

## پهنه‌بندی خطرات ژئوتکنیکی لرزه‌ای در نوار ساحلی دریای خزر

سولماز بابکان<sup>۱</sup>، مهدی زارع<sup>۲</sup> و حسین معاریان<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشیار زلزله‌شناسی مهندسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی معدن - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۶/۱۱/۲۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۳/۲۶، تاریخ تصویب ۸۷/۵/۱)

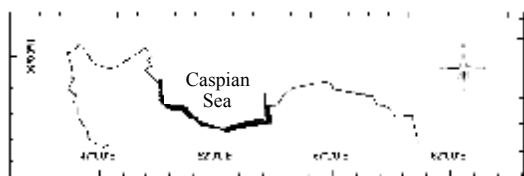
### چکیده

بلایای طبیعی از جمله مهم‌ترین عوامل مخربی هستند که تاکنون خسارات و تلفات بسیاری را در سراسر جهان به بار آورده‌اند. شناسایی مناطق که ظرفیت بلایی برای وقوع چنین پدیده‌هایی دارند، میزان آسیب‌پذیری احتمالی ناشی از آنها را تا حدود زیادی کاهش خواهد داد. بدین منظور، در این مطالعه، با بکارگیری سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، نقشه پهنه‌بندی خطرات ژئوتکنیکی لرزه‌ای شامل روانگرایی و زمین‌لغزش در مقیاس ۱:۵۰۰,۰۰۰ برای نوار ساحلی دریای مازندران تهیه شد. این نقشه، محدوده مطالعاتی را بر اساس میزان خطر نسبی روانگرایی (در ۵ رده خطر) و زمین‌لغزش (در ۳ رده خطر) به ۱۵ پهنه خطر تقسیم می‌کند. همچنین حذف عوامل که اثر منفی بر نقشه خطر زمین‌لغزش دارند، با به کارگیری بررسی‌های اثرپذیری و تعیین صحت نقشه خطر، منجر به افزایش میزان صحت نقشه خطر زمین‌لغزش تا ۹۳.۵٪ شد. طبق نقشه خطرات ژئوتکنیکی لرزه‌ای تهیه شده، حدود ۳۰٪ از سطح منطقه از خطر نسبی خیلی پایین لغزش و خطر نسبی بالای روانگرایی برخوردار هستند.

**واژه‌های کلیدی:** پهنه‌بندی، خطر، زمین‌لغزش، روانگرایی، ژئوتکنیکی لرزه‌ای، خزر، کرانه ساحلی، GIS

### مقدمه

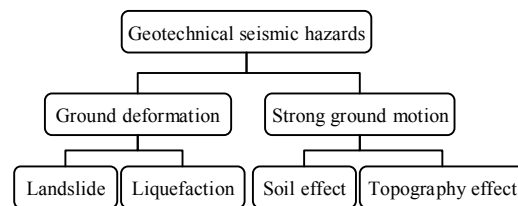
عامل اصلی، خرابی سازه‌هایی است که در مجاورت و یا روی شیب‌ها ساخته شده‌اند. بنابراین با توجه به اثرات مخرب این پدیده‌ها در مناطق مستعد حین زلزله‌ها، باید برای مقابله با آنها و کاهش خطرات ناشی از آن و نیز بهسازی سازه‌ها در برابر زلزله‌های آینده در مناطق مستعد اقدام کرد [۱-۳]. محدوده مطالعاتی، منطقه‌ای به وسعت  $9649.64 \text{ Km}^2$  از دشتهای ساحلی دریای مازندران را در برمی‌گیرد که حداکثر فاصله‌ای معادل ۲۰ کیلومتر از خط کرانه ساحلی داشته و از طرف دیگر به ارتفاع توپوگرافیک ۵۰۰ متر محدود می‌شود (شکل (۲)).



شکل ۲: نمایش محدوده مطالعاتی بر روی نقشه ایران.

سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۱</sup> (GIS) مجموعه‌ای است از امکانات و قابلیت‌های ویرایشی و به‌هنگام‌سازی سریع داده‌ها که روش‌های سنتی آن را ندارند و در زمینه پهنه‌بندی خطرات و پردازش اطلاعات خام دریافت شده از

به طور کلی خطرات ژئوتکنیکی لرزه‌ای به دو دسته اصلی تشدید جنبش شدید زمین و تغییر شکل زمین تقسیم می‌شوند که هر یک از این دو دسته نیز شامل دو زیر گروه است (شکل (۱)). در این مطالعه بر دسته دوم از خطرات ژئوتکنیکی لرزه‌ای یعنی تغییر شکل زمین پرداخته شده است.



شکل ۱: انواع خطرات ژئوتکنیکی لرزه‌ای و طبقه‌بندی آنها [۱].

روانگرایی یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مباحث مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای است که پس از اثرات ویرانگر آن طی زلزله‌های نیکاتای ژاپن و گودفرایدی آلاسکا در سال ۱۹۶۴ مورد توجه جدی قرار گرفت. از طرفی زمین‌لغزش نیز از جمله دیگر عوامل مسبب فجایع مصیبت‌بار در خلال زمین‌لرزه‌ها بوده است، ولی

- **متوسط بارندگی سالانه:** این نقشه به کمک آمار و اطلاعات ایستگاه‌های بارندگی استانی سایت سازمان هواشناسی کشور تهیه شده است.
- **انحنای زمین، شیب و جهت شیب دامنه‌ها:** این نقشه‌ها به کمک نقشه توپوگرافی رقومی استان‌های گیلان، مازندران، گلستان، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ ارائه شده توسط سازمان پایگاه ملی داده‌های علوم زمین تهیه شده است.
- **نقشه کاربری اراضی و نقشه پراکنش لغزش‌ها:** نقشه‌های ارائه شده توسط سازمان مراتع و جنگل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

### نقشه پهنه‌بندی خطر روانگرایی خطر روانگرایی

روانگرایی<sup>۲</sup> که اولین بار توسط مورگان و کوبو در سال ۱۹۵۳ عنوان شد، اغلب در ماسه‌های غیرمتراکم در اثر افزایش فشار آب منفذی حین بارگذاری لرزه‌ای و به دلیل تقلیل مقاومت برشی خاک ایجاد می‌شود. خاک‌هایی که مقاومت برشی خود را به طور کامل از دست می‌دهند، مانند یک مایع غلیظ عمل کرده، سازه‌های بنا شده روی آن به راحتی داخل زمین فرو می‌روند [۱-۳].

به طور کلی فرایند تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر روانگرایی، شامل آماده‌سازی و ترکیب مجموعه‌ای از نقشه‌ها یا لایه‌هایی است که مناطقی که خطر روانگرایی دارند را مشخص کند [۶]:

- نقشه‌های زمین‌شناسی برای تهیه نمایش دقیق از توزیع نهشته‌های کواترنری در ناحیه مورد مطالعه. نهشته‌های زمین‌شناسی مستعد روانگرایی عبارتند از: نهشته‌های رسوبی آبرفتی و رودخانه‌ای عهد حاضر و خاکریزهای مصنوعی<sup>۳</sup>.
- نقشه‌های عمق آب زیرزمینی؛
- معیاری از لرزه‌خیزی محدوده مطالعاتی (در این مطالعه نقشه بیشینه شتاب احتمالی زلزله PGA)؛
- ویژگی‌های ژئوتکنیکی نهشته‌ها برای ارزیابی ظرفیت روانگرایی (در صورت وجود چنین نهشته‌هایی)؛
- داده‌های جمع‌آوری شده برای این ارزیابی به صورت لایه‌هایی، وارد مجموعه‌ای از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی شده و از راه تلفیق این داده‌ها، نقشه‌های خطر روانگرایی استخراج می‌شوند.

منابع مختلف به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی، می‌تواند در تسریع کارها و افزایش دقت نقشه‌های تولید شده نقش بسزایی داشته باشد. یکی از نرم‌افزارهای متداول GIS، نرم‌افزار ArcGIS9.x است که در این مطالعه به طور گسترده مورد استفاده واقع شده است. به طور کلی تجزیه و تحلیل در محیط GIS، طی چهار مرحله اصلی صورت گرفته است [۴-۵]:

- تشکیل لایه‌های اطلاعاتی (نقشه‌های پارامتری) از روش رقوم‌کردن و ورود داده‌ها؛
- طبقه‌بندی و وزن‌دهی نقشه‌های پارامتری؛
- تهیه نقشه خطر از روش ادغام نقشه‌های پارامتری؛
- طبقه‌بندی نقشه خطر به پهنه‌های خطر.

### لایه‌های اطلاعاتی سامان‌یافته در GIS

- **نقشه زمین‌شناسی کواترنری:** این نقشه از روش رقوم‌کردن نقشه‌های ارائه شده در کتاب زمین‌شناسی کواترنر کرانه‌های دریای خزر (مقیاس ۱:۵۰۰۰۰۰) انتشارات سازمان زمین‌شناسی ایران، تهیه شده است.
- **عمق آب زیرزمینی:** این نقشه به کمک نقشه خطوط تراز سطح آب زیرزمینی شیت‌های اردبیل، بندر انزلی، قزوین-رشت ۱ و ۲، آمل، ساری، گرگان، گنبد کاووس، با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ ارائه شده توسط شرکت مشاوران جاماب در سال ۱۳۷۵ تهیه شده است.
- **فاصله از گسلها:** این نقشه به کمک نقشه رقومی گسل‌های شیت‌های اردبیل، بندر انزلی، قزوین-رشت ۱ و ۲، آمل، ساری، گرگان، گنبد کاووس، با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ ارائه شده توسط مرکز تحقیقات خزر تهیه شده است.
- **فاصله از رودخانه‌ها و جاده‌ها:** این نقشه‌ها بکمک نقشه رقومی رودخانه‌ها و جاده‌های استان‌های گیلان، مازندران، گلستان، با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ ارائه شده توسط سازمان پایگاه ملی داده‌های علوم زمین تهیه شده است.
- **بیشینه شتاب زلزله:** نقشه بیشینه شتاب زلزله (PGA) تهیه شده توسط م. زارع برای کل ایران (۲۰۰۷) مورد استفاده قرار گرفت.

### نرمال سازی مقادیر

بررسی آماری پارامترهای کمی مورد استفاده در تهیه نقشه خطر روانگرایی، نشان می‌دهد که مقادیر داده‌ها در نقشه‌های پارامتری مختلف، دامنه‌های ناهمسانی دارد (جدول ۱). بنابراین استفاده مستقیم از داده‌های خام، نتایج تحلیل‌ها را دچار اغتشاش خواهد کرد. طبیعی است وقتی مجموع مقادیر داده‌های مربوط به چندین پارامتر به عنوان معیاری برای تخمین پارامتری دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد، همسانی دامنه عددی این پارامترها، نقشی اساسی در درستی نتایج ایفا می‌کند. یکی از روش‌ها برای یکسان سازی دامنه مجموعه داده‌های مختلف، نرمال کردن مقادیر بین صفر و یک است. برای نرمال سازی مقادیر داده‌ها در هر نقشه پارامتر، مقادیر داده‌ها در هر پیکسل بر مقدار حداکثر مربوطه تقسیم می‌شود. بدین ترتیب نقشه جدیدی تهیه می‌شود که دارای دامنه عددی بین ۰ و ۱ دارد. در واقع مقادیر جدید به عنوان مقادیر وزنی برای پارامتر مربوطه در هر پیکسل استفاده خواهد شد.

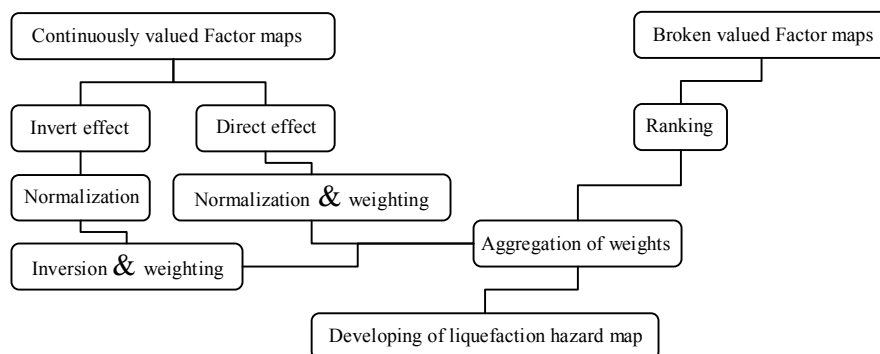
موارد ذکر شده در سطور بالا در شرایطی است که نقشه پارامتری فرمت رستری و در نتیجه مقادیر پیوسته کمی دارد. اما در صورتی که نقشه پارامتری مانند شتاب زلزله و زمین‌شناسی به فرمت برداری و دارای مقادیر گسسته باشد، امکان اجرای روند یاد شده وجود ندارد. زیرا در این نوع نقشه‌ها برای تعیین میزان احتمال وقوع روانگرایی با متغیرهای گسسته‌ای چون میزان شتاب زلزله و نوع واحدهای زمین‌شناسی سر و کار داریم. بنابراین ابتدا کلاس‌های مختلف پارامترها بر حسب نقش آنها در وقوع روانگرایی رتبه‌بندی گردیده، سپس روندی مشابه با داده‌های با فرمت رستری، دنبال شد.

در این مطالعه با توجه به مقیاس کاری و نبود امکان دسترسی به داده‌های ژئوتکنیکی و هرگونه اطلاعات عمقی دیگر، امکان استفاده از روش‌های دقیق پهنه‌بندی روانگرایی وجود ندارد، از این رو با استفاده از نقشه‌های پارامتری در دسترس و وزن‌دهی آنها در محیط *ArcGIS.9x* به روشی ابتکاری، نقشه پهنه‌بندی خطر روانگرایی ارائه شد. طبیعی است که در مناطقی که میزان خطر بالا تخمین زده شده است، انجام بررسی‌های دقیق‌تر برای تعیین ظرفیت روانگرایی ضروری است.

### وزن‌دهی نقشه‌های پارامتری

در این مطالعه با وزن‌دهی و ادغام مجموعه‌های از نقشه‌های پارامتری شامل زمین‌شناسی کواترنری، عمق آب زیرزمینی، شتاب زلزله و نیز عوامل فاصله از گسل‌ها و رودخانه‌ها، متوسط بارندگی سالانه و انحنای زمین با تأثیر هر چند موضعی بر عمق آب زیرزمینی، برای تعدیل قدمت نقشه‌های عمق آب زیرزمینی، اقدام به تهیه نقشه خطر روانگرایی برای کرانه ساحلی دریای خزر در محیط *ArcGIS.9x* و در مقیاس ۱:۵۰۰,۰۰۰ شد [۶-۷].

چنانچه گفته شد، جهت وزن‌دهی پارامترهای مؤثر، از روشی ابتکاری استفاده شد. بدین ترتیب که مقادیر داده‌ها در نقشه‌های پارامتری، در محدوده بین ۰ و ۱ نرمال شد. سپس مقادیر نرمال شده، به عنوان مقادیر وزنی در هر واحد کاری ( $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ ) در نظر گرفته و در نهایت از راه جمع مقادیر وزنی مربوط به عوامل مؤثر در هر واحد کاری، نقشه خطر روانگرایی تهیه شد. فرایند تهیه نقشه خطر روانگرایی، که در شکل (۳) ارائه شده است، به این شرح است:



شکل ۳: روش تهیه نقشه پهنه‌بندی روانگرایی.

جدول ۱: آماره‌های مقادیر وزنی در نقشه‌های پارامتری با مقادیر پیوسته.

statistics	Groundwater depth	Average annual precipitation	Distance from rivers	Distance from faults	Curvature
Maximum	0.107	426.31	0	0	-0.178
Minimum	672.19	2044.32	27955.14	42992.32	0.443
Average	101.63	1081.71	1681.40	8052.27	$-4.01 \cdot e^{-3}$
Standard deviation	151.67	354.92	2940.04	8405.99	0.010

برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر روانگرایی در جدول (۲) آورده شده است.

### ادغام نقشه‌های پارامتری

تنها کاری که پس از وزن‌دهی پارامترها باقی می‌ماند، ادغام نقشه‌های پارامتری برای تهیه نقشه خطر روانگرایی است. بدین ترتیب با جمع مقادیر وزنی نقشه‌های پارامتری طبق رابطه (۱) و به کمک محاسبه‌گر رستری<sup>۴</sup> نرم‌افزار، شاخص خطر روانگرایی در هر پیکسل به دست خواهد آمد:

$$LHI = \sum_{i=1}^n F_i \quad (1)$$

$LHI$ : شاخص خطر؛

$F_i$ : مقدار وزنی نقشه پارامتر در هر پیکسل؛

$n$ : تعداد نقشه‌های پارامتری؛

مقادیر شاخص خطر روانگرایی در نقشه پهنه‌بندی خطر، بر روش طبقه‌بندی مرزهای طبیعی (جنکس)<sup>۵</sup> در سه رده کم ( $LHI = ۲.۷-۴.۶$ )، متوسط ( $LHI = ۴.۶-۵.۲$ ) و بالا ( $LHI = ۵.۲-۶.۵$ ) طبقه‌بندی گردید. طبق نقشه تهیه شده نیمی از سطح منطقه، دارای خطر بالا و حدود ۱۵ درصد از آن دارای خطر کم در برابر روانگرایی می‌باشد.

شایان ذکر است برای رتبه‌بندی کلاس‌های پارامتری در نقشه زمین‌شناسی کواترنر از معیار ایواساکی و همکاران (۱۹۸۲) استفاده شد. برای رتبه‌بندی نقشه شتاب زلزله نیز، از مقادیر نسبی ۱ تا ۴ بر اساس افزایش در میزان شتاب زلزله استفاده شد.

### معکوس‌سازی مقادیر

عوامل مورد استفاده در این مطالعه برای پهنه‌بندی خطر روانگرایی، دارای اثرات متفاوتی بر احتمال وقوع روانگرایی دارند. بدین معنی که برخی از پارامترها شامل عمق آب زیرزمینی و فاصله از رودخانه‌ها و گسل‌ها اثر معکوس و برخی دیگر اثری مستقیم بر روی احتمال وقوع روانگرایی دارند.

منظور از اثر معکوس، کاهش احتمال وقوع روانگرایی با افزایش مقدار این پارامترها است که باید در نظر گرفته شود. بنابراین مرحله‌ای اضافی روی نقشه‌های پارامتری با اثر معکوس اجرا شد. بدین ترتیب که مقادیر داده‌ها در هر پیکسل، از مقدار واحد کسر شدند. اجرای چنین فرایندی رابطه معکوس پارامتر با میزان خطر روانگرایی را به رابطه مستقیم تبدیل می‌کند. مقادیر وزنی نقشه‌های پارامتری با مقادیر گسسته مورد استفاده

جدول ۲: مقادیر وزنی در نقشه‌های پارامتری با مقادیر گسسته جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر روانگرایی.

class	Factor	Coverage %	rank	weight
Lithology	Young organic detrital deposits, land silty deposits (silty clays) [A] \ river deposits (silt & clay) [B] \ rounded young river deposits (gravel & sand) [C] \ detrital-river deposits [F] \ wind-river deposits (silt & silty sand) [G] \ shore deposits [J] \ marsh [K]	30.31	3	1
	stream sediments deposited in fans [E]	6.76	2	0.67
	Fossil Terraces (silt, clay, sand) [D] \ young salt lands [H] \ prequaternary mountains [I]	62.93	1	0.33
PGA	>0.65	1.81	4	1
	0.5-0.65	20.39	3	0.75
	0.35-0.50	65.32	2	0.5
	<0.35	12.49	1	0.25

در بعد کمی متناسب باشد [۲]. در این مطالعه از روش احتمالی نسبت فراوانی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده گردید که چگونگی آن در زیر ارائه می‌شود.

### وزن دهی نقشه‌های پارامتری

برای پیش‌بینی وقوع لغزش‌ها فرض دو اصل ضروری است: اول آنکه وقوع لغزش‌ها به وسیله عوامل مؤثر در وقوع لغزش، قابل پیش‌بینی هستند و دوم آنکه لغزش‌ها در آینده نیز در شرایطی مشابه با شرایط لغزش‌های گذشته اتفاق خواهند افتاد. بر این اساس رابطه بین مناطق لغزشی گذشته و عوامل، مرتبط با لغزش از رابطه بین مناطق بدون لغزش و این عوامل قابل تمایز خواهد بود. برای ارائه کمی این تمایز می‌توان از روش احتمالی نسبت فراوانی استفاده کرد. طبق تعریف، نسبت فراوانی برای هر یک از کلاس‌ها در هر یک از نقشه‌های پارامتری برابر است با نسبت درصد لغزش‌ها در هر کلاس به درصد مساحت دربرگیرنده آن کلاس [۸-۹] (رابطه ۲).

$$Fr_i = \frac{NPix(S_i) / \sum_{i=1}^n NPix(S_i)}{NPix(N_i) / \sum_{i=1}^n NPix(N_i)} \quad (2)$$

$Fr_i$ : مقدار وزنی نسبت فراوانی برای کلاس  $i$  ام

$NPix(S_i)$ : تعداد پیکسل‌های حاوی لغزش در کلاس  $i$  ام

$NPix(N_i)$ : تعداد پیکسل‌های حاوی ویژگی کلاس  $i$  در

کل محدوده مطالعاتی

$n$ : تعداد کلاس‌ها در نقشه پارامتری

بدیهی است که هر چه نسبت  $Fr_i$  بزرگ‌تر از واحد باشد، رابطه بین وقوع لغزش و آن کلاس از نقشه پارامتری قوی‌تر و بر عکس کوچک‌تر از واحد بودن این نسبت دلالت بر رابطه ضعیف‌تر بین وقوع لغزش و کلاس مربوطه خواهد داشت. به عبارت دیگر همبستگی بین این کلاس و وقوع لغزش زیاد است [۸-۹].

روند اجرایی تعیین مقادیر وزنی در نقشه‌های پارامتری در فلوچارت شکل (۴) نشان داده شده است. تعیین مقادیر وزنی کلاس‌ها در نقشه‌های پارامتری در سه مرحله اجرا شد:

### طبقه‌بندی نقشه پارامتری

ابتدا نقشه‌های پارامتری با فرمت رستری (نقشه‌های شیب، جهت شیب دامنه، انحنای زمین، عمق آب زیرزمینی، فاصله از عوارض خطی شامل رودخانه، جاده و گسل،

مناطق نزدیک نوار ساحلی، احتمال وقوع روانگرایی بالاتری دارد. پس به طور طبیعی این مناطق به علت ماهیت رسوبات سازنده و برقراری شرط اساسی اشباع بودن رسوبات، بیشتر در معرض خطر روانگرایی قرار دارند. حال آنکه با دور شدن از نوار ساحلی، به ویژه به دلیل کاهش درجه اشباع رسوبات، احتمال وقوع روانگرایی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر طبق گزارش‌های موجود، واقع شدن محدوده روان شده طی زلزله ۳۱ خرداد منجیل در منطقه با خطر بالا در این نقشه، گواهی دیگر بر عملکرد خوب نقشه تهیه شده است (شکل ۶).

### نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

#### خطر لغزش

می‌دانیم که نیروی ثقل زمین همواره سبب اعمال یک نیروی رو به پایین به مواد می‌شود. در اثر اعمال این نیرو که نتیجه تجزیه نیروی وزن روی دامنه می‌باشد، مواد ناپایدار موجود در دامنه‌ها، برای رسیدن به پایداری، روی دامنه شروع به حرکت کرده و انواع حرکات دامنه‌ای را به وجود می‌آورند. ناپایداری شیب به طور اساسی به دو عامل نیروی رانش خارجی و مقاومت مواد در مقابل حرکت وابسته است. از جمله نیروهای رانش خارجی، نیروهای ثقل و لرزه‌ای است، در حالی که مقاومت مواد اغلب به وسیله شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی کنترل می‌شود [۷].

به طور کلی روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به دو دسته روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. در روش‌های مستقیم، زمین‌شناس بر اساس تجربه و دانش شخصی خود و همچنین بر اساس شرایط منطقه، به طور مستقیم درجه حساسیت واحدهای مختلف را تعیین می‌کند. حال آنکه در روش‌های غیرمستقیم مدل‌های آماری، احتمالی و امثال آنها برای پیش‌بینی مناطق مستعد استفاده می‌شود. در این روش‌ها، بر اساس اطلاعات به دست آمده از روابط داخلی بین عوامل شرایطی زمین‌لغزش و پراکنش زمین‌لغزش‌ها، احتمال وقوع لغزش در منطقه تعیین می‌شود [۷]. در مورد اخیر روشی که در عمل جهت پهنه‌بندی ناپایداری شیب‌ها انتخاب می‌شود، بایستی با اطلاعات صحرائی قابل دسترس، چه در بعد کیفی و چه

به عنوان لغزش، استفاده شده است. همچنین طبق گزارش سازمان مراتع و جنگل‌ها، گروه مطالعات و ارزیابی آبخیزها، در مجموع ۵۵ زمین لغزش در محدوده مطالعاتی قرار می‌گیرد که از آنها به عنوان شاهد در محاسبات استفاده شد. مقادیر وزنی محاسبه شده در هر کدام از نقشه‌های پارامتری در جدول (۳) ارائه شده است.

### ادغام نقشه‌های پارامتری

مرحله بعدی بررسی‌ها، همپوشانی<sup>۷</sup> نقشه‌های عامل برای تهیه نقشه خطر زمین لغزش بوده است. برای این منظور نقشه‌های پارامتر تهیه شده توسط ArcGIS 9x که دارای ستون مربوط به مقادیر وزنی نسبت فراوانی در جداول توصیفی هستند، با هم قطع داده شدند. در نتیجه پهنه‌هایی که طی فرایند تقاطع ایجاد می‌شوند، مقادیر وزنی منحصر به فردی از مجموعه ۱۱ پارامتر خواهند داشت. در نهایت با جمع مقادیر وزنی کلاس‌های پارامترهای مختلف (رابطه ۲)، میزان شاخص خطر لغزش در نقشه نهایی به دست خواهد آمد [۸-۹].

مقادیر *LHI* محاسبه شده در پنج نقشه پهنه‌بندی خطر لغزش به روش طبقه‌بندی جنکس در رده خطر بسیار کم ( $LHI = 0.3 - 3.6$ )، کم ( $LHI = 3.6 - 6.9$ )، متوسط ( $LHI = 6.9 - 10.2$ )، زیاد ( $LHI = 10.2 - 13.4$ )، بسیار زیاد ( $LHI = 13.4 - 16.7$ ) تقسیم شد. نتایج نشان می‌دهد که اکثریت سطح منطقه (۶۰٪) دارای میزان خطر بسیار کم در برابر لغزش هستند و تنها بخش کوچکی از سطح آن را (حدود ۶٪)، خطر بسیار زیاد تهدید می‌کند. این در حالی است که محدوده با خطر بالا و بسیار بالا حدود ۹۰٪ از کل لغزش‌های رخ داده (لغزش‌های شاهد) در منطقه را در بر می‌گیرد. که خود گواهی بر عملکرد خوب این روش می‌باشد.

### بررسی اثرپذیری و تخمین صحت نقشه خطر

برای تعیین اثر هر یک از عوامل مؤثر در وقوع لغزش، از بررسی‌های اثرپذیری<sup>۸</sup> استفاده می‌شود. این نوع بررسی‌ها، چگونگی تأثیرپذیری نتایج را در صورت تغییر لایه‌های اطلاعاتی ورودی نشان می‌دهد. اگر پارامتر انتخاب شده، تغییراتی به نسبت بزرگ را در نتایج به بار آورد، دلالت بر تأثیر شدید آن پارامتر بر نتایج خواهد داشت و از این راه عواملی که بیشترین تأثیر در نقشه خطر لغزش را دارند

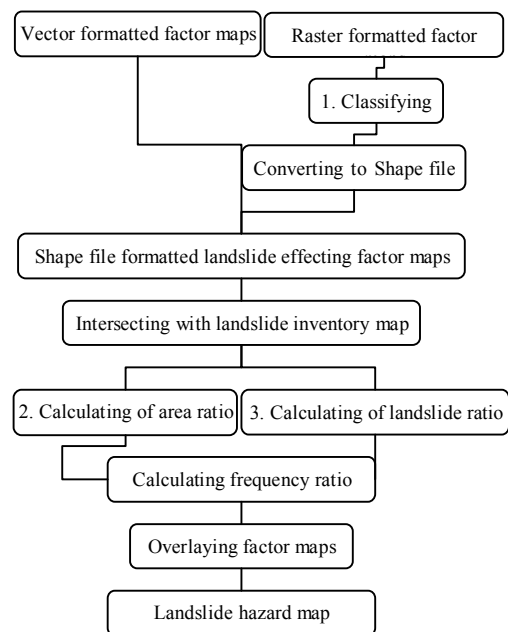
بارندگی متوسط سالانه) باید طبقه‌بندی شوند. در واقع این طبقه‌بندی باید به نحوی انجام شود که اجرای مرحله سوم کلاس غیرمفید تولید نکند. نقشه‌های با فرمت برداری، از این مرحله مستثنی هستند. برای طبقه‌بندی نقشه‌های پارامتری از روش جنکس استفاده شد.

### تعیین نسبت مساحت

مساحت کلاس‌های نقشه پارامتری و نسبت مساحت آنها به مساحت کل محدوده مطالعاتی محاسبه می‌شود.

### تعیین نسبت لغزش

برای این منظور نقشه پارامتر مورد نظر با نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها قطع داده شده و نسبت لغزش‌ها در هر کلاس نسبت به کل تعداد لغزش‌ها در محدوده مطالعاتی محاسبه می‌شود.



شکل ۴: مراحل طراحی شده برای تعیین مقادیر وزنی نسبت فراوانی برای نقشه‌های پارامتری مختلف.

در این مطالعه برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر لغزش از ۹ عامل شامل شیب زمین، جهت شیب دامنه، زمین‌شناسی کواترنر، فاصله از عوارض خطی (گسل، جاده و رودخانه)، تراز آب زیرزمینی، انحنای زمین و کاربری اراضی به عنوان عوامل مستعدکننده وقوع لغزش و دو عامل بیشینه شتاب زلزله و متوسط بارندگی سالانه

جدول ۳: مقادیر وزنی در نقشه‌های پارامتری جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش.

Factor	class	Fr	Factor	class	Fr
Aspect (°)	337.5-22.5	1.20	curvature	<0	0.97
	22.5-67.5	1.62		>0	1.04
	67.5-112.5	0.92	Land use type	Agriculture	0.3
	112.5-157.5	0.00		Airport	0.00
	157.5-202.5	0.00		Garden	0.00
	202.5-247.5	0.00		Dense forest	4.86
	247.5-292.5	0.42		Fishery pool	0.00
292.5-337.5	0.34	Good range		0.00	
slope(°)	0-2	0.30		Low forest	0.00
	2-6	3.85		Floodway	0.00
	6-12	3.05		Agriculture-Garden	0.25
	>12	0.00		Agriculture-Follow	0.00
Distance from roads (m)	0-1688.73	0.42		Agriculture-Urban	0.00
	1688.73-5213.03	1.99		Dense forest- Agriculture	0.00
	5213.03-18796.28	0.83		Dry farming-Follow	0.00
Distance from rivers (m)	<400	1.48		Good range-Dry farming	0.00
	400-800	0.93		Low forest- Agriculture	0.00
	800-1200	0.54		Moderate forest-Agriculture	0.00
	>1200	0.82		Poor range- Agriculture	0.00
Lithology	A	0.00	Poor range-Bare land	0.00	
	B	0.00	Poor range-Follow	0.00	
	C	0.00	Poor range-Salt land	0.00	
	D	0.00	Urban-Moderate forest- Agriculture	0.00	
	E	0.00	Urban-Shoreline	0.00	
	F	3.05	Woodland-Agriculture	0.00	
	G	0.00	Moderate forest	0.00	
	H	0.00	Moderate range	0.00	
	I	4.90	Poor range	0.00	
	J	0.00	Shoreline	0.00	
	K	0.00	Urban	0.00	
PGA	>0.65	0.00	Water	0.00	
	0.5-0.65	0.09	Wetland	0.00	
	0.35-0.50	1.50	Precipitation (mm)	426.25-698.03	1.46
<0.35	0.00	698.03-1096.23		0.08	
<100	0.07	1096.23-1507.07		1.61	
Groundwater depth (m)	100-200	3.48	1507.07-2044.32	0.00	
	200-300	3.09	Distance from faults (m)	0-2197.74	1.68
	300-400	8.05		2197.74-5240.77	1.46
	400-500	3.60		5240.77-13355.52	0.52
	500-600	0.00		13355.52-43278.63	0.00
	>600	0.00			

برای ترسیم منحنی‌های نرخ موفقیت، مقادیر *LHI* محاسبه شده، به صورت نزولی مرتب شده و به صد کلاس با فواصل ۱٪ تقسیم شدند. برای این کار مقادیر بین ۰-۱۰۰ نرمالایز شدند. سپس درصد تجمعی لغزش‌هایی که در هر یک از کلاس‌ها اتفاق افتاده بود، تعیین شد. چنین فرایندی مشخص خواهد کرد که به عنوان مثال ۱۰٪ فوقانی مقادیر مرتب شده به صورت نزولی *LHI*، چند درصد از کل لغزش‌ها در منطقه را توجیه می‌کند. به عنوان مثال در

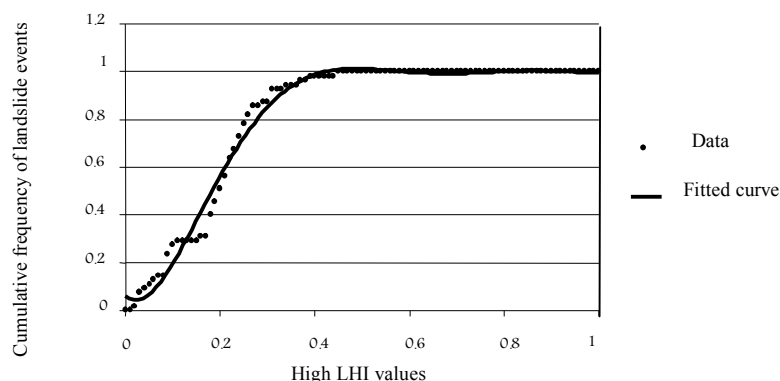
قابل شناسایی می‌کند. یکی از روش‌های بررسی اثرپذیری عوامل مؤثر، که در این مطالعه نیز استفاده شد، به کارگیری «منحنی‌های نرخ موفقیت»<sup>۹</sup> برای محاسبه میزان صحت نقشه خطر لغزش، پس از حذف یکایک پارامترهای مؤثر در وقوع لغزش در فرایند محاسبه شاخص خطر لغزش (رابطه ۲) است. در نهایت با انتخاب مؤثر عوامل مرتبط، کیفیت نقشه خطر لغزش را می‌توان بهبود بخشید [۱۰-۱۲].

در تهیه نقشه خطر، باعث افزایش صحت نقشه می‌شود. در مقابل، افزایش اندک مساحت زیرمنحنی‌های نرخ موفقیت پس از حذف بقیه عوامل نسبت به زمانی که تمامی عوامل در محاسبه *LHI* استفاده شده باشند، دلالت بر اندک اثر منفی این عوامل بر نقشه خطر لغزش دارد. مگر عامل عمق آب زیرزمینی که پس از حذف آن صحت نقشه نهایی تا حد زیادی (۸۶.۶۷٪) افزایش می‌یابد.

از این روش عواملی که اثر منفی بر روی نقشه خطر دارند، قابل شناسایی هستند. شناسایی این عوامل به افزایش صحت نقشه تهیه شده کمک شایانی خواهد کرد. بدین ترتیب با حذف عواملی که اثر منفی دارند، از فرایند محاسبه شاخص خطر، نقشه جدیدی تهیه شد. این موضوع به افزایش صحت نقشه به میزان ۹۳.۵۰٪ انجامید. طبق نتایج به دست آمده تنها حدود ۱۷٪ از سطح منطقه دارای خطر خیلی بالا در برابر خطر زمین لغزش و حدود نیمی از سطح منطقه دارای خطر نسبی خیلی کم در برابر زمین لغزش هستند. در واقع مناطق دور از نوار ساحلی که از سنگ‌های قبل از کواترن پوشیده شده‌اند، بیشترین احتمال را برای وقوع لغزش هستند. در مقابل، رسوبات عهد حاضر با شیب توپوگرافی کم، که اکثریت سطح منطقه را تشکیل می‌دهند، دارای میزان خطر کم تا بسیار کم در برابر وقوع این پدیده هستند. از طرفی واقع شدن ۹۸٪ وقایع لغزش ثبت شده در محدوده مطالعاتی، در مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد، تصدیقی دیگر بر عملکرد خوب نقشه ارائه شده است.

موردی که پارامتر شیب زمین، از محاسبات حذف شود، مناطقی که دارای ۲۰٪ فوقانی مقادیر *LHI* هستند، قادر به توجیه ۶۰٪ از کل لغزشها در محدوده مطالعاتی خواهند بود. برای نمونه، نتایج برای حالتی که پارامتر شیب از محاسبات حذف شده باشند، به صورت نموداری در شکل (۵) نشان داده شده است. برای تهیه منحنی‌های نرخ موفقیت، درصد تجمعی لغزش‌ها، در برابر درصدهای متفاوتی از مقادیر فوقانی *LHI*، ترسیم شد. برای مقایسه نتیجه حذف هر یک از پارامترها در تهیه نقشه خطر، از سطح زیر منحنی‌ها استفاده می‌شود و در واقع سطح زیر منحنی‌ها میزان صحت نقشه را به طور کمی نشان می‌دهد. بنابراین مساحت واحد برای منحنی‌ها نشان دهنده صحت کامل نقشه‌ها است [۸-۹].

خلاصه‌ای از نتایج انجام بررسی‌های صحت نقشه و مساحت مربوط به هر یک از حالات حذف پارامترها، در جدول (۴) نشان داده شده است. همان طور که از جدول (۴) نیز مشاهده می‌شود، عوامل انحنای زمین، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، بیشینه شتاب زلزله و بارندگی سالانه، اثر مثبت بر روی نقشه خطر لغزش دارند. زیرا پس از حذف این عوامل، سطح زیر منحنی‌های موفقیت و در نتیجه صحت نقشه نهایی نسبت به زمانی که تمامی عوامل در نظر گرفته می‌شود، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر دخالت دادن این عوامل



شکل ۵: منحنی‌های نرخ موفقیت پس از حذف عامل شیب.



جدول ۵: درصد پوشش پهنه‌های خطر در نقشه پهنه‌بندی خطرات ژئوتکنیکی.

Explanation	Relative hazards	Coverage %
SH.: landslide hazard	VL.SH. & L.LH.	3.94
	VL.SH. & M.LH.	15.09
	VL.SH. & H.LH.	29.98
LH.: liquefaction hazard	L.SH. & L.LH.	1.28
	L.SH. & M.LH.	10.24
	L.SH. & H.LH.	16.55
VL.:very low	M.SH. & L.LH.	0.01
	M.SH. & M.LH.	1.07
	M.SH. & H.LH.	2.02
L.: low	H.SH. & L.LH.	0.65
	H.SH. & M.LH.	1.88
M.: moderate	H.SH. & H.LH.	0.80
	VH.SH. & L.LH.	8.89
H. : high	VH.SH. & M.LH.	7.07
	VH.SH. & H.LH.	0.54

جدول ۴: مساحت زیر منحنی های نرخ موفقیت.

Landslide susceptibility map	Ratio of the Below curve area	Accuracy of calculations
Total used	0.8068	0.9886
Except slope	0.8103	0.9949
Except aspect	0.8075	0.9962
Except curvature	0.7997	0.993
Except lithology	0.7560	0.9952
Except Distance from rivers	0.8073	0.9951
Except Distance from roads	0.8072	0.9929
Except Distance from faults	0.8094	0.9938
Except Groundwater	0.8667	0.9935
Except Land use type	0.7852	0.9966
Except PGA	0.7955	0.9967
Except Precipitation	0.8012	0.9953

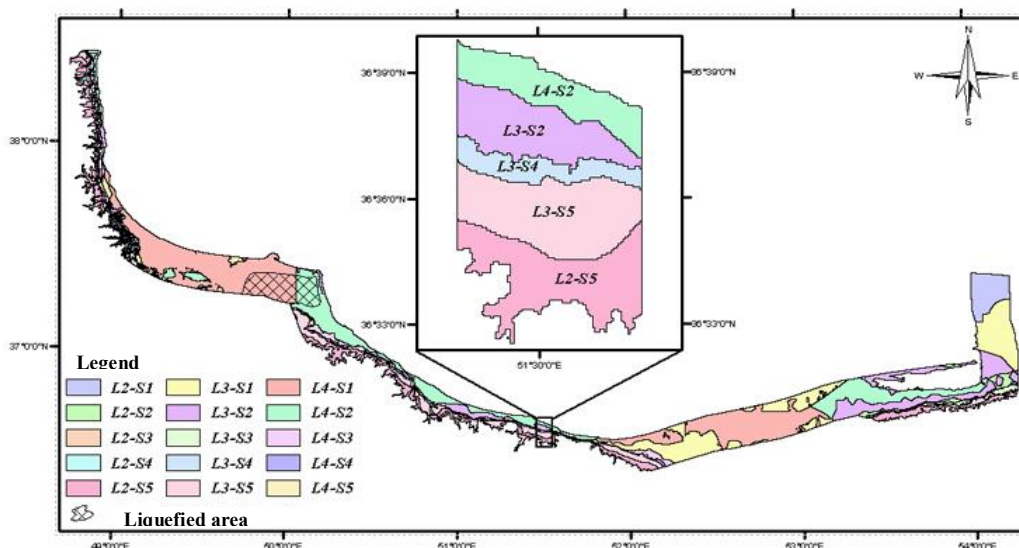
### نقشه پهنه‌بندی خطرات ژئوتکنیکی لرزه‌ای

در پایان، با ترکیب دو نقشه نهایی تهیه شده برای خطر زمین‌لغزش و روانگرایی نقشه پهنه‌بندی خطرات ژئوتکنیکی لرزه‌ای برای نوار ساحلی دریای مازندران در مقیاس ۱:۵۰۰,۰۰۰ تهیه شد. این نقشه میزان نسبی خطر وقوع دو پدیده زمین‌لغزش و روانگرایی را برای نوار ساحلی دریای خزر ارائه می‌دهد. برای تهیه این نقشه، دو نقشه نهایی تهیه شده برای لغزش و روانگرایی با هم قطع داده شدند. بدین ترتیب در نقشه خروجی مجموع ۱۵ پهنه تشکیل می‌شود که هر یک از آنها میزان خطر نسبی متفاوتی از خطرات زمین لغزش و روانگرایی دارند. این نقشه در شکل (۶) ارائه شده است. درصد پوشش هر یک از کلاس‌های مختلف در نقشه خطرات ژئوتکنیکی در جدول (۵) ارائه شده است. چنانچه از این جدول بر می‌آید، پهنه مربوط به خطر روانگرایی بالا، خطر لغزش خیلی کم، بیشترین درصد پوشش (حدود ۳۰٪) از سطح منطقه را نسبت به بقیه پهنه‌ها به خود اختصاص می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از یک سری عوامل مؤثر نقشه‌های پهنه‌بندی خطر روانگرایی در سه رده خطر و زمین‌لغزش در پنج رده خطر تهیه شد. سپس با ترکیب دو نقشه خطر تهیه شده، نقشه خطرات ژئوتکنیکی لرزه‌ای در ۱۵ رده خطر برای نوار ساحلی دریای مازندران و برای منطقه‌ای با وسعت تقریبی  $9649.64 \text{ Km}^2$  در مقیاس ۱:۵۰۰,۰۰۰ تهیه شد.

طبق نتایج به دست آمده، حدود ۵۰٪ از سطح منطقه را خطر روانگرایی تهدید می‌کند. همچنین طبق بررسی‌های اثرپذیری، صحت نقشه نهایی خطر لغزش، معادل ۹۳.۵۰٪ برآورد شد که نشان می‌دهد تنها ۱۷٪ از سطح منطقه دارای خطر نسبی خیلی بالایی در برابر زمین‌لغزش دارند. در عین حال نقشه نهایی خطرات ژئوتکنیکی لرزه‌ای نشان می‌دهد که پهنه مربوط به خطر روانگرایی بالا و خطر لغزش خیلی کم بیشترین سطح منطقه (حدود ۳۰٪) را می‌پوشاند. طبیعی است که بسته به نوع عملیات مورد نظر، در مناطقی که میزان خطر، بالا تخمین زده شده است، انجام بررسی‌های دقیق‌تر قبل از انجام هرگونه ساخت و ساز ضروری است.



شکل ۶: نقشه پهنه‌بندی خطرات ژئوتکنیکی لرزه‌ای در نوار ساحلی دریای مازندران.  
 L=خطر روانگرایی، S=خطر زمین لغزش، ۱=خیلی کم، ۲=کم، ۳=متوسط، ۴=بالا، ۵=خیلی بالا.

### مراجع

- 1 - Memarian, H. (1998). *Engineering Geology and geotechnics*. (2.ed.), Tehran University Press, Tehran, PP. 954.
- 2 - Mir Mohammad Hoseini, M., Arefpour, B. and Gasemi, A. (1998). "Guidelines for seismic geotechnical hazard zonation." *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology Press*.
- 3 - Mir Mohammad Hoseini, M. (1993). "Soils dynamic." *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology Press*, Iran.
- 4 - Shariat Jaafari, M. (1996). "Landslide (concepts of natural slope stabilities)." *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute Press*, Iran.
- 5 - Titidez, O. (2005). *Getting to know ArcGIS9.x desktop and basic concepts of GIS*. (2.ed.), Shomal University Press, PP. 600.
- 6 - *Seismic hazard zone report for the Oakland east 7.5 minute quadrangle*, Alameda County, (2003), California, department of conservation, California Geological Survey. Report No. 080.
- 7 - Westen, V, Rengers, C. J. and Soeters, N. R. (2003). "Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment." *Natural Hazards*, Vol. 30, No.3, PP. 399-419.
- 8 - Lee, S. and Talib, J. A. (2005). "Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis." *Environmental Geology*, Vol. 47, PP. 982-900.
- 9 - Lee, S. and Pradhan, B. (2006). "Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island." *Malaysia, J. Earth Syst. Sci.*, Vol. 115, No. 6, PP. 661-672.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- |                                     |                       |
|-------------------------------------|-----------------------|
| 1 - Geographical Information System | 2 - Liquefaction      |
| 3 - Artificial Fills                | 4 - Raster Calculator |
| 5 - Natural Break (Jenks)           | 6 - Intersect         |
| 7 - Overlay                         | 8 - Effect Analyses   |
| 9 - Success Rate Curves             |                       |