

پهنه‌بندی و برآورد میزان حرکات دامنه‌ای و مخاطرات آن در شهرستان هشتروند با استفاده از تداخل‌سنجی راداری و مدل MABAC

صیاد اصغری سراسکانرود*

استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

مریم محمدزاده شیشه‌گران

دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

صالح اصغری سراسکانرود

دانش‌آموخته دکتری برنامه‌ریزی روستایی، دانشگاه فرهنگیان تبریز، تبریز، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۵/۱ - تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۶/۲۵)

چکیده

زمین‌لغزش یکی از انواع ناپایداری دامنه‌ای است که هر ساله خسارات مالی و جانی فراوانی بر جای می‌گذارد. در پژوهش حاضر، کارایی مدل MABAC و تداخل‌سنجی رادار در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در شهر هشتروند ارزیابی شد. فرایند کار تلفیقی از روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است. به این منظور ابتدا نقشه زمین‌لغزش‌های منطقه با بازدیدهای میدانی تهیه شد. سپس با مرور و بررسی منابع، عوامل احتمالی مؤثر در فرایند بروز زمین‌لغزش استخراج و بررسی شدند. نقشه حاصل در پنج کلاس خطر، طبقه‌بندی شده و با توجه به زمین‌لغزش‌های رخ داده در محدوده پژوهش ارزیابی شد. با توجه به نتیجه ارزیابی، مدل‌های به کاررفته، قابلیت مناسبی برای پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش نشان می‌دهند. بررسی و تحلیل نتایج نشان داد که مقدار بارش و ارتفاع ماهواره‌ای راداری نیز از نرم‌افزار SARSCAPE استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داده است که تصاویر راداری از پتانسیل خوبی برای آشکارسازی ناپایداری دامنه‌ها و محاسبه جابه‌جایی آن‌ها برخوردار است. در دامنه زمانی پژوهش بیشترین میزان حرکات مواد دامنه‌ای ۲۳ سانتی‌متر است که نشان‌دهنده فعال بودن منطقه از لحاظ حرکات دامنه‌ای است.

واژه‌های کلیدی: تداخل‌سنجی رادار، زمین‌لغزش، شهر هشتروند، مخاطرات طبیعی، مدل MABAC.

مقدمه

زمین لغزش اصطلاحی است که انواع حرکات دامنه‌ای را در بر می‌گیرد و سبب جابه‌جایی توده‌ای از مواد در دامنه‌ها می‌شود این اصطلاح همه فرآیندهایی که منجر به حرکت توده‌ای مواد بر روی دامنه‌ها می‌شود را در بر گرفته و برحسب نوع حرکت به حرکات لغزشی، جریانی، ریزشی و خزشی طبقه‌بندی می‌شود [۶]. ناپایداری دامنه‌های طبیعی یکی از پدیده‌های ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی است که در تغییر شکل سطح زمین نقش مؤثری دارد [۹]. شناخت نواحی دارای پتانسیل لغزش و پهنه‌بندی آنها یکی از گام‌های اساسی در مدیریت مخاطرات محیطی و کاهش خسارت‌های ناشی از این پدیده محسوب می‌شود، چراکه این پدیده موجب هزینه‌های مالی و جانی، تخریب خاک و اراضی و افزایش تولید رسوب در خروجی حوضه می‌شود [۱۱]. ایران با توپوگرافی اغلب کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، بیشتر شرایط طبیعی برای ایجاد گستره وسیعی از زمین لغزش‌ها را داراست. زمین لغزش سالیانه خسارت جانی و مالی فراوانی به کشور وارد می‌آورد [۸]. عوامل انسانی زمین لغزش شامل فعالیت‌های معدنی، نشت لوله، زهکشی ناکارآمد، ارتعاشات ناشی از حفاری، انفجار و ... است. این بلوک‌های بریده‌شده با حجم‌های مختلف از چند دسی‌متر مکعب تا هزاران متر مکعب با سرعت بسیار زیاد به پایین دست حرکت می‌کنند. این پدیده در کره زمین خسارت‌های فراوانی در طول تاریخ برجای گذاشته است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به زمین لغزش لس‌آنجلس اشاره داشت که در آن ۱۰۰ هزار نفر کشته شدند. عوامل مختلفی در ایجاد این زمین لغزش نقش داشتند که از جمله می‌توان به عوامل زمین‌شناسی (لیتولوژی و ساختار زمین‌شناسی)، ضخامت و بافت خاک، درصد پوشش گیاهی، کاربری اراضی، میزان پستی و بلندی، شیب دامنه و آب‌های زیرزمینی اشاره کرد [۱۰]. زمین لغزش ممکن است در شیب‌های طبیعی و دستکاری‌شده توسط انسان رخ دهد. عوامل مؤثر در ناپایداری و گسیختگی دامنه‌ها را از دیدگاه ژئوتکنیکی می‌توان در دو دسته قرار داد: ۱. عواملی که سبب کاهش مقاومت برشی می‌شوند؛ ۲. عواملی که سبب افزایش نیروی محرک می‌شوند. به‌منظور کاهش خسارت ناشی از زمین لغزش، شناسایی پهنه‌های دارای پتانسیل خطر زمین لغزش و تهیه نقشه از آنها ضروری است. تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش از گام‌های اصلی در مدیریت و کاهش خسارت ناشی از این پدیده است [۲۱]. برای این کار، روش‌های متعددی توسط محققان در کشورهای مختلف استفاده شده است که هر یک از آنها در شرایط ویژه‌ای ارائه شده است [۵]. اصغری و همکاران در پژوهشی با استفاده از تداخل‌سنجی راداری به‌منظور شناسایی و اندازه‌گیری زمین لغزش از تصاویر راداری سنتینل ۱ سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰

و به‌منظور پردازش اطلاعات از نرم‌افزار SARSCAPE استفاده کردند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که تصاویر راداری از پتانسیل خوبی برای آشکارسازی ناپایداری دامنه‌ها و محاسبه جابه‌جایی آنها برخوردار است و بیشترین حرکات مواد دامنه‌ای ۲۱ سانتی‌متر در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ بوده است که نشان‌دهنده فعال بودن منطقه از لحاظ حرکات دامنه‌ای است. نهادسازی نقشه‌های زمین‌لغزش با لایه‌های کاربری اراضی نیز نشان داد که مناطق دارای پوشش گیاهی و کشاورزی دیم بیشترین زمین‌لغزش را دارند [۱]. اصغری و همکاران با مرور و بررسی عوامل مؤثر از جمله شیب، گسل، زمین‌شناسی و کاربری اراضی، بارش، ارتفاع، پوشش گیاهی را برای پهنه‌بندی و پتانسیل خطر وقوع زمین‌لغزش بررسی و آنها را در پنج گروه ارزیابی کردند [۲]. مددی به بررسی خطر زمین‌لغزش به روش آنبالاگان در گردنه صائین پرداخته است. نتایج تحقیق او نشان می‌دهد که پهنه با خطر زیاد، ۱۰ کیلومتر معادل ۲۳ درصد از اراضی منطقه؛ پهنه با خطر زیاد ۲۴ درصد؛ پهنه با خطر متوسط ۲ درصد، پهنه با خطر کم ۱۸ درصد و پهنه با خطر خیلی کم ۱۴ درصد از منطقه را در بر می‌گیرند [۱۲]. بابکان و همکاران به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از GIS در ناحیه ساحلی دریای خزر، الگوهای احتمالی ریاضی وقوع زمین‌لغزش را وارد GIS کرده و رابطه آماری تراکم فراوانی وقایع زمین‌لغزش را در لایه‌های اطلاعاتی با سیستم اطلاعات جغرافیایی ترکیب کردند [۴]. با توجه به پژوهش‌های صورت‌گرفته و با درک اهمیت موضوع، به‌طور قطع می‌توان گفت که پایداری یا شیب دامنه‌ها اثر بسیار مهمی در بیشتر مخاطرات طبیعی به‌ویژه مخاطرات حرکات دامنه‌ای و زمین‌لغزش دارد.

صدوق ونینی و همکاران در مقاله‌ای با عنوان پهنه‌بندی لغزش زمین در منطقه کاشتر کامیاران برای کاهش مخاطرات ابتدا پهنه‌های لغزشی را با بازدید میدانی بررسی و در حدود ۲۸ پهنه لغزشی را شناسایی کردند و پس از پردازش در محیط برنامه GIS به‌صورت یک لایه کارآمد با مبنا قرار دادن نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها، وزن‌دهی به پارامترهای مهم در زمین‌لغزش را انجام دادند. آنها منطقه تحقیق را از نظر حساسیت به خطر وقوع زمین‌لغزش به پنج طبقه تقسیم کردند که براساس آن ۶/۲ کیلومتر مربع دارای خطر بسیار زیاد، ۴/۶ کیلومتر دارای خطر زیاد، ۱۹/۳ کیلومتر دارای خطر متوسط، ۷/۹ کیلومتر دارای خطر کم و در نهایت ۶/۵ کیلومتر مربع دارای خطر بسیار کم است [۱۰]. میرزانیسا و شهابی در پژوهشی در زمینه ارزیابی و پیش‌بینی مخاطره زمین‌لغزش در جاده کوهستانی سنندج- کامیاران، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی مانند مدل تابع شواهد قطعی و شواهد وزنی انجام دادند. نتایج تحلیل منحنی ویژگی عملی نسبی نشان داد که مدل‌های WOE و EBF به‌ترتیب با مقدار ۰/۸۹ و ۰/۷۹ بهترین مدل برای پیش‌بینی مکانی خطر

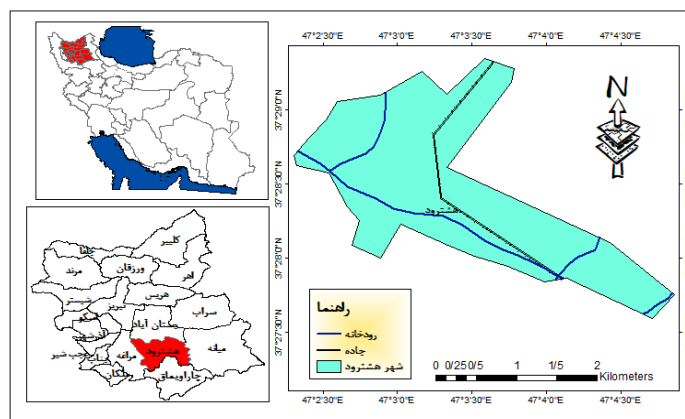
زمین لغزش بودند همچنین نتایج نشان داد که الگوریتم‌های پیشرفته داده کاوی بنا به ساختار خود از دقت کافی در پیش‌بینی مکانی زمین لغزش برخوردارند [۱۳].

اطیابی و همکاران نیز عامل توپوگرافی را دارای بیشترین تأثیر در رخداد زمین لغزش ذکر کردند [۳]. پژوهش پیش رو به پهنه‌بندی خطر بروز زمین لغزش در شهر هشترود پرداخته است. برای این کار از دو مدل تداخل‌سنجی راداری و MABAC استفاده شده و از تصاویر سنتینل ۱ برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش بهره گرفته شده است.

نوآوری این تحقیق نسبت به تحقیقات مشابه استفاده از دیدگاه تطبیقی است؛ چنانکه با محاسبات عددی و ریاضی و نیز بهره‌مندی از مدل MABAC و تصاویر ماهواره‌ای راداری سنتینل ۱ نتایج را با واقعیت‌های زمینی تطبیق می‌دهد. بخش اعظم این پژوهش بر مطالعات صحرایی تأکید دارد و در دو نوبت موقعیت نقاط ریزشی بررسی و برداشت شده است که در تحقیقات مشابه به این موضوع کمتر توجه شده است.

منطقه پژوهش

شهرستان هشترود از شهرستان‌های استان آذربایجان شرقی است. مرکز این شهرستان شهر هشترود است. این شهر در ۱۲۰ کیلومتری جنوب شرقی تبریز و ۶۵ کیلومتری غرب میانه واقع شده است. شهرستان هشترود دارای دو شهر هشترود و نظر کهریزی و دو بخش مرکزی و نظر کهریزی است. این شهرستان در استان آذربایجان شرقی از نظر جمعیت در جایگاه شانزدهم و از نظر مساحت در جایگاه سیزدهم قرار دارد.



شکل ۱. نقشه محدوده پژوهش و موقعیت جغرافیایی شهرستان هشترود در استان آذربایجان شرقی و کشور (نگارندگان)

روش تحقیق

مطالعه حاضر از نظر هدف، از نوع کاربردی و از نظر روش، از نوع توصیفی-تحلیلی است. در پژوهش حاضر برای شناسایی مکان‌های مستعد زمین‌لغزش شهر هشتروند از مدل MABAC استفاده شده است. مدل MABAC توسط پاموکار و سیرویک در سال ۲۰۱۵ بنیان نهاده شد. این روش مقادیر قطعی را فراهم می‌کند [۱۲]. با فرض اینکه m تناوب $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ ویژگی $\{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ با بردار وزن‌دهی $W_j (j=1, 2, \dots, n)$ کارشناس λ و با بردار $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ وزن‌دهی $\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ باشد. بنابراین، فرایند تصمیم‌گیری با مدل MABAC به صورت زیر بیان می‌شود:

گام اول: برای ارزیابی ماتریس

$$R = [A_{ij}^\lambda]_{m \times n}, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$$

به‌عنوان

$$R = [A_{ij}^\lambda]_{m \times n} = \begin{matrix} & \begin{matrix} G_1 & G_2 & \dots & G_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} & \begin{vmatrix} A_{11}^\lambda & A_{12}^\lambda & \dots & A_{1n}^\lambda \\ A_{21}^\lambda & A_{22}^\lambda & \dots & A_{2n}^\lambda \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{m1}^\lambda & A_{m2}^\lambda & \dots & A_{mn}^\lambda \end{vmatrix} \end{matrix} \quad i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$$

است که در آن:

$[A_{ij}^\lambda]_{m \times n}, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ ، به اطلاعات ارزیابی معادل $A_i (i=1, 2, \dots, m)$ براساس ویژگی $G_j (j=1, 2, \dots, n)$ - توسط تصمیم‌گیرنده d_λ دلالت می‌کند.

گام دوم:

براساس برخی از عملگرهای تراکم، می‌توان A_{ij}^λ کلی را در A_{ij} استفاده کرد.

گام سوم:

نرمال‌سازی نتایج ماتریس

$$R = [A_{ij}^\lambda]_{m \times n}, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$$

براساس نوع هر ویژگی مفید براساس فرمول زیر:

$$N_{ij} = A_{ij}, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$$

برای ویژگی‌های هزینه:

$$N_{ij} = 1 - A_{ij}, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$$

گام چهارم:

براساس ماتریس نرمال شده

$$N_{ij}=A_{ij}, i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n$$

و وزن ویژگی‌های W_j ($j=1,2,\dots,n$)، ماتریس وزن دهی شده نرمال شده

$$WN_{ij}=A_{ij}, i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n$$

می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$WN_{ij}=(i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n)$$

گام پنجم: محاسبه مقادیر مرز ناحیه شباهت ماتریس و ماتریس BAA، $G=gj_{1 \times n}$ را

می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$g_j = (\prod_m WN_{ij})^{\frac{1}{m}} \quad (i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n)$$

گام ششم: فاصله $D=[D_{ij}]_{m \times n}$ میان هر تناوب و BAA با استفاده از فرمول زیر محاسبه

می‌شود:

$$d_{ij} = \begin{cases} d(WN_{ij}, g_j), & \text{if } WN_{ij} > g_j, \\ 0, & \text{if } WN_{ij} = g_j \\ d(WN_{ij}, g_j) & \text{if } WN_{ij} < g_j \end{cases}$$

که در آن:

WN_{ij} ، میانگین فاصله WN_{ij} تا g_j است. براساس مقادیر d_{ij} :

اگر $d_{ij} > 0$ باشد، تناوب به منطقه بالایی مجاور ناحیه G^+ (UAA) تعلق دارد.

اگر $d_{ij} = 0$ باشد، تناوب به ناحیه مجاور مرز C(BAA) تعلق دارد.

اگر $d_{ij} < 0$ باشد، تناوب به ناحیه مجاور پایین تر G^- (LAA) تعلق دارد.

بهترین تناوب به G^+ (UAA) و بدترین تناوب به G^- (LAA) تعلق دارد.

گام هفتم: مجموع مقادیر هر تناوب d_{ij} با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}$$

در مورد نتایج ارزیابی جامع k ، ترتیب تناوبها به روشنی استخراج می‌شود. هرچه ارزیابی

بزرگ تر باشد، انتخاب بهتر است. این روش از به روزترین فنون تصمیم‌گیری چندمعیاره است که

برای رتبه بندی گزینه‌ها در مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده می‌شود. از جمله

مزیت‌های این روش می‌توان به سیستم ریاضی ساده و نتایج پایدار اشاره کرد. افزون بر این، با

استفاده از این مدل می‌توان نتایج کاملی را به دست آورد، زیرا ارزش‌های احتمالی سود و ضرر را

نیز در نظر می‌گیرد. بنابراین این روش می‌تواند نیازهای یک ابزار اولویت بندی معتبر را برآورده

کند [۱۷، ۱۵].

نخستین مرحله اجرای این مدل در پژوهش حاضر، شناسایی و انتخاب عوامل و گزینه‌های پژوهش بود. در این قسمت در انتخاب گزینه‌ها و معیارها از نظر کارشناسان و پژوهش‌های پیشین استفاده شد. در مرحله دوم ماتریس تصمیم تشکیل شد. در این روش ماتریس تصمیم به صورت معیار-گزینه است، یعنی یک ماتریس که ستون‌های آن از معیارهای مسئله و سطرها از گزینه‌ها تشکیل شده باشد. هر سلول نیز امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار است. در گام سوم ماتریس تشکیل شده در مرحله دوم نرمال شد. در مرحله چهارم وزن دهی ماتریس نرمال شده با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی محاسبه شد. گام پنجم تعیین مرز ناحیه شباهت ماتریس بود. در واقع باید از امتیازات هر معیار میانگین هندسی گرفته شود تا مرز ناحیه شباهت به دست آید. سپس فاصله گزینه‌ها تا مرز ناحیه شباهت محاسبه شد [۱۵].

در اجرای این پژوهش از داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای متعددی شامل موارد زیر استفاده شده است:

تصاویر ماهواره‌ای راداری

در این پژوهش از تصاویر سنتینل ۱ استفاده شده است که در محدوده باند C امواج مایکروویو اخذ تصویر می‌کند. سپس پردازش‌های لازم از طریق افزونه SARSCAPE 5.2 در نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام گرفت. روش به‌کاررفته در این پژوهش برای تعیین مقدار فرونشست، تداخل‌سنجی تفاضلی با گشودگی ترکیبی دو عبور مکرر یا غیرمکرر بوده است. از اساسی‌ترین مراحل در پردازش تداخل‌سنجی راداری انتخاب مناسب زوج تصویر مناسب است که چند عامل همچون فرکانس سنجنده، خط مبنای مکانی، خط مبنای زمانی و همچنین همپوشانی فضایی در راستای حرکت سنجنده در انتخاب زوج تصاویر مؤثرند. در پژوهش حاضر از دو تصویر Sentinel-1-A از نوع SLC مربوط به سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ استفاده شد. مشخصات تصاویر راداری در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات تصاویر استفاده‌شده

شماره	تصویر اصلی	تصویر فرعی	گذر ماهواره	نام سنجنده	سال
۱	S1A_IW_SLC__1SDV_20151031	S1A_OPER_AUX_20151101	صعودی	Sentinel1	۲۰۱۵
۲	S1A_IW_SLC__1SDV_20200126	S1A_OPER_AUX_20200127	صعودی	Sentinel1	۲۰۲۰

یک سیگنال راداری با درجهٔ مصنوعی از دو بخش دامنه و فاز تشکیل شده است. دامنه، قدرت سیگنال برگشتی و فاز کسری از یک سیگنال کامل موج سینوسی است. فاز در تصویر راداری براساس فاصلهٔ بین آنتن سنجنده و عارضهٔ زمینی مشخص می‌شود. فاز تصویر منفرد به‌سختی اطلاعات مفیدی در اختیار قرار می‌دهد، اما تفاوت فاز یک زوج تصویر هم‌مرجع و همدوس اطلاعات ذی‌قیمتی در اختیار محققان قرار می‌دهد. در تداخل‌سنجی راداری تفاوت فاز دو تصویر از یک منطقهٔ زمانی و خط مبنای مشخص تعیین می‌شود [۷]. روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) امکان تولید مدل رقومی ناهمواری‌های زمین را فراهم می‌آورد که دقت ارتفاع بهینهٔ آن برای داده‌های نوار C با طول موج ۵/۶ سانتی‌متر حدود ۵ متر است [۱۳]. این روش را گولدشتاین و زیگر در سال ۱۹۸۹ معرفی کردند. این اصطلاح به روش اندازه‌گیری پاره‌ای از پارامترها از قبیل توپوگرافی، تغییرات و جابه‌جایی سطح زمین از طریق تداخل فاز دو یا چند تصاویر راداری با روزهٔ مجازی (SAR) اخذ شده از منطقهٔ مشابه اطلاق شده است. این روش با استفاده از دست‌کم دو تصویر DEM یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری تغییرات سطحی رخ داده در زمین را در دامنه‌های متفاوت با دقت‌های میلی‌متری آشکارسازی می‌کند. سنجندهٔ تصویر نخست (تصویر اصلی) T_0 ثبت و مقدار فاز (Φ_m) آن را اندازه‌گیری می‌کند. مقدار نشست عبارت است از فاصلهٔ P تا P_1 که در طی زمان مشخصی صورت گرفته است (Dt). برای اندازه‌گیری این مقدار، سنجنده تصویر دومی (تصویر فرعی) در زمان t و با هندسه‌ای کاملاً شبیه به تصویر نخست را اخذ و مقدار فاز (Φ_m) را برای آن اندازه‌گیری می‌کند. روش تداخل‌سنجی تفاضلی، تفاضل فاز Φ_s و Φ_m را در فرم تداخل‌نگار فازی نمایش می‌دهد ($\Delta\Phi_{int}$). در صورت ثابت و پایدار بودن سطح، تفاضل فاز این دو تصویر ناشی از تغییر موقعیت این دو سنجنده و مقدار آن به کمک رابطهٔ ۱ به‌دست می‌آید.

$$\Delta\Phi_{int} = 4\pi \frac{SP - MP}{\lambda} \quad (1)$$

که در آن SP فاز تصویر اول، MP فاز تصویر دوم، عدد پی با مقدار ثابت $3/14$ و λ طول موج است. در اندازه‌گیری مقدار فرونشست در این روش، سطح ناپایدار تصور می‌شود، به‌طوری که سطح از P به P_1 تنزل یافته است. تعیین مقدار نشست در فاصلهٔ زمانی دو تصویر (Dt) تابع اختلاف فاز دو تصویر ($\Delta\Phi_{int}$) به‌همراه فاز ناشی از توپوگرافی (Φ_{Top}) و فاز ناشی از اتمسفر خواهد بود [۱۵].

$$\Delta\phi_{int} = 4\pi \frac{SP - MP}{\lambda} = \phi_{Top} + \phi_{Mov} + \phi_{Atm} \quad (2)$$

در نهایت با نادیده انگاشتن اثر اتمسفر در جابه‌جایی‌های بزرگ (چند سانتی‌متر) یا حذف آن به کمک تصاویر اپتیکی اختلاف فاز دو تداخل‌نگار فقط بیان‌کننده مقادیر جابه‌جایی سطح خواهد بود.

تداخل‌نگار تفاضلی حاصل دربرگیرنده مقداری نویز است. عامل پدیدآورنده این نویزها ممکن است مختلف باشد و دو عامل اصلی در پدید آمدن آنها تأثیرگذار است [۴].

عامل اول مربوط به تفاوت زمانی بین دو تصویر اصلی و وابسته است. گاهی برخی از تغییرات در منطقه که در فاصله زمانی بین دو تصویر اتفاق می‌افتد از عوامل پدیدآورنده نویز هستند که از آن جمله می‌توان به ساخت‌وسازهای مربوط به فعالیت‌های عمرانی یا فعالیت‌های کشاورزی در منطقه اشاره کرد. دومین عامل ایجاد نویز، خط مبنای مکانی است که میزان نویزها در تصاویر ارتباط مستقیمی با خط مبنای مکانی دارد. هرچه این میزان بیشتر باشد، نویزهای بیشتری در تداخل‌نگار ایجاد خواهد شد. در منطقه پژوهش به دلیل مهاجرپذیر بودن شهر هشترود و رشد زیاد ساکنان، شاهد ساخت‌وساز و فعالیت‌های عمرانی زیادی هستیم. وجود زمین‌های کشاورزی و باغ‌ها نیز از عوامل ایجاد نویز در تصاویر است. برای حذف و کاهش نویزها از عمل فیلترینگ استفاده شده است. در این تحقیق به دلیل کارایی از فیلتر Goldstein استفاده شده است. نتیجه اعمال فیلتر تولید تداخل‌نگار فیلترشده است که از لحاظ بصری حاشیه‌های مرتب‌تری نسبت به تداخل‌نگار فیلترنشده دارد و نویز در آنها کاهش چشمگیری داشته است. ویژگی این فیلتر این است که به صورت انتخابی عمل می‌کند و فیلترگذاری به صورت محلی انجام می‌گیرد. عملکرد این فیلتر تحت تأثیر همبستگی تداخل‌نگار است، یعنی در صورت همبستگی کم، پیکسل‌های بیشتر و در صورت همبستگی زیاد، پیکسل‌های کمی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴]. مدل رقومی ارتفاعی: SRTM فاز اینترفروگرام حاوی اثر توپوگرافی، خطای مداری و اثرهای اتمسفر است. برای به دست آوردن جابه‌جایی سطح زمین در یک دامنه زمانی، باید خطاهای مداری، اثرهای توپوگرافی و نویز اتمسفر از اینترفروگرام‌ها حذف شوند. برای حذف اثر توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر استفاده شده است. خطاهای مداری نیز با برازش یک رویه به مناطق فاقد جابه‌جایی مدل‌سازی شده و از اینترفروگرام مورد نظر کم شد. خطای اتمسفر را می‌توان به کمک اطلاعات جوی و مدل اتمسفری تعدیل کرد [۱۶].

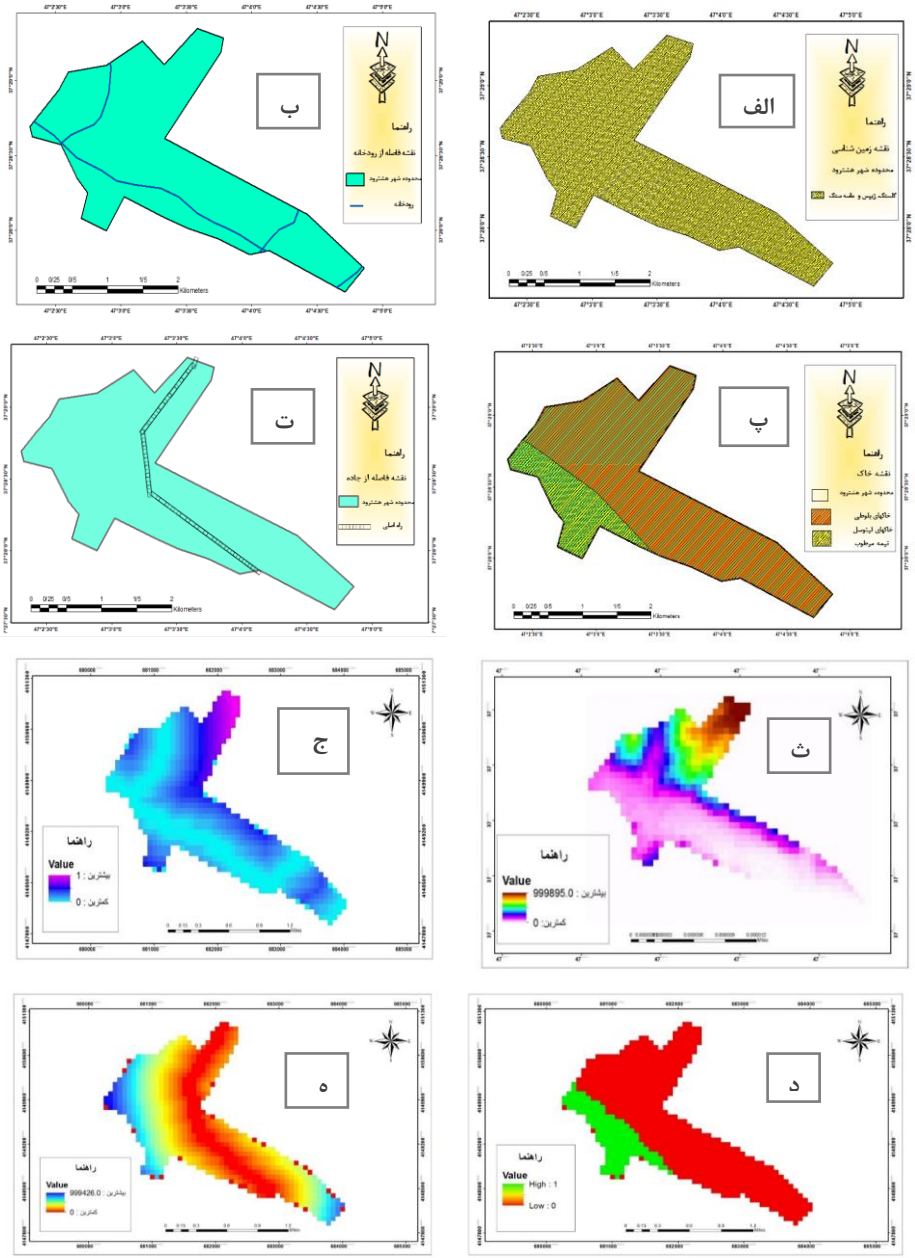
بحث و نتایج

به منظور تهیه نقشه خطر زمین لغزش در شهر هشتروند و ایجاد نقشه‌های مؤثر در وقوع حرکات دامنه‌های منطقه پژوهش پهنه‌بندی صورت گرفت و نقشه حاصل از آنها تهیه شد (شکل ۲). همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، چهار نقشه به منظور بررسی خطر زمین لغزش ایجاد شد که شامل لایه‌های خاک، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، خاک و زمین‌شناسی است. بعد از ایجاد لایه‌های اطلاعاتی به منظور تهیه نقشه نهایی خطر زمین لغزش، نقشه‌های فازی لایه‌های اطلاعاتی ایجاد شد. برای مشخص شدن تأثیر طبقات مختلف معیارها در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش، لایه‌ها براساس نوع عملکرد هر کدام در رخداد زمین لغزش با استفاده از توابع عضویت فازی در دامنه صفر تا ۱ فازی‌سازی شدند. پارامترهای استفاده شده شامل بارش، شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، زمین‌شناسی و خاک است (شکل ۲).

نتایج به دست آمده از لایه‌های اطلاعاتی و در نهایت نقشه خطر زمین لغزش نشان می‌دهد که ارتفاعات بیش از ۱۵۰۰ متر بیشترین سهم لغزش را به خود اختصاص داده‌اند. لغزش در ارتفاعات ۱۴۰۰ متر نیز چشمگیر بوده است که دلیل آن ناپایداری دامنه‌ها در برابر عوامل اقلیمی و محیطی است. همچنین با مشاهده و مقایسه لایه زمین لغزش و زمین‌شناسی و جنس سنگ مشاهده شد که بیشتر زمین لغزش‌ها در مناطقی رخ داده است که جنس سنگ‌ها بیشتر ژئیس و ماسه سنگ بوده‌اند.

محدوده پژوهش در قسمت مرتفع و پرشیب قرار دارد و به سکونتگاه‌های شهری و روستایی نزدیک است. از نظر کاربری اراضی شهر در زیر دامنه قرار گرفته و کاملاً مستعد ریزش سنگ است که علت آن، تأثیر ارتفاع به‌ویژه در نفوذ و هدایت آب بارندگی به طبقات سست زیرین است (شکل ۳).

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، حدود ۴۰ درصد از زمین لغزش‌های رخ داده در طبقات با خطر خیلی زیاد و زیاد رخ داده است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل توانایی زیادی در پیش‌بینی زمین لغزش دارد. شایان توضیح است که بیشتر لغزش‌ها در محدوده شهر هشتروند اتفاق می‌افتد که شرایط بسیار مستعدی برای وقوع حرکات دامنه‌ای دارد. هرچند که تا فاصله پنج کیلومتری نیز به لحاظ پتانسیل خطر، شرایط مستعدی برای وقوع حرکات در بسیار از دامنه‌های دو طرف جاده وجود دارد.



شکل ۲. الف) فاصله از رودخانه؛ ب) زمین‌شناسی؛ ج) خاک؛ د) فاصله از جاده؛ پ) مدل رقومی ارتفاعی؛ ت) فاصله از جاده؛ ث) خاک؛ ه) جاده.



شکل ۳. سازندها و تشکیلات سست و رسوبات رودخانه‌ای مستعد زمین‌لغزش (نگارندگان)

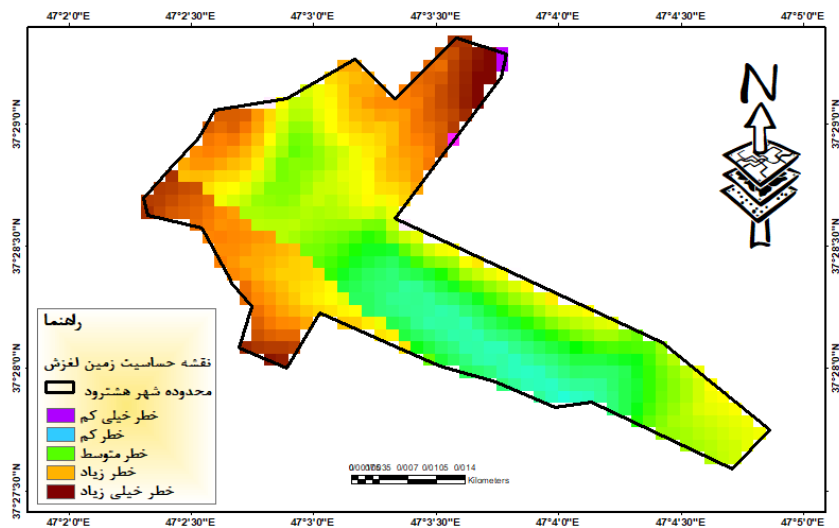


شکل ۴. عوامل انسانی مؤثر در از بین رفتن پایداری دامنه‌ها





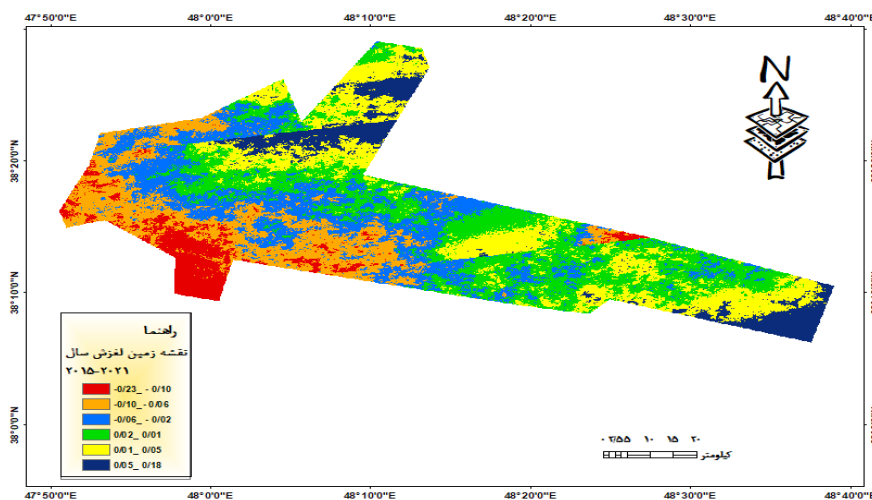
شکل ۵. تأثیر شیب و بریدگی‌های عمودی در زمین لغزش منطقه و کناره‌های جاده (نگارندگان)



شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در شهر هشتروند

با بررسی چگونگی و امکان وجود جابه‌جایی در سطح زمین، می‌توان به برآورد پارامترهای تأثیرگذار در فرایند جابه‌جایی زمین دست یافت و آنها را در مدل‌سازی ژئوفیزیکی و تعیین راهکارهای لازم به‌منظور مقابله با حرکات دامنه‌ای به‌کار گرفت. در میان همه روش‌های زمینی و فضایی اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین، روش تداخل‌سنجی راداری، ابزار مفید به‌شمار

می‌رود. میزان جابه‌جایی، حرکات دامنه‌ای را در منطقه پژوهش نشان می‌دهد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده میزان جابه‌جایی در جهت حسگرهای ماهواره و مقادیر منفی نشان‌دهنده میزان جابه‌جایی در خلاف جهت حسگر است. میزان جابه‌جایی مواد دامنه‌ای اندازه‌گیری شده در محدوده پژوهش حداکثر ۲۳ سانتی‌متر و حداقل ۱۸ سانتی‌متر در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ است. بیشترین حرکات دامنه‌ای در جنوب شهر هشتگرد و کمترین آن در شمال شهر دیده می‌شود (شکل ۶).



شکل ۷. میزان جابه‌جایی مواد دامنه‌ای اندازه‌گیری شده توسط پردازش تداخل‌سنجی راداری

ناپایداری‌های دامنه‌ای در طبیعت همیشه نشانه‌هایی از خود به جا می‌گذارند که با استفاده از آنها می‌توان به شناخت بصری از ناپایداری‌ها دست یافت؛ بنابراین با بازدید میدانی می‌توان اطلاعات کیفی بارزشی در مورد سن و میزان فعالیت مواد دامنه‌های ناپایدار به دست آورد. شکل‌های ۴ و ۵ نمونه‌هایی از ترانشه‌های پایدار و حرکات دامنه‌ای ایجادشده در محدوده پژوهش است. حدود ۴۰ درصد از زمین‌لغزش‌های رخ داده در طبقات با خطر خیلی زیاد و زیاد رخ داده است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل توانایی زیادی در پیش‌بینی زمین‌لغزش دارد.

نتیجه‌گیری

تداخل‌سنجی راداری روش بسیار دقیقی است که می‌تواند حرکات دامنه‌ای را با استفاده از دو تصویر از یک منطقه در دامنه‌های زمانی مختلف به صورت خیلی دقیق در حد سانتی‌متر و حتی

میلی‌متر شناسایی کند. نتایج تحقیقات میدانی نیز صحت و دقت بسیار زیاد تصاویر ماهواره‌ای را تأیید می‌کند. با استفاده از این فناوری امکان پایش حرکات کوچک سطح زمین به‌صورت پیوسته با دقت زیاد و در گستره وسیع امکان‌پذیر است. تصاویر راداری حرکات دامنه‌ای را در منطقه پژوهش با دقت بسیار زیادی شناسایی کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد که تصاویر راداری از پتانسیل خوبی برای آشکارسازی ناپایداری دامنه‌ها و محاسبه جابه‌جایی آنها برخوردارند. بیشترین حرکات مواد دامنه‌ای در محدوده پژوهش ۲۳ سانتی‌متر بوده است. فرایند کار برمبنای تلفیقی از روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای صورت گرفت. به این منظور ابتدا نقشه زمین لغزش‌های منطقه با بازدیدهای میدانی تهیه شد. نقشه حاصل در پنج طبقه خطر، طبقه‌بندی و با توجه به زمین لغزش‌های رخ داده در محدوده تحت مطالعه ارزیابی شد. با توجه به نتیجه ارزیابی، مدل‌های به‌کاررفته قابلیت مناسبی برای پیش‌بینی وقوع زمین لغزش نشان می‌دهند. بررسی و تحلیل نتایج نشان داد که بارش و ارتفاع نسبت به بقیه عوامل تأثیر بیشتری در ایجاد نواحی پرخطر دارند. به منظور پردازش اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای راداری نیز از نرم‌افزار SARSCAPE استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد که تصاویر راداری از توانایی خوبی برای آشکارسازی ناپایداری دامنه‌ها و محاسبه جابه‌جایی آنها برخوردارند. در دامنه زمانی مدنظر، بیشترین حرکات مواد دامنه‌ای ۲۳ سانتی‌متر بوده است که نشان‌دهنده فعال بودن منطقه از لحاظ حرکات دامنه‌ای است. بیشترین میزان حرکات مواد دامنه‌ای ۲۱ سانتی‌متر سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ در محدوده پژوهش بوده است که نشان‌دهنده فعال بودن منطقه از لحاظ حرکات دامنه‌ای است هم‌نهادسازی نقشه‌های زمین‌لغزش با لایه‌های کاربری اراضی نیز مؤید رخداد بیشینه عرصه زمین‌لغزش مربوط به مناطق پوشش گیاهی و کشاورزی دیم بیشترین میزان زمین‌لغزش را نشان داد.

منابع

- [۱]. اصغری سراسکانرود، صیاد؛ محمدزاده شیشه‌گران، مریم؛ و زالی کرده مهینی، عادل (۱۴۰۰). «ارزیابی ناپایداری دامنه‌های جاده‌های اردبیل - سرعین - سراب با استفاده از تداخل‌سنجی رادار»، جغرافیا و پایداری محیط، دوره ۱۱، شماره ۲، ص ۹۱-۱۰۴.
- [۲]. اصغری سراسکانرود، صیاد؛ پالیزبان، دلنیا؛ امامی، هادی؛ و قلعه، احسان (۱۳۹۹). «تحلیل مدل‌های تحلیل شبکه و منطق، فازی برای تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش مطالعه موردی (جاده سراب-نیر)»، جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۴، شماره ۷۳، ص ۱-۲۲.
- [۳]. اطمیابی، سیدمحمدرضا؛ نیازمردی، سعید؛ و عباسپور، رحیم‌علی (۱۴۰۰). «روشی جدید بر مبنای ترکیب روش‌های آماری برای افزایش دقت نقشه‌های حساسیت به مخاطرات زمین‌لغزش (مطالعه موردی: استان مازندران)»، مدیریت مخاطرات محیطی، سال ۸، شماره ۲، ص ۹۹-۱۱۷.
- [۴]. بابکان، سولماز؛ زارع، مهدی؛ و معاریان، حسین. (۱۳۸۵). «پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش، در ناحیه ساحلی دریای خزر، با روش احتمالی نسبت فراوانی با استفاده از GIS»، دومین کنفرانس بین‌المللی مدیریت جامع بحران در حوادث غیرمترقبه طبیعی، تهران، شرکت کیفیت ترویج.
- [۵]. حبیب‌زاده هریس، محمدصادق؛ المدرسی، علی؛ و سرکارگر اردکانی، علی (۱۳۹۲). بررسی فرونشست در شهریار با استفاده از تکنیک D-In SAR، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد.
- [۶]. خدائی قشلاق، فاطمه؛ و حجازی، اسداله. (۱۳۹۵). «پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در محدوده کلیرچای با استفاده از روش تحلیل شبکه ANP»، اولین کنفرانس بین‌المللی مخاطرات طبیعی و بحران‌های زیست‌محیطی ایران، راهکارها و چالش‌ها، اردبیل، شرکت کیان طرح دانش، مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد.
- [۷]. رامشت، محمدحسین؛ و سادات، سمیه. (۱۳۹۰). کاربرد ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی ملی، منطقه‌ای، اقتصادی، انتشارات دانشگاه اصفهان.
- [۸]. دهقانی بیدگلی، رضا؛ کوهبنانی، حمیدرضا؛ و یزدانی، محمدرضا (۱۳۹۹). «پهنه‌بندی فرونشست دشت سمنان ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی با استفاده از تکنیک

- تداخل سنجی راداری و تصاویر سنتینل ۱»، مهندسی آبیاری و آب/ایران، سال ۱۰، شماره ۳۹، ص ۱۸۷-۱۷۵.
- [۹]. رنجبر، محسن؛ و معمار افتخاری، محمد. (۱۳۹۱). «پهنه‌بندی پدیده لغزش با استفاده از روش LNRF در جاده هراز (از امامزاده هاشم تا لاریجان)»، *جغرافیا؛ دوره ۱۰*؛ شماره ۳۳، ص ۱۲۸-۱۰۷.
- [۱۰]. صدوق ونینی، حسن؛ ثروتی، محمدرضا؛ نصرتی، کاظم؛ ذاسدی، میترا؛ قربانی، محمد صدیق. (۱۳۹۴). «پهنه‌بندی لغزش زمین در منطقه کاشتر کامیاران برای کاهش مخاطرات»، مدیریت مخاطرات محیطی، سال ۱، شماره ۲، ص ۱۱۶-۱۰۵.
- [۱۱]. عبادی نژاد، سید علی؛ یمانی، مجتبی؛ مقصودی، مهران؛ و شادفر، صمد (۱۳۸۶). «ارزیابی کارایی عملگرهای منطق فازی در تعیین توانمندی زمین لغزش (مطالعه موردی: حوزه آبخیز شیروود)»، *انجمن آبخیزداری/ایران*، سال اول، شماره ۲، ص ۳۹-۴۴.
- [۱۲]. مددی، عقیل (۱۳۸۹). «بررسی ناپایداری ژئومورفولوژیک گردنه صائین (بین شهر نیر و سراب، منطقه آذربایجان) با استفاده از روش آنبالاگان»، *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، سال ۲۱، شماره ۱، ص ۹۴-۷۷.
- [۱۳]. میرزانی، صالح؛ و شهابی، هیمن (۱۳۹۸). «ارزیابی و پیش‌بینی مکانی مخاطره زمین لغزش در جاده کوهستانی سنندج-کامیاران با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته داده کاوی»، مدیریت مخاطرات محیطی، سال ۴، شماره ۶، ص ۳۴۰-۳۱۷.
- [۱۴]. میرسنجری، میرمهرداد؛ ایلدرمی، علیرضا؛ عابدیان، سحر؛ و علی محمدی، عارفه (۱۳۹۷). «پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل LNRF (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبریز قمرود- الیگودرز)»، *مخاطرات محیط طبیعی*، دوره ۷، شماره ۱۸، ص ۱۳۰-۱۰۹.
- [15]. Božanić, D.; Tešić, D.; & Kočić, J. (2019). "Multi-Criteria Fucom-Fuzzy Mabac Model for the Selection of Location for Construction of Single-Span Bailey Bailey Bridge", *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 2(1), pp: 132-146.
- [16]. Chatterjee, R.S.; Fruneau, B.; Rudan, J.P.; Roy, P.S.; Frison, P.; Lakhera, R.C.; Dadlhwai, V.K.; & Saha, R. (2006). "Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990 as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) technique", *Remote Sensing of Environment*, 102, pp: 176-185.
- [17]. Dehghani, M.; ValadanZoej, M.J.; Entezam, I.; Saatchi, S.; & Shemshaki, A. (2011). "Interferometric measurements of ground surface subsidence induced by

- overexploitation of groundwater”, *Journal of Applied Remote Sensing*, 4(2010), pp: 56-73.
- [18]. Ding, X.L.; Liu, G.X.; Li, Z.W.; Li, Z.L.; & Chen, Q.Y. (2004). “Ground subsidence monitoring in Hong Kong with satellite SAR interferometry”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(10), pp: 1151–1156
- [19]. Massonnet, D.; & Feigl, K.L. (1998). “Radar interferometry and its application to changes in the earths surface”, *Reviews of Geophysics*, 36(4), pp:441-500.
- [20]. Pamučar, D.; & Božanić, D. (2019) “Selection of Allocation For the Development OF MULTIMODAL LOGISTICS CENTER: APPLICATION OF SINGLE-VALUED NEUTROSOPHIC MABAC MODEL”, *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 2(2), pp: 55-71.
- [21]. Van Westen, C.J. (1995). Geographic Information System in Landslide Hazard Zoning: A Review, with Example from the Andes of Colombia in: Price, M. and System, Taylor & Francis, Basingstoke, U.K, pp: 135-165.
- [22]. Wang, J.; Wei, G.; Wei, C.; & Wei, Y. (2020). “MABAC method for multiple attribute group decision making under q-rung orthopair fuzzy environment”, *Defence Technology*, 16, pp: 208-216.