.7	488.20	288.4	199.8	P10
۱۷۷	256.9	321.70	248.5	73.2	P11
۲۵۸	362.7	551.50	182.4	369.1	P12
۲۸۸	397.8	567.70	18.1	549.6	P13
۱۲۷	218.2	321.10	197.0	124.1	P14
۹۵	67.0	104.00	54.1	49.9	P15
۴۰۳	457.3	810.00	122.3	687.7	P16
۳۵۵	37.6	46.60	22.1	24.5	P17
۴۲۴	503.4	765.50	125.2	640.3	P18
۶۹۹	113.9	147.30	8.1	139.2	P19
۱۱۷۹	1642.2	2011.10	462.6	1548.5	P20
۹۴۵	1177.6	1486.50	6.7	1479.8	P21
۳۵۷	472.1	473.10	467.7	5.4	P22
۲۶۵	137.0	141.30	126.3	15.0	P23
۲۳۸	119.1	172.10	10.7	161.4	P24
۹۳	17.0	24.90	9.3	15.6	P25
۵۷	76.1	77.20	71.8	5.4	P26
۵۰۸	563.3	604.20	243.1	361.1	P27
۵۵۵	342.3	361.10	258.6	102.5	P28
۴۷۲	206.1	209.10	196.3	12.8	P29
۲۴۳	47.2	86.20	36.9	49.3	P30
۵۶	19.6	27.50	8.6	18.9	P31
۷۴	20.7	30.50	10.4	20.1	P32
۴۳۳	550.9	581.40	324.0	257.4	P33
۹۰	24.0	28.10	14.0	14.10	P34
۹۵	19.6	24.30	9.6	14.7	P35
۱۰۱	17.7	24.40	6.3	18.1	P36
۹۹	17.6	24.20	5.8	18.4	P37
۱۸۱	208.3	209.50	204.0	5.5	P38

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۳

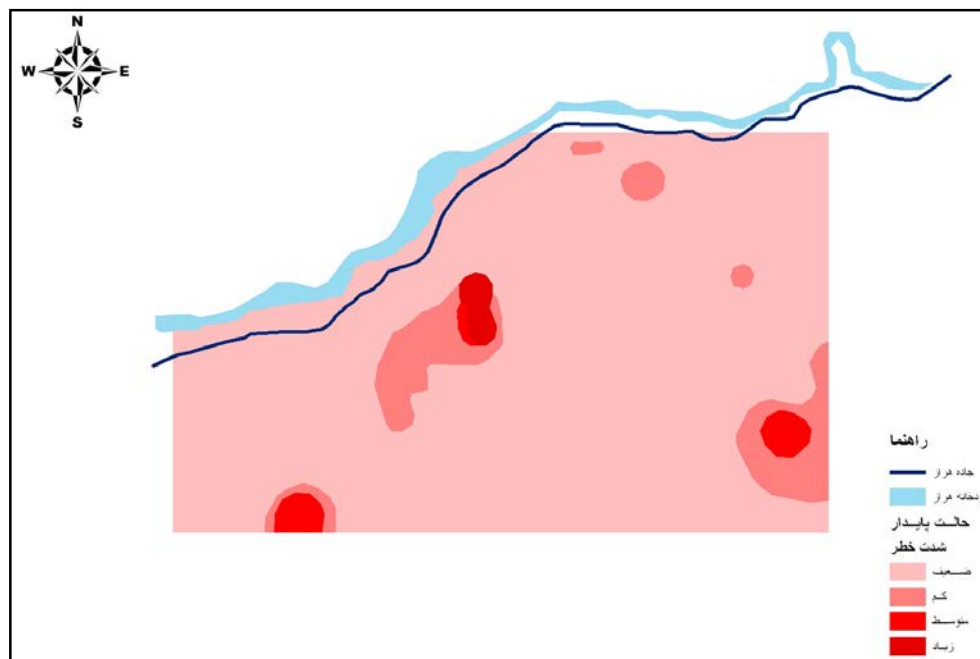
جدول ۳: میزان جابجایی سنگ (حداقل، حداکثر، متوسط) نسبت به جاده

نقاط سنگ ریزش	حداقل فاصله برخورد سنگ از جاده	حداکثر فاصله برخورد سنگ از جاده	متوسط فاصله برخورد سنگ از جاده
P1	773	-586	-371
P2	320	277	290
P3	513	489	500
P4	632	92	156
P5	-58	-63	-62
P6	-52	-227	-69
P7	886	871	875
P8	694	464	602
P9	-84	-712	-149
P10	-68	-268	-133
P11	-72	-145	-80
P12	76	-294	-105
P13	270	-280	-110
P14	-70	-194	-91
P15	41	-9	28
P16	281	-407	-54
P17	333	308	317
P18	299	-342	-79
P19	691	552	585
P20	716	-832	-463
P21	938	-542	-233
P22	-111	-116	-115
P23	139	124	128
P24	227	66	119
P25	84	68	76
P26	-15	-20	-19
P27	265	-96	-55
P28	296	194	213
P29	276	263	266
P30	206	157	196
P31	47	29	36
P32	64	44	53
P33	109	-148	-118
P34	76	62	66
P35	85	71	75
P36	95	77	83
P37	93	75	81
P38	-23	-29	-27

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

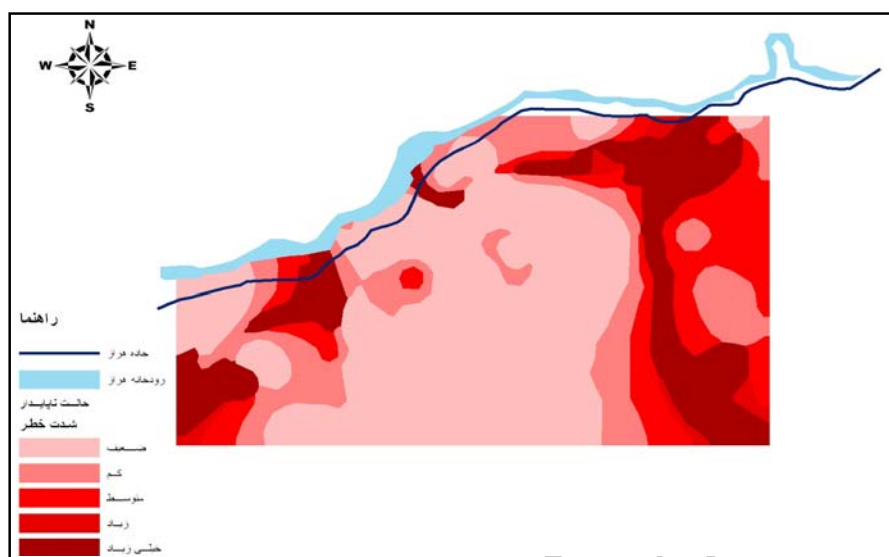
توقف این سنگ‌ها نسبت به جاده‌ی اصلی بوده که پیامد خطرآفرینی را برای جاده تعریف می‌کند. چه بسا در حالت شدت خطر ضعیف و کم ما بیشترین جابجایی سنگ را خواهیم داشت، لیکن در فاصله‌ای بسیار دورتر از جاده‌ی اصلی متوقف می‌شوند که امکان خطر را برای جاده کاهش می‌دهد. بدین ترتیب نقاط برداشتی P15، P26 و P38 از بیشترین شدت خطر سنگ‌ریزش برای جاده هر از منطقه امامزاده علی برخوردار هستند. هر سه این نقاط از شیب بالای ۶۰ درصد برخوردار بوده و همگی متعلق به مناطق واریزه‌ای می‌باشند. همانطور که از جدول ۳ پیداست، این نقاط برداشتی هم در حالت حداقل فاصله و هم حداکثر فاصله برخورد سنگ نسبت به جاده، دارای شدت خطر بالایی می‌باشند که در مشاهدات صحرایی نیز انتظار آن می‌رفت.

همانطور که از جدول فوق برمی‌آید، در حداقل فاصله برخورد نسبت به جاده، ۵۵ درصد از نقاط از شدت خطر ضعیف، ۳۴ درصد از شدت خطر کم، ۸ درصد از شدت خطر متوسط و ۳ درصد از نقاط از شدت خطر زیاد برخوردارند. از طرفی در حداکثر فاصله برخورد نسبت به جاده، ۶۲ درصد نقاط از شدت خطر ضعیف، ۲۴ درصد از شدت خطر کم، ۸ درصد از خطر متوسط، ۳ درصد از شدت خطر زیاد و ۳ درصد از نقاط از شدت خطر خیلی زیاد برخوردار خواهند بود. گرچه در حالت دوم میزان ۶۲ درصد از نقاط از شدت خطر ضعیف برخوردارند، اما این موضوع نشان‌دهنده‌ی پتانسیل پایین خطرآفرینی این نقاط نیست، بلکه اساساً این نسبت‌ها و درصدها نمی‌تواند نشان‌دهنده‌ی کم یا زیاد بودن توان بالقوه خطرآفرینی ذاتی سنگ‌ریزش منابع سنگ‌ریزشی باشد. موضوعی که برای ما حائز اهمیت است دوری و یا نزدیکی فاصله‌ی



شکل ۱۱: پهنه شدت خطر سنگ‌ریزش در حالت پایدار (حداقل جابجایی سنگ نسبت به جاده)

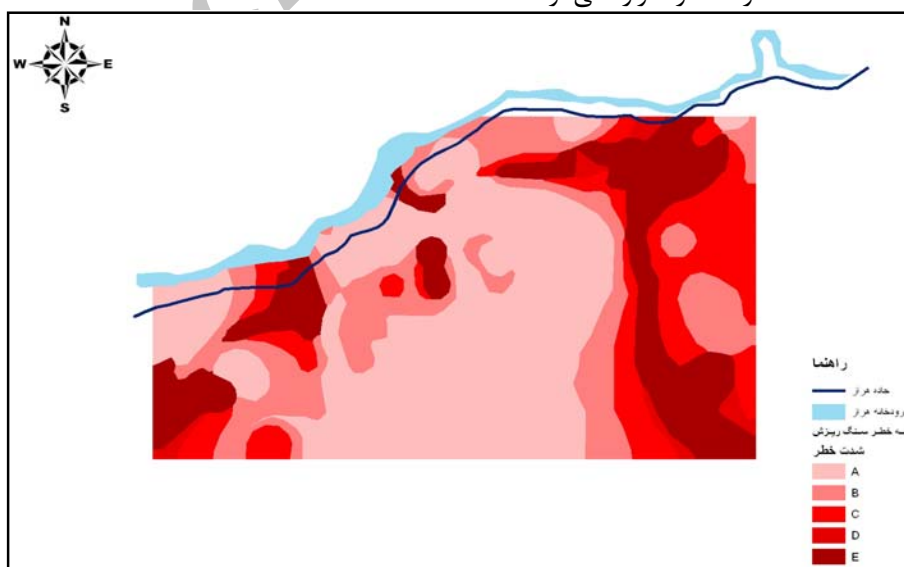
مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲



شکل ۱۲: پهنه‌ی شدت خطر سنگ ریزش در حالت ناپایدار (حداکثر جابجایی سنگ نسبت به جاده)  
 مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

اولویت با سلول با شدت خطر بیشتر بود. به عنوان مثال، اگر سلولی در حالت پایدار دارای شدت خطر کم یا متوسط بود، و همان سلول با همان مختصات جغرافیایی در حالت ناپایدار دارای شدت خطر زیاد یا خیلی زیاد بود، ارزش سلول را به لحاظ شدت خطر، زیاد یا خیلی زیاد در نظر می‌گرفتیم (شکل ۱۳).

با توجه به اشکال ۱۱ و ۱۲ که پهنه‌ی خطر سنگ‌ریزش را در کمترین جابجایی و بیشترین جابجایی نشان می‌دهد، برای پایین آوردن میزان ریسک، دو لایه مذکور را در محیط Arc GIS به صورت رستری با یکدیگر ادغام کردیم. در این فرآیند، هرکجا که سلولی با درجه شدت خطر بیشتر بر روی سلولی با درجه شدت خطر کمتر قرار می‌گرفت،



شکل ۱۳: پهنه‌بندی خطر سنگ‌ریزش بالادست جاده‌ی هراز - منطقه‌ی امامزاده علی شهرستان آمل  
 مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

## بحث و نتیجه

هرچند سنگ‌ریزش‌ها به لحاظ فیزیکی تحت تأثیر شیب طبیعی دامنه‌ها می‌باشند، لیکن با مسائل عدم قطعیت و احتمالات در ارتباط می‌باشند که می‌بایست مورد محاسبه قرار گیرد. مدل‌سازی قطعی در رابطه با تشریح و ارزیابی فرآیندهای طبیعی پیچیده مانند سنگ‌ریزش با مشکلاتی مواجه است. روش‌های آماری پیچیده و سخت که مدل‌سازی عددی را یکپارچه‌سازی می‌نماید و فاکتورهای شکل سنگ را مورد توجه قرار می‌دهد، می‌تواند نتایج واقعی‌تری را به دست آورد. البته این مسأله بسیار حائز اهمیت است که به هنگام شبیه‌سازی موارد دقت و صحت داده‌ها (مخصوصاً داده‌های توپوگرافی)، همچنین انتخاب مناسب پارامترهای سنگی منابع ریزش سنگ و خصوصیات سطحی زمین را مدنظر قرار دهیم. مشاهدات صحرائی داده‌های به روز و دست اول و مطالعه و بررسی داده‌های تاریخی منطقه‌ی مورد مطالعه از لوازم اصلی کالیبره کردن پارامترهای مدل برای بهبود نتایج شبیه‌سازی است. تابع الحاقی RA به صورت منحصر به فرد و قدرتمند همراه با ابزارهای آنالیزگر مدل‌ساز ۳ بعدی، امکان مدل‌سازی فرآیند سنگ‌ریزش و ارزیابی خطر آن را فراهم می‌نماید. این تابع توانسته به طور کامل خود را با محیط GIS که توانایی‌های بسیاری در زمینه‌ی مدیریت، تصویرسازی و مدل‌سازی مکانی داده‌ها دارد، سازگار نماید که مواردی از قابلیت‌های ویژه این تابع به شرح ذیل را ارائه می‌شود:

- تلفیق مدل‌سازی فرآیندهای فیزیکی ۳ بعدی با مدل‌سازی توزیعی رستری به منظور ارتقاء شناخت بهتر و ارزیابی مؤثرتر خطر سنگ‌ریزش؛

- این تابع همه‌ی فرآیندهای فیزیکی سنگ‌ریزش نظیر پرتاب/ جهش، برخورد و برگشت دوباره، چرخش/ لغزش را با استفاده از پارامترهای توزیعی به صورت ۳ بعدی مدل‌سازی می‌کند؛

- پس از دریافت پارامترهای اولیه، خطر سنگ‌ریزش را با دقت بالا محاسبه می‌نماید.

درخصوص موارد کاربردی استفاده از این تابع این چنین می‌توان اذعان داشت که: از این تابع می‌توان برای تعیین خط پروژه‌های راه‌سازی استفاده نمود؛ بدین ترتیب که مسیری را که کمترین خطر را به لحاظ ریزش سنگ و برخورد با جاده داشته انتخاب نمود. همچنین با شناسایی وضع موجود و پیش‌بینی حرکت سنگ در صورت وقوع سنگ‌ریزش می‌توان راه‌کارهای عملیاتی و فنی مناسب‌تری را برای ممانعت از ریزش سنگ و یا کنترل و هدایت سنگ‌ها اتخاذ نمود.

## منابع

۱. احمدی، رضا (۱۳۷۴). نقش کاربری اراضی در ایجاد و تشدید حرکات توده‌ای جنگل واز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی دانشگاه تربیت مدرس.
۲. پورقاسمی، حمیدرضا؛ حمیدرضا مرادی؛ سیدمحمد فاطمی‌عقدا؛ مجید محمدی (۱۳۸۵). مقدمه‌ای بر منطق فازی و کاربرد آن در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مجموعه مقالات همایش منابع طبیعی و توسعه‌ی پایدار در عرصه‌های جنوبی دریای خزر. دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور. ۱۷ اسفند ۱۳۸۵.
۳. شادفر، صمد؛ علیرضا نوروزی؛ جمال قدوسی، غیومیان، حامد (۱۳۸۴). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوزه آبخیز لاکترشان، نشریه علمی پژوهشی حفاظت آب و خاک. سال اول. شماره ۱.
۴. شادفر، صمد؛ جمال قدوسی، محمد نمکی، محسن شریعت‌جعفری (۱۳۸۳). بررسی برخی از عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش (مطالعه موردی؛ حوزه جلیسان)، سومین همایش ملی فرسایش و رسوب.
۵. کرم، عبدا... (۱۳۸۰). مدل‌سازی کمی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در زاگرس چین‌خورده (مطالعه موردی؛ حوزه‌ی آبخیز سرخون- استان چهارمحال بختیاری)، رساله دکتری جغرافیای طبیعی. دانشگاه تربیت مدرس.

13. Agliardi, F., Crosta, G. B (2003). High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40 (4), 455.
14. Benson, A. K (1995). Application of ground penetrating radar in assessing 440 some geological hazards: examples of ground water contamination, faults, cavi. *Journal of Applied Geophysics* 33.
15. Descoedres, F., Zimmermann, Th (1987). Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. In: *Proceedings of the Sixth International congress of Rock Mechanics*, Montreal, Canada.
16. Dorren, L.K.A (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography* 27 (1).
17. Dorren, L.K.A., Maier, B., Putters, U.S., Seijmonsbergen, A.C (2004). Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. *Geomorphology* 57 (3-4).
18. Evans, S.G., Hungr, O (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal* 30, 620-636.
19. Frayssines, M., Hantz, D (2006). Failure mechanisms and triggering factors in calcareous cliffs of the subalpine ranges (french Alps). *Engineering Geology* 86.
20. Grasmueck, M (1996). 3-d ground penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss. *Geophysics* 61.
21. Grasmueck, M., Weger, R., Horstmeyer, H (2005). Full-resolution 3d gpr imaging. *Geophysics* 70, K12-K19.
22. Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., Agliardi, F (2002). STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences* 28 (9).
23. Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ghigi, S (2004). Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera Valley, central Italy. *Environmental Management* 34 (2), 191-208.
۶. گرایبی، پرویز؛ ایاد اعظمی؛ ایوب پیرانی (۱۳۸۶). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش LNRF در حوزه‌ی آبخیز و استان ساری، سومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کرمان. ۲۰ و ۲۱ آذرماه ۱۳۸۶.
۷. فاطمی‌عقدا، سید محمد؛ حامد غیومیان؛ علی فراهانی (۱۳۸۲). ارزیابی کارایی روش‌های آماری در تعیین پتانسیل خطر زمین‌لغزش، *مجله علوم زمین* (۴۷-۴۸) ۱۱.
۸. قائم‌مقامی، شهرام؛ حمیده معافی؛ مصطفی ذوالفقاری‌مجد (۱۳۸۶). استفاده از روش نیلسون و GIS جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوزه بافت، سومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کرمان. ۲۰ و ۲۱ آذرماه ۱۳۸۶.
۹. محمدی، مجید؛ حمیدرضا مرادی؛ حمیدرضا پورقاسمی، حمیدرضا داوودی (۱۳۸۶). بررسی ناپایداری دامنه‌های طبیعی و کاربرد آن در آمایش سرزمین با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی، *مجموعه مقالات اولین همایش ملی جغرافیا و آمایش سرزمین*. دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان. ۲۰ و ۲۱ خرداد.
۱۰. مدلل‌دوست، سارا (۱۳۸۷). استفاده از GIS در تعیین چگونگی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوزه‌ی آبخیز نکارود)، اولین همایش ملی فن‌آوری‌های نوین در کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۴ و ۱۵ اسفند ۱۳۸۷.
۱۱. مرادی، حمیدرضا، دشتی مرویلی، مریم سیدی علم‌آباد، م (۱۳۸۶). بررسی مهمترین عوامل مؤثر بر پدیده زمین‌لغزش با رویکرد SGI (مطالعه موردی: حوزه آبخیزواژ)، سومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کرمان. ۲۰ و ۲۱ آذرماه ۱۳۸۶.
۱۲. مهدوی‌فر، محمدرضا (۱۳۷۶). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه خورش رستم (جنوب غربی شهرستان خلخال)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی زمین‌شناسی. دانشگاه تربیت مدرس

30. Pettinelli, E., Beaubien, S., Tommasi, P (1996). Gpr investigation to evaluate the geometry of rock slides and buckling in a limestone formation in northern Italy. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 1, 271–286.
31. Pipan, M., Forte, E., Guangyou, F., Finetti, I (2003). High-resolution gpr imaging and joint characterisation in limestones. *Near Surface Geophysics* 1, 39–55.
32. Stevens, W (1998). Rockfall: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls. M.A.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Ontario, Canada, 105pp.
33. Stevens, K.M., Lodha, G.S., Holloway, A. L., Soonawala, N. M (1995). The application of ground penetrating radar for mapping fractures in plutonic rocks within the Whiteshell Research Area, Pinawa, Manitoba, Canada. *Journal of Applied Geophysics* 33, 125–141.
34. Toshioka, T., Tsuchida, T., Sasahara, K., (1995). Application of gpr to detect and map cracks in rock slopes. *Journal of Applied Geophysics* 33, 119–124.
35. Woolard, J.W., Colby, J. D (2002). Spatial characterization, resolution, and volumetric change of coastal dunes using airborne LIDAR: cape Hatteras, North Carolina. *Geomorphology* 48 (1–3), 269–287.
24. Hantz, D., Vengeon, J.M., Dussauge-Peisser, C (2003). An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 693–701.
25. Hutchinson, J. N (1988). Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, state-of-the-art report. In: Bonnard, C. (Ed.), *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, Vol. 1. A.A. Lausanne, Balkema, Rotterdam.
26. Jaboyedoff, M., Dudt, J.P., Labiouse, V (2005). An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5 (5), 621–632.
27. Jones, C.L., Higgins, J. D., Andrew, R. D (2000). *Colorado Rockfall Simulation Program Version 4.0 (for Windows)*, Colorado Department of Transportation, Colorado Geological Survey.
28. McNeil, B.E., Jasper, J.D., Luchsinger, D. A., Rainsmier, M.V (2002). Implementation and application of GIS at Timpanogos Cave National Monument, Utah. *Journal of Cave and Karst Studies* 64 (1), 34–37.
29. Nagihara, S., Mulligan, K.R., Xiong, W (2004). Use of a three-dimensional laser scanner to digitally capture the topography of sand dunes in high spatial resolution. *Earth Surface Processes and Landforms* 29 (3), 391–398.