

بررسی خطر زمین لغزش به روش AHP در ساحل دریای خزر، محدوده نوشهر تا رامسر

محمد رسول ستایشی راد^۱، محمدرضا نیکودل^{۲*}، علی ارومیه‌ای^۳

پذیرش مقاله: ۹۰/۵/۵

دریافت مقاله: ۸۹/۷/۱۸

چکیده

بر اساس بررسی‌های صحرایی، این منطقه از لحاظ وقوع زمین لغزش دارای پتانسیل بالایی می‌باشد و در سرتاسر منطقه می‌توان انواع مختلف حرکات دامنه‌ای را مشاهده نمود. در این مقاله داده‌های ورودی در مدل AHP جهت تحلیل خطر زمین لغزش شامل عوامل شیب، زمین شناسی، گسل، آبراهه، جهت شیب، ارتفاع، کاربری اراضی و راه‌های دسترسی می‌باشند که با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS رقومی گشته و به صورت لایه‌های اطلاعاتی ذخیره شده‌اند. نقشه تهیه شده با استفاده از روش فاصله برابر در ۵ رده خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد عوامل لیتولوژی، شیب و گسل از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش در این منطقه هستند و بیش از ۳۰ درصد از اراضی منطقه در رده خطر بالا قرار دارد.

کلید واژه‌ها: زمین لغزش، پهنه‌بندی، مازندران، دریای خزر، تحلیل سلسله مراتبی، مدل AHP

۱. دانشگاه تربیت مدرس، گروه زمین شناسی مهندسی

۲. دانشگاه تربیت مدرس، استادیار گروه زمین شناسی مهندسی

۳. دانشگاه تربیت مدرس، استادیار گروه زمین شناسی مهندسی

* مسئول مکاتبات

مقدمه

مراتبی و در نظر گرفتن عوامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و بارش اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه طالقان نموده‌اند. همچنین احمدی و همکاران (۱۳۸۲)، از دو روش رگرسیون چند متغیره و تحلیل سلسله مراتبی جهت پهنه‌بندی حرکات توده‌ای در حوضه آبخیز گرمی‌چای استفاده کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان دهنده دقت بیشتر روش تحلیل سلسله مراتبی نسبت به روش رگرسیون چند متغیره می‌باشد. کلاستاقی (۱۳۸۱)، عوامل زمین‌شناسی، شیب، جهت شیب، بارندگی، ارتفاع و کاربری اراضی را برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز شیرین رود تجن مورد بررسی قرار داده است. وی در این تحقیق از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی، ارزش اطلاعاتی، تراکم سطح و شاخص هم‌پوشانی استفاده نموده است.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از زیرحوضه است (شکل ۱). به دلیل موقعیت جغرافیایی، ساختار زمین‌شناختی، اقلیم، خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و دخالت انسان همواره با خطر زمین‌لغزش مواجه است. پهنای منطقه، ۱۵ Km از خط ساحلی و مساحت آن تقریباً ۱۵۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد. این منطقه به لحاظ آب و هوایی، در ناحیه خزری قرار دارد و مرطوب‌ترین ناحیه کشور است که منبع اصلی رطوبت آن دریای مازندران و توده‌های هوای مرطوب مدیترانه و اقیانوس اطلس می‌باشد. بر اساس آمار سالیانه ایستگاه‌های سینوپتیک، میانگین بارش سالانه در سال ۱۳۸۷ در منطقه بیش از ۱۳۰۰ میلی‌متر بوده است (پایگاه اینترنتی اداره کل هواشناسی استان مازندران).

از نظر زمین‌شناسی، این منطقه در بخش شمال غربی رشته کوه‌های البرز مرکزی واقع شده و به جز بخش کوچکی در گوشه جنوب غربی، دیگر رخنمون‌ها با درختان جنگلی پوشیده شده‌اند. در سواحل دریای خزر، نهشته‌های کواترنر شامل جلگه‌های آبرفتی و مخروط افکنه‌ها که با مزارع و گیاهان پوشیده شده‌اند، دیده می‌شوند و به سوی جنوب، با

یکی از مهم‌ترین و زیان‌بارترین مخاطرات زمین‌شناختی پدیده زمین‌لغزش می‌باشد. در برخی از کشورها خسارات مالی و جانی ناشی از زمین‌لغزش، بیشتر از دیگر انواع مخاطرات مانند سیل و زلزله می‌باشد (Guzzetti et al., 1999). به عنوان مثال در سال ۱۹۶۲ در پرو، ۴۰۰۰ نفر و در سال ۱۹۲۰ در چین، نزدیک به ۲۰۰۰۰۰ نفر در اثر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله جان باختند (Chau et al., 2004). از لحاظ رانش زمین سواحل دریای خزر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مناطق دارای جمعیت قابل توجهی بوده و به دلیل کمبود مناطق هموار، ساخت و ساز مناطق مسکونی در ارتفاعات و دامنه‌ها روز افزون می‌باشد.

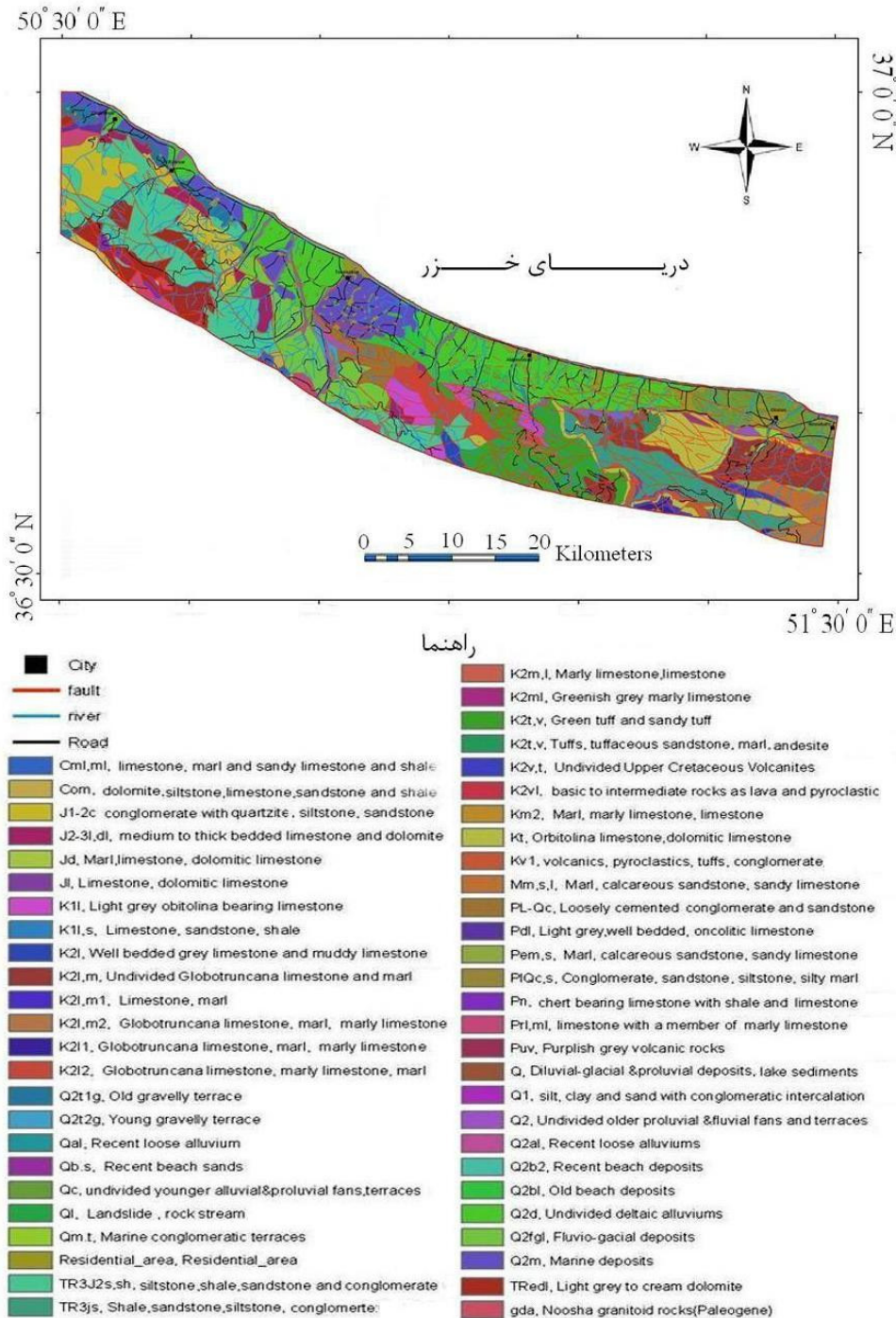
تاکنون تلاش‌های زیادی در داخل و خارج از کشور جهت بررسی خطر زمین‌لغزش صورت گرفته و محققین از روش‌ها و همچنین از معیارهای متفاوتی برای رسیدن به این هدف استفاده نموده‌اند.

از جمله: (Yalcin et al., 2008)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را با استفاده از ۳ روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، ارزش اطلاعات و تراکم سطح در ترکیه انجام داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که روش AHP دقت بیشتری نسبت به ۲ روش دیگر دارد. Kamp et al., 2008، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و با استفاده از روش AHP و مقایسه دو به دو، خطر زمین‌لغزش، در شمال پاکستان و هند را بررسی کرده‌اند. آن‌ها ۸ عامل شیب، زمین‌شناسی، گسل، جاده، ارتفاع، جهت شیب، کاربری اراضی و آبراهه را به عنوان عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در نظر گرفته‌اند. Komac, 2006، با استفاده از ۲ روش آنالیز چند متغیره و AHP اقدام به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در اسلوونی نموده است. Yoshimatsu & Abe, 2006، خطر زمین‌لغزش در ژاپن را با استفاده از روش AHP بررسی کرده‌اند. Ayalew et al., 2004، با به کارگیری روش مقایسه دوتایی، وزن‌های نسبی عوامل مؤثر در زمین‌لغزش را تعیین کرده و با استفاده از GIS، نقشه خطر زمین‌لغزش در قسمتی از ژاپن را تهیه کرده‌اند.

احمدی و همکاران (۱۳۸۴)، با استفاده از روش تحلیل سلسله

کک‌نشین دو گسل مهم منطقه هستند. گسل البرز جداکننده کوهپایه و ارتفاعات جنوبی از جلگه شمالی است. چین خوردگی‌ها در منطقه، به صورت تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها دیده می‌شوند که عمدتاً با گسل‌ها بریده شده‌اند. به طور معمول شدت چین خوردگی‌ها به سوی شمال کاهش می‌یابد و صفحه محوری آن‌ها کم و بیش قائم‌اند

نهشته‌های کوهپایه‌ای پایان می‌پذیرند. در محدوده رامسر، سنگ‌های پرکامبرین تا سنوزوئیک و در محدوده چالوس، ردیف‌های چین‌نگاشتی از پرمین تا کواترنر، به جز ائوسن و اولیگوسن رخنمون دارند (درویش‌زاده، ۱۳۸۳؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور). گسل‌های منطقه عمدتاً از نوع راندگی هستند. گسل البرز و گسل ازارک-



شکل ۱- موقعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

روش تحقیق

روش استفاده شده جهت ارزیابی خطر زمین لغزش، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی^۴ (AHP) می باشد. این روش در سال ۱۹۸۰ به وسیله ساعتی^۵ معرفی شد (نقل از آذر و رجب زاده، ۱۳۸۷). از آنجا که این فرآیند سازگاری زیادی با نحوه تفکر و فرآیندهای ذهنی انسان دارد و نیز الگوریتم آن بر اساس یک منطق ریاضی بنا شده است، از کارائی فوق العاده بالا برخوردار بوده و استفاده از آن بسیاری از مشکلات تصمیم گیری را حل نموده است. در روش AHP، ابتدا مساله را تعریف نموده، و بعد یک سلسله مراتب تشکیل می دهیم. در این سلسله مراتب، بالاترین سطح، هدف نهایی تصمیم گیری و پایین ترین سطح، عوامل مؤثر در هدف نهایی می باشد. سپس یک ساختار ماتریسی برای مقایسه هر عامل نسبت به عامل دیگر تشکیل می دهیم. مقایسه دو به دو با استفاده از مقیاسی که از اهمیت برابر (۱) تا اهمیت مطلق (۹)، طراحی شده است انجام می گیرد (آذر و رجب زاده، ۱۳۸۷). به عنوان مثال اگر یک عامل در مقایسه با عامل دیگر عدد ۱ را کسب کند، نشان دهنده تأثیر برابر این دو عامل در وقوع زمین لغزش می باشد و اگر عدد ۹ را کسب کند، نشان از تأثیر بسیار بیشتر آن در وقوع زمین لغزش می باشد.

تجربه نشان داده است که استفاده از این مقیاس تصمیم گیرنده را قادر می سازد تا مقایسه ها را به گونه ای مطلوب انجام دهد. به همین علت استفاده از این مقیاس در امتیازدهی مقایسه ای، به صورت یک مقیاس استاندارد درآمده است (آذر و رجب زاده، ۱۳۸۷). بعد از مقایسه دو به دو عوامل، مراحل زیر انجام می گیرد:

محاسبه وزن عوامل: در این مرحله ابتدا مقادیر هر ستون ماتریس مقایسه دوتایی با همدیگر جمع می شوند، سپس هر مولفه ماتریس بر مجموع ستونش تقسیم می گردد، ماتریس به دست آمده را "ماتریس مقایسه دوتایی نرمال شده" می نامند به گونه ای که مجموع هر ستون برابر یک شود. در مرحله بعد میانگین مولفه ها در هر ردیف از ماتریس نرمال شده محاسبه

می گردد، برای این منظور مجموع امتیازات نرمال شده برای هر ردیف بر تعداد عوامل تقسیم می گردد. این میانگین ها تخمینی از وزن نسبی عوامل مقایسه شونده را نشان می دهند (آذر و رجب زاده، ۱۳۸۷).

تخمین نسبت توافق: در این مرحله درست بودن مقایسه ها و عملیات تعیین خواهد شد. این مرحله عبارتست از: الف) تعیین بردار مجموع وزنی به وسیله ضرب کردن وزن اولین عامل در اولین ستون ماتریس، سپس ضرب نمودن وزن دومین عامل در دومین ستون، و همین طور این کار به تعداد عوامل ادامه یافته و در نهایت جمع نمودن این مقادیر در سطرها، ب) تعیین بردار توافق به وسیله تقسیم بردار مجموع وزنی بر وزن عوامل که بیشتر تعیین گردید، ج) تعیین λ که برابر با میانگین مقادیر بردار توافق است. د) تعیین شاخص توافق (Consistency Index). عبارت شاخص توافق (CI)، ملاکی برای انحراف از توافق تلقی می شود. محاسبه CI بر مبنای این واقعیت است که λ همیشه بزرگتر یا مساوی تعداد عوامل تحت بررسی (n) است و $n = \lambda$ در صورتی است که ماتریس مقایسه دوتایی یک ماتریس سازگار باشد. بنابراین $\lambda - n$ می تواند ملاکی از میزان سازگاری در نظر گرفته شود که با استفاده از رابطه ۱ نرمال می شود:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad 1$$

که n برابر با تعداد عوامل می باشد.

ه) تعیین نسبت توافق (Consistency Ratio) بر اساس رابطه ۲

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad 2$$

نسبت توافق CR، نسبت بین شاخص توافق ماتریس و شاخص تصادفی (Random Index) است که این مقدار بین ۰-۱ تغییر می کند. شاخص تصادفی RI میانگین شاخص توافق تعداد زیادی ماتریس است که به صورت تصادفی ایجاد شده اند و مقدار آن به تعداد عوامل بستگی دارد (Ayalew et al., 2004). اگر مقدار نسبت توافق به دست آمده کمتر از ۰/۱ باشد، نشانه سازگاری ماتریس مقایسه و قضاوت صحیح

4. Analytical Hierarchy Process

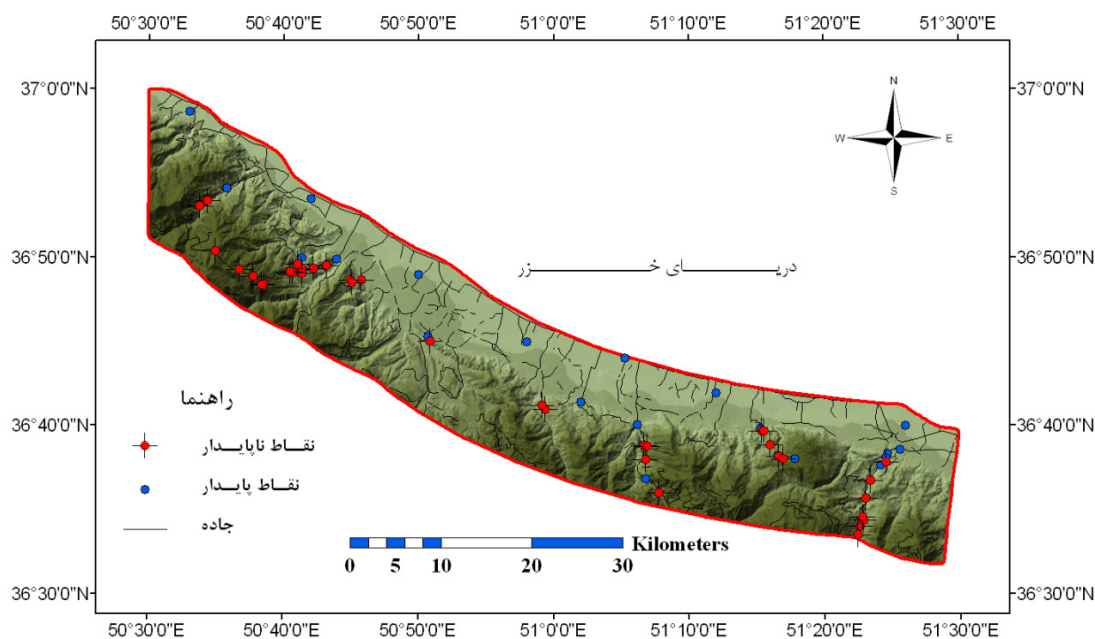
5. Saaty

تهیه لایه رقومی، مختصات این نقاط به محیط نرم افزار ArcGIS انتقال داده شد و نقشه نقاط مطالعه شده تهیه گردید (شکل ۲). تعدادی از این نقاط پایدار بوده و در بقیه نقاط زمین لغزش رخ داده است. دامنه‌های ناپایدار عمدتاً از مصالح سست و فرسایش یافته تشکیل شده‌اند. ضمن اینکه عواملی مانند تغییر کاربری زمین و دستخوردگی ناشی از احداث جاده‌ها از عوامل مؤثر در ناپایداری هستند. این نتایج می‌تواند در تعیین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش و امتیازدهی به آن‌ها که در مرحله بعد صورت می‌گیرد، مفید واقع گردد. همچنین از این نقاط می‌توان در اعتبارسنجی نقشه نهایی استفاده کرد.

است. اما اگر بزرگتر یا مساوی ۰/۱ باشد، نشان‌دهنده قضاوت ناسازگار است. در چنین مواردی باید در مقادیر اصلی ماتریس دوتایی تجدیدنظر شود (آذر و رجب زاده، ۱۳۸۷؛ Malczewski, 1999).

بررسی‌های صحرایی

نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها، با استفاده از روش‌هایی مانند پیمایش صحرایی، تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی، استفاده از زمین لغزش‌های تاریخی و ... تهیه می‌گردد (Nandy & shakoor., 2009). در کل منطقه مورد مطالعه ۶۰ نقطه با بازدیدهای میدانی مورد مطالعه قرار گرفت و مختصات آن‌ها با استفاده از GPS ثبت گردید. سپس برای



شکل ۲- نقشه زمین لغزش‌های منطقه و نقاط پایدار مطالعه شده طی بازدیدهای میدانی

داشت، اما معمولاً رسیدن به این هدف به دلیل محدودیت در دسترسی به اطلاعات، مشکل است (Ayalew et al., 2004). ۴ دسته اطلاعات مورد استفاده شامل نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، اطلاعات کاربری اراضی و بارندگی منطقه و در نهایت داده‌های عوارض خطی مانند گسل، آبراهه و جاده‌ها که با استفاده از

داده‌ها و لایه‌های اطلاعاتی

تعیین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش در یک منطقه، نیازمند شناخت جامع از فرآیند زمین لغزش و شرایط زمین‌شناسی منطقه می‌باشد (Guzzetti et al., 1999). به طور کلی هر چه تعداد عوامل بیشتری در ارزیابی خطر زمین لغزش مورد استفاده قرار بگیرد، نتایج آن دقت و اعتبار بیشتری خواهد

انحراف معیار داده‌ها انجام می‌گیرد. چون در این روش از میانگین داده‌ها جهت تعیین مرز رده‌ها استفاده می‌شود، نسبت به روش‌های قبلی ارجحیت بیشتری دارد (Ayalew et al., 2004; Nandy & shakoor., 2009). از دیگر روش‌های طبقه‌بندی استفاده از نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌ها در مقابل ارزش هر پیکسل است. روی این منحنی مناطقی که شیب منحنی تغییر پیدا می‌کند را به عنوان مرز یک رده با رده دیگر در نظر می‌گیرند (فیض‌نیا و همکاران، ۱۳۸۳).

پس از طبقه‌بندی هر یک از لایه‌های اطلاعاتی که در زیر تشریح می‌گردد، امتیازدهی به آن‌ها صورت می‌پذیرد. در روش‌های آماری مانند رگرسیون لجستیک از روش تراکم زمین‌لغزش برای امتیازدهی استفاده می‌شود. در این روش، امتیازدهی به یک عامل، به صورت غیرمستقیم تحت تأثیر دیگر عوامل می‌باشد. در این تحقیق هر عامل به صورت یک عامل مستقل در وقوع زمین‌لغزش در نظر گرفته شده و از یک مقیاس عددی در امتیازدهی استفاده می‌شود. در این روش اساس امتیازدهی بر مبنای اهمیت نسبی هر رده در وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. مبنای این امتیازدهی مقیاس ۰ تا ۱ می‌باشد. ولی به دلیل اینکه بازه ۰ تا ۱ کوچک می‌باشد، محققین مختلف جهت تحلیل ساده‌تر از مقیاس‌های بزرگتری استفاده می‌کنند و چون این مقدار در یک عدد ثابت ضرب می‌شود، تغییری در تفسیر نتایج حاصل نخواهد شد (Bai et al., 2009). بنابراین در این تحقیق امتیازدهی با استفاده از مقیاس صفر (مناطقی که احتمال زمین‌لغزش در آن‌ها وجود ندارد) تا ۵ (احتمال زمین‌لغزش بسیار زیاد است) انجام می‌پذیرد. ضمن اینکه امتیاز ۱ احتمال بسیار کم، امتیاز ۲ احتمال کم، امتیاز ۳ متوسط و امتیاز ۴ احتمال زیاد را نشان می‌دهد. نقشه‌های تهیه شده پس از آماده‌سازی به فرمت رستری با قدرت تفکیک ۲۰ متر تبدیل می‌شوند.

شیب

شیب یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش می‌باشد (Dai & Lee, 2002). در روش‌های پهنه‌بندی ارائه شده توسط محققین، تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای عامل

نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی تعیین گردید. در مرحله بعد این اطلاعات جهت استفاده در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) رقومی گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS Desktop 9.3، نقشه عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش شامل لیتولوژی، شیب، جهت شیب، گسل، آبراهه، ارتفاع، راه‌های دسترسی و کاربری اراضی تهیه گردید.

داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده پس از تبدیل به نقشه‌های رقومی، طبقه‌بندی خواهند شد. این مرحله یکی از مراحل مهم در تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش می‌باشد. عواملی مانند لیتولوژی، کاربری زمین و یا جهت شیب بر اساس تقسیم‌بندی‌های مشخص هر لایه و محتویات آن‌ها طبقه‌بندی می‌گردند. در این راستا مشکل اصلی طبقه‌بندی لایه‌های پیوسته (Continuous Data) می‌باشد (Ayalew et al., 2004). جهت انتخاب مناسب‌ترین روش طبقه‌بندی در این تحقیق، به برخی از روش‌های محققین مختلف اشاره می‌گردد. طبقه‌بندی بر اساس قضاوت مهندسی که توسط (Guzzetti et al., 1999) استفاده شده است. طبقه‌بندی دوتایی (Binary) که در این طبقه‌بندی (Dai & Lee, 2002) منطقه را به دو گروه دارای زمین‌لغزش و فاقد زمین‌لغزش تقسیم کرده‌اند. از معایب این روش اینست که نمی‌تواند مناطق با خطر کم را از مناطق پر خطر تفکیک کند. طبقه‌بندی Quantile که در این روش فاصله هر رده به صورتی تعیین می‌شود که همه رده‌ها تعداد عوارض یا پیکسل برابر داشته باشند. اشکال این روش اینست که ممکن است تغییرات داده‌ها در هر رده بسیار زیاد باشد (Ayalew et al., 2004). طبقه‌بندی Equal Interval که در آن فاصله بین هر رده برابر است. این روش زمانی مناسب است که هدف از طبقه‌بندی لایه اطلاعاتی، مقایسه آن با لایه دیگری باشد (Nandy & shakoor., 2009). طبقه‌بندی Natural Breaks. این روش زمانی به کار می‌رود که تغییرات ناگهانی در داده‌ها وجود داشته باشد و طبقه‌بندی بر اساس این تغییرات ناگهانی صورت می‌گیرد (Ayalew et al., 2004; Nandy & shakoor., 2009). طبقه‌بندی Standard Deviations، در این روش طبقه‌بندی با استفاده میانگین و

و درصد مساحت هر گروه در جدول ۱ ارائه شده است. به واحدهایی مانند شیل، رس و مارن به دلیل مقاومت کم و فرسایش‌پذیری بالا، بیشترین امتیاز داده شد و واحدهایی مانند سنگ‌های آتشفشانی به دلیل مقاومت بالا، کمترین امتیاز را کسب کردند. لازم به ذکر است که رسوبات ساحلی به دلیل اینکه نمی‌توانند دامنه‌ای تشکیل بدهند، با کسب امتیاز صفر وارد مدل نمی‌شوند.

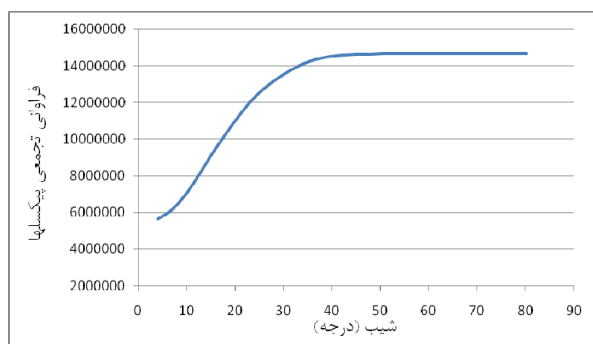
آبراهه

رودخانه‌ها و آبراهه‌ها می‌توانند با تغییر و ایجاد فرسایش در دامنه‌ها، مقدمه وقوع زمین‌لغزش را فراهم آورند (Dai & Lee, 2002). نقشه آبراهه و رودخانه‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه توپوگرافی و نقشه زمین‌شناسی منطقه تهیه شده است. تراکم بالای آبراهه‌ها علاوه بر فرسایش دامنه، با زیرشویی و در نتیجه برداشتن تکیه‌گاه دامنه، احتمال وقوع زمین‌لغزش را افزایش می‌دهد (Neaupane & Piantanakulchai, 2006) که این مسئله طی بازدیدهای میدانی اثبات گردید. بر این اساس برای بررسی آبراهه‌ها و تأثیر آن‌ها در ناپایداری دامنه‌ها از تراکم آن‌ها استفاده شده است. بنابراین با استفاده از ابزار Density نرم‌افزار ArcGIS، طبقه‌بندی آبراهه‌ها در ۵ رده و در یک کیلومتر مربع انجام گرفت که بالاترین امتیاز به مناطق با تراکم آبراهه خیلی زیاد تعلق گرفت. جدول ۱ تراکم آبراهه‌ها، توصیف، امتیاز و درصد مساحت آن‌ها را نشان می‌دهد.

گسل

از دیگر عوامل مؤثر در ناپایداری دامنه‌ها، گسل‌ها هستند. عموماً با افزایش فاصله از گسل، احتمال وقوع زمین‌لغزش کاهش می‌یابد (Yilmaz, 2009). این عامل در روش‌های مختلف، تأثیر متفاوت دارد. به عنوان مثال در روش آن‌بالاگان (۱۹۹۲) رابطه ناپیوستگی ساختاری و شیب و در روش موسسه راه ژاپن (۱۹۹۳) فاصله از گسل مورد توجه قرار گرفته است (نقل از شریعت جعفری، ۱۳۷۵). نقشه گسل‌های منطقه با استفاده از نقشه زمین‌شناسی منطقه تهیه شده است. با

شیب مطرح شده است (به عنوان مثال Kamp et al., 2008; Pachuri & Pant, 1992; Yilmaz, 2009). شیب منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) استان مازندران تهیه شده است. جهت طبقه‌بندی آن با توجه به مزایا و معایب روش‌های طبقه‌بندی که پیشتر ذکر گردید، از روش انحراف معیار استفاده شده است. بر این اساس شیب منطقه مورد مطالعه به پنج گروه کمتر از ۱۰ درجه، ۱۰ تا ۲۰ درجه، ۲۰ تا ۳۰ درجه، ۳۰ تا ۴۰ درجه و بیشتر از ۴۰ درجه تقسیم شده است. سپس نمودار فراوانی تجمعی آن نیز رسم گردید که نتایج آن با روش انحراف معیار مطابقت دارد (شکل ۳). با توجه به اینکه بدون توجه به جنس مواد تشکیل دهنده دامنه، با افزایش شیب دامنه، احتمال وقوع زمین‌لغزش نیز بیشتر می‌شود (Pachuri & Pant, 1992) بالاترین امتیاز به دامنه‌های با شیب بیشتر از ۴۰ درجه تعلق می‌گیرد. جدول ۱، امتیاز و درصد مساحت هر رده این عامل را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار فراوانی تجمعی پیکسل‌های عامل شیب

زمین‌شناسی

لیتولوژی نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش دارد (Neaupane & Piantanakulchai, 2006) & (Dai & Lee, 2002). بررسی‌های صحرایی مشاهده گردید که تراکم زمین‌لغزش در دامنه‌هایی با مصالح سست و مستعد فرسایش مانند شیل، رس و ... بیشتر از دامنه‌هایی است که از مصالح مقاوم مانند سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده‌اند. بر این اساس به دلیل تنوع زیاد واحدهای سنگ‌شناختی منطقه (شکل ۱)، واحدهای مشابه از نظر جنس و چینه‌شناسی در یک گروه قرار گرفتند و یک نقشه زمین‌شناسی با ۶ گروه لیتولوژی تهیه گردید. امتیاز

(Chau et al., 2004) معتقدند که رابطه زیادی بین وقوع زمین لغزش و ارتفاع وجود ندارد. به هر حال با توجه به اینکه در این تحقیق هر عامل به صورت یک عامل مستقل در نظر گرفته می‌شود، ارتفاع نیز به عنوان یکی از عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش بررسی می‌گردد. نقشه ارتفاع با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی منطقه مورد مطالعه، تهیه شده است. بیشترین ارتفاع منطقه، ۲۲۲۰ متر می‌باشد. طبقه‌بندی ارتفاع نیز مانند عامل شیب صورت گرفته و بر این اساس ارتفاع منطقه به ۶ گروه با فاصله ۲۰۰ متری تقسیم شده است. امتیاز و درصد مساحت هر رده در جدول ۱ ارائه شده است. در امتیازدهی، به مناطق با ارتفاع بیشتر، امتیاز بیشتری داده شده است. ضمن اینکه مناطق با ارتفاع کمتر از سطح آب‌های آزاد، با کسب امتیاز صفر وارد مدل نمی‌شوند.

عامل کاربری اراضی

یکی از عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش، کاربری زمین است. در مناطق با کاربری جنگل به دلیل کاهش رطوبت خاک (عامل هیدرولوژی) و وجود ریشه درختان (عامل مکانیکی) احتمال وقوع زمین لغزش کمتر است (Neaupane & Piantanakulchai, 2006). در حالی که در مناطق با کاربری کشاورزی آبی به دلیل افزایش رطوبت ناشی از آبیاری و در مناطق بدون پوشش گیاهی به دلیل فرسایش پذیری بالا احتمال وقوع زمین لغزش بیشتر است. نقشه کاربری اراضی منطقه، با استفاده از نقشه تهیه شده توسط وزارت جهاد کشاورزی آماده و با استفاده از تصویر ماهواره‌ای لندست (ETM) مورد بازبینی قرار گرفته است. این نقشه به ۵ گروه مسکونی، کشاورزی دیم، کشاورزی آبی، جنگل و اراضی بایر تقسیم شده که بر مبنای توضیحات ذکر شده امتیازدهی شده است (جدول ۱).

جهت شیب

جهت شیب، یکی از عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش است (Dai & Lee, 2002). این عامل با تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، استعداد شکست دامنه را افزایش می‌دهد. این تغییر

توجه به اینکه سنگ‌های واقع در حریم گسل‌ها، خردشدگی زیادی دارند و این خردشدگی محل مناسبی را جهت عبور آب‌های سطحی و زیرزمینی فراهم کرده و با ایجاد هوازدهی و فرسایش دامنه باعث کاهش مقاومت دامنه می‌شود، حریم گسل‌ها به پنج گروه ۰ تا ۱۰۰ متر، ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر، ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر، ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر و بیشتر از ۴۰۰ متر تقسیم شده است. امتیاز و درصد مساحت هر رده در جدول ۱ ارائه شده است. در امتیازدهی به این عامل، مناطق با فاصله کمتر از گسل‌ها، بیشترین امتیاز را کسب کرده‌اند.

جاده

احداث جاده موجب تغییر شکل دامنه می‌شود. در اغلب موارد، ناپایداری از قسمت بالای جاده شروع و موجب مسدود شدن جاده می‌شود (Ayalew & Yamagishi, 2005). نقشه جاده‌های منطقه با استفاده از نقشه توپوگرافی و زمین‌شناسی تهیه شده است. جهت تحلیل و بررسی عوارض خطی مانند جاده‌ها، در نظر گرفتن بافرهای ۵۰ متری مناسب‌تر می‌باشد (Kamp et al., Van Westin et al., 2003). این امر بر مبنای این واقعیت است که احداث جاده موجب دستخوردگی دامنه‌های اطراف جاده می‌شود و بیشترین زمین لغزش‌ها در این دامنه‌ها به وقوع می‌پیوندد. با توجه به حریم جاده‌های جنگلی منطقه، بیشترین تراکم زمین لغزش‌های اطراف جاده‌ها در فاصله ۵۰ متری از محور جاده‌ها روی می‌دهد. بر این اساس، فاصله از جاده به ۵ گروه ۰ تا ۵۰ متر، ۵۰ تا ۱۰۰ متر، ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر، ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر و بیشتر از ۲۰۰ متر طبقه‌بندی شده، که با افزایش فاصله از محور جاده، امتیاز کمتری را کسب کرده‌اند. جدول ۱ امتیاز و درصد مساحت هر رده را نشان می‌دهد.

عامل ارتفاع

تأثیر عامل ارتفاع مانند دیگر عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش، توسط محققین مختلف یکسان در نظر گرفته نشده است، به عنوان مثال (Ayalew et al., 2004) نقش ارتفاع در وقوع زمین لغزش را برابر با شیب در نظر گرفته‌اند اما

واقعیت است که در نیمکره شمالی، دامنه‌های جنوبی مدت زمان بیشتری در معرض آفتاب هستند و نسبت به دامنه‌های شمالی پایدارترند. بنابراین دامنه‌های شمالی و غربی منطقه به دلیل رطوبت بیشتر، امتیاز بیشتری دریافت کرده‌اند. امتیاز و درصد مساحت هر رده در جدول ۱ ارائه شده است.

ویژگی از طریق تابش آفتاب، وزش باد و ریزش‌های جوی میسر می‌شود (Neaupane & Piantanakulchai, 2006). نقشه جهت شیب با استفاده مدل ارتفاعی رقومی منطقه، تهیه و به ۵ گروه مناطق هموار، دامنه‌های شمالی، جنوبی، شرقی و غربی تقسیم شده است. امتیازدهی به این عامل بر مبنای این

جدول ۱- طبقه‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه، درصد مساحت و امتیاز آن‌ها

امتیاز					عامل مؤثر
۱	۲	۳	۴	۵	
۱۰-۰	۲۰-۱۰	۳۰-۲۰	۴۰-۳۰	بیش از ۴۰	میزان شیب (درجه)
۴۳/۴۴	۲۶/۹۲	۱۹/۱۳	۸/۲۶	۲/۲۵	درصد مساحت
بیش از ۴۰۰	۴۰۰-۳۰۰	۳۰۰-۲۰۰	۲۰۰-۱۰۰	۱۰۰-۰	فاصله از گسل (متر)
۵۲/۹۸	۸/۱۰	۱۰/۲۰	۱۲/۵۲	۱۶/۲۰	درصد مساحت
بیش از ۲۰۰	۲۰۰-۱۵۰	۱۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۵۰	۵۰-۰	فاصله از جاده (متر)
۶۷/۳۳	۶/۵۸	۷/۶۴	۸/۷۱	۹/۷۴	درصد مساحت
۲۰۰-۰	۴۰۰-۲۰۰	۶۰۰-۴۰۰	۸۰۰-۶۰۰	بیش از ۸۰۰	ارتفاع (متر)
۲۷/۲۱	۱۹/۷۳	۱۵/۴۱	۱۲/۱۴	۲۵/۵۲	درصد مساحت
مناطق مسکونی	جنگل	کشاورزی دیم	کشاورزی آبی	اراضی بایر	کاربری اراضی
۶/۳۳	۵۸/۸۴	۴/۶۰	۳۲/۱۸	۲/۰۵	درصد مساحت
مناطق هموار	دامنه‌های جنوبی	دامنه‌های شرقی	دامنه‌های غربی	دامنه‌های شمالی	جهت شیب
۱۴/۰۳	۸/۵۰	۲۴/۶۳	۱۲/۴۱	۴۰/۴۳	درصد مساحت
خیلی کم (۰/۴-۰)	کم (۰/۸-۰/۴)	متوسط (۱/۲-۰/۸)	زیاد (۱/۶-۱/۲)	خیلی زیاد (بیشتر از ۱/۶)	تراکم آبراهه‌ها Km/Km^2
۴۳/۶۰	۲۷/۸۸	۱۶/۱۸	۷/۰۲	۵/۳۲	درصد مساحت
توف و سنگ- های آتش‌فشانی	سنگ‌آهک، دولومیت و دولومیت‌های آهکی	رسوبات دریاچه‌ای، آبرفتی، دریایی، مخروط‌افکنه	مارن و مارن‌سیلت‌دار	کنگلومر، شیل، ماسه‌سنگ، سیلت‌سنگ، رس‌سنگ	سنگ‌شناسی
۱۱/۲۳	۱۹/۲۶	۳۶/۴۲	۱۰/۵۶	۲۲/۵۳	درصد مساحت

بنابراین به دلیل تغییر کم بارش در منطقه، تأثیر عامل بارش به عنوان یکی از عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش یکسان است و در مدل وارد نمی‌شود. همچنین به دلیل تغییرات کم شتاب لرزه‌ای در منطقه، عامل زلزله نیز وارد مدل نمی‌شود.

طبق آمار سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک استان مازندران، میانگین سالانه بارش در سال ۱۳۸۷ در ایستگاه نوشهر (شرق منطقه) ۱۲۶۳ و در رامسر (غرب منطقه) ۱۳۳۰ میلی‌متر می‌باشد (پایگاه اینترنتی اداره کل هواشناسی استان مازندران).

تجزیه و تحلیل اطلاعات

در روش AHP پس از تعیین ساختار سلسله مراتبی با تهیه ماتریس مقایسه، عوامل مؤثر دو به دو مقایسه شده و بر حسب اهمیتی که نسبت به یکدیگر دارند، امتیازی بین $\frac{1}{9}$ تا ۹ کسب می‌کنند. برای این منظور ماتریس نسبت $8 * 8$ با استفاده از قضاوت مهندسی و تجربیات دیگر محققین که در

این زمینه از این روش استفاده کرده‌اند تهیه شده است (جدول ۲). سپس با استفاده از روشی که پیش‌تر برای محاسبه وزن‌های نسبی عوامل مختلف ذکر گردید، وزن‌های نسبی هر یک از عوامل به دست آمد که نتیجه آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- ماتریس نسبت جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش AHP

جهت شیب	کاربری زمین	جاده	ارتفاع	آبراهه	گسل	لیتولوژی	شیب
۷	۵	۶	۵	۴	۲	۱	۱
۷	۵	۶	۵	۴	۲	۱	۱
۶	۵	۵	۳	۱	۱	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
۴	۲	۲	۴	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
۲	۲	۳	۱	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$
۴	۱	۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$
۴	۱	۱	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$
۱	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{7}$

جدول ۳- وزن‌های محاسبه شده در روش AHP

پارامتر	عامل مؤثر	وزن نسبی
زمین شناسی	واحدهای سنگ‌شناسی	۰/۲۹
	گسل	۰/۱۵۹
ریخت شناسی	شیب	۰/۲۶۱
	ارتفاع	۰/۰۳۴
	جهت شیب	۰/۰۲۵
هیدرولوژی	آبراهه	۰/۰۹۱
راه‌های دسترسی	جاده	۰/۰۷
کاربری زمین	کاربری زمین	۰/۰۷

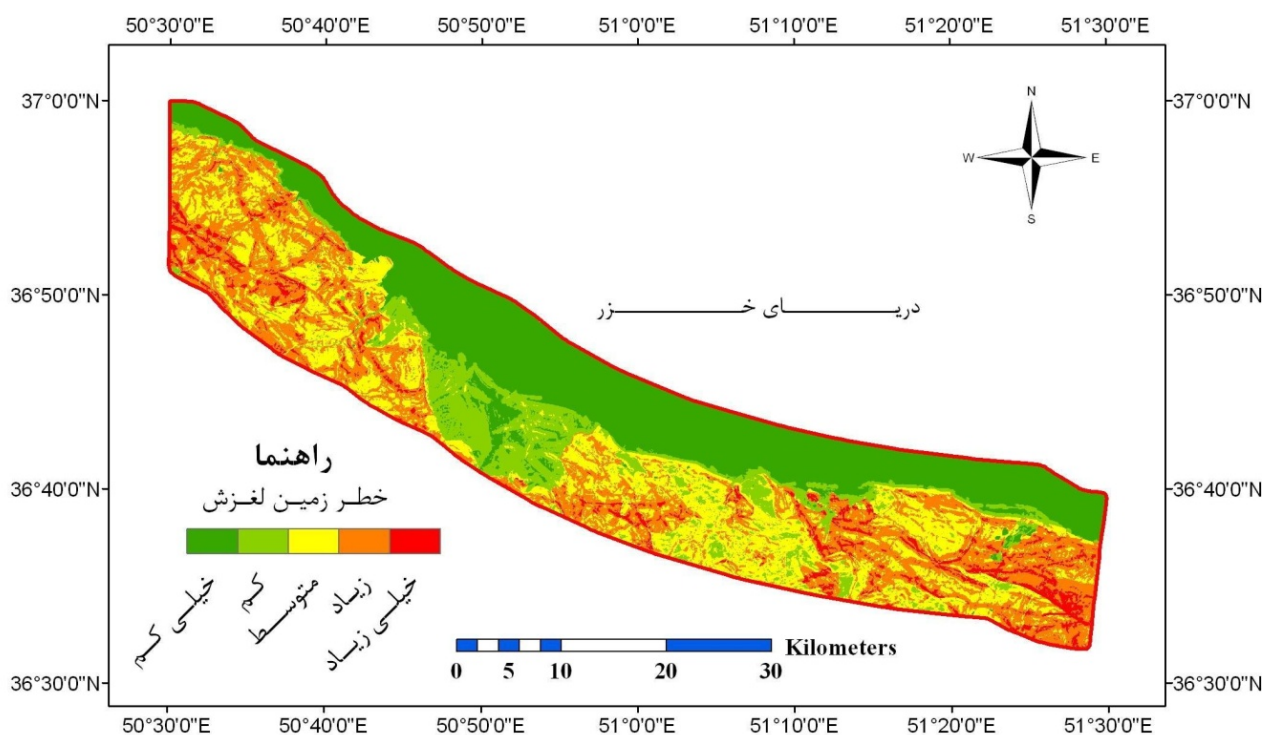
برای اطمینان از این موضوع که مقایسه‌های صورت گرفته بین عوامل مؤثر، سازگار هستند باید نسبت توافق ماتریس محاسبه شود. مقدار λ برای این ماتریس $8/47601$ و تعداد پارامترها ۸ می‌باشد. بنابراین شاخص توافق (CI) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{8.47601 - 8}{7} = 0.068001 \quad 3$$

با توجه به اینکه ۸ عامل در ماتریس نسبت در نظر گرفته شده، شاخص تصادفی RI برای این ماتریس $1/41$ می‌باشد (Malczewski, 1999). بنابراین مقدار نسبت توافق CR

نقشه، با توجه به روش های طبقه بندی که پیش تر ذکر گردید و بر اساس مجموع امتیازاتی که به دست آمده، با استفاده از روش فاصله برابر منطقه به ۵ رده مساوی طبقه بندی شده است شکل (۴).

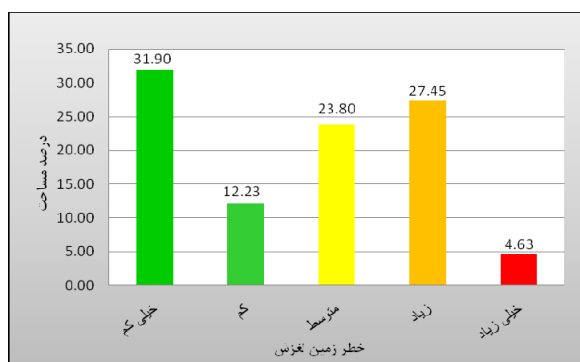
برای این ماتریس 0.048 به دست می آید که این مقدار از سطح قابل قبول که 0.1 می باشد، بسیار کمتر بوده و سازگاری این ماتریس را نشان می دهد. در نهایت وزن های به دست آمده بر روی عوامل مؤثر اعمال شده و نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش منطقه تهیه گردیده است. برای طبقه بندی این



شکل ۴- نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش AHP

ارزیابی نقشه خطر ناپایداری دامنه ای در منطقه مورد مطالعه جهت ارزیابی و اعتبارسنجی نقشه پهنه بندی تهیه شده، باید این نقشه با نقشه زمین لغزش های منطقه قطع داده شود (crossing). تراکم زمین لغزش، نسبت تعداد زمین لغزش در هر یک از رده های خطر تعیین شده، به مساحت هر رده خطر می باشد (Sarkar & Anbalagan, 2008; Wang, 2008). بنابراین با استفاده از لایه زمین لغزش (شکل ۲)، تراکم زمین لغزش در پهنه های تعیین شده به دست آمده است. همان طور که در شکل ۶ دیده می شود با افزایش خطر زمین لغزش تراکم زمین لغزش نیز زیاد می شود. همچنین بین رده های خطر تعیین شده، اختلاف تراکم قابل قبول و واضحی وجود دارد.

در شکل ۵ درصد مساحت رده های خطر زمین لغزش در منطقه آورده شده است.



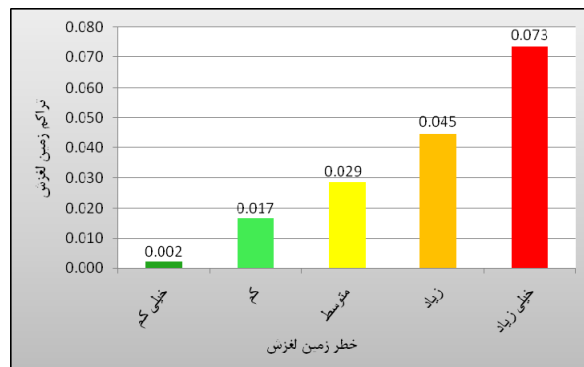
شکل ۵- درصد مساحت رده های خطر زمین لغزش در منطقه

مورد مطالعه با استفاده از روش AHP

نتیجه گیری

روش تحلیل سلسله مراتبی، به عنوان یکی از فرآیندهای تصمیم گیری چند متغیره، علاوه بر مزیت هایی مانند انعطاف پذیری، کاربرد وسیع و آسان، مقایسه عوامل به صورت دو به دو، قرارداد اجزای یک سیستم در سطوح مختلف و ... ضعف هایی نیز دارد، از جمله می توان به تعداد زیاد مقایسه ها در مسائل پیچیده و یا دخالت سلیقه شخصی در مقایسه عوامل اشاره کرد.

منطقه مورد مطالعه از نظر وقوع زمین لغزش استعداد بالایی دارد و بیش از ۳۰ درصد منطقه در رده خطر زیاد تا خیلی زیاد قرار دارد که با شواهد صحرایی منطقه مطابقت دارد. بر اساس نتایج روش AHP، لیتولوژی مهمترین عامل مؤثر در وقوع زمین لغزش است که ناشی از گسترش زیاد سازندهای سست و مستعد فرسایش از جمله سازند شمشک است. دومین و سومین عامل مؤثر شیب و گسل می باشد. ارزیابی و اعتبارسنجی نقشه خطر تهیه شده بر اساس تراکم زمین لغزش ها و درصد نقاط پایدار، نشان می دهد که با افزایش خطر زمین لغزش، تراکم زمین لغزش بیشتر و درصد نقاط پایدار کمتر می شود.



شکل ۶- تراکم زمین لغزش در پهنه های تعیین شده به وسیله

روش AHP

همچنین برای ارزیابی بیشتر، مختصات ۲۲ نقطه پایدار که طی بررسی های صحرایی ثبت و مطالعه گردیده با نقشه پهنه بندی تهیه شده، قطع داده شده است. نتایج نشان می دهد که حدوداً ۷۰ درصد نقاط (۱۵ نقطه) در پهنه های با خطر خیلی کم و کم قرار گرفته است (جدول ۴). این نتایج نیز دقت نقشه تهیه شده با استفاده از روش AHP را تایید می کند.

جدول ۴- درصد نقاط پایدار و تراکم زمین لغزش رده های

خطر تعیین شده با استفاده از روش AHP

تراکم زمین لغزش	درصد نقاط پایدار	نقاط پایدار	خطر زمین لغزش
۰/۰۰۲	۵۰	۱۱	خیلی کم
۰/۰۱۷	۱۸/۱۸	۴	کم
۰/۰۲۹	۹/۰۹	۲	متوسط
۰/۰۴۵	۱۳/۶۴	۳	زیاد
۰/۰۷۳	۹/۰۹	۲	خیلی زیاد

منابع

- آذر، عادل؛ رجب زاده، علی. ۱۳۸۷، تصمیم گیری کاربردی (رویکرد M.A.D.M). انتشارات نگاه دانش.
- احمدی، حسن؛ اسماعیلی، اباذر؛ فیض نیا، سادات؛ شریعت جعفری، محسن. ۱۳۸۲، "پهنه بندی خطر حرکت های توده ای با استفاده از دو روش رگرسیون چندمتغیره (MR) و تحلیل سلسله مراتبی سیستم ها (AHP)، مطالعه موردی حوزه آبخیز گرمی چای". مجله منابع طبیعی ایران. ۵۶ (۴)، ۳۲۳-۳۳۵.
- احمدی، حسن؛ محمدخان، شیرین؛ فیض نیا، سادات؛ قدوسی، جمال. ۱۳۸۴، "ساخت مدل منطقه ای خطر حرکت های توده ای با استفاده از ویژگی های کیفی و تحلیل سلسله مراتبی سیستم ها (AHP)، مطالعه موردی حوزه آبخیز طالقان". مجله منابع طبیعی ایران. ۵۸، ۳-۱۴.

- درویش زاده، علی. ۱۳۸۳، زمین شناسی ایران: چینه شناسی، تکتونیک، دگرگونی و ماگماتیسیم. انتشارات امیرکبیر.
- سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نقشه های زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ ورقه رامسر و چالوس.
- شریعت جعفری، محسن. ۱۳۷۵، زمین لغزش (مبانی و اصول پایداری شیب های طبیعی). انتشارات سازه.
- فیض نیا، سادات؛ کلارستاقی، عطالله؛ احمدی، حسن؛ صفایی، مهرداد. ۱۳۸۳، "بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش ها و پهنه بندی خطر زمین لغزش، (مطالعه موردی حوزه آبخیز شیرین رود- سد تنجن)". *مجله منابع طبیعی ایران*. ۵۷ (۱)، ۳-۲۲.
- کلارستاقی، عطالله. ۱۳۸۱، "بررسی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش ها و پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوزه آبخیز شیرین رود ساری". پایان نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- مهدویفر، محمدرضا. ۱۳۷۶، "پهنه بندی خطر زمین لغزش منطقه خورش رستم (جنوب غربی شهرستان خلخال)". پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Ugawa, N., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*. 1, 73-81.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*. 65, 15-31.
- Bai, S. B., Wang, J., Lu, G. N., Zhou, P. G., Hou, S. S., Xu, S. N., 2009. GIS - Based and Data-Driven Bivariate Landslide-Susceptibility Mapping in the Three Gorges Area, China. *Pedosphere*. 19 (1), 14-20.
- Chau, K. T., Sze, Y. L., Fung, M. K., Wong, W. Y., Fong, E. L., Chan, L. C. P., 2004. Landslide hazard analysis for HongKong using landslide inventory and GIS. *Computer and Geosciences*. 30, 429-443.
- Dai, F. C., Lee, C. F., 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*. 42, 213-228.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*. 31, 181-216.
- Kamp, U., Growley, B. J., Khattak, G. A., Owen, L. A., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region. *Geomorphology*. 101, 631-642.
- Komac, M., 2006. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in prialpine Slovenia. *Geomorphology*. 74, 17-28.
- Malczewski, J., 1999. GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley & Sons, New York. 408 pp.
- Nandi, A., Shakoor, A., 2009. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*. 110, 11-20.
- Neaupane, K. M., Piantanakulchai, M., 2006. Analytic network process model for landslide hazard zonation. *Engineering Geology*. 85, 281-294.
- Pachauri, A. K., Pant, M., 1992. Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering Geology*. 32, 81-100.
- Sarkar, S., Anbalagan, R., 2008. Landslide Hazard Zonation Mapping and Comparative Analysis of Hazard Zonation Maps. *Journal Mountain Science*. 5(3), 232-240.
- Van Westin, C. J., Rengers, N., Soeters, R., 2003. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assesment. *Natural Hazards*. 30, 399-419.
- Wang, R., 2008. An Expert Knowledge-Based Approach to Landslide Susceptibility Mapping Using GIS and Fuzzy Logic. Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison.
- Yalcin, A., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations, *Catena*. 72, 1-12.

- Yilmaz, I., 2009. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslide (Tokat-Turkey). *Computers & Geosciences*. 35 (6), 1125-1138.
- Yoshimatsu, H., Abe, S., 2006. A review of landslide hazards in Japan and assessment of their susceptibility using an analytical hierarchic process (AHP) method. *Landslide*. 3, 149-158.