

پهنه بندی خطر سنگ ریزش بر اساس تعیین مسیر سنگ ریزش در محیط GIS (مطالعه موردی : جاده هراز - امامزاده علی - شهرستان آمل)

سعید مدلل دوست*^۱، ام البنین اولاد زاده^۲

۱- کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشگاه مازندران

۲- کارشناسی ارشد جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشگاه پیام نور ساری

پذیرش مقاله: ۱۳۸۸/۹/۱۲

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۸۹/۴/۱۰

چکیده

منطقه امامزاده علی - آب اسک در بخش لاریجان از شهرستان آمل، استان مازندران واقع شده است. این منطقه با توپوگرافی کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، عمده شرایط طبیعی را برای ایجاد طیف وسیعی از سنگ ریزش‌ها داراست که عمده خطرات جانی و مالی آن متوجه محور هراز، وسایل نقلیه و سرنشیبانی است که از این محور همه روزه در حال عبور و مرور می‌باشند. در این مقاله خطر سنگ-ریزش در منطقه امامزاده علی از طریق مدل سازی ۳ بعدی و به صورت توزیع مکانی در GIS انجام گرفت. از تابع الحاقی Rock fall Analyst که قادر است مقادیر زیادی از اطلاعات مکان زمین را در رابطه با رفتارهای سنگ-ریزش مدیریت کند استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه سازی فرآیند سنگ‌ریزش، مسیر ۳ بعدی سنگ‌ریزش و سرعت عوارض آن در دامنه مشرف به امامزاده علی، به صورت نقطه ای و خطی در shp فایل های سه بعدی ذخیره شد. بر پایه مسیرهای ۳ بعدی مدل سازی توزیعی رستری سنگ‌ریزش و تکنیک زمین آمارمکانی، توزیع خطر سنگ‌ریزش، مسیر حرکت سنگ و پهنه بندی خطر سنگ ریزش در حالات پایدار و ناپایدار برای منطقه امامزاده علی به دست آمد. **واژه های کلیدی:** تحلیل ۳ بعدی سنگ‌ریزش، مدل سازی توزیعی، GIS، امامزاده علی.

مقدمه

در اغلب اوقات خطرات ناشی از سنگ ریزش را نمی توان دفع کرد. به دلیل این که وقوع این قبیل خطرات هم از نظر مکانی و هم از نظر زمانی متنوع می باشد. روش های آمار مینا که اغلب به کمک مدل سازی رایانه ای انجام می شود به ابزاری استاندارد برای ارزیابی خطر سنگ ریزش و طراحی اقدامات حفاظتی تبدیل شده است. مدل سازی فرآیندهای فیزیکی سنگ ریزش نیاز به بررسی از هم گسیختگی اجزاء سنگی، افتادن یا پرش و جهش بعدی، خرد شدن، چرخش یا لغزش و نشست انتهایی دارد (هاتچینسن، ۱۹۸۸)، (اوانس و هانگر، ۱۹۹۳)، (گازتی و همکاران، ۲۰۰۲). بدون در نظر گرفتن محدودیت حجمی، سنگ ریزش ها با انرژی و تحرک بالای خود توصیف می شوند. فرآیندهای دینامیکی سنگ ریزش ها تحت الشعاع خصوصیات توزیعی مکانی و زمانی، مانند شرایط از هم گسیختگی، ویژگی های هندسی و مکانیکی بلوک های سنگی و دامنه های سنگی قرار گرفته است (جابویدوف و همکاران، ۲۰۰۵). بنابراین، توانایی برنامه ریزی رایانه در مدیریت و استفاده پربازده از اطلاعات مکانی نقش موثری را در تحلیل خطر سنگ ریزش ایفا می کند. صرفاً انتخاب پروفیل دو بعدی برای به دست آوردن نتایج تحلیلی واقعی با استفاده از مدل های دو بعدی سنگ ریزش قابل اطمینان نمی باشد. توانایی این مدل ها محدود به تهیه نمونه های مکانی توزیع مسیر سنگ ریزش، یا ارتفاع و انرژی پرش و جهش سنگ ریزش می باشد. تنها تعداد کمی برنامه سه بعدی سنگ ریزش جهت مدل سازی سه بعدی موجود می باشد. این مدل ها معمولاً از داده های توپوگرافی که خود از دیگر منابع داده ای، مثل داده های مکان زمین در شبکه نامنظم مثلثاتی (TIN) یا شبکه منظم (GRID) به دست آمده اند استفاده می کنند که البته ساختارهای داده ای استاندارد در اکثر نرم افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) می باشند. هم چنین طیفی از داده های توصیفی موجود، از قبل در پایگاه داده ای GIS،

نظیر زمین شناسی، کاربری اراضی یا پوشش گیاهی و نوع سنگ که به طور خودکار در تحلیل قرار نگرفته اند، ذخیره می شود. سرانجام، کنترل کیفی و تضمین کیفی به هنگام انتقال داده ها در بین برنامه های مختلف مد نظر قرار می گیرد. مدل سازی توزیعی GIS مینا در تلفیق با مدل سازی سه بعدی فرآیند فیزیکی سنگ ریزش به ابزاری کارآمد در ارزیابی خطر سنگ ریزش در مناطق بزرگ تبدیل شده است (مک نیل و همکاران، ۲۰۰۲)، (دورن، ۲۰۰۳)، (دورن و همکاران، ۲۰۰۴). (گازتی و همکاران، ۲۰۰۴) تکنیک مدل سازی رستری توزیعی (یا GRID) برای نمایش توزیع فراوانی مکانی سنگ ریزش، ارتفاع جهش یا پرتاب (انرژی پتانسیل) و انرژی جنبشی بر پایه نتایج حاصل از فرآیند مدل سازی ۳ بعدی سنگ ریزش به کار گرفته می شود. هر سه این فاکتورها باید در تلفیق با یکدیگر برای نائل شدن به یک برآورد واقعی از توزیع مکانی خطر سنگ ریزش مورد بررسی و توجه قرار گیرد (جابویدوف و همکاران، ۲۰۰۵). در این مقاله از منطبق به کار گرفته شده در برنامه RA در تحلیل خطر سنگ ریزش و تعیین مسیر حرکت سنگ در منطقه امام زاده علی جاده هراز استفاده شده است.

مواد و روش ها

نحوه مدل سازی مسیر ۳ بعدی سنگ ریزش در

GIS

این کار در ۲ بخش اصلی انجام شد: ۱- شبیه سازی ۳ بعدی مسیر سنگ ریزش ۲- مدل سازی رستری توزیع مکانی سنگ ریزش. ابتدا یک توده برآمده یا نقطه ورود را برای شبیه سازی مسیر سنگ ریزش مورد استفاده قرار دادیم. نقطه ورود عبارت است از مکان جغرافیایی بر روی دامنه ای که احتمال ریزش سنگ در آن به لحاظ کلیه شرایط طبیعی (زمین ساختی، ژئومورفولوژیکی، سنگ شناسی، شیب و شرایط اقلیمی) بالاست. این نقطه (نقاط) با دید کارشناسی در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد و به

سنگریزش در پی خواهد داشت. به دلیل محدودیت تحقیقات نظری در زمینه تأثیر شکل سنگ-ریزش در حالت ۳ بعدی، از شیوه معمول و متداول "توده برآمده" برای مدیریت شبیه سازی مسیر سنگ-ریزش بدون در نظر گرفتن اثر شکل سنگ استفاده شد. مدل سازی حرکتی فرآیند سنگریزش در مراحل زمانی ناپیوسته و به طور خودکار هم توسط اندازه سلول و هم با سرعت ذره تعیین شد. الگوریتم های حرکتی امکان مدل سازی پرتاب یا سقوط آزاد، حرکات کوبشی، جهشی، لغزشی و چرخشی را در فضایی ۳ بعدی فراهم نمودند (شکل ۱).

دشواری در استفاده از الگوریتم پرتاب، تعیین نقطه برخورد در انتهای مسیر پرتاب سنگ می باشد. نقطه برخورد، محل تقاطع سهمی مسیر پرتاب با سطح سلولی گرید (شبکه ای) می باشد. برای مشخص کردن نقطه برخورد با صفحه سلولی، در ابتدا نمونه هایی از نقاط با موقعیت داخلی/خارجی نسبت به صفحه برای تعیین این که آیا برخوردی رخ داده یا خیر، انتخاب شد. نقطه برخورد از طریق معادله درجه دوم ایجاد شده از تلاقی معادلات سهمی و خطی به دست می آید. با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، نقطه برخورد را می توان با محاسبه محل برخورد نقطه بین خط و صفحه در مراحل زمانی بسیار کوتاه به دست آورد. برای هر سلول گریدی (شبکه ای) در صفحه، دو فاکتور خسارت در نظر گرفته می شود: ۱- ضریب خسارت نرمال R_N ۲- ضریب خسارت مماسی R_T در سامانه مختصاتی شیب محلی، بردارهای سرعت جهش به صورت روابط ۱، ۲ و ۳ می شوند:

رابطه ۱)

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

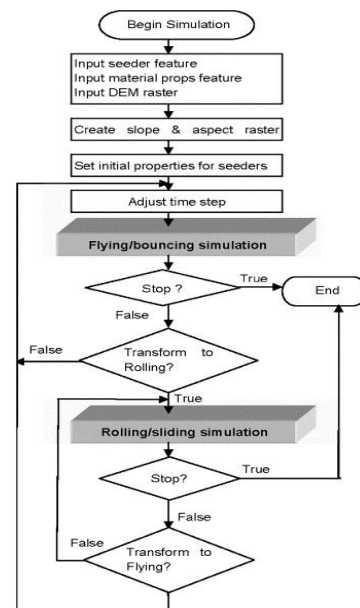
رابطه ۲)

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

رابطه ۳)

$$V'_N = V_N R_N,$$

صورت یک فایل وکتوری نقطه ای وارد GIS شد. اتوکورولیشن مکانی فاکتورهای تأثیرگذار بر سنگ-ریزش (شیب هندسی، زمین شناسی، پوشش گیاهی و ...)، کورولیشن مکانی رویدادهای سنگریزشی را از نقطه نظر میزان به کارگیری توزیع سرعت و انرژی تحت الشعاع قرار می دهد. بنابراین مدل سازی رستری مبتنی بر زمین آمار مکانی، در رابطه با تنوع فراوانی مکانی و انرژی سنگریزش با در نظر گرفتن عدم قطعیت آن ها به کار گرفته می شود. نمایش سطوح پیش بینی قابل اطمینان توزیع مکانی فراوانی سنگریزش و انرژی را می توان با استفاده از انواع روش های زمین آمار (ترجیحاً کریجینگ) انجام داد. در پایان، اندازه گیری خطر سنگریزش با احتساب تمامی این لایه های رستری انجام گرفت.



شکل ۱- الگوریتم تعیین مسیر سنگریزش

الگوریتم حرکتی

در اکثر برنامه های شبیه سازی سنگریزش، یک توده برآمده برای محاسبه مسیر ۳ بعدی سنگریزش مورد استفاده قرار می گیرد (استیونس، ۱۹۹۸)، (جونز و همکاران، ۲۰۰۰)، (گازتی و همکاران، ۲۰۰۲، ۲۰۰۴). در مدل سازی ۳ بعدی، تکنولوژی بسیار پیشرفته ای برای مدیریت اثر ۳ بعدی شکل سنگ طراحی شده است. درحقیقت، بررسی جداگانه اندازه و شکل سنگ نیاز به محاسبات پیچیده و دشواری در ارزیابی خطر

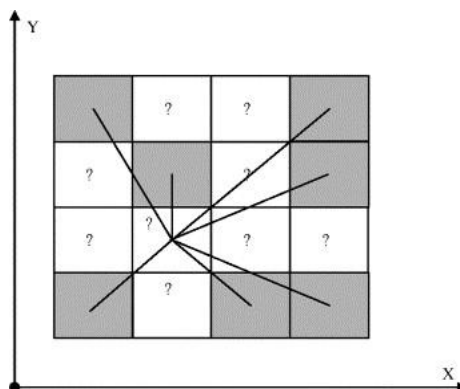
که $(V'_{Dip}, V'_{Trend}, V'_N)$ بردارهای سرعت جهش بدون هدررفت انرژی، مولفه سرعت سنگ در راستای شیب پایینی سلول، V_{Trend} مولفه سرعت سنگ در راستای مایل، V_N مولفه سرعت سنگ در راستای شیب نرمال سلول، R_N ضریب خسارت نرمال در بازه $[0,1]$ و R_T ضریب خسارت مماسی در بازه $(0,1)$ می‌باشد. الگوریتم چرخش یا 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 ۰/۵ متر بر ثانیه) کاهش یابد، پس از برخورد سنگ با زمین، چرخش یا لغزش اتفاق می‌افتد.

مدل‌سازی رستری توزیعی جهت آنالیز خطر

سنگ ریزش

شیوه مدل‌سازی

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 بعدی فرآیند سنگ‌ریزش قادر می‌سازد. شکل ۲ یک مدل مفهومی از مدل‌سازی رستری را با استفاده از تکنولوژی درون‌یابی زمین آماری 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 بعدی سنگ‌ریزش و داده مبنای مکانی سنگ‌ریزش به دست می‌آیند. سلول‌های با علامت سؤال، مناطق نامعلومی هستند که تحت پوشش شبیه‌سازی یا بازدید صحرایی قرار نگرفته‌اند. این مسئله در مورد مطالعه سنگ‌ریزش در مناطق وسیع بسیار متداول است. مقدار این سلول‌های نامعلوم با درون‌یابی مکان آماری پیش‌بینی می‌شود. سرانجام، آنالیز همسایگی برای کل داده رستری جهت تولید سطح پیش‌بینی شده پیوسته صورت می‌پذیرد.



شکل ۲- نقشه شماتیکی از مدل‌سازی رستری با استفاده از روش درون‌یابی زمین آمار. 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 مکان آماری پیش‌بینی می‌شود. خطوط، هم‌بستگی مکانی بین سلول‌های ناشناخته و سلول‌های نمونه را نشان می‌دهد

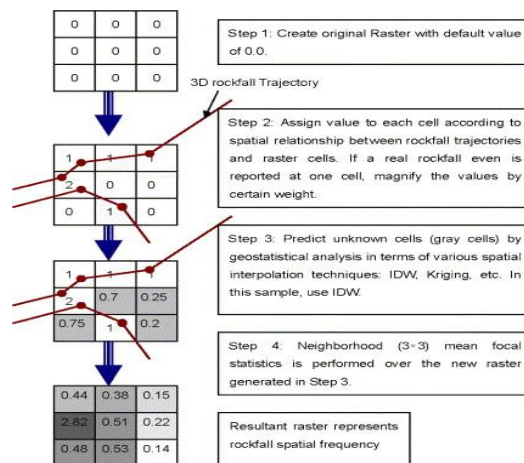
ارتفاع جهش (انرژی پتانسیل) و انرژی جنبشی مشخص شود. برای رستر پیش‌بینی شده خطر نهایی، حد آستانه‌ای وجود دارد. شکل ۳ روند کار

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

سلول‌ها عدد ۲ درج می‌شود. بعد از مرحله ۲، هنوز بسیاری از سلول‌ها صفر باقی مانده‌است. البته این بدان معنی نیست که آن‌ها با محل ریزش برخوردی ندارند، به‌عنوان مثال، سلول‌هایی که در مجاورت سلول‌های با ارزش ۲ هستند مشخصاً در معرض خطر می‌باشند. درون‌یابی مکان آماری در مرحله ۳ برای پیش‌بینی خطر این مناطق نامعلوم انجام می‌شود. یک رستر جدید در این مرحله تولید می‌شود. در مرحله ۴، آنالیز تمرکز همسایگی بر روی این رستر جدید به منظور به‌دست آمدن سطح پیش‌بینی پیوسته جدید از فراوانی مکانی سنگ‌ریزش انجام می‌شود.

تولید رستر فراوانی مکانی سنگ‌ریزش را نشان می‌دهد. این روش شامل چهار مرحله استاندارد می‌باشد: ابتدا رستری با ارزش پیش فرض صفر تولید می‌شود. معمولاً رستر اولیه دارای مقدار، اندازه سلول و سامانه زمین مرجعی مشابه با لایه ورودی DEM می‌باشد. در مرحله ۲ آنالیز توپولوژیکی در ۲ مرحله برای تعیین هم‌بستگی مکانی بین مسیرهای ۳ بعدی 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



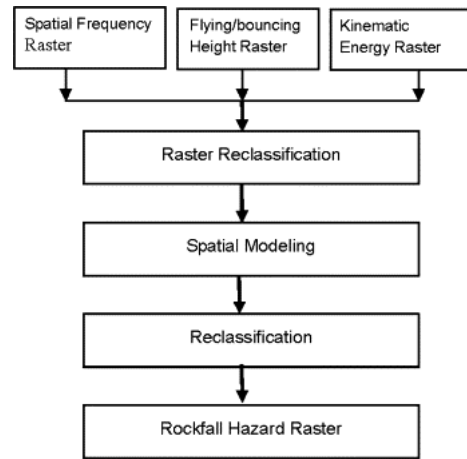
شکل ۳- روند تولید رستر فراوانی مکانی سنگ‌ریزش که شامل ۴ مرحله فوق می‌باشد

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 ۴، مراحل مورد نیاز برای تولید رستر نهایی خطر سنگ‌ریزش را نشان می‌دهد.

ارزش هر سلول نشان‌دهنده احتمال مکانی وقوع سنگ‌ریزش می‌باشد. سلول‌های تیره تر نشان‌دهنده فراوانی مکانی بیشتر بوده و سلول‌های روشن‌تر مشخص‌کننده امنیت نسبی است. مراحل مشابه به این برای ایجاد رستر ارتفاع پرتاب یا جهش و رستر انرژی جنبشی با تنها تفاوت در انجام مرحله 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

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در ناحیه زمین‌شناختی البرز مرکزی، بر گستره ای از سنگ‌های کامبرین تا کواترنری واقع شده است. مسئله تنوع سازندی، ویژگی‌های زمین ساختی، خصوصیات آب و هوایی، ارتفاع از سطح دریا، و 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. منطقه امامزاده علی - آب اسک در بخش لاریجان از شهرستان آمل استان مازندران، مابین $52^{\circ} 07' 40''$ تا $52^{\circ} 09' 25''$ طول شرقی و $35^{\circ} 20' 20''$ تا $35^{\circ} 52' 03''$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۵ و ۶).



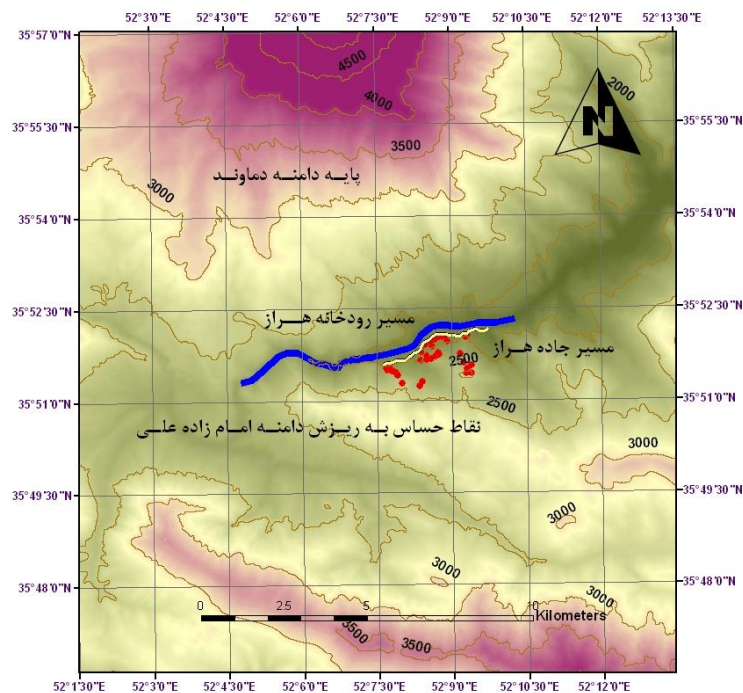
شکل ۴- روند تولید رستر خطر سنگ‌ریزش



شکل ۵- موقعیت جغرافیایی محدوده امامزاده علی - آب اسک بر روی تصویر اخذ شده از Google Earth

(وولارد و کولبی، ۲۰۰۲ و ناگیهارا و همکاران، ۲۰۰۴) در این مطالعه از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان نقشه برداری کشور و نقاط ارتفاعی برداشت شده با دوربین نقشه برداری توتال برای دقت بیشتر و مناطق گپ استفاده شد. سپس مدل رقومی ارتفاعی DEM با قدرت تفکیک ۵*۵ مترمربع با روش درون‌یابی به‌دست آمد (شکل ۶).

این منطقه با توپوگرافی کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، عمده شرایط طبیعی را برای ایجاد طیف وسیعی از سنگ ریزش‌ها داراست. بر پایه توضیحات داده شده خطر سنگ‌ریزش به طریق مسیر یابی ۳ بعدی در منطقه امامزاده علی از طریق مدل سازی ۳ بعدی و به صورت توزیع مکانی در GIS انجام گرفت. یکی از مهمترین ورودی‌ها برای تهیه مدل توزیعی سنگ‌ریزش، توپوگرافی زمینی است



شکل ۶- مشخصات سنگ ریزش محدوده 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

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 (دارن ۲۰۰۳). 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) بر حسب متر بر ثانیه، فاصله انتقال (از پرتاب به غلطیدن) بر حسب متر، زاویه انتقال (از غلطیدن به پرتاب) بر حسب درجه. دسته دوم پارامترها به مشخصات ژنتیکی سنگ مربوط می‌شود. این مشخصات به صورت یک پایگاه داده ای هم برای سطح منطقه مورد مطالعه و هم برای تک تک نقاط (۲۸ نقطه موجود در جدول ۱) محاسبه شد. این مشخصات عبارتند از: ضریب خسارت نرمال، ضریب

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 مربوط به منطقه مورد مطالعه از نرم افزار GoogleEarth مربوط به سال ۲۰۰۸ اخذ شد. البته این تصویر به فرمت JPEG بوده و فاقد باند برای مطالعه می‌باشد. لیکن به دلیل قدرت تفکیک بالا و برای تشخیص چشمی از این تصویر استفاده شد. شایان ذکر است که تصویر فوق مربوط به ماهواره آیکنوس می‌باشد. برای استفاده بهینه از این تصویر، با زدن نقطه‌ای 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 بعدی روند تحقیقات را ادامه داد. جزئیات مربوط به نقاط حساس به سنگ‌ریزش (۳۸ مورد) شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، ضریب اصطحکاک سنگ با بستر، تراکم پوشش خاک و ... مربوط به منطقه مورد مطالعه در

پهنه بندی خطر سنگ ریزش بر اساس تعیین مسیر

با در نظر گرفتن فاصله ثابت هر یک از نقاط تا جاده، نقطه توقف سنگ هایی که در فاصله ± 10 متر از جاده قرار دارند به عنوان پهنه بسیار خطرناک، نقاطی که تا فاصله ± 20 متر از جاده قرار دارند به عنوان پهنه خطرناک، تا ± 50 متر متوسط، تا ± 100 متر پهنه کم و بیشتر و کمتر از ± 100 متر را به عنوان پهنه با خطرناکی ضعیف طبقه بندی نمودیم (شکل ۹). برای به دست آوردن فواصل فوق الذکر، مقادیر حداقل و حداکثر حرکت سنگ را از فواصل نقطه برداشت تا جاده کسر نمودیم (جدول ۳).

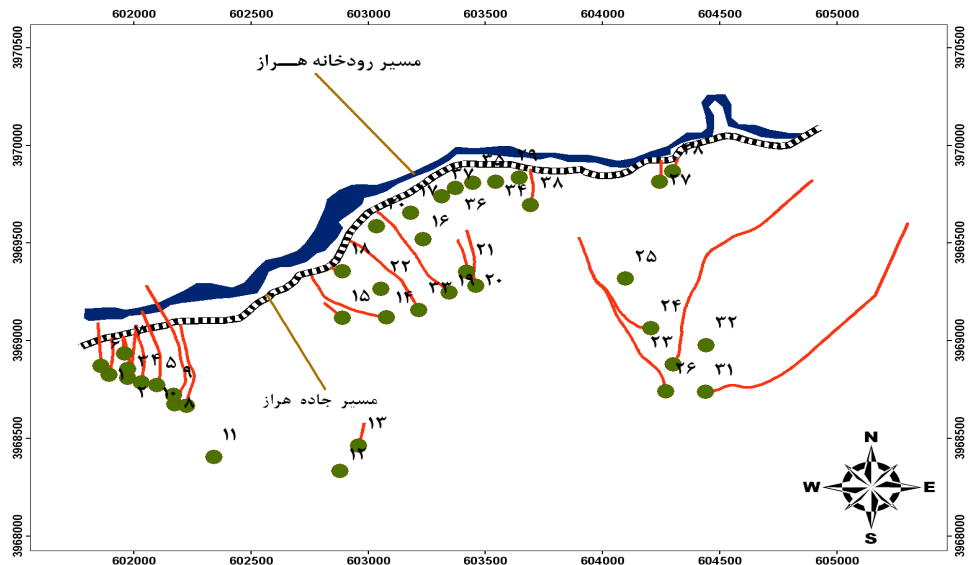
خسارت مماسی و زاویه اصطحکاک داخلی. سپس برای ۳۸ نقطه برداشت شده مدل را ۷۰۹۸ بار اجرا کرده و تعداد ۵۰۰ نمونه برای بررسی و مقایسه انتخاب شد. مقایسه مقدماتی به شیوه آماره های توصیفی انجام پذیرفت (جدول ۲). یک نمونه انتخابی از اجرای مدل به صورت ۳ بعدی و ۲ بعدی در شکل های ۷ و ۸ آمده است. برای تعیین شدت خطر سنگ ریزش، طبق جدول ۲، حداقل، حداکثر و متوسط جابجایی هر یک از نقاط سنگ ریزشی به دست آمد. فاصله نقاط تا جاده اصلی در محیط Arc GIS از مسیر زیر به دست آمد:
ArcToolbox / Analysis Tools / Proximity / Near



شکل ۷- نمایش ۳ بعدی مسیر سنگ ریزش. همانطور که مشاهده می شود 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 می یابند، تصویر Google Earth به صورت رقومی بر روی مدل رقومی ارتفاعی منطقه با ضریب اغراق ارتفاعی ۱/۵ بزرگنمایی شده است.

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

ردیف	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	شیب (درجه)	نوع بستر	ضریب خسارت نرمال	ضریب خسارت مماسی	زاویه اصطحکاک (درجه)
1	52 07 42/61	35 51 30/08	2192.3	30	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
2	52 07 45/83	35 51 29/50	2200.5	53	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
3	52 07 45/77	35 51 30/93	2131.5	66	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
4	52 07 48/14	35 51 28/76	2225.1	59	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
5	52 07 50/72	35 51 28/31	2215.0	36	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
6	52 07 41/28	35 51 31/52	2127.0	68	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
7	52 07 45/29	35 51 33/59	2012.9	44	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
8	52 07 53/78	35 51 25/07	2288.5	60	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
9	52 07 53/57	35 51 26/63	2214.2	41	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
10	52 07 55/69	35 51 24/76	2284.7	62	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
11	52 08 00/24	35 51 16/28	2422.8	21	دامنه سنگی سخت	0.40	0.85	10,00
12	52 08 21/69	35 51 13/71	2336.9	19	دامنه خاکی با پوشش مناسب	0.20	0.50	30,00
13	52 08 24/94	35 51 17/93	2284.8	30	دامنه خاکی با پوشش مناسب	0.20	0.50	30,00
14	52 08 29/99	35 51 39/17	2089.4	۲۱	واریزه	0.30	0.70	20,00
15	52 08 22/49	35 51 39/15	1986.0	۳۴	واریزه	0.30	0.70	20,00
16	52 08 36/43	35 51 52/09	1994.4	18	واریزه	0.30	0.70	20,00
17	52 08 34/30	35 51 56/46	1942.7	8	واریزه	0.30	0.70	20,00
18	52 08 22/60	35 51 46/90	1935.6	43	واریزه	0.30	0.70	20,00
19	52 08 40/61	35 51 43/19	2168.3	38	واریزه	0.30	0.70	20,00
20	52 08 45/29	35 51 44/22	2180.0	27	واریزه	0.30	0.70	20,00
21	52 08 43/73	35 51 46/60	2109.6	30	واریزه	0.30	0.70	20,00
22	52 08 29/06	35 51 43/22	2024.3	38	واریزه	0.30	0.70	20,00
23	52 09 18/63	35 51 30/85	2431.5	31	دامنه سنگی هوازده	0.35	0.80	15,00
24	52 09 14/93	35 51 36/93	2319.4	38	دامنه سنگی هوازده	0.35	0.80	15,00
25	52 09 10/70	35 51 45/21	2183.0	20	دامنه سنگی هوازده	0.35	0.80	15,00
26	52 09 17/33	35 51 26/45	2532.4	32	دامنه سنگی هوازده	0.35	0.80	15,00
27	52 09 16/72	35 52 01/19	2019.1	16	دامنه سنگی هوازده	0.35	0.80	15,00
28	52 09 18/94	35 52 02/95	1989.4	35	دامنه سنگی هوازده	0.35	0.80	15,00
29	52 08 52/89	35 52 02/16	1913.6	16	واریزه	0.30	0.70	20,00
30	52 08 28/53	35 51 54/28	1935.2	16	واریزه	0.30	0.70	20,00
31	52 09 24/03	35 51 26/23	2491.4	43	دامنه خاکی با پوشش ضعیف	0.25	0.60	25,00
32	52 09 24/30	35 5134/04	2406.9	23	دامنه خاکی با پوشش ضعیف	0.25	0.60	25,00
33	52 08 35/51	35 51 40/29	2179.9	48	واریزه	0.30	0.70	20,00
34	52 08 48/81	35 52 01/49	1929.2	20	واریزه	0.30	0.70	20,00
35	52 08 44/94	35 52 01/39	1932.1	12	واریزه	0.30	0.70	20,00
36	52 08 41/94	35 52 00/58	1933.8	10	واریزه	0.30	0.70	20,00
37	52 08 39/65	35 51 59/14	1940.6	7	واریزه	0.30	0.70	20,00
38	52 08 54/74	35 51 57/57	1974.3	30	واریزه	0.30	0.70	20,00



شکل ۸ - نمایش ۲ بعدی مسیر سنگ ریزش ها به همراه شماره نقاط برداشت شده

جدول ۲- آماره توصیفی مربوط به نقاط سنگ ریزشی

نقاط سنگ ریزش	اختلاف در طول (متر)	حداقل طول مسیر	حداکثر طول مسیر	متوسط طول مسیر (متر)	فاصله نقطه تا جاده (متر)
P1	1358.1	227.5	1585.60	1370.6	۱۰۰۰
P2	42.7	479.4	522.10	509.1	۷۹۹
P3	24.1	16.7	40.80	30.1	۵۳۰
P4	540.6	494.8	1035.40	971.4	۱۱۲۷
P5	5.8	169.5	175.30	173.9	۱۱۲
P6	174.8	113.1	287.90	129.5	۶۱
P7	15.0	6.5	21.50	17.3	۸۹۲
P8	229.7	133.3	363.00	224.9	۸۲۷
P9	628.4	264.8	893.20	329.6	۱۸۱
P10	199.8	288.4	488.20	352.7	۲۲۰
P11	73.2	248.5	321.70	256.9	۱۷۷
P12	369.1	182.4	551.50	362.7	۲۵۸
P13	549.6	18.1	567.70	397.8	۲۸۸
P14	124.1	197.0	321.10	218.2	۱۲۷
P15	49.9	54.1	104.00	67.0	۹۵
P16	687.7	122.3	810.00	457.3	۴۰۳
P17	24.5	22.1	46.60	37.6	۳۵۵
P18	640.3	125.2	765.50	503.4	۴۲۴

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

نتایج

همانطور که از جدول فوق بر می آید، 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 از 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 نشان دهنده پتانسیل پایین خطر آفرینی این نقاط نیست. بلکه اساساً

این نسبت ها و درصدها نمی تواند نشان دهنده کم یا زیاد بودن توان بالقوه خطرآفرینی ذاتی سنگ ریزش منابع سنگ ریزشی باشد. موضوعی که برای ما حائز اهمیت است دوری و یا نزدیکی فاصله توقف این سنگ ها نسبت به جاده اصلی بوده که پیامد خطرآفرینی را برای جاده تعریف می کند. چه بسا در حالت شدت خطر ضعیف و کم ما بیشترین جابجایی سنگ را خواهیم داشت، لیکن در فاصله ای بسیار دور تر از جاده اصلی متوقف می شوند که امکان خطر را برای جاده کاهش می دهد. بدین ترتیب نقاط برداشتی P15، P26 و P38، از بیشترین شدت خطر سنگ ریزش برای جاده هر از منطقه امامزاده علی برخوردار هستند. هر سه این نقاط از شیب بالای

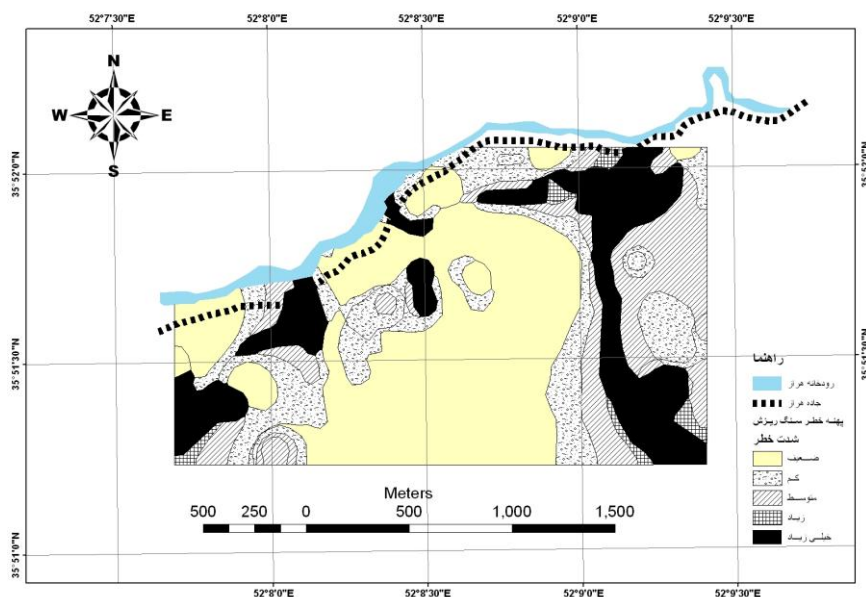
پهنه بندی خطر سنگ ریزش بر اساس تعیین مسیر

۶۰ درصد برخوردار بوده و همگی متعلق به مناطق واریزه ای می باشند. 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 می باشند که در مشاهدات صحرایی نیز انتظار آن می رفت

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



شکل ۹- پهنه بندی خطر سنگ ریزش بالادست جاده هراز- منطقه امامزاده علی شهرستان امل

سخت که مدل سازی عددی را یکپارچه سازی می نمایند و فاکتورهای شکل سنگ را مورد توجه قرار می دهند، می توانند نتایج واقعی تری را به دست آورند. البته این مسئله بسیار حائز اهمیت است که به هنگام شبیه سازی موارد دقت و صحت داده ها (مخصوصاً داده های توپوگرافی)، همچنین انتخاب مناسب پارامترهای سنگی منابع ریزش سنگ، و خصوصیات سطحی زمین را مد نظر قرار دهیم. مشاهدات صحرایی داده های تاریخی منطقه مورد مطالعه و بررسی داده های تاریخی منطقه مورد مطالعه از لوازم اصلی کالیبره کردن پارامترهای مدل برای بهبود نتایج شبیه سازی است. تابع الحاقی RA به صورت منحصر به فرد و قدرتمند همراه با ابزارهای آنالیزگر مدل ساز ۳ بعدی، امکان مدل سازی فرآیند سنگ ریزش و ارزیابی خطر آن را فراهم می نماید. این تابع توانسته به طور کامل خود را با محیط GIS که توانایی های بسیاری در زمینه مدیریت، تصویر سازی، و مدل سازی مکانی داده ها دارد، سازگار نماید که مواردی از قابلیت های ویژه این تابع به شرح ذیل را ارائه می شود:

شکل ۹، پهنه بندی خطر سنگ ریزش را در ناپایدارترین حالت نشان می دهد. برای به دست آوردن این پهنه خطر، برای پائین آوردن میزان ریسک، هرکجا که سلولی با درجه شدت خطر بیشتر بر روی سلولی با درجه شدت خطر کمتر قرار می گرفت (در حالات پایدار، متوسط و ناپایدار)، 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 می گرفتیم (شکل ۹).

بحث و نتیجه گیری

هرچند سنگ ریزش ها به لحاظ فیزیکی تحت تأثیر شیب طبیعی دامنه ها می باشند، لیکن با مسائل عدم قطعیت و احتمالات در ارتباط می باشند که می بایست مورد محاسبه قرار گیرد. مدل سازی قطعی در رابطه با تشریح و ارزیابی فرآیندهای طبیعی پیچیده مانند سنگ ریزش با مشکلاتی مواجه است. روش های آماری پیچیده و

- این تابع تمامی فرآیندهای فیزیکی سنگ ریزش نظیر پرتاب/ جهش، برخورد و برگشت دوباره، چرخش/ لغزش را با استفاده از پارامترهای توزیعی به صورت ۳ بعدی مدل سازی می کند؛
- پس از دریافت پارامترهای اولیه، خطر سنگ ریزش را با دقت بالا محاسبه می نماید.

- تلفیق مدل سازی فرآیندهای فیزیکی ۳ بعدی با مدل سازی توزیعی رستری به منظور ارتقاء شناخت بهتر و ارزیابی موثرتر خطر سنگ ریزش؛

منابع:

- Agliardi, F., and Crosta, G.B., 2003. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 40 (4), p. 455–471.
- Descoeurdes, F., and Zimmermann, Th., 1987. Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. In: *Proceedings of the Sixth International Congress of Rock Mechanics*, Montreal, Canada, p. 337–342.
- Dorren, L.K.A., 2003. A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, v. 27 (1), p. 69–87.
- Dorren, L.K.A., Maier, B., Putters, U.S., and Seijmonsbergen, A.C., 2004. Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. *Geomorphology*, v. 57 (3–4), p. 151–167.
- Evans, S.G., and Hungr, O., 1993. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 30, p. 620–636.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., and Agliardi, F., 2002. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers and Geosciences*, v.28 (9), p. 1079–1093.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., and Ghigi, S., 2004. Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera Valley, central Italy. *Environmental Management*, v. 34 (2), p. 191–208.
- 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*, v.1. A.A. Lausanne, Balkema, Rotterdam, p. 3–35.
- 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*, v. 5 (5), p. 621–632.
- Jones, C.L., Higgins, J.D., and Andrew, R.D., 2000. Colorado Rockfall Simulation Program Version 4.0 (for Windows), Colorado Department of Transportation, Colorado Geological Survey, 127 p.
- McNeil, B.E., Jasper, J.D., Luchsinger, D.A., and Rainsmier, M.V., 2002. Implementation and application of GIS at Timpanogos Cave National Monument, Utah. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 64 (1), p.34–37.
- 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, 105 p.
- Nagihara, S., Mulligan, K.R., and Xiong, W., 2004. Use of a threedimensional laser scanner to digitally capture the topography of sand dunes in high spatial resolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 29 (3), p. 391–398.
- Woolard, J.W., and Colby, J.D., 2002. Spatial characterization, resolution, and volumetric change of coastal dunes using airborne LIDAR: cape Hatteras, North Carolina. *Geomorphology*, v. 48 (1–3), p. 269–287.