

## بررسی کارایی دو مدل پایه فیزیکی SINMAP و SHALSTAB

### در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش

### (مطالعه موردی: محدوده منطقه چهاردانگه، استان مازندران)

- ❖ علی‌رضا متولی\*؛ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس.
- ❖ علی طالبی؛ دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد.
- ❖ مهرداد صفایی؛ مربی، عضو هیئت‌علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی مازندران.
- ❖ محمدرضا اختصاصی؛ استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد.

#### چکیده

زمین لغزش یکی از مهم‌ترین پدیده‌های زمین‌شناختی دامنه‌های البرز شمالی است که به‌طور تدریجی و گاهی در مدت‌زمان کوتاه باعث بروز خسارات قابل توجه می‌گردد. در چندساله اخیر به دلیل تغییرات نامطلوب در کاربری‌ها و تخریب فزاینده مراتع و جنگل‌ها و اراضی زراعی و اجرای نامناسب پروژه‌های عمرانی در مناطق مستعد لغزش، تشکیلات زمین‌شناسی مستعد به لغزش، میزان بارندگی و اقلیم منطقه و وجود دامنه‌های پرشیب، فراوانی وقوع این پدیده مخرب، افزایش یافته است. در این تحقیق زمین لغزش‌های رخ داده محدوده چهاردانگه، واقع در جنوب شهرستان ساری با استفاده از دو مدل پایه فیزیکی SHALSTAB و SINMAP مورد بررسی قرار گرفت و نقشه پایداری دامنه این محدوده به‌وسیله این دو مدل تعیین شد. در ابتدا مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیزده گمانه در محدوده اندازه‌گیری گردید و با پنجاه‌وشش مورد از لغزش‌های رخ داده در منطقه، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیقات میدانی، نمونه‌های آزمایشگاهی، اجرای مدل و تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که دو مدل SINMAP و SHALSTAB دارای نرخ موفقیت ۸۷/۳ و ۶۹/۵ درصد برای پیش‌بینی ناپایداری دامنه در منطقه چهاردانگه است. این به این معنی است که مدل SINMAP کارایی بیشتری از مدل SHALSTAB در بررسی تجزیه و تحلیل پایداری دامنه دارد.

**واژه‌های کلیدی:** زمین لغزش، مدل SINMAP، مدل SHALSTAB، منطقه چهاردانگه، نقشه پایداری دامنه.

## ۱. مقدمه

زمین لغزش یک فرآیند ژئودینامیکی است که معمولاً در سطح زمین رخ می‌دهد. زمین لغزش در بسیاری از مناطق جهان به‌عنوان یک تهدید جدی جانی-مالی مطرح است. شناخت نوع و فرآیند شکل‌گیری، عوامل مؤثر در ایجاد حرکات توده‌ای و شناخت گستره‌های دارای زمین لغزش و تعیین میزان خطر آن‌ها، مهم‌ترین گام‌هایی است که در راستای جلوگیری از این نوع مخاطره طبیعی باید به آن توجه شود [۹]. در به وقوع پیوستن این حرکات، عوامل گوناگون با نسبت‌های مشارکتی متفاوت نقش دارند که شناخت این عوامل مؤثر در وقوع و شناسایی مناطق پرخطر و کم‌خطر از نظر وقوع، یکی از مهم‌ترین و ضروری‌ترین اقدامات جهت پیشگیری و کاهش خسارات است. استان مازندران به دلایل زیر از جمله مناطق بسیار مستعد زمین لغزش کشور است: مهم‌ترین عامل اقلیم مرطوب و پرباران استان است که به طرق مختلف اعم از مستقیم و غیرمستقیم در فراوانی وقوع حرکت توده‌ای نقش دارد. عامل دوم شرایط زمین‌شناسی استان است، وجود رخنمون‌های وسیع از سازندهای حساس به لغزش از قبیل تناوب‌های مارن میوسن و ماسه‌سنگ و سیلت، سازند شمشک، لس‌های کواترنر و همچنین خاک رویی نسبتاً ضخیمی که بر روی سازندها تشکیل شده موجب گردیده که سطح قابل توجهی از استان به‌طور بالقوه دارای شرایط وقوع حرکت توده‌ای باشد. در کنار این عوامل، عامل انسانی نیز با استفاده نادرست از منابع طبیعی (بهره‌برداری بی‌رویه از جنگل و قطع اشجار، جاده‌سازی و ...)، تغییر کاربری و احداث جاده‌های متعدد روستایی و جنگلی در سطح استان حرکت‌های توده‌ای را تشدید می‌کند.

مدل‌های شبیه‌سازی و پهنه‌بندی زمین لغزش به‌طور کلی در ۳ گروه طبقه‌بندی می‌شوند: مدل‌های seismic که مبتنی بر داده‌های لرزه‌نگاری بوده و پارامترهای زیادی را وارد نمی‌کنند، مدل‌های

که اکثراً مبتنی بر تراکم زمین لغزش‌ها در واحد سطح هستند و مدل‌های deterministic که این مدل‌ها بر پایه محاسبات عددی بوده و پارامترهای فیزیکی نسبتاً دقیقی را در مدل وارد می‌کند [۱۰]. در خارج از ایران، [۱] با استفاده از مدل SINMAP به بررسی زمین لغزش‌های ناشی از طوفان میچ پرداختند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که پدیده‌های فیزیکی با مقیاس کوچک توسط این مدل در نظر گرفته نمی‌شود و دو عامل تنوع پارامترها و مقیاس بسیار مهم هستند و باید در مدل پایداری شیب مورد توجه قرار گیرد. [۱۴] در یک تحقیق در شمال اردن زمین لغزش‌ها در امتداد یک بزرگراه مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق با استفاده از مدل SINMAP منطقه از لحاظ استعداد زمین لغزش، پهنه‌بندی شد. نتایج نشان داد که سه مقطع از بزرگراه که ۷۹ درصد زمین لغزش‌ها در آن فراوانی دارند در کلاس ناپایدار قرار گرفت. [۸] در مقاله‌ای بیان داشتند که روش‌های آماری فقط روابط بین وقوع زمین لغزش و عوامل مرتبط با آن را در نظر می‌گیرند، اما مکانیسم شکست را لحاظ نمی‌کنند، در مقابل، روش‌های فیزیکی پایه، شرایط مکانیکی دامنه و پایداری آن را با استفاده از محاسبات ریاضی برآورد و تجزیه و تحلیل می‌کنند. [۱۱] در مقاله‌ای تحت عنوان تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای الگوهای پایداری زمین برای پیش‌بینی زمین لغزش سطحی به مقایسه یافته‌های حاصل از مدل‌های SINMAP و SHALSTAB پرداختند و به این نتیجه رسیدند که SINMAP نیاز به مقادیر دقیق ورودی ندارد و محدوده‌ای از مقادیر را می‌پذیرد و در مدل SHALSTAB نیز پارامترها ثابت بوده و از نظر مکانی به‌طور یکنواختی در کل سطح مطالعه توزیع شده‌اند. در نهایت نتایج نشان داد که دو مدل بکار رفته در این منطقه، توان پیش‌بینی مناسبی از وقوع زمین لغزش‌ها را دارند در ایران در ارتباط با مدل‌های فرآیندمحور زمین لغزش، [۲۰] در تحقیقی با عنوان بررسی کارایی مدل فرآیندمحور SINMAP در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، نقشه پایداری دامنه را با

مورد مطالعه است که اکثریت زمین لغزش‌های موجود در این سازند واقع شده‌اند. این محدوده توسط گسل اصلی شمال البرز با طول بیش از ۴۰۰ کیلومتر با روند تقریباً شرقی - غربی در بر گرفته شده است. این منطقه توسط ۳ گسل فرعی کسوت، ششک، علمدارده و کلوکرد با روند شمال شرق - جنوب غرب نیز در بر گرفته شده است.

## ۲.۲. شاخص‌های اندازه گیری شده

### ۱.۲.۲. مدل SINMAP

مدل فرآیندمحور مورد استفاده به منظور ارزیابی شرایط ناپایداری برای ایجاد یک نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به نام نقشه شاخص پایداری<sup>۱</sup> است [۱۸]. SINMAP بر اساس مدل عددی نامحدود پایداری شیب<sup>۲</sup> پایه‌گذاری شده [۷] که مؤلفه‌های ناپایدارکننده (نیروی ثقل) و پایدارکننده (نیروی اصطکاک و چسبندگی خاک) شیب را بر روی یک سطح شکست<sup>۳</sup> به موازات سطح زمین و البته با چشم‌پوشی از اثر مرزی موازنه کرده و شبیه‌سازی می‌نماید. فشار منفذی با توجه به رطوبت موجود، مقاومت طبیعی مؤثر خاک را کاهش داده که این مقاومت از طریق اصطکاک داخلی با نیروی برشی خاک مرتبط می‌باشد. این روش به مدل‌سازی ضریب اطمینان [۷] پرداخته که این ضریب به صورت نسبت نیروهای پایدارساز به نیروهای ناپایدارکننده شیب تعریف می‌شود (رابطه ۱):

$$FS = \frac{c + \cos \theta \left[ 1 - \min \left( \frac{R}{T \sin \theta}, 1 \right) \cdot r \right] \tan \phi}{\sin \theta} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در این رابطه:  $C'$  چسبندگی مؤثر خاک (رابطه ۲) (بدون بعد)،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک (درجه)،  $R$  بارش مؤثر (بارندگی که مستقیماً به خاک رسیده و نفوذ می‌کند) ( $mm/h$ )، ذکر این نکته ضروری است که  $R$

استفاده از این مدل تهیه کردند. نتایج حاصل از اجرای مدل SINMAP نشان داد که این مدل از دقت بالایی در پیش‌بینی خطر زمین لغزش در حوزه سد ایلام برخوردار است. با توجه به جمع‌بندی منابع فوق می‌توان گفت که در مدل SHALSTAB نسبت ضریب انتقال پذیری خاک به بارش مؤثر به‌عنوان خروجی مدل در نظر گرفته می‌شود [۱۲]، یعنی مدل SHALSTAB این دو پارامتر را محاسبه می‌کند، در حالی که در مدل SINMAP این دو پارامتر به‌عنوان ورودی به مدل تعریف می‌گردند [۱۸]. معادله‌ای که SHALSTAB استفاده می‌کند به تدوین و فرموله کردن نقشه پایداری دامنه کاملاً متفاوت از معادله استفاده شده در SINMAP است. مدل SINMAP معادله ضریب اطمینان را حل می‌کند [۱۸]، در حالی که مدل SHALSTAB نسبت  $\log q/t$  (نسبت بارش مؤثر بر انتقال پذیری) را محاسبه می‌کند [۶]. در این تحقیق سعی بر آن است تا کارایی دو مدل فیزیکی SINMAP و SHALSTAB در تعیین ناپایداری دامنه‌های محدوده چهاردانگه مورد بررسی قرار گیرد.

## ۲. روش‌شناسی تحقیق

### ۱.۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در استان مازندران، با وسعت بیش از ۲۰۰ کیلومتر مربع واقع در جنوب شهرستان ساری در حوزه آبخیز تجن به محدوده مختصات  $36^{\circ} 09' 00''$  تا  $53^{\circ} 22' 30''$  طول شرقی و  $36^{\circ} 16' 30''$  تا  $36^{\circ} 24' 00''$  عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). مدل رقومی ارتفاعی<sup>۱</sup> منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که ارتفاع توپوگرافی از ۲۰۲ تا ۱۲۳۳ متر است.

منطقه مورد مطالعه، شامل سه دوران پالئوژئوتیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک است. واحد سنگی مارن میوسن  $M_{2,3}^{sl}$  شامل مارن، ماسه‌سنگ، سیلت سنگ آهکی، مارن سیلت دار، سنگ آهک ماسه‌ای، مادستون است. این سازند زمین‌شناسی یکی از بیشترین واحدهای سنگی در منطقه

<sup>1</sup> Digital elevation model

<sup>2</sup> Stability INdex MAPping

<sup>2</sup> Infinite slope stability model

<sup>3</sup> Failure plane

چسبندگی ریشه  $(N/m^2)$ ،  $g$  شتاب جاذبه زمین  $(m/s^2)$  و  $h$  ضخامت خاک  $(m)$  می باشد که از رابطه ۳ به دست می آید.

$$h = d \cdot \cos \theta \quad \text{رابطه ۳}$$

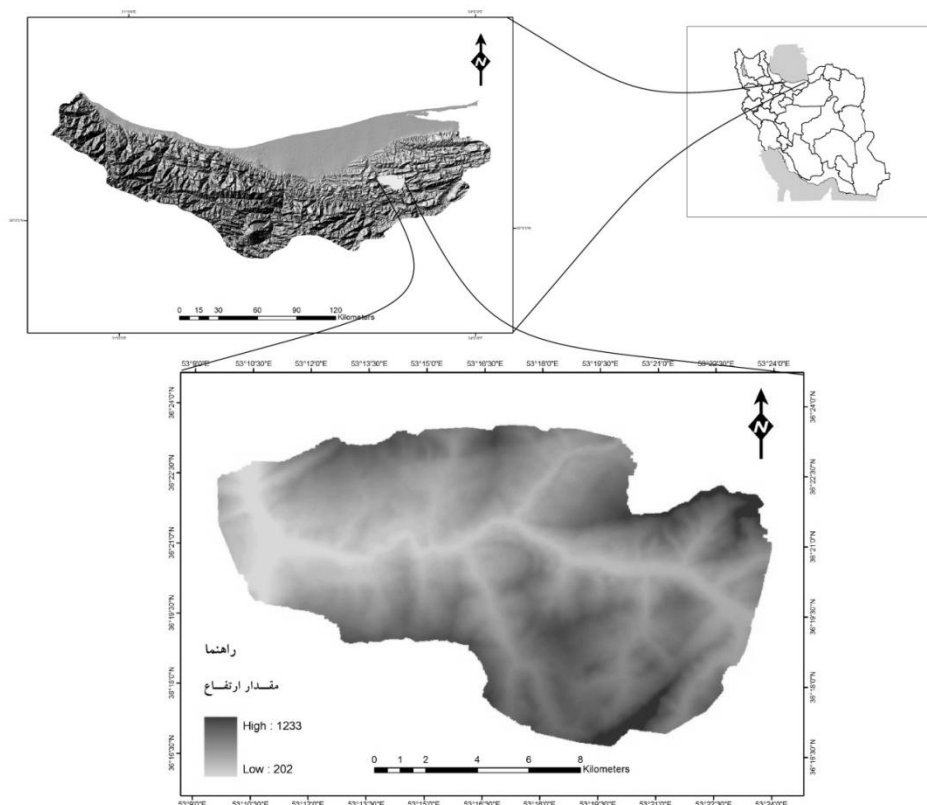
$$T = K_S \cdot d \quad \text{رابطه ۴}$$

ضریب آبگذری خاک نیز از رابطه ۴ به دست می آید که در این رابطه  $K_S$  هدایت هیدرولیکی اشباع  $(m/day)$  و  $d$  عمق خاک در راستای عمود بر دامنه  $(m)$  می باشد. جدول ۱ طبقه بندی کلاس پایداری را در مدل SINMAP نمایش می دهد.

میانگین بلندمدت (مثلاً یک ساله) بارندگی مؤثر نمی باشد. در واقع  $R$ ، بارندگی مؤثر برای یک دوره بحرانی از هوای مرطوب است که احتمالاً می تواند منجر به شروع فرآیند زمین لغزش گردد [۲].  $T$  ضریب آبگذری خاک  $(m^2/h)$ ،  $r$  نسبت وزن مخصوص آب به وزن مخصوص خاک مرطوب،  $a$  سطح بالادست دامنه  $(m^2)$  که به همراه شیب دامنه  $\theta$  (درجه) به ترتیب از نقشه توپوگرافی و نقشه رقومی ارتفاعی به دست می آیند [۱۸]. در این رابطه چسبندگی مؤثر خاک از رابطه ۲ به دست می آید. همچنین ضریب آبگذری خاک نیز از رابطه ۴ به دست می آید.

$$C = \frac{(C_s + C_r)}{(\rho_s \cdot g \cdot h)} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در این رابطه  $C_s$  چسبندگی خاک  $(N/m^2)$ ،  $C_r$



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. تعریف کلاس پایداری مدل SINMAP

کلاس	شرایط	حالت پیش‌بینی شده
۱	$SI > 1/5$	منطقه پایدار
۲	$1/25 > SI > 1/5$	منطقه با پایداری متوسط
۳	$1/25 > SI > 1$	منطقه شبه پایدار
۴	$1 > SI > 0/5$	منطقه پایین‌تر از سطح آستانه
۵	$0/5 > SI > 0$	منطقه بالاتر از سطح آستانه
۶	$0 > SI$	منطقه حفاظت‌شده

### ۲.۲.۲. مدل SHALSTAB

رابطه ۵

$$\log \frac{Q}{T} = \frac{\sin \theta}{a/b} \cdot \left[ \frac{c}{\rho_w \cdot g \cdot z \sin^2 \theta \cdot \tan(\phi)} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right]$$

که در آن  $Q$  واقعه بارندگی طی دوره رگبار ۲۴ ساعته  $T$ ، ضریب آبگذری خاک ( $m^2/day$ )،  $a$  سطح آبخیز بالادست ( $m^2$ )،  $b$  عرض شیبی که در آن جریان شکل می‌گیرد ( $m$ )،  $c$  چسبندگی خاک ( $kn/m^2$ )،  $\rho_s$  وزن مخصوص خاک اشباع به ( $kg/m^3$ )،  $\rho_w$  وزن مخصوص آب ( $kg/m^3$ )،  $g$  شتاب گرانش ( $9.81 m/s^2$ )،  $z$  عمق خاک ( $m$ ) و ( $\phi$ ) زاویه اصطکاک داخلی مؤثر خاک به (درجه) می‌باشد. جدول ۲ طبقه‌بندی کلاس پایداری را در مدل SHALSTAB نمایش می‌دهد.

### ۳.۲.۲. پارامترهای ورودی

متغیرها برای دو مدل SHALSTAB و SINMAP در این مطالعه شامل چسبندگی مؤثر خاک ( $C'$ )، زاویه اصطکاک داخلی مؤثر خاک ( $\phi'$ )، وزن مخصوص خاک مرطوب (جدول ۵) ( $\rho_{SS}$ )، عمق خاک ( $d$ ) و نسبت بارندگی مؤثر به ضریب انتقال دهندگی آب در خاک می‌باشد. برای تعیین پارامترهای وابسته به خاک از قبیل چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک داخلی خاک، وزن

مدل فرآیندمحور مورد استفاده به منظور ارزیابی شرایط ناپایداری برای ایجاد یک نقشه پهنه‌بندی خطر زمین- لغزش به نام مدل پایداری سطحی دامنه<sup>۱</sup> که به وسیله [۱۲] توسعه یافته است. SHALSTAB با فرض ماندگاری جریان آب به موازات جریان اشباع به سطح لغزش و با استفاده از قانون داری برای تخمین توزیع مکانی فشار منفذی آب می‌باشد. این مدل داده‌های حاصل از مدل رقمی ارتفاع را با جریان (زیرسطحی) نزدیک سطح زمین و مدل شیب بی‌نهایت ترکیب می‌کند [۱۲]. این مدل نقش پوشش گیاهی و اثرات ریشه گیاهان بر روی مقاومت خاک را در نظر نمی‌گیرد [۱۲]. همچنین SHALSTAB نسبت  $Log Q/T$  (تأثیر بارش بر روی ضریب آبگذری خاک) را با استفاده از نظریه شیب بی‌نهایت و تنش برشی خاک را با استفاده از نظریه گسیختگی موهر-کلمب و مدل هیدرولوژیکی TOPOG [۱۶] محاسبه می‌کند [۴] (رابطه ۵). در اصل، ضروری است که مقدار بارش لازم برای ایجاد بی‌ثباتی در شیب با نرخ انتقال خاک شناخته شود. در این مدل هر جا شیب دامنه با زاویه اصطکاک داخلی خاک برابر باشد، دامنه بدون هیچ قید و شرطی ناپایدار تعریف می‌شود [۴].

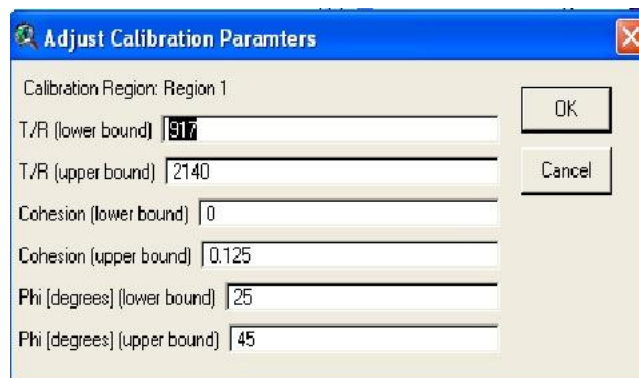
<sup>1</sup> Shallow Landsliding Stability

۵۵ نقطه لغزش استفاده گردید (جدول ۵). برای محاسبه چسبندگی ریشه با توجه به پوشش گیاهی منطقه از جدول ۳ استفاده شده است.

مخصوص خاک خشک و مرطوب و هدایت هیدرولیکی خاک با توجه به عمق هر نمونه از آزمایش برش مستقیم، آزمایش تک محوری و نفوذپذیری ۱۳ گمانه در محدوده

جدول ۲. تعریف کلاس پایداری مدل SHALSTAB

کلاس	تفسیر مربوط به هر کلاس	طبقه بندی پایداری
۱	بی هیچ قید و شرطی ناپایدار و اشباع	ناپایداری شدید
۲	بی هیچ قید و شرطی ناپایدار و غیر اشباع	$\text{Log } Q \cdot T^{-1} < -3/1$
۳	ناپایدار و اشباع	$-3/1 < \text{Log } Q \cdot T^{-1} < -2/1$
۴	ناپایدار و غیر اشباع	$-2/1 < \text{Log } Q \cdot T^{-1} < -2/5$
۵	پایدار و غیر اشباع	$-2/5 < \text{Log } Q \cdot T^{-1} < -2/2$
۶	بی هیچ قید و شرطی پایدار و غیر اشباع	$\text{Log } Q \cdot T^{-1} > -2/2$
۷	بی هیچ قید و شرطی پایدار و اشباع	پایدار



شکل ۲. تعریف بازه حداقل و حداکثر پارامترهای ضریب آبگذری خاک به بارندگی مؤثر، چسبندگی مؤثر خاک و زاویه اصطکاک داخلی خاک در مدل SINMAP

جدول ۳. اسامی گونه های منطقه مورد مطالعه و مقادیر چسبندگی ریشه مربوط به هر گونه

منابع	چسبندگی ریشه (Kpa)	نام فارسی	خانواده	اسامی علمی
[۵]	۷	توسکا	<i>Betulaceae</i>	<i>Alnus sp</i>
[۳]	۲	افرا پلت	<i>Aceraceae</i>	<i>Acer pseudoplatanus</i>
[۱۶]	۶/۶	راش	<i>Fagaceae</i>	<i>Fagus sp</i>
[۱۵]	۸	ولیک	<i>Rosaceae</i>	<i>Crataegus microphylla</i>
[۱۵]	۷	بلند مازو	<i>Fagaceae</i>	<i>Quercus castanifolia</i>

هر پیکسل در این مدل با توجه به فرمول FS و مقادیر مربوط به گمانه‌ها و تعریف بازه حداقل و حداکثر پارامترها (شکل ۲) در محیط نرم‌افزاری مدل SINMAP درون‌یابی، روی هم گذاری و اجرا گردید. مدل SHALSTAB نیز بر پایه معادله شیب بی‌نهایت و با فرض حالت ماندگار، جریان اشباع را با استفاده از قانون داری، برآورد و توزیع مکانی فشار منفذی آب را تعیین می‌کند [۱۹].

### ۴.۲.۲. بارش

در تحلیل بارش یک منطقه بارندگی‌های ۲۴ ساعته از اهمیت زیادی برخوردار است. منظور از حداکثر بارش ۲۴ ساعته مقدار بارشی است که در طول یک شبانه‌روز اتفاق افتاده و در طی یک سال بیشترین مقدار را داشته است. به منظور برآورد شدیدترین بارندگی‌های ۲۴ ساعته به وقوع پیوسته در منطقه از آمار بارندگی روزانه ایستگاه‌های موجود در منطقه استفاده گردید و سپس با استفاده از توزیع‌های آماری، بهترین توزیع با نرم‌افزار *Easy fit* تعیین و در نتیجه مقادیر بارش ۲۴ ساعته برای دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه گردید (جدول ۴). سپس از بارش‌های با دوره بازگشت ۲ ساله و ۲۰ ساله جهت اجرای مدل SINMAP استفاده گردید.

لازم به ذکر است به دلیل نبود دستگاه‌های اندازه‌گیری چسبندگی ریشه در این مطالعه، از منابع موجود و مشابهت گونه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه با تحقیقات قبل بهره گرفته شد. با استفاده از آمار بارندگی روزانه ۱۶ ساله منطقه مورد مطالعه، حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته برای ۱۶ سال استخراج و بارندگی مؤثر برای ورودی دو مدل تعیین گردید. در ادامه لغزش‌های معرفی شده در مطالعات مدیریت بحران استان مازندران انتخاب شد و مشخصات مکانیکی نمونه‌های خاک پس از آماده‌سازی پارامترها در دو مدل وارد الحاقیه‌های SINMAP و SHALSTAB بسته نرم‌افزاری Arc view 3.2 شد. دو مدل برای محاسبه توپوگرافی، نیاز به داده‌های رقومی ارتفاعی دارد. در این مطالعه از نقشه خطوط تراز رقومی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استفاده گردید. نقشه شیب و سطح آبخیز بالادست از نقشه DEM به‌وسیله برنامه Arc view 3.2 آماده شد. این نقشه‌های اولیه نشان‌دهنده توزیع پستی و بلندی در منطقه و همچنین مرتبط با ناپایداری دامنه می‌باشند. در واقع سطح آبخیز بالادست مناطق از طریق این دو مدل محاسبه می‌شود که الگوریتم آن بر پایه روش [۱۹] است. در مدل SINMAP برای محاسبه پارامترهای ورودی این مدل‌ها در سطح حوضه با توجه به جدول ۵ نقشه پایداری دامنه برای

جدول ۴. حداکثر بارش ۲۴ ساعته ایستگاه‌های منتخب منطقه مورد مطالعه

نام ایستگاه	دوره بازگشت						
	۲	۵	۱۰	۲۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
گرمرد	۳۷/۸۴	۴۸/۸۹	۵۵/۲۲	۶۰/۷۶	۶۲/۴۴	۶۷/۳۷	۷۱/۹۹
کیاسر	۲۸/۵	۴۲/۵	۵۶/۱	۶۷/۴	۷۶/۵	۹۳/۶	۱۱۱/۸
ریگ چشمه	۵۸/۱۸	۸۰/۰۷	۶۲/۹۴	۱۰۸/۶۱	۱۱۳/۱	۱۲۶/۸۵	۱۴۰/۶۷
واستان	۴۶/۵	۶۴/۴	۷۷/۶	۸۸/۳	۹۵/۳	۱۰۸/۷	۱۲۲/۴
سلیمان تنگه	۳۹	۵۰/۳۷	۵۶/۳۲	۶۱/۲۳	۶۲/۷۵	۶۶/۷۵	۷۰/۴۳

### ۳. نتایج

گردیده است. سپس نتایج دو مدل SINMAP و SHALSTAB برای شناسایی مناطق حساس به زمین لغزش مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ارتباط با

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل و آنالیز پایداری دامنه برای دو مدل فیزیکی مورد استفاده در جدول ۵ ارائه

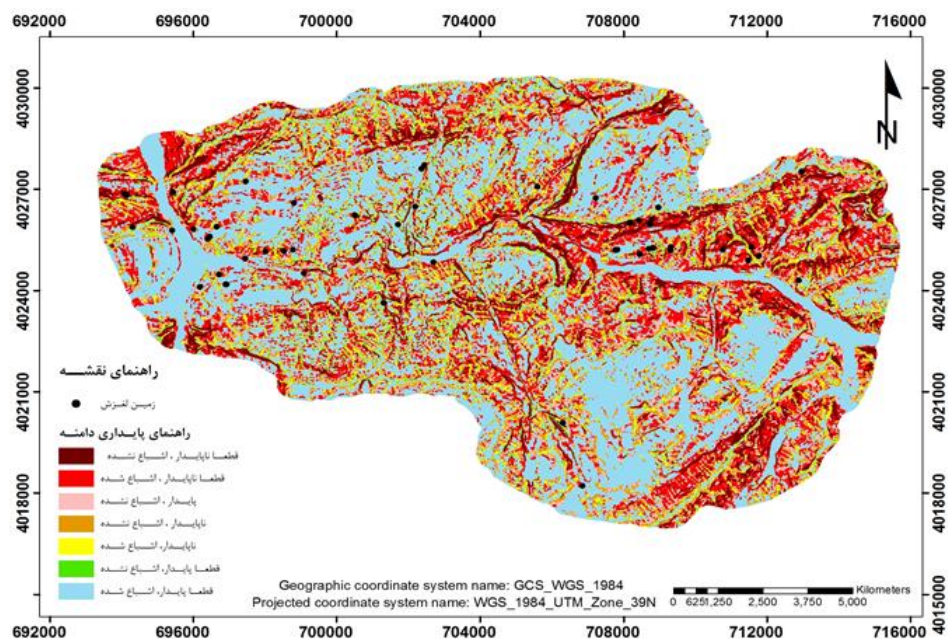
کنگلومرا، ماسه‌سنگ، سیلت سنگ و مارن سیلت دار با نسبت تراکم  $2/72$  و  $1/18$  نیز در واحد سنگی  $M^{ms}$  شامل مارن‌های خاکستری - قرمز، بین لایه‌های نازک تا متوسط لایه ماسه‌سنگ و ماسه‌سنگ آهکی با نسبت تراکم  $1/34$  واقع شده است.

ویژگی‌های زمین‌شناسی نتایج نشان داد که  $38\%$  زمین لغزش‌های رخ داده در واحد سنگی  $M_{2,3}^{msl}$  شامل مارن، ماسه‌سنگ، سیلت سنگ آهکی، مارن سیلت دار، سنگ آهک ماسه‌ای و مادستون با نسبت تراکمی  $0/63$  قرار داشته و  $25\%$  نیز در واحد سنگی  $PIQ^{cs}$  شامل

جدول ۵. نتایج به‌دست‌آمده از گمانه‌های محدوده چهاردانگه

Lithology	$(kg/m^3)\rho_s$	$(kg/m^3)\rho_s$	$(mm/h)R$	$(m^2/h)T$	$(Pa)Cr$	$(Pa)Cs$	$\phi$	عمق نمونه (m)	شماره گمانه
$M_{2,3}^{msl}$	۱۹۱۰	۱۷۱۰	۵۰	۰/۱۸۵	۷	۰	۳۲	۳/۷	۱
$M_{2,3}^{msl}$	۲۰۸۰	۱۷۶۰	۵۰	۰/۰۵۵۱	۲	۱۴۹۰۰۰	۳	۲/۹	۲
$M_{2,3}^{msl}$	۲۱۰۰	۱۷۹۰	۵۰	۰/۰۰۸۶	۶/۶	۶۷۰۰۰	۳۸	۲/۱۵	۳
$M_{2,3}^{msl}$	۱۹۸۰	۱۶۸۰	۵۰	۰/۰۵	۸	۲۶۰۰۰	۱۳	۳/۸۵	۴
$M_{2,3}^{msl}$	۲۰۴۰	۱۷۷۰	۳۹	۰/۳۳۴	۸	۰	۳۳	۳/۲۵	۵
$M_{2,3}^{msl}$	۲۰۰۰	۱۷۵۰	۵۸	۰/۱۱	۷	۴۰۰۰۰	۰	۲	۶
$PIQ^{cs}$	۲۱۰۰	۱۷۸۰	۸۰	۰/۱۳۷۵	۷	۰	۴۰	۲/۵	۷
$M_{2,3}^{msl}$	۲۱۰۰	۱۷۷۵	۸۰	۴/۳۸	۲	۵۰۰۰	۳۶	۳	۸
$M_{2,3}^{msl}$	۱۸۰۰	۱۵۰۰	۸۰	۱/۵۵	۷	۲۰۰۰۰	۱	۴	۹
$M^{ms}$	۱۹۰۰	۱۵۳۰	۸۰	۰/۰۵۶	۶/۶	۰	۲۹	۴	۱۰
$M_{2,3}^{msl}$	۱۸۰۰	۱۵۱۰	۶۴	۵/۸۴	۸	۲۰۰۰۰	۰	۴	۱۱
$M_{2,3}^{msl}$	۱۸۵۰	۱۵۶۰	۵۸	۰/۰۵۶	۸	۰	۳۰	۳/۵	۱۲
$M_{2,3}^{msl}$	۱۸۰۰	۱۶۰۰	۵۸	۲/۱۷	۷	۱۵	۲۵	۳/۵	۱۳

$\phi$ : زاویه اصطکاک داخلی خاک، Cs: چسبندگی خاک، Cr: چسبندگی ریشه، T: آب‌گذری خاک، R: بارندگی مؤثر،  $\rho_s$ : وزن مخصوص خاک خشک،  $\rho_s$ : وزن مخصوص خاک مرطوب

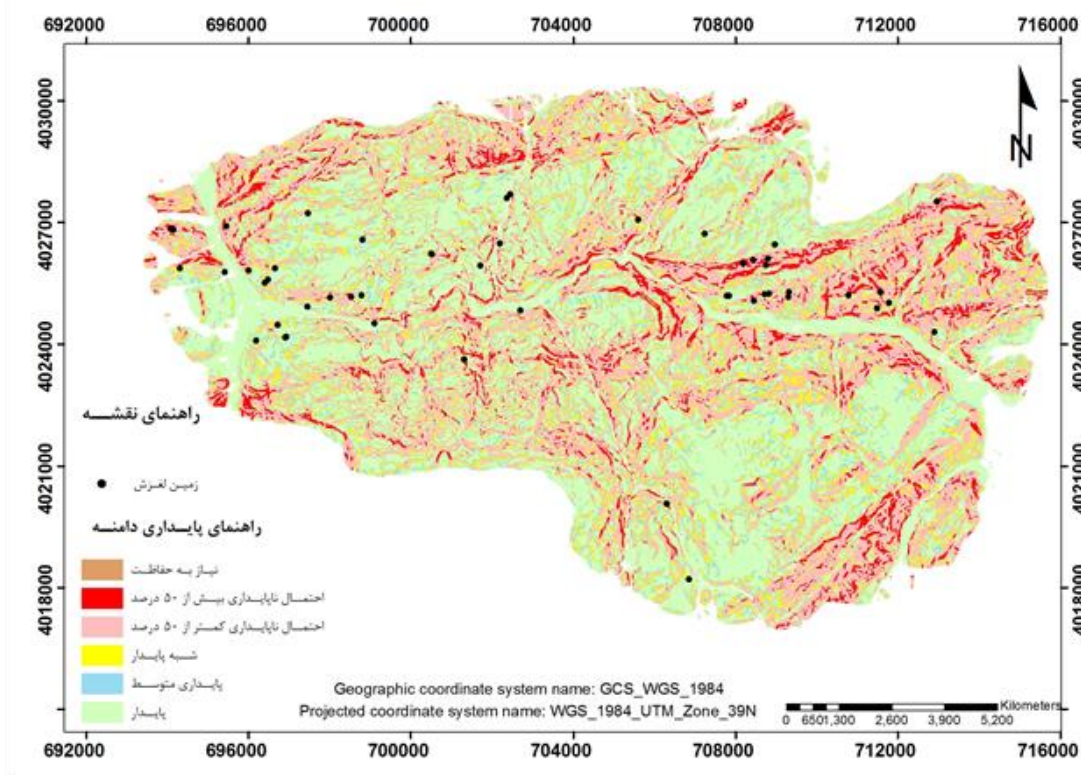


شکل ۳. نقشه پایداری دامنه حاصل از مدل SHALSTAB در محدوده چهار دانگه



جدول ۶. نتایج آماری محاسبه شده با مدل SHALSTAB برای لغزش‌های محدوده چهاردانگه

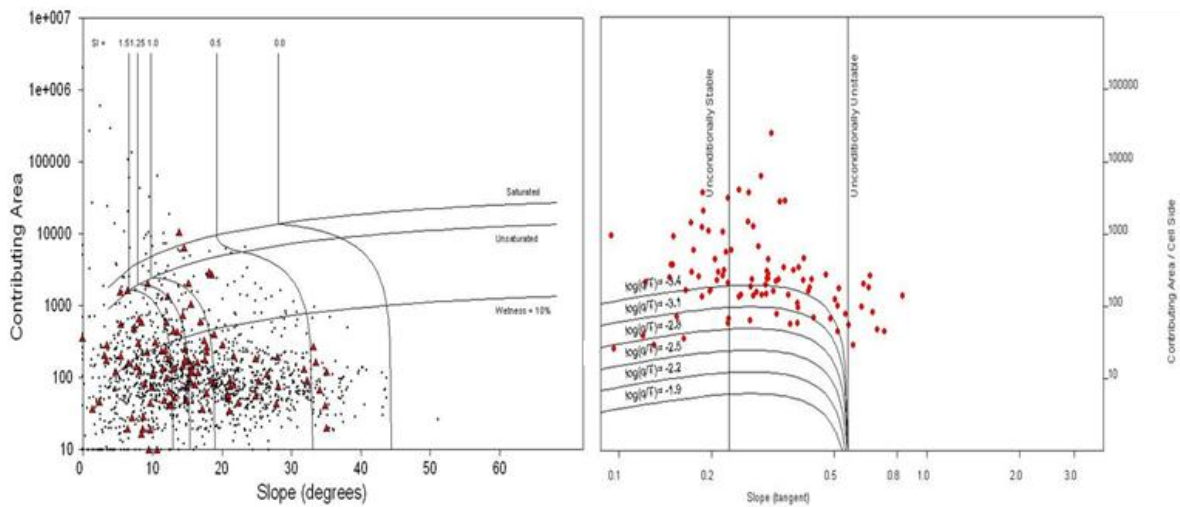
منطقه	قطعاً پایدار اشباع شده	قطعاً پایدار اشباع نشده	پایدار اشباع نشده	ناپایدار اشباع نشده	ناپایدار اشباع شده	قطعاً پایدار اشباع نشده	قطعاً پایدار اشباع شده	مجموع
مساحت (km <sup>2</sup> )	۸۰/۹۳	۴۰/۰۳	۲۳/۲۳	۲۴/۰۲	۱۴/۳۵	۴/۲۶	۱۹/۱۴	۲۰۶/۴
درصد منطقه	۳۹/۲۱	۱۹/۳۹	۱۱/۲۵	۱۱/۶۷	۶/۹۹	۲/۱۱	۹/۲۷	۱۰۰
تعداد لغزش	۹	۱۸	۸	۵	۵	۰	۱۱	۵۶
درصد لغزش	۱۶	۳۲/۱	۱۴/۲	۸/۹	۸/۹	۰	۱۹/۶	۱۰۰
نسبت تراکم	۰/۴	۱/۶۵	۱/۲۶	۰/۷۶	۱/۲۷	۰	۲/۱۱	



شکل ۴. نقشه پایداری دامنه حاصل از مدل SINMAP در منطقه چهاردانگه

جدول ۷. نتایج آماری محاسبه شده با مدل SINMAP برای لغزش‌های محدوده ساری - کیاسر

منطقه	پایدار	پایداری متوسط	شبه پایدار	حد پایین ناپایداری	حد بالای ناپایداری	حفاظتی	مجموع
مساحت (km <sup>2</sup> )	۶۲/۱	۱۸/۴	۲۵/۴	۷۴/۱	۱۴	۰/۵	۱۹۴/۵
درصد منطقه	۳۱/۹	۹/۵	۱۲/۱	۳۸/۱	۷/۲	۰/۳	۱۰۰
تعداد لغزش	۱	۶	۹	۳۲	۷	۰	۵۵
درصد لغزش	۱/۸	۱۰/۹	۱۶/۴	۵۸/۲	۱۲/۷	۰	۱۰۰
نسبت تراکم	۰,۰۵	۱/۱۴	۱/۲۵	۱/۵۲	۱/۷۶	۰	-



شکل ۵. پلات های شیب - سطح آبخیز بالادست زمین لغزش های رخ داده الف) مدل SINMAP ب) مدل SHALSTAB

نتایج مدل SINMAP نشان می‌دهد که مجموعاً ۸۷/۳٪ زمین لغزش‌های مشاهداتی مدل (۴۸ مورد از ۵۵) در کلاس پرخطر طبقه‌بندی شده‌اند. آمار فوق نشان‌دهنده کاربرد موفق این مدل در پیش‌بینی وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه می‌باشد که با نتایج [۱، ۱۴ و ۲۰] مطابقت دارد. در حالی که ۱۲/۷٪ از زمین لغزش‌ها در طبقه پایدار مدل‌سازی گشته‌اند. با توجه به جدول ۶ و ۷، نسبت تراکم در مدل SINMAP از طبقات کم‌خطر تا پرخطر روند صعودی بهتری نسبت به مدل SHALSTAB داشته است. همچنین نسبت تراکمی زمین لغزش در طبقات پایدار مدل SINMAP کمتر از نسبت تراکم مدل SHALSTAB در این طبقات بوده است بنابراین درصد خطای مدل SINMAP پایین‌تر از مدل SHALSTAB بوده و کاربرد بیشتری در پیش‌بینی وقوع زمین لغزش در منطقه چهاردانگه استان مازندران دارد. با توجه به توضیحات فوق مدل SINMAP با شبیه‌سازی ۸۷/۳٪ زمین لغزش‌ها نسبت به مدل SHALSTAB با شبیه‌سازی ۶۹/۵٪ زمین لغزش‌های رخ داده در محدوده مورد مطالعه کاربرد

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج جدول ۶ و شکل ۳، در مدل SHALSTAB، مجموعاً ۶۹/۵٪ (۳۹ مورد از ۵۵) زمین لغزش‌های مشاهداتی در طبقه ناپایدار به لحاظ پتانسیل وقوع لغزش قرار گرفت. همچنین ۳۰٪ (۱۷ مورد از ۵۶) از زمین لغزش‌های مشاهداتی در طبقه پایدار به لحاظ خطر وقوع زمین لغزش قرار گرفت. این دو مدل پلات شیب - سطح آبخیز بالادست را تعیین می‌کنند (شکل ۵). این پلات نشان می‌دهد که هر یک از رخداد زمین لغزش در چه شیبی و در چه سطح آبخیز بالادستی قرار دارد. خطوط عمودی نشان‌دهنده طبقه‌بندی فاکتور اطمینان می‌باشد و گویای این است که هر رخداد زمین لغزش دارای چه ضریب پایداری می‌باشد. خطوط نیمه افقی نیز نمایش‌دهنده این است که هر رخداد از لحاظ شرایط رطوبتی در چه وضعیت اشباع یا غیراشباع قرار دارد. با توجه به شکل ۵ در مدل SINMAP اکثریت زمین لغزش‌ها در شیب ۱۰-۲۰ درجه واقع شده‌اند. همچنین اکثریت زمین لغزش‌ها در شرایط رطوبتی غیراشباع قرار گرفته‌اند. با توجه به جدول ۷ و شکل ۴،

نیاز به لایه پراکنش زمین لغزش‌ها برای تهیه نقشه خطر نبوده و با خصوصیات آزمایش گمانه خاک (چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و وزن مخصوص خشک و مرطوب خاک) و خصوصیات هیدرولوژی (بارندگی مؤثر، ضریب آبگذری) و توپوگرافی (نقشه شیب، نقشه جریان مستقیم و نقشه سطح آبخیز بالادست سهیم) می‌توان به نقشه خطر دست پیدا کرد و لایه پراکنش لغزش برای واسنجی نقشه خطر بکار می‌رود. محدودیت دو مدل این است که برای لغزش‌های کم عمق بکار می‌روند و حداکثر تا عمق ۲-۴ متر مناسب هستند [۱۸]. بنابراین برای ارزیابی آن‌ها نمی‌توان از نقشه لغزش‌های بزرگ و عمقی نیز استفاده کرد که در کم شدن دقت پیش‌بینی و کاربرد دو مدل می‌تواند اثرگذار باشد.

روش‌های زیادی برای پهنه‌بندی زمین لغزش وجود دارند که عوامل مختلف را در وقوع این پدیده بررسی می‌کنند، در این مطالعه از دو مدل فرآیندمحور SINMAP و SHALSTAB جهت تعیین نقشه پایداری دامنه استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل SINMAP با شبیه‌سازی  $3/87\%$  زمین لغزش‌ها نسبت به مدل SHALSTAB با شبیه‌سازی  $5/69\%$  زمین لغزش‌های رخ داده در محدوده محور مورد مطالعه دقت بالاتری داشته است و در صورت وجود اطلاعات دقیق می‌توان به پیش‌بینی درستی از وقوع زمین لغزش دست یافت و در مکان‌هایی که احتمال وقوع زمین لغزش زیاد است و دارای ارزش اقتصادی زیادی می‌باشد. می‌توان با استفاده از این مدل، مناطق حساس به زمین لغزش را پیش‌بینی و در اختیار مدیران و برنامه ریزان قرارداد.

موفقیت‌آمیزتری در پیش‌بینی وقوع لغزش در این منطقه داشته است که با نتایج [۲۱] مطابقت دارد. با توجه به نتایج تحقیق تفاوت در پیش‌بینی و خطای دو مدل به این نکته دلالت دارد که در مدل SHALSTAB پارامترها به صورت یک عدد قطعی به مدل معرفی می‌گردند، در نتیجه نتایج این مدل اغراق‌آمیز بوده و در مناطقی که دارای عوامل خاک و توپوگرافی و هیدرولوژیکی همگن بوده کاربرد بهتری دارند؛ اما در مناطقی که دارای تنوع گسترده عوامل خاک و توپوگرافی و خاک بوده نمی‌توان به نتایج این مدل اعتماد و به کل منطقه تعمیم داد، در حالی که در مدل SINMAP اصل عدم قطعیت رعایت شده و می‌توان محدوده‌ای از پارامترها (شکل ۲) را با توجه به آزمایش‌های گمانه خاک به‌عنوان ورودی به مدل معرفی نمود. همچنین بر اساس نتایج فوق در مدل SINMAP چسبندگی ریشه علاوه بر چسبندگی خاک در نظر گرفته شده، در حالی که در مدل SHALSTAB چسبندگی ریشه در ورودی این مدل در نظر گرفته نشده در نتیجه این ویژگی‌ها مزیت مدل SINMAP نسبت به مدل SHALSTAB محسوب شده و از مدل SINMAP می‌توان در مناطق وسیع که دارای شرایط متنوع هیدرولوژیکی، توپوگرافی و خاک و پوشش گیاهی بوده استفاده نمود و نتایج حاصل از این مدل معقولانه‌تر از مدل SHALSTAB می‌باشد. با در نظر گرفتن تغییرات مکانی در دو مدل، برخلاف مدل‌های آماری که لایه پراکنش زمین لغزش حتماً می‌بایست موجود بوده و ایجاد نقشه‌های پتانسیل خطر کاملاً وابسته به پراکنش زمین لغزش‌هاست، در دو مدل فیزیکی پایه این تحقیق

## References

- [1] Benjamin, F., Zaitchik, B., Harold, M., van Es, H. and Patrick, J. (2003). Modeling Slope Stability in Honduras Parameter Sensitivity and Scale of Aggregation, *Soil Science Society of America Journal*, 67(1), 268-278.
- [2] Beven, K. J. and Kirkby, M. J. (1979). A physically-based variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43-69.

- [3] Clark, D. A. (2002). Bioengineering and root skin friction. Unpublished BSc Thesis, Nottingham Trent University, Nottingham. Modulus of elasticity and tensile strength of Douglas fir roots, *Canadian Journal of Forest Research*, 21, 48–52.
- [4] Dietrich, W. E., Bellugi, D. and Asua, R. (2001). Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management, *Water science and Application*, 2, 195-227.
- [5] Greenwood, J.R., Vikkers, A.W., Morgan, R. P. C., Coppin, N.J. and Norris, J.E. (2001). *Bioengineering the Longham Wood Cutting field trial*. CIRIA PR 81, London.
- [6] Guimarães, R. F., Montgomery, D. R., Greenberg, H. M., Fernandes, N. F., Gomes, R. A. T., and Carvalho Junior, O. A. (2000). Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology*, 69, 99–108.
- [7] Hammond, C., Hall, D., Miller, S. and Swetik, P. (1992). Level I stability analysis (LISA) documentation for version 2.0. General technical report INT, 285.
- [8] Ho, J.Y., Lee, K.T., Chang, T.C., Wang, Z.Y. and Liao, Y. H. (2012). Influence of spatial distribution of soil thickness on shallow landslide prediction, *Engineering Geology*, 124, 38–46.
- [9] Husseinzade, M. M., Servati, M. R., Mansouri, A., Mirbagheri, B. and Khezri, S. (2010). Risk zonation of mass movements using logistic regression (case study: the range of Sanandaj - Dehgalan), *Journal of Geology*, 11, 27-37.
- [10] Memarian, H. and safdari, A. (2010). *Slope stability analysis in the natural environment and familiarity with the model arc GIS sin map*. Sokhan gostar Publishing Co.
- [11] Meisina, C., Scarabelli, S. (2007). A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils, *Geomorphology*, 23, 803–887.
- [12] Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1994). A Physically Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding, *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1171.
- [13] Montgomery, D. R., Sullivan, K. and Greenberg, H. R. (1998). Regional test of a model for shallow land sliding, *Hydrological Processes*, 12, 943–955.
- [14] Naqa, A. and Abdelghafoor, M. (2006). Application of SINMAP terrain stability model along Amman-Jerash-Irbid highway, North Jordan, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Bunde B.
- [15] Norris, J. E. (2007). Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England, *In Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*, 61-71.
- [16] O'loughlin, C. L. and Ziemer, R. R. (1982). The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steepland forests. Proceedings of an I.U.F.R.O.
- [17] O'Loughlin, E. M. (1986). Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*, 22, 794–804.
- [18] Pack, R. T., Tarboton, D. G. and Goodwin, C. N. (1998). Terrain stability mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00, 4114–0, Terratech Consulting Ltd, Salmon Arm. British Columbia.
- [19] Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. and Planchon, O. (1991). The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models, *Hydrological Processes*, 5, 59-80
- [20] Talebi, A. and Izadust, M. (2011). Landslide hazard zonation model to evaluate the performance of SINMAP (Case Study: Ilam dam watershed), *Watershed Engineering Iranian Journal of Science*, 15, 68-63.
- [21] Zizioli, D., Meisina, C., Valentino, R. and Montrasio, L. (2013). Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese, Northern Italy. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 13, 559-573.