

تحلیل پایداری شیب با استفاده از مدل فرآیندی SINMAP

(مطالعه موردی: پهنه لغزشی هاوانان، بیرجند)

سید محمد تاجبخش^۱- استادیار آبخیزداری، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

هادی معماریان- استادیار آبخیزداری، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

مجید آسیایی- کارشناس ارشد آبخیزداری، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۸ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۵/۲۹

چکیده

روستای هاوانان در ۱۵ کیلومتری جنوب غرب بیرجند و در دامنه شمالی رشته‌کوه باقران واقع شده و تاریخ اولین حرکت اصلی لغزش در منطقه در سال ۱۳۶۴ و تاریخ آخرین حرکت اصلی در سال ۱۳۸۵ است. در این مقاله پهنه‌بندی حساسیت به لغزش و تحلیل پارامترهای فیزیکی- هیدرولوژیکی و تکنیکی به‌منظور شناسایی بیشتر وضعیت شکل‌گیری توده‌های لغزشی منطقه و تحلیل پایداری دامنه‌ها به کمک مدل فرآیندی SINMAP انجام شده است. این مدل نشان می‌دهد بخش اندکی از پهنه لغزشی هاوانان در محدوده رطوبتی اشباع قرار می‌گیرد و کمتر از ۳۰ درصد آن دارای حساسیت متوسط تا بالا به لغزش است؛ لذا بایستی در این محدوده به دنبال علل خارجی تأثیرگذار در پدیداری لغزش بود. محدوده هاوانان متأثر از سه سری گسل اصلی با روندهای مختلف می‌باشد و در اثر تقاطع این سه سری گسل، واحدهای سنگی (اسپیلیت‌ها، پریدوتیت‌ها و گابروها) به‌صورت بلوک‌های گسلی کشیده درآمده و در اثر ادامه فرآیند برش، این بلوک‌ها متحمل تغییر شکل، جابجایی و چرخش شده‌اند. ترکیب سنگ‌شناسی (قرارگیری اسپیلیت بر روی سرپانتینیت) و وجود دو سری شکستگی به‌موازات گسل‌های هاوانان و مزار مهم‌ترین عوامل ناپایداری هستند. علاوه بر این برخاستگی رشته‌کوه باقران باعث افزایش تدریجی نشیب دامنه و رخداد زمین‌لرزه‌ای ادواری نیز موجب تشدید لغزش می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: زمین لغزش، پایداری شیب، پهنه‌بندی، SINMAP، تکنیک.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر بررسی‌های گسترده‌ای در خصوص علل و عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش‌ها، مدل‌سازی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است. عوامل متعددی مانند شرایط توپوگرافی،

آب و هوا و هوازدگی بر پایداری یک شیب تأثیر گذاشته و می‌توانند باعث ایجاد لغزش شوند (سوترز و فن وستن^۱، ۱۹۹۴، چائو و همکاران^۲، ۲۰۰۴، پیرت و همکاران^۳، ۲۰۰۵، گارفی و همکاران^۴، ۲۰۰۷). راهبرد مطالعه زمین‌لغزش شامل شناخت فرآیند، تجزیه و تحلیل خطر و پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش در آینده برای کاهش پیشرفت و خسارات ناشی از آن است (طالبی و ایزد دوست، ۱۳۹۰: ۶۳). امروزه برای پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها از روش‌های مختلفی از جمله روش‌های آماری، روش‌های توصیفی و روش‌های فرآیند محور استفاده می‌شود که در ایران بیشتر مطالعات صورت گرفته بر اساس روش‌های آماری و توصیفی است (همان)؛ به‌عنوان مثال احمدی و محمدخان (۲۰۰۲) با استفاده از روش توصیفی در بررسی حرکت‌های توده‌ای در حوزه آبخیز طالقان دریافتند که گسل و رواندگی‌ها جهت دامنه‌ها را تحت تأثیر قرار داده است؛ به‌طوری‌که سولیفیلکسیون‌ها به‌جای دامنه شمالی در دامنه‌های جنوبی اتفاق می‌افتند. معماریان و همکاران (۲۰۰۳) در بررسی زمین‌لغزش روستای اسطرخی واقع در خراسان شمالی، با استفاده از نمایه آماری استقرار روستا بر روی سازند زمین‌شناسی حساس، شیب ناپایدار و تغییر کاربری را عوامل اصلی دانسته‌اند.

ژو و همکاران^۵ (۲۰۰۲) رابطه مکانی و عوامل مؤثر بر آن‌ها را جهت دستیابی به الگوی مکانی زمین‌لغزش‌ها و عوامل مؤثر در جزیره لانتوا بررسی کردند و نتیجه گرفتند که بیشتر لغزش‌ها در شیب‌های ۴۰-۲۵ درجه اراضی مرتعی لخت و مناطق نزدیک به گسل‌های جزیره رخ داده‌اند. آوانزی و همکاران^۶ (۲۰۰۴) طی بررسی تأثیر عوامل زمین‌شناسی بر وقوع لغزش‌های کم‌عمق منطقه کوهستانی آپونا واقع در شمال غربی توسکانی ایتالیا بیان نمودند که سنگ‌شناسی بستر و نفوذ ناپذیری، عوامل مهمی در وقوع زمین‌لغزش‌ها بوده‌اند. کوآستا و همکاران^۷ (۲۰۰۷) در بررسی حساسیت به وقوع زمین‌لغزش در حوزه رودخانه نالون در کوه‌های سانتا بریان آمریکا اعلام کردند که بیشتر ناپایداری‌ها مربوط به شیب‌هایی با جهت جنوب غربی - شمال شرقی و درجه شیب ۱۶ تا ۳۰ می‌باشد. راوی^۸ و همکاران (۲۰۱۲: ۱۹۸) عدم پایداری شیب را عامل اصلی لغزش در منطقه جامو و کشمیر هند بیان نموده‌اند.

مدل‌های پهنه‌بندی آماری بیشتر مبتنی بر تراکم زمین‌لغزش‌ها در واحد سطح بوده و جهت به دست آوردن نتایجی صحیح‌تر از آن‌ها بایستی لایه‌های محاسباتی بیشتری را در مدل وارد نمود؛ اما مدل‌های دترمینیستیک یا قطعی مانند SINMAP بر پایه محاسبات عددی بوده و پارامترهای فیزیکی نسبتاً دقیقی را در مدل دخیل می‌کنند (معماریان و صفدری، ۱۳۸۸: ۱۱). یکی از ویژگی‌های بارز مدل نرم‌افزاری SINMAP این است که محاسبات بر پایه یک شبکه

1 Soeters and van Westen

2 Chau et al.

3 Peart et al.

4 Garfi et al.

5 Zhou et al.

6 Avanzi et al.

7 Cuesta et al.

8 Ravi et al.

سلولی انجام می‌گیرد. در واقع این مدل تلفیقی است از یک مدل هیدرولوژیکی و یک مدل فیزیکی پایداری شیب که نتایج آن زمانی که در ارتباط و مقایسه با سایر مدل‌های مشابه جهت محاسبه شاخص پایداری قرار می‌گیرد، می‌تواند نتایج مفیدی جهت استفاده محققین در بر داشته باشد. ولی آنچه این مدل را متمایز می‌کند این است که در SINMAP نیازی به تعریف عددی دقیق پارامترهای اقلیم و خاک نیست، بلکه می‌توان دامنه‌ای از ارزش‌ها را برای این پارامترها در نظر گرفت؛ یعنی همان مفهوم عدم قطعیت که به صورت طبقات نسبی خطر زمین‌لغزش ارائه می‌شود (معماریان و صفدری، ۱۳۸۸: ۱۳).

آچاریا^۱ (۲۰۰۳) در منطقه‌ای در هیمالیا تحلیل پایداری شیب را با مدل‌های ریاضی بررسی نموده و در نهایت آن را با مدل SINMAP مقایسه کرده و همبستگی حدود ۹۸ درصدی در نزدیکی نتایج به‌دست‌آمده است. ویور و نووسین^۲ (۲۰۰۳) با استفاده از مدل SINMAP به بررسی زمین‌لغزش‌ها در منطقه مرتفع فلات لسی در شرق لهستان پرداختند. نتایج نشان داد که در این مدل می‌توان با مقادیر عددی تخمینی و تعریف محدوده‌ای از ارزش‌ها برای پارامترهای واسنجی به نتایج نسبتاً قابل قبولی رسید. دب و الکادی (۲۰۰۹) در بررسی ۲۲۶ نقطه لغزشی با استفاده از مدل SINMAP در هاوایی، کارایی مدل را در بررسی مناطق خطر زمین‌لغزش تأیید نمودند ولی بر این نکته تأکید داشتند که نتایج به‌دست‌آمده بایستی با بررسی‌های ژئوتکنیکی تکمیل گردد. ترهورست و کرجا (۲۰۰۹) توانستند مدل SINMAP را با موفقیت جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه‌ای مسکونی در کشور آلمان بکار بگیرند. طالبی و ایزد دوست (۱۳۹۰: ۶۳) از مدل SINMAP در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوزه سد ایلام استفاده نموده و نتایج نشان از دقت بالای مدل در پیش‌بینی محدوده خطر ساز بوده است. معماریان و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی تحلیل پایداری شیب در حوزه لانگات مالزی از مدل SINMAP استفاده نموده و لایه‌های شاخص پایداری و شاخص اشباع خاک را به‌عنوان دو متغیر تأثیرگذار بر شبیه‌سازی کاربری اراضی وارد مدل مارکوف کرده‌اند.

هدف از این مطالعه پهنه‌بندی حساسیت به لغزش و تحلیل پارامترهای فیزیکی، تکتونیک و مورفولوژیکی به‌منظور شناسایی بیشتر وضعیت شکل‌گیری توده‌های لغزشی منطقه و تحلیل پایداری دامنه‌ها به کمک مدل فرآیندی SINMAP می‌باشد.

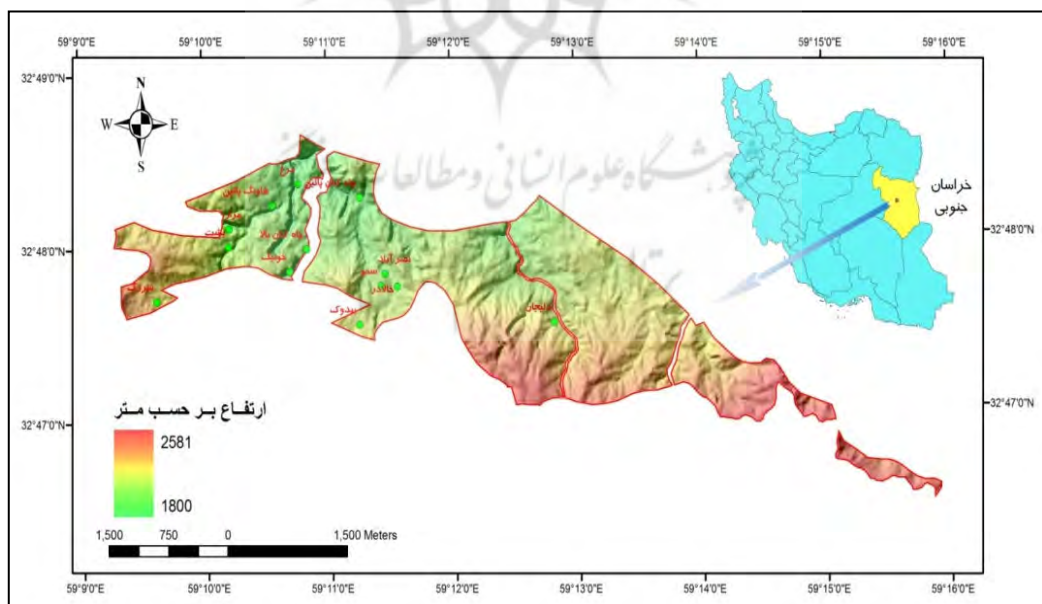
۲. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد نظر (روستای هاوانان) در ۱۵ کیلومتری جنوب غرب بیرجند و در دامنه شمالی رشته‌کوه باقران با مختصات جغرافیایی $59^{\circ} 10' 12''$ طول شرقی و $32^{\circ} 48' 11''$ عرض شمالی در ارتفاع ۲۱۰۰ متری از سطح دریا واقع شده است. آب و هوای منطقه گرم و خشک است. گرم‌ترین ماه سال تیر و سردترین ماه سال دی است. میانگین بارندگی ۴۰ ساله منطقه ۱۷۷ میلی‌متر است. سال ۱۳۶۱ با ۲۴۱ میلی‌متر بارش پرباران‌ترین سال و حداقل بارندگی در

1 Acharia

2 Waver and Nowocien

سال ۱۳۸۳ با ۵۶ میلی متر بوده است. میانگین درجه حرارت سالیانه منطقه ۱۶/۵ درجه سانتی گراد است. خاک‌های تشکیل شده در این منطقه عمدتاً خاک‌های نسبتاً حاصلخیز با ضخامت اندک حاصل از آتراسیون واحدهای سنگی است که به صورت برجا بر روی سنگ مادر و دامنه نهشته شده‌اند. پوشش گیاهی منطقه بیشتر مرتعی (درمنه زار) و با وضعیت فقیر و گرایش منفی است. واحدهای سنگی در این منطقه شامل پریدوتیت‌ها و اسپیلیت‌ها می‌باشد. مورفولوژی‌های پست در این منطقه متعلق به واحد پریدوتیتی است. اسپیلیت‌ها در مجموع خشن‌ترین لیتولوژی شمال منطقه را تشکیل می‌دهند. جهت آبراهه‌ها در واحدهای اسپیلیت و مجموعه کالرملازهای افیولیتی از شکستگی‌های منطقه پیروی می‌کنند. فرسایش فیلیت‌ها موجب ایجاد طرح آبراهه شاخه دندربیتی شده است؛ اما حتی این طرح آبراهه نیز گاهی تحت تأثیر گسل‌های اصلی قرار گرفته است. طرح آبراهه در واحد اسپیلیت راست‌گوشه است. همچنین رخساره منطقه، رخنمون سنگی بالای ۷۵ درصد می‌باشد (مهندسین مشاور سامان سدرو، ۱۳۸۹). تاریخ اولین حرکت اصلی لغزش در منطقه در سال ۱۳۶۴ و تاریخ آخرین حرکت اصلی در سال ۱۳۸۵ می‌باشد. خسارت وارده ناشی از لغزش شامل تخریب ۳۵ واحد مسکونی روستایی، ۵ هکتار زمین کشاورزی و یک مورد قنات می‌باشد که مجموعاً ۴۷۰۰ میلیون ریال بر اساس برآورد سال ۱۳۸۹ بوده است (مهندسین مشاور سامان سدرو، ۱۳۸۹). دامنه لغزشی مذکور غیر یکنواخت و مواج بوده، طول گسیختگی ۱۵۰۰ متر، عرض گسیختگی ۵۰۰ متر، اختلاف ارتفاع بین تاج و پنجه سطح گسیختگی ۳۵۰ متر، ارتفاع پرتگاه اصلی ۲۰ متر و مقدار حرکت بیش از ۱۰ متر می‌باشد. سرعت حرکت دامنه کند و وضعیت فعالیت آن معلق است (مهندسین مشاور سامان سدرو، ۱۳۸۹).



شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعاتی

۳. مواد و روش‌ها

در تهیه مدل رقومی ارتفاع از الگوریتم Topo to Raster نرم افزار ArcGIS استفاده شد. این روش که بر اساس برنامه ANUDEM بوده و توسط هاجینسون (۱۹۸۸ و ۱۹۸۹) توسعه داده شده، منجر به تهیه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) می‌شود که حداقل خطاها را به لحاظ هیدرولوژیک داراست. جهت تعیین اندازه تفکیک بهینه مدل رقومی ارتفاع از سه روش مختلف مقیاس کاری^۱، اندازه شیء مرجع^۲ و پیچیدگی زمین^۳ (هنگل^۴، ۲۰۰۶) استفاده شد و در نهایت اندازه سلول به دست آمده با روش مقیاس کاری (۱۰ متر) به عنوان اندازه سلول بهینه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

فرآیند پهنه‌بندی خطر زمین لغزش بر روی اجزای واحد اراضی ۱-۸-۱ انجام گرفت. این اراضی شامل کوه‌های مرتفع با قله تیز و پستی و بلندی زیاد و متشکل از فیلیت، شیست، همراه با سنگ‌های اسپیلیتی و رخنمون سنگی زیاد و شیب ۵۰-۴۰ درصد است. سطح این اراضی عموماً لخت، بدون پوشش خاکی و یا دارای خاک کم عمق غیر یکنواخت سنگریزه دار می‌باشد. نتایج پروفیل و آزمایش‌های خاک‌شناسی نشان‌دهنده وجود خاکی با بافت متوسط لومی تا لومی شنی و ساختمان دانه‌ای و عمق کم (۵۰ سانتیمتر) در این پهنه مطالعاتی است. میزان کربن آلی ۰/۶۷، میزان هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع ۰/۵۶ دسی زیمنس بر متر و میزان اسیدیته آن ۷/۸ برآورد شده است. این خاک در حالت خشک سخت، در حالت مرطوب ترد و در حالت خیس چسبنده و کمی شکل پذیر (Sticky Plastic) است.

۱.۱. تئوری پایداری شیب

SINMAP بر اساس مدل عددی نامحدود پایداری شیب پایه‌گذاری شده (هاموند و همکاران^۵، ۱۹۹۲؛ مونتگومری و دیتریش^۶، ۱۹۹۴) که این مدل مؤلفه‌های ناپایدارکننده (نیروی ثقل) و پایدارکننده (نیروی اصطکاک و چسبندگی خاک) شیب را بر روی یک سطح شکست به موازات سطح زمین و البته با چشم‌پوشی از اثر مرزی موازنه کرده و شبیه‌سازی می‌نماید. SINMAP با استفاده از داده‌های ورودی یعنی شیب، سطح ویژه حوضه آبریز، ویژگی‌های خاک (استحکام) و خصوصیات اقلیمی (رطوبت هیدرولوژیک) عمل طبقه‌بندی زمین را بر اساس میزان پایداری انجام می‌دهد. هر یک از این پارامترها بر روی یک شبکه سلولی بیان می‌گردند تا قابل استفاده در محاسبات عددی نرم افزار باشند. متغیرهای وابسته به توپوگرافی به صورت خودکار از مدل رقومی ارتفاع استخراج می‌شوند. سایر متغیرهای ورودی دارای یک نوع عدم قطعیت می‌باشند؛ بنابراین به صورت حدود بالا و پایین یا دامنه‌ای در نرم افزار تعریف می‌شوند. با فرض یکنواخت

- 1 Working Scale
- 2 Size of Reference Object
- 3 Complexity of Terrain
- 4 Hengl
- 5 Hammond et al.
- 6 Montgomery and Dietrich

بودن توزیع پارامترها در دامنه عددی تعریف شده از جانب کاربر، نمایه پایداری یا SI به صورت یک احتمال تعریف می شود که نشان دهنده پایداری مکان یا بیکسل مورد مطالعه است. این دامنه عددی بین صفر و یک متغیر است که عدد صفر نشان دهنده حداکثر ناپایداری و عدد یک نشان دهنده حداقل ناپایداری است. جایی که ناپایدارکننده ترین مجموعه از پارامترهای مدل هنوز قادر به ناپایدار کردن شیب نیستند، ارزش عددی شاخص پایداری بیشتر از یک خواهد بود و در این حالت این شاخص به عنوان ضریب ایمنی یا اطمینان تعریف می شود (معماریان و صفدری، ۱۳۸۷). در جدول شماره ۱-۱ کلاس های پیش فرض مدل جهت طبقه بندی شاخص SI نشان داده شده اند.

جدول ۱ طبقات پایداری شیب در مدل SINMAP (معماریان و صفدری، ۱۳۸۷)

وضعیت	طبقه	حالت پیش بینی شده	دامنه پارامتر	تأثیر ممکن فاکتورهای مدل نشده
$5/SI > 1$	۱	پایدار	در این دامنه عددی مدل قادر به شبیه سازی عدم پایداری شیب نیست	عوامل ناپایدارکننده مهمی جهت ناپایداری سازی شیب مورد نیاز است
$25/5 > SI > 1/1$	۲	نیمه پایدار		عوامل ناپایدارکننده متوسطی به لحاظ اهمیت جهت ناپایداری سازی شیب مورد نیاز است
$0/25 > SI > 1/1$	۳	شبه پایدار		عوامل ناپایدارکننده ناچیز هم می توانند منجر به ناپایداری شیب شوند
$5/0 > SI > 0/1$	۴	آستانه پایینی پایداری	برای ناپایداری سازی شیب بایستی از نیمه خالی یا بدبینانه دامنه عددی ارزش های ورودی کمک گرفت	عامل ناپایدارکننده ای برای ناپایداری سازی شیب مورد نیاز نیست
$0/5 > SI > 0/0$	۵	آستانه بالایی پایداری	برای پایداری سازی شیب بایستی از نیمه پر یا خوش بینانه دامنه عددی ارزش های ورودی کمک گرفت	عوامل پایداری کننده شاید به پایداری شیب کمک کنند
$0 > SI/0$	۶	حفاظتی	در این دامنه عددی مدل قادر به شبیه سازی پایداری شیب نیست	برای پایداری شیب حتماً بایستی از عوامل پایداری کننده استفاده کرد

۲.۱. مدل عددی پایداری شیب

این روش به مدل سازی ضریب اطمینان (هاموند و همکاران، ۱۹۹۲) پرداخته که این ضریب به صورت نسبت نیروهای پایداری ساز به نیروهای ناپایدارکننده شیب تعریف می شود:

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [\rho_s g (D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g) D_w] \tan \phi}{D \rho_s g \sin \theta \cos \theta} \quad (1)$$

که در این معادله C_r چسبندگی حاصل از ریشه گیاهان $[N/m^2]$ ، C_s چسبندگی خاک $[N/m^2]$ ، θ زاویه شیب، ρ_s وزن مخصوص خاک مرطوب $[Kg/m^3]$ ، ρ_w وزن مخصوص آب $[Kg/m^3]$ ، g شتاب جاذبه زمین

(9.81 m/s^2) ، D عمق خاک در حالت عمودی $[m]$ ، D_w ارتفاع عمودی سطح آب درون خاک $[m]$ و θ زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشند. در این معادله θ آرکتانژانت شیب (S) است.

کوئیشن ترکیبی خاک نیز نسبت به ضخامت خاک یک ضریب بدون بعد را در محاسبات ایجاد می‌نماید:

$$C = (C_r + C_s) / (h \rho_s g) \quad (2)$$

در واقع معادله ۲ بیانگر نسبت نیروی چسبندگی خاک به وزن آن است؛ یا به عبارتی دیگر نشان‌دهنده سهم نسبی نیروهای چسبندگی خاک، در پایداری شیب است (معماریان و صفدری، ۱۳۸۷).

۳.۱. شاخص رطوبت توپوگرافیک

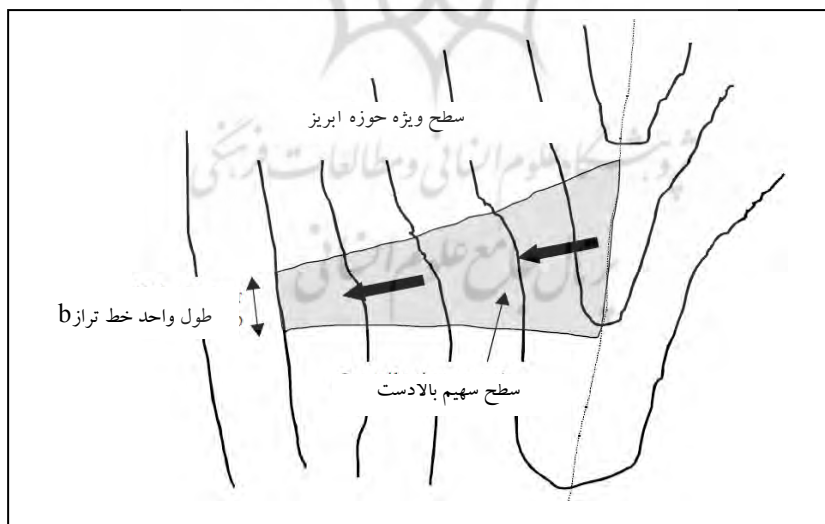
در TOPMODEL (بون و کرکبای^۱، ۱۹۷۹) و سایر مدل‌های هیدرولوژیک جهت تخمین شاخص رطوبت بر

اساس توپوگرافی، مفروضات مدل به شرح زیر است:

۱- حرکت جریان کم عمق آب زیر سطحی درون خاک، تابعی از شیب توپوگرافیک دامنه است. در واقع این نکته مؤید این است که سطح بالادست سهم^۲ در جریان آب در هر نقطه از حوضه (سطح ویژه حوضه آبریز) با توجه به توپوگرافی تعریف می‌گردد (شکل ۱-۴).

۲- دبی جانبی در هر نقطه، در تعادل با تغذیه سفره "R" (به صورت جریان ماندگار) است (m/hr) .

۳- ظرفیت یا میزان شار جانبی جریان در هر نقطه، برابر با $T \sin \theta$ است که T قابلیت انتقال آب در خاک می‌باشد بر حسب m^2/hr ؛ یعنی حاصلضرب هدایت هیدرولیکی (m/hr) در ضخامت خاک (m) .



شکل ۲ نمایشی شماتیک از سطح ویژه حوزه آبریز

1 Beven and Kirkby

2 Contributing area

حال با در نظر گرفتن فرض ۳، رطوبت نسبی به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$w = \text{Min}\left(\frac{R a}{T \sin \theta}, 1\right) \quad (۳)$$

حد بالایی رطوبت نسبی در این معادله، ۱ می‌باشد که هرگونه تجاوز از این حد، جریان رواناب را در سطح زمین شکل می‌دهد (معماریان و صفدری، ۱۳۸۷).

۱.۳. شاخص پایداری

با جایگزینی معادلات (رجوع شود به معماریان و صفدری، ۱۳۸۷: ۲۲) شاخص پایداری به صورت زیر

قابل تعریف است:

$$FS = \frac{C + \cos \theta \left[1 - \min\left(\frac{R a}{T \sin \theta}, 1\right) r\right] \tan \phi}{\sin \theta} \quad (۴)$$

پارامترهای a و θ از توپوگرافی به دست می‌آیند اما سایر پارامترها یعنی C ، r ، $\tan \phi$ و R/T بایستی تعریف گردند. نسبت وزن مخصوص یعنی r را با یک عدد ثابت ۰/۵، کمی می‌کنیم؛ اما برای سه کیمت دیگر بایستی با تعریف حدود بالا و پایین، عدم قطعیتی برای آن‌ها در نظر بگیریم. این حدود در واقع تعریف‌کننده توزیع احتمال یکسانی بر روی کیمت‌هایی هستند که فرض مدل بر این است که تغییرات آن‌ها کاملاً تصادفی است. با جایگذاری x بجای R/T و t بجای $\tan \theta$ حدود بالا و پایین پارامترها با توزیع احتمال یکنواخت به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$C \sim U(C_1, C_2) \quad (۵)$$

$$x \sim U(x_1, x_2)$$

$$t \sim U(t_1, t_2)$$

کوچک‌ترین ارزش C و t یعنی C_1 و t_1 همراه با بزرگ‌ترین ارزش x یعنی x_2 بدترین یا در واقع محافظه‌کارانه‌ترین سناریو را در پایداری شیب و با فرض عدم قطعیت پارامترها شکل می‌دهند. مناطقی که تحت این سناریو، دارای FS بزرگ‌تر از یک هستند، در SINMAP با عنوان مناطق "قطعاً پایدار" شناخته می‌شوند. در محدوده‌هایی که ضریب اطمینان حداقل کمتر از یک به دست آمده است، احتمال شکست شیب وجود دارد. بهترین سناریو زمانی شکل می‌گیرد که $C=C_2$ ، $x=x_1$ و $t=t_2$ باشد (همان: ۲۳).

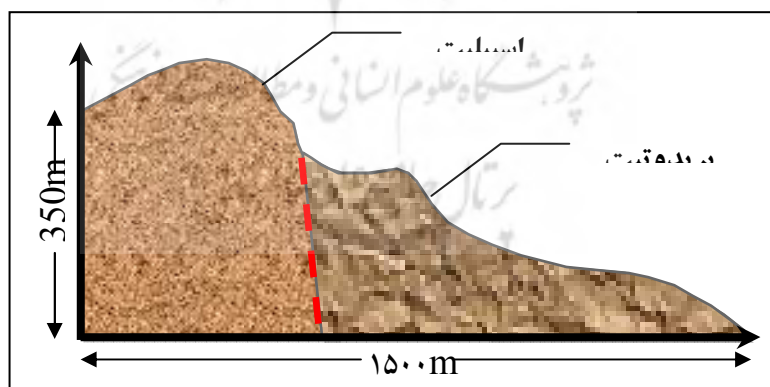
۱.۴. تعیین پارامترهای واسنجی

در تعیین پارامترهای واسنجی از اطلاعات موجود در گزارش‌های تفصیلی اجرایی (مهندسین مشاور سامان سد رود، ۱۳۸۹ و مهندسین مشاور آب پوی، ۱۳۸۷)، جزوات، کتاب‌ها و منابع موجود (نخجوانی، ۱۳۵۶؛ مورگان و همکاران، ۱۹۹۸؛ معماریان و صفدری، ۱۳۸۷: ۳۷) و اطلاعات میدانی بهره گرفته شد. نتایج محاسبات در جدول شماره ۲ آمده است.

جدول ۲ ارزش‌های تعریف‌شده پارامترهای واسنجی در مدل SINMAP

ارزش	پارامتر
500	T/R_{min}
2000	T/R_{max}
0	C_{min}
0/25	C_{max}
30	θ_{min} (Deg)
35	θ_{max} (Deg)

ارزش پارامترهای C_s ، C_r ، h و ρ_s جهت محاسبه ضریب بی بعد C به ترتیب $200 \text{ (N.m}^{-2}\text{)}$ ، $200 \text{ (N.m}^{-2}\text{)}$ ، 2000 ، $0/45 \text{ (m)}$ و $2000 \text{ (Kg.m}^{-3}\text{)}$ تخمین زده شد. کمیت $(T/R)\sin\theta$ (بر حسب متر) را می‌توان به‌عنوان طول شیبی (البته به‌صورت مستوی یا افقی و نه به‌صورت همگرا) در نظر گرفت که نیاز است در یک دوره بحرانی به لحاظ رطوبت اشباع گردد. این مفهوم می‌تواند در تخمین پارامتر T/R با استفاده از مشاهدات صحرایی بسیار مؤثر واقع گردد (معماریان و صفدری، ۱۳۸۷: ۳۷). بدین جهت در تعیین نسبت T/R از مشاهدات میدانی و پروفیل سطح لغزش هاوانان (مهندسین مشاور سامان سد رود، ۱۳۸۹) (شکل ۳) کمک گرفته شد.



شکل ۳ مقطع شماتیک از دامنه لغزشی هاوانان

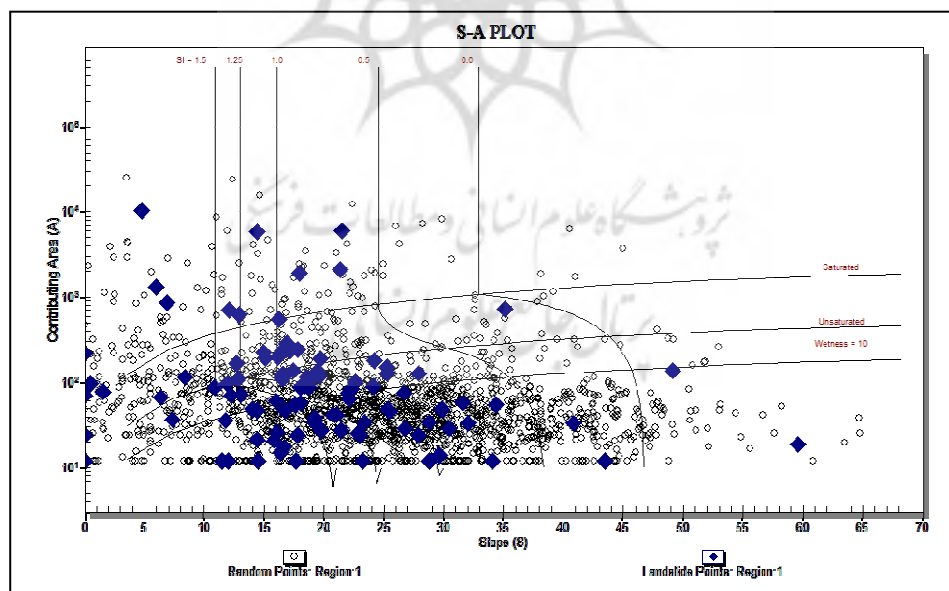
۴. بحث و نتایج

پس از اجرای مدل شاخص پایداری شیب برای کل منطقه مطالعاتی و پهنه لغزشی هاوانان به‌صورت نقشه استخراج و در قالب جدول و نمودار سطح-شیب به‌صورت آماری ارائه گردید (جدول ۳ و شکل ۴).

جدول ۳ بررسی آماری نتایج اجرای مدل SINMAP در منطقه هاوانان

کل	حفاظتی	حد بالایی آستانه لغزشی	حد پایینی آستانه لغزشی	شبه پایدار	نیمه پایدار	پایدار	
13/14	0/49	1/77	4/08	2/23	1/22	3/36	سطح (km ²)
100	3/72	13/47	31/03	16/97	9/25	25/57	فراوانی (%)
100	2	3	24	22	17	32	تعداد نقاط لغزشی
100	2	3	24	22	17	32	فراوانی نقاط لغزشی (%)
7/61	0/15	0/23	1/83	1/67	1/29	2/43	تراکم نقاط لغزشی (تعداد در km ²)

نتایج جدول ۳ و شکل ۴ و ۵ نشان می‌دهد که حدود ۲۵/۵ درصد منطقه موردبخت در محدوده پایدار قرار می‌گیرد که در واقع عوامل ناپایدارکننده مهمی بایستی جهت ناپایدار سازی شیب در این مناطق وجود داشته باشد. ۹/۲ درصد اراضی منطقه با پایداری متوسط می‌باشند و ۱۷ درصد شبه پایدار بوده ضمن آنکه در این نواحی عوامل ناپایدارکننده ضعیفی نیز می‌توانند منجر به ناپایداری شیب شوند. حدود ۲۴ درصد اراضی در محدوده پایین‌تر از حد آستانه لغزشی قرار می‌گیرند که در این مناطق عامل ناپایدارکننده‌ای برای ناپایدار سازی شیب موردنیاز نیست. از طرف دیگر حدود ۳ درصد از سطح منطقه در محدوده بالاتر از حد آستانه لغزش قرار می‌گیرد که عوامل پایدارکننده در این دامنه‌ها شاید به پایداری شیب کمک کنند. همچنین این مدل ۳/۷ درصد اراضی منطقه (حدود ۵۰ هکتار) را حفاظتی ارزیابی نموده که در این دامنه عددی به علت شیب بسیار زیاد شاخص SI کمتر از صفر بوده و در واقع در این دامنه عددی مدل قادر به شبیه‌سازی پایداری شیب نیست.



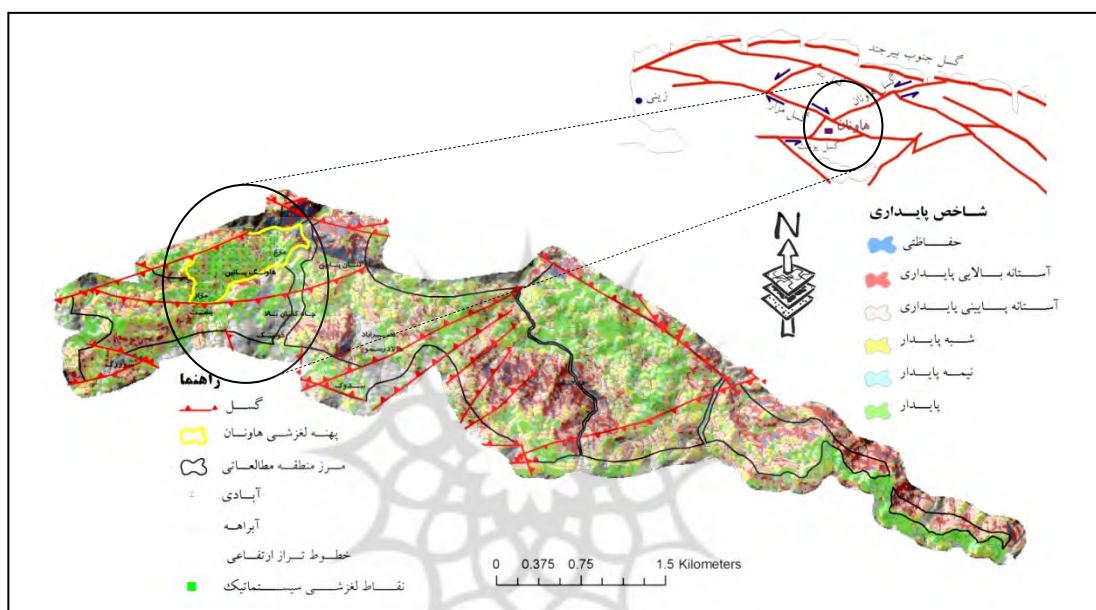
شکل ۴ نمودار شیب-سطح به دست آمده از مدل SINMAP برای محدوده مطالعاتی هاوانان

جهت تحلیل دقیق پهنه لغزشی هاوانان ۱۰۰ نقطه به صورت سیستماتیک بر روی پهنه لغزیده پیاده شد که این نقاط به عنوان نقاط لغزشی به مدل معرفی گردید (شکل ۵). از مجموع ۱۰۰ نقطه قید شده فوق حدود ۳۲ نقطه در محدوده پایدار، ۱۷ نقطه در محدوده پایداری متوسط، ۲۲ نقطه در محدوده شبه پایدار، ۲۴ نقطه در محدوده پایین تر از حد آستانه لغزشی و ۳ نقطه در محدوده های بالاتر از حد آستانه لغزشی و ۳ نقطه در محدوده حفاظتی واقع شده اند. بر این اساس می توان بیان نمود که حدود ۷۱ درصد از سطح پهنه لغزشی هاوانان در محدوده شبه پایدار تا پایدار طبقه بندی می گردد. ۲۴ درصد از پهنه لغزشی در دامنه پایین تر از حد آستانه لغزشی و تنها ۳ درصد در محدوده ای بالاتر از حد آستانه لغزشی قرار می گیرند. نتایج این مدل بیانگر آن است که کمتر از ۳۰ درصد پهنه لغزشی هاوانان دارای حساسیت متوسط تا بالا به لغزش هستند. از مجموع ۲۴ نقطه واقع در محدوده پایین آستانه لغزشی ($SI < 1$) تنها سه نقطه، یعنی ۱۲/۵ درصد آن در محدوده رطوبتی اشباع و ۱۵ درصد در محدوده رطوبتی بین اشباع و غیر اشباع قرار می گیرد (شکل ۴). این نتایج بیانگر این است که بخش اندکی از پهنه لغزشی هاوانان در محدوده رطوبتی اشباع قرار می گیرد؛ از این رو باید در این محدوده به دنبال علل خارجی تأثیرگذار در پایداری لغزش هاوانان بود. زیرا بررسی صحرایی دامنه های این مناطق نیز نشان می دهد که علل خارجی در این منطقه سبب شکل گیری لغزش شده است.

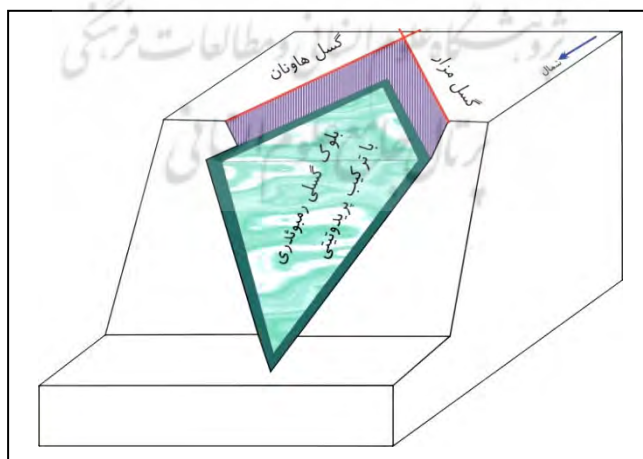
نتایج تحلیل های زمین شناسی و تکتونیکی منطقه نشان می دهد که شکل دگر ریختی در این ناحیه در واقع از مدل دگر ریختی آمیزه افیولیتی جنوب بیرجند، یعنی قرارگیری در یک پهنه فشاری- برشی با روند تقریباً خاوری-باختری، با دگرشکلی برش ساده در یک پوسته شکننده تبعیت می کند. لذا گسل های معکوس با مؤلفه امتداد لغز رو رانده و سفره های رانده، از نظر آماری دارای فراوانی بیشتری هستند. محدوده هاوانان متأثر از سه سری گسل اصلی با روندهای مختلف می باشد (شکل ۵). این گسل ها عبارتند از: گسل هاوانان، گسل یوشت (که دارای امتداد لغز چپ بر با مؤلفه حرکتی معکوس) و گسل مزار (با سازو کار امتداد راست بر با مؤلفه حرکتی معکوس). در اثر تقاطع این سه سری گسل، واحدهای سنگی (اسپیلیت ها، پریدوتیت ها و گابروها) به صورت بلوک های گسلی کشیده درآمده و در اثر ادامه فرآیند برش، این بلوک ها متحمل تغییر شکل، جابجایی و چرخش شده اند (شکل ۶). لذا قطعات سنگی متفاوت با رفتار مکانیکی مختلف در کنار و یا روی یکدیگر قرار گرفته اند (غلامی و خطیب، ۱۳۷۹).

اتصال شکستگی های وابسته به پهنه های برشی سبب ایجاد بلوک های رومبوئدری شده است (شکل ۶). وجود سیستم درزه های متقاطع سبب خردشدگی مضاعف مجموعه های سنگی و افزایش دگرسانی گردیده است. این پدیده موجب افزایش حجم، کاهش پایداری و در نهایت لغزش مواد در دامنه های پر شیب شده است. اعمال بارهای دینامیکی و شسته شدن پاشنه مواد نقش مهمی در تداوم لغزش دارد. شاخص هایی مانند قوس های لغزش، تختگاه ها، شکاف در دیوار منازل، تخریب زمین های کشاورزی، شکاف های کششی و غیره نشانی از چگونگی لغزش مواد دارند (همان). در درون پهنه های برشی ایجاد شده دگرسانی پریدوتیت ها به سرپانتینیت، بروسیت و تالک همراه با

افزایش حجم و کاهش ضریب پایداری می‌باشد. قرارگیری این مجموعه سنگی بر روی شیب ۳۴ درجه موجب ناپایداری دامنه و لغزش بلوک‌های گوه‌ای شکل در منطقه گردیده است. برخاستگی زمین ساختی رشته‌کوه باقران و اعمال تنش‌های دینامیکی ناشی از رخداد زمین، سبب ناپایداری شده است (خطیب، ۱۳۷۸). نتایج مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه نشان می‌دهد که توده‌های سست سرپانتینیزه بخش اعظم روباره را تشکیل می‌دهد و سنگ کف که از جنس دیاباز می‌باشد در عمقی حدود ۱۵ متری از سطح زمین قرار دارد. همچنین به‌احتمال زیاد لغزش از مرز بین توده‌های سست سرپانتینیزه و سنگ کف صورت می‌گیرد (دهواری و همکاران، ۱۳۹۰).



شکل ۵ نقشه پهنه‌بندی شاخص پایداری همراه با وضعیت تکنیکی منطقه



شکل ۶ نمایی شماتیک از بلوک گسلی رمبونداری ناشی از عملکرد گسل‌های مزار، هاوانان و یوشت (خطیب، ۱۳۷۸)

نتایج نشان می‌دهد که مدل SINMAP در تلفیق با مطالعات تکمیلی عوامل خارجی مانند تکنیک می‌تواند به‌عنوان مدلی مناسب جهت آنالیز شکست مناطق شیبدار در محدوده مطالعاتی معرفی گردد. این نتیجه‌گیری توسط مطالعات انجام‌شده به‌وسیله مینسینا و اسکارابلی^۱ (۲۰۰۷)، ترهورست و کرجا^۲ (۲۰۰۹)، پاولین و بوریسک^۳ (۲۰۰۹)، پاولین و همکاران^۴ (۲۰۱۰)، طالبی و ایزد دوست (۱۳۹۰) نیز تأیید می‌گردد.

۵. نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی با مدل فرآیندی SINMAP و بررسی‌های صحرائی بیانگر آن است که کمتر از ۳۰ درصد پهنه لغزشی هاوانان دارای حساسیت متوسط تا بالا به لغزش هستند. همچنین بخش اندکی از این پهنه لغزشی در محدوده رطوبتی اشباع قرار می‌گیرد؛ بنابراین عوامل خارجی دیگری علاوه بر توپوگرافی، هیدرولوژی و وضعیت خاکشناسی بایستی در شکل‌گیری لغزش هاوانان مؤثر باشند. در این محدوده عوامل خارجی کنترل‌کننده و تأثیرگذار عبارت‌اند از: ترکیب سنگ‌شناسی، فرم دگر ریختی و خصوصاً شکستگی‌ها، وضعیت ریخت‌شناسی دامنه شمالی کوه باقران، برخاستگی منطقه و اثر تنش‌های آبی ناشی از رخدادهای زمین‌لرزه در منطقه. در این میان ترکیب سنگ‌شناسی (قرارگیری اسپیلیت بر روی سرپانتینیت) و وجود دو سری شکستگی به‌موازات گسل‌های هاوانان و مزار مهم‌ترین عوامل ناپایداری‌اند. علاوه بر این برخاستگی رشته‌کوه باقران باعث افزایش تدریجی نشیب دامنه و رخداد زمین‌لرزه‌ای ادواری نیز موجب تشدید لغزش می‌گردد.

سپاسگزاری

بر خود لازم می‌دانیم از همکاری گروه زمین‌لغزش دفتر مطالعات و ارزیابی خاک‌های معاونت آبخیزداری و اداره کل منابع طبیعی خراسان جنوبی تشکر و قدردانی کنیم.

کتابنامه

- احمدی، حسن؛ محمدخان، شیرین؛ ۱۳۸۱. بررسی برخی از عوامل حرکت‌های توده‌ای، مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان. مجله منابع طبیعی ایران. شماره ۵۵. صص ۴۶۳-۴۵۵.
- خطیب، محمد مهدی؛ ۱۳۷۸. بررسی ساختاری زمین‌لغزش هاوانان. بیست و ششمین نشست انجمن زمین‌شناسی ایران.
- غلامی، ابراهیم؛ خطیب، محمد مهدی؛ ۱۳۷۹. بررسی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در جنوب بیرجند. چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.

1 Meisina and Scarabelli
2 Terhorst and Kreja
3 Paulin and Bursik
4 Paulin et al.

- معماریان، هادی؛ صفدری، علی اکبر؛ ۱۳۸۸. پایداری شیب‌های طبیعی و تحلیل آن در محیط ArcView GIS، آشنایی با مدل SINMAP. انتشارات سخن گستر. ۹۸ صفحه.
- مهندسین مشاور آب پوی؛ ۱۳۸۷. مطالعات تفصیلی-اجرایی حوزه آبخیز کوه باقران بیرجند.
- مهندسین مشاور سامان سد رود؛ ۱۳۸۹. بررسی مهم‌ترین زمین‌لغزش‌ها در خراسان جنوبی.
- نخجوانی، فیروز؛ ۱۳۵۶. جزوه درسی آبخیزداری. دانشگاه تهران.
- طالبی، علی؛ ایزد دوست، مریم؛ ۱۳۹۰. بررسی کارایی مدل SINMAP در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی حوزه آبخیز سد ایلام). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. شماره ۱۵. صص ۶۸-۶۳.
- Ab Pooy Consulting Engineers Co., 2008. Executive watershed management studies of the Bagheran mountains.
- Ahmadi, H., Mohamadkhan, SH., 2002. Investigation of some mass movements in Taleghan basin. *Natural Resources of Iran* 55, 455-463.
- Avanzi, G.D., Giounecchini, R., Punchedelli, A., 2004. The influence of geological and geomorphological setting on shallow landslides, an example of a temperate climates environment: The June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). *Engineering Geology* 73, 215-228.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24(1), 43-69.
- Chau, K.T., Sze, Y.L., Fung, M.K., Wong, W.Y., Fong, E.L., Chan, L.C.P., 2004. Landslide inventory and GIS. *Computer and Geoscience* 30, 429-443.
- Deb, S.K., El-Kadi, A.I., 2009. Susceptibility assessment of shallow landslides on Oahu, Hawaii, under extreme-rainfall events. *Geomorphology* 108, 219-233.
- Dehvari, M., Mohammady, M., Ahmady, M., 2011. Geoelectrical interpretation to identify the subsurface structure of the roof overlooking the village Havenan. Meeting of the Geological Sciences Association.
- Dietrich, W.E., Wilson, C.J., Montgomery, D.R., McKean, J., 1993. Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model. *The Journal of Geology* 101, 259-278.
- Domínguez-Cuesta, M.J., Jiménez-Sánchez, M., Berrezueta, E., 2007. Landslides in the Central Coalfield (Cantabrian Mountains, NW Spain): Geomorphological features, conditioning factors and methodological implications in susceptibility assessment. *Geomorphology* 89(3), 358-369.
- Garfi, G., Bruno, D.E., Calcaterra, D., Parise, M. 2007. Fan morphodynamics and slope instability in the Mucone River basin (Sila Massif, southern Italy): significance of weathering and role of land use changes. *Catena* 69(2), 181-196.
- Gholami, E., Khatib, M., 2000. Assessment of the effective factors and elements on the landslide occurrence in the south of Birjand. 4th Meeting of the Geological Sciences Association.
- Hammond, C., Hall, D., Miller, S., Swetik, P., 1992. Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2.0. General Technical Report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Research Station.

- Hengl, T., 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences* 32(9), 1283-1298.
- Hutchinson, J.N., 1988. Geomorphological and geotechnical parameters of landslide in relation to geology and geomorphology. *Proceedings of the 5th international symposium of landslide*, Lausanne, Switzerland, 13-35.
- Khatib, M., 1999. Structural analysis of the Havenan's landslide. 26th Meeting of the Geological Sciences Association.
- Meisina, C., Scarabelli, S., 2007. A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. *Geomorphology* 87, 207-223.
- Memarian, H., Balasundram, S.K., Talib, J.B., Sung, C.T.B., Sood, A.M., Abbaspour, K., 2012. Validation of CA-Markov for Simulation of Land Use and Cover Change in the Langat Basin, Malaysia. *Journal of Geographic Information System* 4, 542-554.
- Memarian, H., Safdari, A., 2009. Natural slopes stability and its analysis using ArcView GIS. Sokhangostar, Mashad, Iran, 98p.
- Memarian, H., Tajbakhsh, M., Safdari, A., Akhondi, E., 2003. Statistical landslide risk zonation on the Shourijeh formation in GIS framework. *Geomatic Conference*, Tehran, Iran.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., ... & Folly, A.J.V., 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide.
- Nakhjavani, F., 1977. Handout of Watershed Management. University of Tehran.
- Paulin, G.L., Bursik, M., 2009. Logisnet: A tool for multimethod, multiple soil layers slope stability analysis. *Computers & Geosciences* 35, 1007-1016.
- Paulin, G.L., Bursik, M., Lugo-Hubp, J., Zamorano Orozco, J.J., 2010. Effect of pixel size on cartographic representation of shallow and deep-seated landslide, and its collateral effects on the forecasting of landslides by SINMAP and Multiple Logistic Regression landslide models. *Physics and Chemistry of the Earth* 35, 137-148.
- Peart, M.R., Ng, K.Y., Zhang, D.D., 2005. Landslides and sediment delivery to a drainage system: some observations from Hong Kong. *Journal of Asian Earth Sciences* 25(5), 821-836.
- Saman SadRood Consulting Engineers Co., 2010. Investigation of the most important landslides in the South Khorasan Province, Iran.
- Singh, R.P., Dubey, C.S., Singh, S.K., Shukla, D.P., Mishra, B.K., Tajbakhsh, M., ... & Singh, N., 2012. A new slope mass rating in mountainous terrain, Jammu and Kashmir Himalayas: application of geophysical technique in slope stability studies. *Landslides*, 1-11.
- Soeters, R., van Westen, C.J., 1996. Landslides: Investigation and Mitigation. Chapter 8- Slope Instability Recognition, Analysis, and Zonation. *Transportation Research Board Special Report*, 247p.
- Taleby, A., Ezaddoost. M., 2012. Investigating the SINMAP model efficiency in landslide hazard zonation (Case study: Ilam dam watershed). *Watershed Management Science & Engineering* 5(15), 63-69.
- Terhorst, B., Kreja, R., 2009. Slope stability modelling with SINMAP in a settlement area of the Swabian Alb. *Landslides* 6(4), 309-319.

- Wawer, R., Nowocien, E., 2003. Application of SINMAP terrain stability model to Grodarz stream watershed. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Environmental Development* 6(1).
- Zhou, C.H., Lee, C.F., Li, J., Xu, Z.W., 2002. On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantua Island, Hong Kong. *Geomorphology* 43, 197-207.

