

مدل‌سازی ناپایداری‌های دامنه‌ای با استفاده از تحلیل سری زمانی تصاویر راداری با تکنیک SBAS

مجتبی یمانی^{۱*}، لیلا حیدریان^۲، ابوالقاسم گورابی^۳، مهران مقصودی^۴

- ۱- دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه تهران دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران دانشکده جغرافیا
۲- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه تهران دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران دانشکده جغرافیا
۳- دکتری دانشگاه تهران دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران دانشکده جغرافیا
۴- دکتری دانشگاه تهران دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران دانشکده جغرافیا

دریافت: ۹۸/۱۱/۹ پذیرش: ۹۹/۷/۹

چکیده

استقرار اغلب سکونتگاه‌های شهری و روستایی ایران در مجاورت مناطق کوهستانی باعث شده تا احتمال وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای و جابه‌جایی زمین یکی از چالش‌های پیش‌روی برنامه‌ریزان شهری محسوب شود. در این پژوهش با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱، طی بازه زمانی سه‌ساله (از تاریخ ۲۰۱۶/۰۱/۰۶ تا ۲۰۱۸/۱۲/۲۱)، با استفاده از روش تکنیک سری زمانی SBAS در نرم‌افزار GMTSAR، نقشه جابه‌جایی و ناپایداری دامنه‌ای زمین در محدوده شهر پردیس تولید شده‌اند. در همین راستا پتانسیل خطر وقوع حرکات دامنه‌ای، با استفاده مدل منطق فازی و AHP، با بهره‌مندی از متغیرهای محیطی شیب، جهت شیب، ارتفاع، رودخانه، گسل، لیتولوژی و راه ارتباطی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در پایان، نتایج تکنیک سری زمانی و مدل سازی مقایسه و تحلیل‌های لازم ارائه شده‌اند. نتایج حاصله بیانگر آن هستند که بخش‌های جنوبی شهرهای پردیس، رودهن و بومهن که بر مخروط‌افکنه‌ها استقرار یافته‌اند، به ترتیب ۳۵-، ۳۱- و ۲۹- میلی‌متر در سال فرونشست و بخش‌های شمالی ۲۵ میلی‌متر بالاتر آمدگی داشته‌اند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که بیش از ۴۰ درصد محدوده در معرض وقوع زمین لغزش بوده که حدود ۷۰ درصد از آن‌ها بر مناطق ناپایدار حاصل از تکنیک راداری هم‌پوشانی دارند. این تحقیق کارایی تکنیک راداری در ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌سازی AHP و منطق فازی را به‌خوبی نمایان نمود.

واژه‌های کلیدی: شهر پردیس، آنالیز سری زمانی SBAS، زمین لغزش، فرونشست



۱- مقدمه

روند افزایشی جمعیت سبب شده است تا نواحی سکونتگاهی با توسعه فیزیکی زیادی همراه باشند. توسعه فیزیکی نواحی سکونتگاهی، یکی از عوامل تخریب محیط زیست در طی سال‌های اخیر بوده است (Chen, 2012 & chengtai, 1999)، علاوه بر این، روند توسعه نواحی سکونتگاهی سبب افزایش پتانسیل آسیب‌پذیری نواحی سکونتگاهی، خصوصاً نواحی شهری شده است. میزان آسیب‌پذیری نواحی شهری در برابر مخاطرات طبیعی تحت تأثیر عوامل مختلف ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی و هیدرواقليمی قرار دارد و هر شهر ممکن است در معرض یک و یا چند نوع مخاطره باشد. یکی از انواع مخاطرات طبیعی در شهرها، زمین‌لغزش است (kimura & yamaguchi, 2000). ایران با توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌ساختی و اقلیمی، شرایط طبیعی مناسبی برای وقوع طیف وسیعی از زمین‌لغزش‌ها را داراست (روستایی و همکاران، ۱۳۹۲) و از جمله شهرهای در معرض این مخاطره، شهرهای واقع در دامنه‌های البرز از جمله شهر پردیس است. یکی دیگر از مخاطراتی که بسیاری از شهرها با آن مواجه هستند، فرونشست است. این پدیده می‌تواند بر اثر عوامل طبیعی و یا انسانی (Chen, 2016) از جمله برداشت معادن زیرزمینی رخ دهد (strozzi et al, 2001 & Marfai & King, 2007). همچنین شرایط آب‌وهوایی خشک نیز از دیگر عوامل مؤثر در وقوع آن است (Galloway et al, 1998). فرونشست زمین از جمله مخاطراتی است که در بلندمدت سبب وارد آوردن خسارات جبران‌ناپذیر به ساختمان‌ها، راه‌آهن، بزرگراه‌ها، متروها و تأسیسات زیرزمینی (لوله‌های آبرسانی، گاز، تأسیسات برق ...) می‌شود (dong et al, 2014 & Xue et al, 2005)، بنابراین لازم است تا روند فرونشست خصوصاً در نواحی شهری مورد پایش قرار گیرد. با توجه به موارد مذکور، در این تحقیق به بررسی وضعیت ناپایداری دامنه‌ها و میزان فرونشست در شهر پردیس تهران پرداخته شده است.

به‌منظور بررسی وضعیت ناپایداری دامنه‌ها و همچنین فرونشست زمین از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین روش‌هایی که در طی سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری است (Chaussard et al, 2014). این روش به دلیل دقت و سرعت بالای پردازش و همچنین کم‌هزینه بودن، از روش‌های مؤثر در بررسی تغییرات شکل زمین محسوب می‌شود (بابایی و همکاران، ۱۳۹۵)، به همین دلیل در این تحقیق به‌منظور ارزیابی میزان جابه‌جایی عمودی زمین در منطقه مورد مطالعه از روش تداخل‌سنجی راداری و سری زمانی SBAS استفاده شده است. از جمله تحقیقاتی که در زمینه اندازه‌گیری و پایش

جابه‌جایی زمین از این تکنیک استفاده نموده‌اند، می‌توان به اسمانگلو^۱ و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از ۲۳ تصویر ماهواره Envisat، طی سال‌های ۲۰۰۴-۲۰۰۶ و روش تحلیل سری زمانی PSI، به ارزیابی میزان فرونشست در شهر مکزیکوسیتی پرداخته است. دینهو^۲ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش روش تداخل‌سنجی (PSI) به بررسی پدیده فرونشست در شهر هوچی مین ویتنام پرداختند. آگوستان^۳ و همکاران (۲۰۱۶) به ارزیابی جابه‌جایی زمین در جاکارتا از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های رادار پرداختند. دکلارک^۴ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از تصاویر ERS، Envisat، TerraSAR-X و Sentinel-1 و روش تداخل‌سنجی راداری، میزان جابه‌جایی عمودی در بروکسل را مورد ارزیابی قرار دادند. ژائو^۵ و همکاران (۲۰۱۷) به تجزیه و تحلیل میزان فرونشست در دشت شرقی پکن براساس ۴۷ تصویر TerraSAR-X SAR از سال ۲۰۱۰م تا سال ۲۰۱۵م پرداختند. معتق^۶ و همکاران (۲۰۰۸) میزان فرونشست در بخش غربی دشت تهران و دشت ورامین در جنوب شرق تهران را به ترتیب ۳۶ سانتی‌متر و ۲۳ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند آمیغ پی و همکاران (۱۳۸۸) فرونشست دشت یزد - اردکان را با استفاده از روش تداخل‌سنجی، ۱۲ سانتی‌متر در سال ارزیابی کرده‌اند. شریفی‌کیا (۱۳۹۱) با استفاده از تصاویر راداری نرخ و دامنه فرونشست دشت نوق - بهرمان را حدود ۳۰ سانتی‌متر در سال برآورد کرده است. صالحی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از تصاویر ماهواره Envisat و روش تداخل‌سنجی راداری، فرونشست دشت مهیار را ۸/۲ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. صفاری و جعفری (۱۳۹۴) با استفاده از ۲۴ تصویر راداری ماهواره Envisat روش تحلیل سری مکانی SBAS، میانگین سالانه فرونشست در دشت کرج - شهریار را ۱۳۶ میلی‌متر برآورد کرده‌اند. حشمی و المدرسی (۱۳۹۴) به شناسایی فرونشست در دشت نیشابور با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری پرداختند. نتایج بیانگر میانگین فرونشست ۷/۹۱ سانتی‌متر طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰م، می‌باشد. بابایی و همکاران (۱۳۹۵) نرخ فرونشست دشت قزوین با استفاده از آنالیز تصاویر راداری را حداکثر ۳۰ تا ۳۵ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. شیرانی و خوش‌باطن (۱۳۹۵) میزان جابه‌جایی زمین لغزش سمیرم را با استفاده از تصاویر راداری ماهواره Envisat، حدود ۸ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند.

۱. Osmanoglu

۲. Dinho

۳. Agustan

۴. Declercq

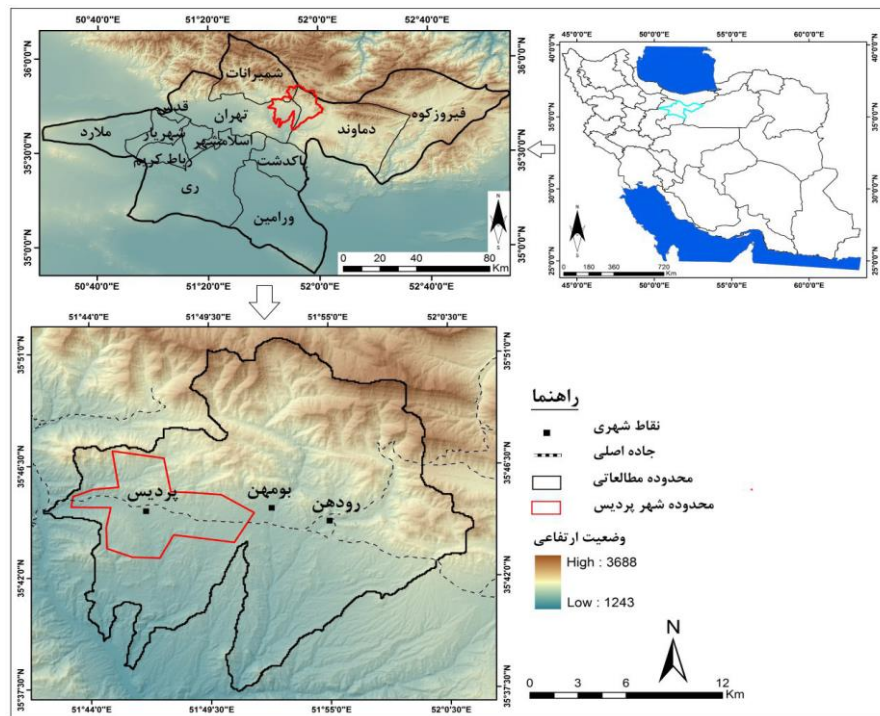
۵. Zhou

۶. Motagh



احمدی و همکاران (۱۳۹۷) میزان فرونشست دشت خرمدره را ۳۵ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. با توجه به موارد مذکور، هدف از تحقیق حاضر ارزیابی میزان جابه‌جایی عمودی در منطقه مورد مطالعه و شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش است.

منطقه مورد مطالعه: حوضه پردیس واقع در بخش شرقی تهران به مساحت کلی ۴۱۲ کیلومتر، در موقعیت جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۱ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۳۵ درجه ۳۷ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. این حوضه از سمت شمال به رشته کوه‌های البرز، از جنوب به سد ماملو، از شرق به شهرستان دماوند و از غرب به منطقه جاجرود محدود می‌شود و شهرهای پردیس، رودهن و بومهن را دربرگرفته است (شکل ۱). در پژوهش حاضر، شهر جدید پردیس با تأکید بیشتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. شهر جدید پردیس یکی از شهرهای اقماری کلان‌شهر تهران می‌باشد که در ۲۵ کیلومتری شرق تهران، در امتداد جاده ترانزیتی تهران - آمل واقع شده است. تاریخچه شکل‌گیری شهرهای جدید در ایران به دهه ۶۰ برمی‌گردد که در چهارچوب و فرایند مکان‌یابی شهرهای جدید مصوب ۱۳۶۸ شورای عالی معماری و شهرسازی ایران احداث ۲۸ شهر جدید در اطراف شهرهای بزرگ برای جذب سرریز جمعیت کلان‌شهرها طراحی شد (Ziari, 2005). این شهر همراه با شهرهای رودهن و بومهن و بسیاری از نقاط با تمرکز جمعیتی کوچک‌تر در حدواسط منطقه‌ای از جاجرود تا دماوند، تشکیل یک منطقه شهری داده است (بازنگری طرح جامع پی‌کده، ۱۳۹۰). در سرشماری عمومی نفوس مسکن سال ۱۳۷۵، در محدوده شهر پردیس خانوار و جمعیتی گزارش نشده است. در سرشماری سال ۱۳۸۵، جمعیت شهر پردیس ۲۵۳۶۰ نفر بوده که در سرشماری سال ۱۳۹۵ جمعیت آن به ۷۳۳۶۳ رسیده است. شهر پردیس شامل یازده فاز است که هشت فاز آن مسکونی و فازهای دیگر تحقیقاتی، صنعتی و گردشگری است (شرکت عمران شهر جدید پردیس، ۱۳۹۳). بخش عمده جمعیت در دو فاز اول و دوم استقرار یافته‌اند؛ به‌نحوی که در حال حاضر حدود ۴۰,۰۰۰ نفر جمعیت در این دو فاز اسکان یافته‌اند (بازنگری طرح جامع پی‌کده، ۱۳۹۰). این منطقه در دامنه‌های جنوبی البرز، واقع شده است و نیمه شمالی منطقه به واحد کوهستان منتهی می‌شود. از نظر ژئومورفولوژی، بخش زیادی از محدوده مطالعاتی را واحد کوهستان و اراضی تپه ماهوری در برگرفته و از نظر اقلیمی نیز، براساس تقسیمات اقلیمی دمارتن و آمبرژه شهر پردیس در اقلیم نیمه‌خشک سرد تا سرد مدیترانه‌ای واقع شده است.



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه و شهر جدید پردیس

زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی: حوضه مورد مطالعه در بخش جنوبی البرز مرکزی واقع شده است. دامنه‌های البرز به دلیل قرارگیری در کمربند زلزله، بارش زیاد در برخی نقاط و توپوگرافی متنوع، زمین لغزش‌های زیادی داشته است (Aghdam et al, 2016). علاوه بر آن سازند کرج در بخش‌های شمالی حوضه مورد مطالعه، به دلیل فرسایش ناپایدار شده و مستعد انواع حرکات توده‌ای است (Farrokhnia et al, 2011). بستر شهر پردیس در بخش‌های شمالی بر روی توف، سنگ‌های آتشفشانی و اگلومرا و رخنمون‌های کوچکی از ریوداسیت‌های پس از ائوسن گسترش یافته است. رخنمون توف‌های سازند کرج در این محدوده به طول ۱۰ کیلومتر مشاهده شده است. در قسمت‌های جنوبی، بستر شهر بر روی نهشته‌های پلیوکواترنری سازند هزار دره، رسوبات آبرفتی و مخروط‌افکنه‌ای کواترنری معادل سازند کهرپزک و پادگانه‌های رودخانه‌ای جوان توسعه یافته است (احتشامی، ۱۳۹۵).

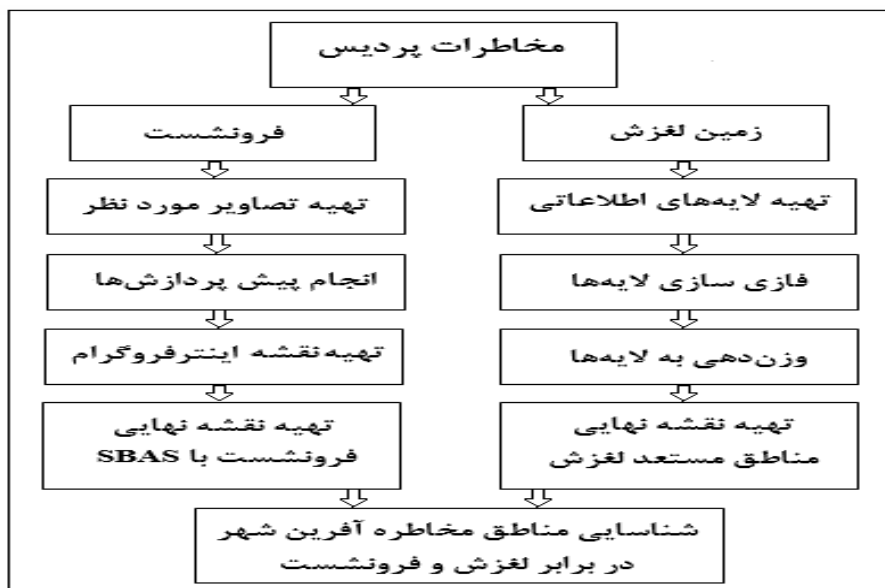
از لحاظ ژئومورفولوژی، این منطقه به پنج واحد کوهستان، تپه ماهور، دشت، دشت سیلابی و پادگانه آبرفتی تقسیم شده است. واحد کوهستان از ارتفاع ۲۱۰۰ تا ۳۶۸۱ متر قرار دارد.



بخش‌های جنوبی این واحد، نواحی پایکوهی است که سکونتگاه‌های زیادی بر روی آن استقرار یافته، این واحد پتانسیل بالایی از نظر حرکات دامنه‌ای دارد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از اطلاعات کتابخانه‌ای، آماری و تصاویر استفاده شده است. اطلاعات تصویری مورد استفاده در این پژوهش شامل نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، مدل‌های رقومی ارتفاعی ۱۰ متر سازمان نقشه‌برداری و ۳۰ متر سنجده SRTM، تصاویر ماهواره لندست و تصاویر راداری سنتینل ۱ است. این تحقیق از دو بخش تشکیل شده است. که در بخش اول با استفاده از روش سری زمانی SBAS، میزان جابه‌جایی عمودی منطقه برآورد شده است و همچنین در بخش دوم نیز با استفاده از روش‌های منطق فازی و AHP، مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش شناسایی شده است (شکل ۲). در ادامه به تشریح مراحل کار پرداخته شده است:



شکل ۲: فلوچارت بخش‌ها و مراحل تحقیق

الف- ارزیابی میزان جابه‌جایی سطح زمین: داده‌های راداری مورد استفاده در این پژوهش جهت تعیین میزان جابه‌جایی سطح زمین، شامل ۲۷ تصویر ماهواره سنتینل (Sentinel 1-A)، نوع IW^1 ، فرمت SLC^2 ، پلاریزاسیون VV طی بازه زمانی ۲۰۱۶/۰۱/۰۶ تا ۲۰۱۸/۱۲/۲۱ (جدول ۱) می‌باشد. این تصاویر از سازمان فضایی اروپا^۳ (<https://scihub.copernicus.eu>) اخذ شده‌اند. سنجنده سنتینل ۱، در حال حاضر از دو سکوی A و B تشکیل شده است. سکوی A، در آپریل سال ۲۰۱۴ م و سکوی B در سال ۲۰۱۶ م به فضا پرتاب شده‌اند (Yague-Martinez, et al, 2016). سنتینل ۱، تجهیزات یک سنجده SAR، با مرکز فرکانس ۵/۴۰۵ GHz که در باند C، قرار دارد را حمل می‌کند. این سنجنده، قابلیت اخذ تصاویر راداری به‌صورت پلاریزاسیون VV , HH , VH , HV را دارد و می‌تواند هر ۱۲ روز یکبار از کل کره زمین تصویربرداری کند، در صورت استفاده از هر دو سکوی A و B، توان تفکیک زمانی و یا به عبارتی بازدید (Revisit) به ۶ روز خواهد رسید. زاویه برخورد این سنجنده ۲۹٫۱ الی ۴۶ درجه است (قنادی و همکاران، ۱۳۹۷). سنجنده سنتینل ۱، چهار نوع تصویر را $(SM)^4$ ، $(IW)^5$ ، $(EW)^6$ ، $(WM)^7$ با رزولوشن‌های مختلف و مناطق تحت پوشش متفاوت، فراهم می‌کند. حالت IW ، از سه زیر نوار $IW1$ ، $IW2$ ، $IW3$ تشکیل شده است و اصلی ترین نوع تصویربرداری سنتینل ۱، با اهداف تداخل سنجی راداری می‌باشد. پهنای نوار تصویر برداری در این حالت ۲۵۰ کیلومتر می‌باشد. توان تفکیک مکانی (رزولوشن) در این نوع تصویربرداری ۵ متر در امتداد آزمون و ۲۰ متر در امتداد رنج می‌باشد (www.Earth.esa.int). تصویربرداری حالت IW ، از تکنیک $TOPSAR^9$ استفاده می‌شود (قنادی و همکاران، ۱۳۹۷). تصاویر نوع IW TOPS مهم‌ترین نوع تصاویر برای پایش و مانیتورینگ سطح بزرگی از زمین و

۱. Interferometric wide Swath

۲. Single Look Complex

۳. European Space Agency

۴. Strip Map

۵. Interferometric wide Swath

۶. Extra Wide Swath

۷. Wave Mode

۸. Sub Swath

۹. Terrain Observation by Progressive Scans SAR



همچنین مناطق ساحلی است. طول موج تصاویر سنتینل ۵/۵۴۷ سانتی‌متر و ارتفاع مدار آن‌ها بین ۶۹۸ کیلومتر تا ۷۲۶ کیلومتر می‌باشد (Yagüe-Martínez et al, 2016).

جدول ۱: مشخصات تصاویر مورد استفاده جهت ساخت اینترفروگرام

ردیف	ماهواره	تاریخ	ردیف	ماهواره	تاریخ	Beam	نوع تصویر	Polarization
۱	Sentinel-1 A	۲۰۱۶/۰۱/۰۶	۱۵	Sentinel-1 A	۲۰۱۷/۰۸/۰۴	IW	SLC	VV
۲	Sentinel-1 A	۲۰۱۶/۰۲/۲۳	۱۶	Sentinel-1 A	۲۰۱۷/۰۹/۰۹	IW	SLC	VV
۳	Sentinel-1 A	۲۰۱۶/۰۴/۱۱	۱۷	Sentinel-1 A	۲۰۱۷/۱۱/۲۰	IW	SLC	VV
۴	Sentinel-1 A	۲۰۱۶/۰۵/۲۹	۱۸	Sentinel-1 A	۲۰۱۷/۱۲/۲۶	IW	SLC	VV
۵	Sentinel-1 A	۲۰۱۶/۰۷/۰۴	۱۹	Sentinel-1 A	۲۰۱۸/۰۱/۳۱	IW	SLC	VV
۶	Sentinel-1 A	۲۰۱۶/۰۸/۰۹	۲۰	Sentinel-1 A	۲۰۱۸/۰۳/۰۸	IW	SLC	VV
۷	Sentinel-1 A	۲۰۱۶/۰۹/۲۶	۲۱	Sentinel-1 A	۲۰۱۸/۰۵/۱۹	IW	SLC	VV
۸	Sentinel-1 A	۲۰۱۶/۱۱/۱۳	۲۲	Sentinel-1 A	۲۰۱۸/۰۶/۲۴	IW	SLC	VV
۹	Sentinel-1 A	۲۰۱۶/۱۲/۳۱	۲۳	Sentinel-1 A	۲۰۱۸/۰۷/۳۰	IW	SLC	VV
۱۰	Sentinel-1 A	۲۰۱۷/۰۲/۰۵	۲۴	Sentinel-1 A	۲۰۱۸/۰۹/۰۴	IW	SLC	VV
۱۱	Sentinel-1 A	۲۰۱۷/۰۳/۱۳	۲۵	Sentinel-1 A	۲۰۱۸/۱۰/۱۰	IW	SLC	VV
۱۲	Sentinel-1 A	۲۰۱۷/۰۴/۱۸	۲۶	Sentinel-1 A	۲۰۱۸/۱۱/۱۵	IW	SLC	VV

۱۳	Sentinel-1 A	۲۰۱۷/۰۵/۲۴	۲۷	Sentinel-1 A	۲۰۱۸/۱۲/۲۱	IW	SLC	VV
۱۴	Sentinel-1 A	۲۰۱۷/۰۶/۲۹	-	-	-	IW	SLC	VV

روش تداخل سنجی تفاضلی راداری: به منظور ارزیابی میزان جابه‌جایی، روش تداخل سنجی راداری، یکی از مؤثرترین روش‌ها محسوب می‌شود. تداخل سنجی تفاضلی (D-InSAR) یک تکنیک سنجش از دور راداری می‌باشد که اختلاف فاز بین دو تصویر SAR را اندازه‌گیری می‌کند. این اختلاف فاز نشان‌دهنده میزان جابه‌جایی رخ داده شده در سطح زمین در جهت پرواز (line of sight) می‌باشد (Rosen et al, 2000).

هر تداخل‌نما^۱ حاصل ضرب تصویر اصلی (Master) در مختلط مزدوج تصویر پیرو (Slave) است، به عبارتی فاز تداخل‌نما، اختلاف فاز زوج تصویر و دامنه آن حاصل ضرب دامنه‌های زوج تصویر است. با توجه به اینکه هر تداخل‌نما، شامل منطقه بزرگی با هم‌بستگی پایین است، بنابراین نتایج آن قابل اعتماد نیست به همین دلیل روش تداخل سنجی راداری به تنهایی نمی‌تواند تغییرات صورت‌گرفته را نشان داد. در این راستا برای حل مشکل، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که یکی از این روش‌ها، روش تحلیل سری زمانی SBAS می‌باشد (Zhou, 2013) که در این پژوهش از این روش استفاده شده است.

ب- پتانسیل سنجی وقوع زمین لغزش: به منظور پتانسیل سنجی وقوع زمین لغزش از مدل منطق فازی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شده است. در منطق بولین، عضویت یک عنصر در یک مجموعه به صورت صفر (عدم عضویت) و یک (عضویت) بیان می‌شود؛ اما در منطق فازی، قطعیت موجود در منطق بولین وجود ندارد و میزان عضویت یک عنصر در یک مجموعه، با مقدار در بازه یک (عضویت کامل) تا صفر (عدم عضویت کامل) تعریف می‌شود (رابطه ۱).

$$A = \{x_1, \mu_A(x) | x \in X\} \quad 0 \leq \mu_A(x) \leq 1 \quad \text{رابطه ۱:}$$

۱. Interferogram



درجه عضویت‌پذیری، اجتماع و اشتراک، متمم، ضرب، جمع، گاما توان‌های اساسی این مدل تلفیقی محسوب می‌شوند. درجه عضویت معمولاً با یک تابع عضویت بیان می‌شود که شکل تابع می‌تواند به صورت خطی، غیرخطی، پیوسته و یا ناپیوسته باشد (لی و بیسواجیت^۱، ۲۰۰۷). در تحقیق حاضر، هشت لایه اطلاعاتی (شیب، جهت شیب، ارتفاع، گسل، رودخانه، راه ارتباطی، لیتولوژی، کاربری اراضی) براساس نظر کارشناسان و با توجه به پتانسیلی که زیرلایه‌ها در وقوع زمین لغزش دارند، فازی‌سازی شده‌اند. انتخاب لایه‌ها نیز براساس وضعیت منطقه و نظرات کارشناسان (۵ متخصص ژئومورفولوژی) صورت گرفته است (جدول ۲). با توجه به اینکه، همه لایه‌های فازی شده ارزش و اهمیت یکسانی ندارند، پس از فازی‌سازی لایه‌ها، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) وزن‌دهی شده‌اند. درنهایت وزن به‌دست‌آمده از طریق مدل AHP، روی تمامی معیارها اعمال شد. سپس در محیط GIS روی شبکه مرجع محدوده مورد مطالعه تمامی فاکتورها از شکل برداری به رستری تبدیل شدند. سپس با استفاده از عملگر گامای فازی ۰/۷ نقشه‌های فازی شده با هم تلفیق شدند و نقشه نهایی حاصل شد.

جدول ۲: ارزش‌گذاری لایه‌های اطلاعاتی مدل فازی

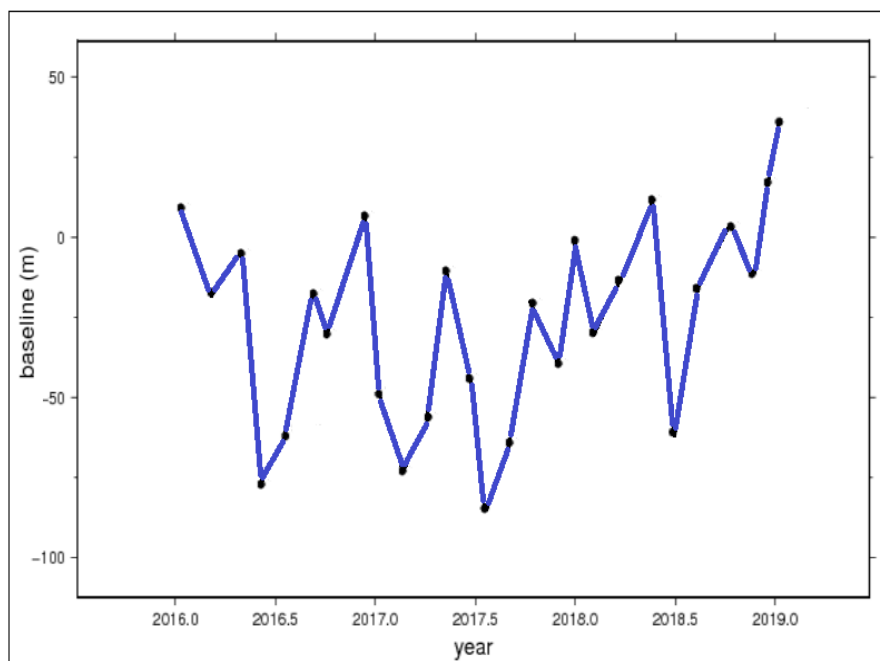
	لایه‌های اطلاعاتی	ارزش نزدیک به یک	ارزش نزدیک به صفر
۱	شیب	پرشیب	کم شیب
۲	جهت شیب	جهت شمالی	جهت جنوبی
۳	ارتفاع	ارتفاع بالا	ارتفاع پایین
۴	گسل	مناطق نزدیک به خطوط گسلی	مناطق دورتر از خطوط گسلی
۵	رودخانه	مناطق نزدیک به رودخانه	مناطق دورتر از رودخانه
۶	راه ارتباطی	مناطق نزدیک به جاده	مناطق دورتر از جاده
۷	لیتولوژی	سازندهای سخت	سازندهای سست
۸	تراکم کاربری اراضی	مناطق کم تراکم	مناطق پرتراکم

۱. Lee & Biswajeet

نتایج و بحث

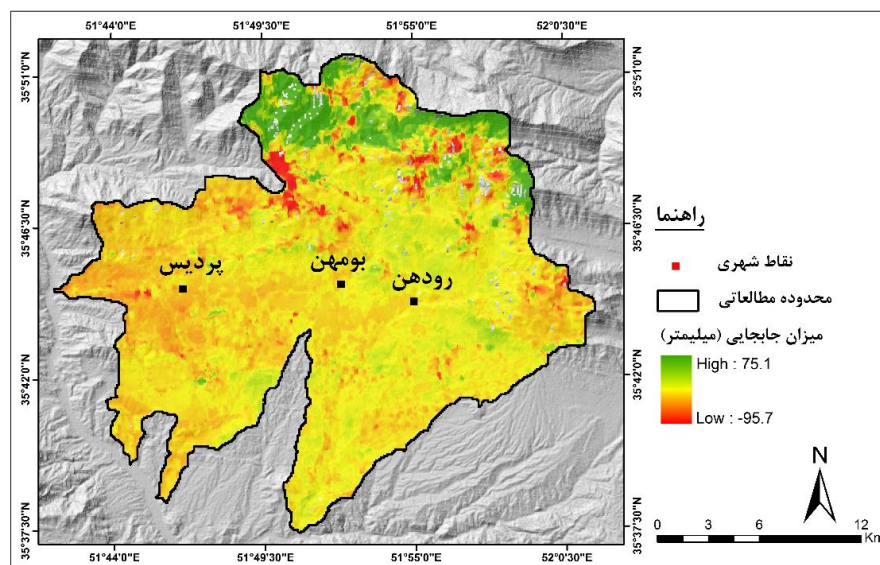
الف) ارزیابی میزان جابه‌جایی زمین با استفاده از روش تحلیل سری زمانی SBAS: به منظور ارزیابی میزان جابه‌جایی زمین، در محدوده مطالعاتی از روش SBAS استفاده شده است. اولین مرحله برای اجرای این روش، انتخاب زوج تصاویر راداری جهت تولید اینترفروگرام است. انتخاب زوج تصاویر بر مبنای حداقل بیس لاین زمانی تصاویر و درجهت کاهش عدم هم‌بستگی صورت گرفته است (شکل ۳). به عبارت دیگر، انتخاب تصاویر به صورتی است که هم‌بستگی مکانی و زمانی اینترفروگرام‌های ایجاد شده را بالا ببرد. مرحله بعد، مرحله بازایی فاز^۱ است که این مرحله مستقیماً توسط اینترفروگرام صورت می‌پذیرد (Lanari, et al, 2007). روش SBAS، عدم هم‌بستگی در مناطقی که میزان جابه‌جایی بالاست، کاهش می‌دهد (Chaussard et al, 2014). در این روش، فقط تداخل‌نگارهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخل‌نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه‌جایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود (Dong et al, 2014).

^۱ .unwrapping



شکل ۳: نمودار زوج تصاویر انتخابی (هر نقطه نشان دهنده یک تصویر انتخاب شده و هر خط یک اینترفروگرام)

پس از انتخاب زوج تصاویر و بازیابی فاز، از طریق نرم افزار GMT در سیستم عامل LINUX، اینترفروگرام‌های مناسب انتخاب شده است. پس از تهیه اینترفروگرام با استفاده از روش تحلیل سری زمانی SBAS، نقشه میزان جابه‌جایی منطقه تهیه شده است (شکل ۴). بررسی نقشه میزان جابه‌جایی بیانگر این است که ارتفاعات شمالی محدوده مطالعاتی دارای بالآمدگی بوده و مناطق پایین‌دست که منطبق بر واحد دشت و مخروط افکنه‌ها هستند و شهرهای پردیس و رودهن و بومهن روی آن‌ها قرار دارند، به ترتیب دارای ۳۵-، ۳۱- و ۲۹- میلی‌متر در سال فرونشست بوده‌اند. به‌طور کلی، منطقه مورد مطالعه سالانه به‌طور میانگین ۷۵/۰۱ میلی‌متر بالآمدگی و ۹۵/۷- میلی‌متر فرونشست داشته است.



شکل ۴: نقشه میزان جابه‌جایی منطقه

ب) پتانسیل سنجی مناطق مستعد وقوع حرکات دامنه‌ای در محدوده مطالعاتی: قرارگیری محدوده مورد مطالعه در دامنه‌های جنوبی البرز، پیش‌روی نواحی سکونتگاهی به سمت مناطق پرشیب، نبود پوشش گیاهی کافی و... سبب شده است؛ تا این منطقه در معرض خطر زمین‌لغزش قرار داشته باشد. مطابق موارد مذکور بعضی از مناطق پتانسیل بالایی در وقوع لغزش دارند، به همین دلیل تفکیک مناطق از لحاظ پایداری و ناپایداری و استعداد اراضی به زمین‌لغزش در اجرای پروژه‌های عمرانی به‌ویژه برای ساخت و سازهای شهری مهم است (عابدینی، ۱۳۹۳)، بر این اساس یکی از اهداف تحقیق حاضر، پتانسیل سنجی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در محدوده مطالعاتی است. با توجه به اهداف مورد نظر، در این تحقیق ابتدا لایه‌های اطلاعاتی مورد نظر تهیه شده است و سپس با استفاده از مدل منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش شناسایی شده است. متغیرهای مورد نظر جهت پتانسیل سنجی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش، شامل متغیرهای ژئومورفولوژی (شیب، جهت شیب، ارتفاع، رودخانه)، متغیرهای زمین‌شناسی (لیتولوژی، گسل) و متغیرهای انسانی (کاربری اراضی، راه ارتباطی) است. در ادامه به تشریح متغیرهای مورد نظر پرداخته شده است:

– متغیرهای ژئومورفولوژی: متغیرهای ژئومورفولوژی از عوامل اصلی در تعیین مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش محسوب می‌شود. از جمله متغیرهای ژئومورفولوژی، شیب است که در صورت



مهیابودن سایر شرایط، توده لغزشی در اثر نیروی ثقل به طرف پایین دامنه حرکت خواهد کرد. با توجه به کوهستانی بودن منطقه، بخش عمده‌ای از منطقه را مناطق پرشیب دربرگرفته است که پتانسیل بالایی جهت وقوع لغزش دارند. یکی دیگر از متغیرهای مورد استفاده، جهت شیب است. جهت شیب از جمله عواملی است که به‌طور غیرمستقیم، منعکس‌کننده لایه‌هایی مانند ضخامت خاک، رطوبت و غیره می‌باشد. درواقع، با توجه به اینکه دامنه‌های شمالی انرژی کم‌تری از دامنه‌های جنوبی دریافت می‌کنند، میزان رطوبت در این دامنه‌ها بیش‌تر از سایر دامنه‌ها است و به همین دلیل عمل زیرشویی و گسیختگی سطح لغزش بیشتر از دامنه‌های جنوبی صورت می‌گیرد (لانگ^۱، ۲۰۰۸). این محدوده در دامنه‌های جنوبی البرز واقع شده است، بنابراین بخش عمده‌ای از جهات منطقه را جهات جنوبی دربرگرفته است که نسبت به جهات شمالی پتانسیل کم‌تری جهت وقوع زمین لغزش دارند. عامل ارتفاعی به‌عنوان یکی دیگر از مهم‌ترین متغیرهای ژئومورفولوژیکی محسوب می‌شوند که در وقوع زمین لغزش نقش مهمی دارد. به ازای هر صد متر افزایش ارتفاع، کاهش ۰/۶ درجه سانتی‌گراد دما را خواهیم داشت و متعاقباً متغیرهای مربوط به آن مانند پوشش گیاهی، خاک و نوع هوازدگی تغییر می‌یابند و درنتیجه به همان میزان، لغزش و اصول حاکم بر آن نیز تغییر می‌یابد (امینی، ۱۳۹۲). محدوده مطالعاتی، دارای ارتفاع قابل توجهی است، به‌طوری که حداقل ارتفاع آن ۱۲۴۳ متر و حداکثر آن نیز ۳۶۸۸ متر می‌باشد که این عامل سبب شده است که مناطق شمالی محدوده مطالعاتی دارای اقلیم مرطوب‌تری نسبت به مناطق جنوبی آن باشد و پتانسیل بیش‌تری جهت وقوع زمین لغزش داشته باشد. یکی دیگر از متغیرهای ژئومورفولوژی که در وقوع زمین لغزش مؤثر است، رودخانه است. رودخانه از طریق شست‌وشوی پای دامنه‌ها، شرایط لازم را برای وقوع زمین لغزش فراهم می‌کند و به‌همین دلیل یکی از مناطقی که در معرض وقوع زمین لغزش قرار دارد، مناطق مجاور رودخانه‌هاست. بنابراین مناطق نزدیک به رودخانه دارای ارزش نزدیک به یک و مناطق دورتر دارای ارزش نزدیک به صفر هستند.

- **متغیرهای زمین‌شناسی:** یکی از فاکتورهای مهمی که در وقوع زمین لغزش مؤثر است، وضعیت زمین‌شناسی منطقه شامل نوع لیتولوژی و خطوط گسل است. جنس زمین و نوع سنگ‌ها از عوامل مهم و تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش هستند. هرچقدر که سنگ‌ها سست‌تر و همچنین از کانی‌های مختلف‌تری تشکیل شده باشند و دارای درز و شکاف فراوان‌تری باشند پتانسیل بالاتری جهت وقوع لغزش دارند. علاوه بر لیتولوژی، خطوط گسلی نیز به‌عنوان یکی دیگر از متغیرهای زمین‌شناسی مؤثر محسوب می‌شود که تأثیر زیادی در ناپایداری دامنه‌ها دارد. مناطق نزدیک به خط گسل پتانسیل بالایی جهت حرکات دامنه‌ای دارند.

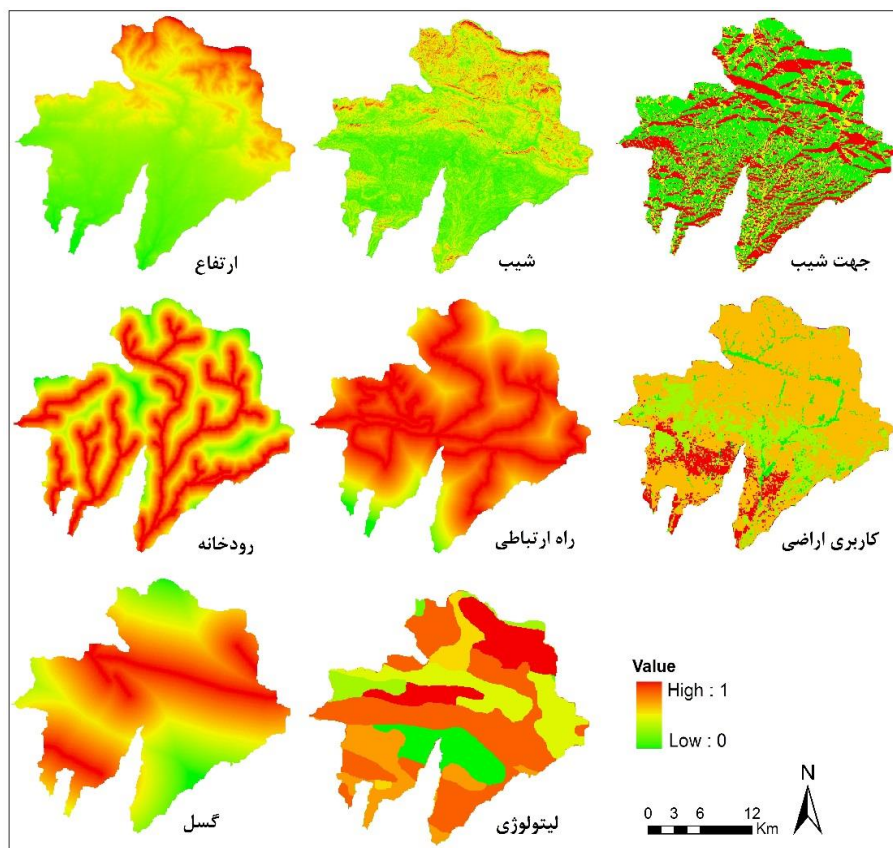
- **متغیرهای انسانی:** عوامل انسانی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل تشدیدکننده در وقوع زمین لغزش هستند. در این تحقیق از متغیرهای راه ارتباطی و کاربری اراضی به‌عنوان عوامل تشدیدکننده زمین لغزش استفاده شده است. راه‌های ارتباطی در ایجاد و توسعه حرکات دامنه‌ای نقش مهمی دارند. تأثیر راه‌های ارتباطی به‌خصوص در مناطقی که دارای لیتولوژی سستی هستند بسیار تأثیرگذار است (رجایی، ۱۳۸۲).

با توجه به اهمیت و تأثیر مستقیم خطوط ارتباطی در وقوع زمین لغزش، از لایه راه ارتباطی به‌عنوان یکی از متغیرهای مؤثر در تعیین مناطق مستعد وقوع زمین لغزش استفاده شده است. نوع کاربری اراضی نیز می‌تواند در تشدید یا کاهش حرکات دامنه‌ای مؤثر باشد. انواع کاربری اراضی در رابطه با محافظت از شیب‌ها و پایداری و عدم پایداری عملکرد متفاوتی دارند. به‌طوری که مناطقی که دارای پوشش گیاهی متراکم باشند، میزان لغزش کمتر از مناطق بدون پوشش خواهد بود. همچنین ممکن است بعضی از کاربری‌های غیراصولی خصوصاً در مناطق پرشیب سبب تشدید حرکات دامنه‌ای شود (یلسن ۱، ۲۰۰۷م). با توجه به اینکه محدوده مطالعاتی در دامنه‌های البرز واقع شده است، بخش عمده‌ای از کاربری‌های این منطقه را مراتع دربرگرفته است.

- **فازی‌سازی لایه‌های اطلاعاتی:** پس تهیه لایه‌های اطلاعاتی، به‌منظور انجام پهنه‌بندی، لایه‌های اطلاعاتی فازی‌سازی شده است (شکل ۵). فازی‌سازی براساس اهداف تحقیق صورت گرفته است، به‌طوری که برای لایه‌های شیب و ارتفاع، مناطق دارای ارتفاع و شیب بیشتر ارزش نزدیک به یک و مناطق کم ارتفاع و کم شیب ارزش نزدیک به صفر دارند. جهت شیب شمالی نیز دارای ارزش نزدیک به یک و جهت جنوبی دارای ارزش نزدیک به صفر هستند. نوع لیتولوژی بر حسب میزان مقاومت در برابر لغزش ارزش‌گذاری شده است و مناطق سست‌تر امتیاز بیشتری



دارند، زیرا مستعد وقوع لغزش هستند. برای کاربری اراضی نیز نواحی دارای پوشش گیاهی ضعیف امتیاز بیشتری دارند. همچنین مناطق نزدیک به خطوط ارتباطی، رودخانه و گسل نیز ارزش نزدیک به یک و مناطق دورتر ارزش نزدیک به صفر دارند.



شکل ۵: نقشه فازی شده لایه‌های اطلاعاتی

- **وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی:** با توجه به اینکه ارزش و اهمیت لایه‌های اطلاعاتی یکسان نیست، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به لایه‌های اطلاعاتی وزن داده شده است. امتیازدهی به معیارها از طریق پرسشنامه و دیدگاه‌های کارشناسان امر صورت گرفته است. برای انجام محاسبات از نرم‌افزار expert choice استفاده شد و پس از به‌دست آوردن

وزن‌های نهایی هر کدام از معیارها (شکل ۶)، در نرم افزار Arc GIS بر روی لایه‌های اطلاعاتی

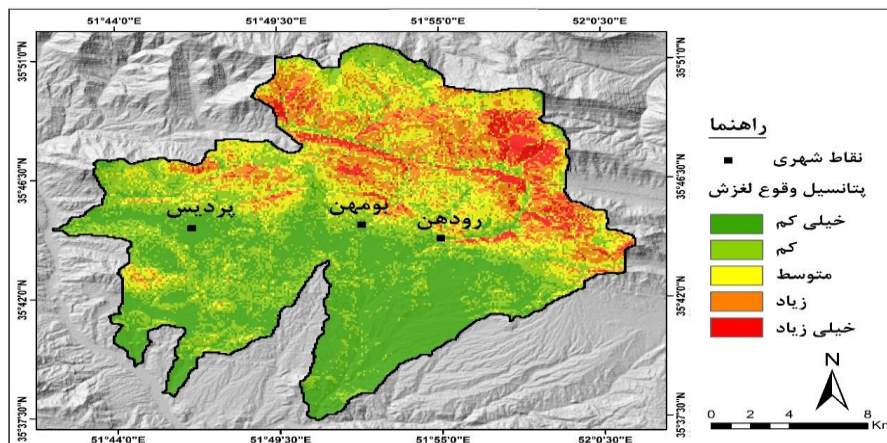


اعمال شدند.

شکل ۶: ارزش‌گذاری لایه‌های اطلاعاتی براساس مدل AHP

-تلفیق و ترکیب لایه‌های اطلاعاتی: پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی، وزن به‌دست آمده بر روی لایه‌ها اعمال شده است و درنهایت لایه‌های اطلاعاتی با هم تلفیق شده و نقشه نهایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش تهیه شده است. برای اجرای مدل منطق فازی با توجه به اهداف مورد نظر، از عملگر گامای فازی استفاده شده است (رابطه ۱). برای عملگر گاما پس از تلفیق و ارزیابی هرکدام درنهایت از گامای ۰/۷ استفاده شده است و به‌منظور ارزیابی و کیفی کردن آن، نقشه مذکور به ۵ طبقه کلاسه‌بندی شده است که در شکل ۷ نشان داده شده است.

$$\mu = (\mu \text{ fuzzy sum})^{\gamma} \times (\mu \text{ fuzzy product})^{1-\gamma} \quad \text{رابطه ۱:}$$



شکل ۷: نقشه مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در محدوده مطالعاتی

براساس نقشه مناطق مستعد وقوع زمین لغزش، محدوده مطالعاتی پتانسیل بالایی جهت وقوع زمین لغزش دارد، درواقع فراهم بودن شرایط سبب شده است تا بخش زیادی از محدوده در کلاس‌های با پتانسیل بالای وقوع زمین لغزش قرار گیرند. براساس جدول ۳ و شکل شماره ۷، بیش از ۴۰ درصد از محدوده در معرض وقوع زمین لغزش قرار دارد. ارزیابی نقشه نهایی بیانگر این است که محدوده حاشیه شهرهای رودهن، بومهن و به‌خصوص پردیس در معرض وقوع زمین لغزش قرار دارد. درواقع در طی سال‌های اخیر، روند توسعه نواحی سکونتگاهی سبب شده است تا سکونتگاه‌های زیادی به سمت مناطق شمالی شهر پردیس پیش‌روی داشته باشند که همین امر سبب شده تا بخشی زیادی از این نواحی در مناطق مستعد وقوع زمین لغزش قرار گیرند.

جدول ۳: مساحت و درصد مساحت طبقات مستعد وقوع زمین لغزش

طبقه	کم	خیلی کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
مساحت (کیلومترمربع)	۱۳۷/۳	۱۰۵	۸۰/۶	۶۱/۷	۲۲/۴
درصد مساحت	۳۳/۷	۲۵/۸	۱۹/۸	۱۵/۲	۵/۵

نتیجه‌گیری

درمورد حرکات دامنه‌ای و همچنین میزان جابه‌جایی زمین، تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. تحقیقات پیشین عمدتاً به صورت جداگانه به هریک از موضوعات پرداخته‌اند. اما در این تحقیق با توجه به موضوع و اهداف مورد نظر، ابتدا با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، میزان جابه‌جایی عمودی منطقه اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از مدل منطق‌فازی و AHP مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش شناسایی شده و سپس نتایج با هم مقایسه شده است. نتایج ارزیابی میزان جابه‌جایی (فرونشست و بالا آمدگی) صورت گرفته در منطقه براساس روش سری زمانی SBAS بیانگر این است که محدوده مطالعاتی طی دوره زمانی سه‌ساله، از تاریخ ۲۰۱۶/۰۱/۰۶ تا ۲۰۱۸/۱۲/۲۱ م به میزان ۹۵/۷- میلی‌متر فرونشست و ۷۵/۱ میلی‌متر بالاآمدگی داشته است. فرونشست‌ها مربوط به نواحی جنوبی محدوده مطالعاتی و منطبق بر واحد مخروط افکنه و دشت‌ها می‌باشد. شهرهای پردیس، بومهن و رودهن واقع در این بخش، به ترتیب دارای ۳۵-، ۳۱- و ۲۹- میلی‌متر فرونشست طی دوره زمانی مذکور بوده‌اند. در نیمه شمالی محدوده مطالعاتی که در دامنه جنوبی البرز مرکزی واقع شده، بالاآمدگی رخ داده است که می‌توان عوامل تکتونیکی را در این امر دخیل دانست. برای پهنه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش از مدل منطق فازی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP استفاده شده است. نتایج حاصله از پهنه‌بندی نهایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش بیانگر این است که نیمه شمالی محدوده مطالعاتی، علاوه بر فعال بودن از لحاظ تکتونیکی، از نظر متغیرهای ژئومورفولوژی از جمله شیب و ارتفاع و رطوبت مناسب و تشدید آن‌ها بر اثر عوامل انسانی به ویژه در نواحی کوهستانی شهر پردیس، پتانسیل بالایی جهت وقوع زمین‌لغزش دارد.

مجموع نتایج حاصل از نقشه میزان جابه‌جایی منطقه با استفاده از روش تحلیل سری‌زمانی SBAS و نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش ترکیبی Fuzzy و AHP بیانگر ناپایداری زمین در دامنه‌های شمالی حوضه می‌باشد. براساس نقشه پتانسیل سنجی وقوع زمین‌لغزش، بیش از ۴۰ درصد محدوده مطالعاتی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را در کلاس متوسط به بالا دارد که حدود ۷۰ درصد از این مناطق ناپایدار حاصل از تکنیک راداری هم پوشانی دارند. بنابراین بخش‌های شمالی محدوده، با جابه‌جایی عمودی قابل توجهی نیز همراه هستند. بر این اساس، می‌توان گفت که این مناطق هم از نظر تکتونیکی (داشتن بالاآمدگی) و هم از نظر ژئومورفولوژی پتانسیل زیادی جهت وقوع حرکات دامنه‌ای دارند. در نتیجه رشد شهرنشینی و گسترش شهرک‌های جدید در دامنه‌های ناپایدار بخش‌های شمالی شهر جدید پردیس، با توجه به اینکه در نزدیکی محل تلاقی گسل‌های فعال نیز می‌باشد، می‌تواند زمینه‌ساز وقوع زمین‌لغزش



در این منطقه باشد. در نتیجه شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش برای توسعه آتی شهر پردیس، ضروری به نظر می‌رسد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی، داده‌های حاصل از نتیجه روش تحلیل سری زمانی SBAS با داده‌های حاصل از اندازه گیری GPS، اعتبارسنجی و مقایسه شوند.

منابع

- ابراهیم زاده، عیسی؛ قرخلو، مهدی؛ شهریاری، مهدی. (۱۳۸۸). *تحلیلی بر نقش شهر جدید پردیس در تمرکز زدایی از مادرشهر تهران*، جغرافیا و توسعه، شماره ۱۳، صص ۲۷-۴۶.
- احتشامی معین‌آبادی، محسن. (۱۳۹۵). *خطر گسیختگی سطحی در محدوده شهر پردیس، استان تهران*، لزوم رعایت حریم گسل در توسعه شهری، زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۹، صص ۴۸-۶۲.
- احمدی، نعیمه؛ موسوی، زهرا؛ معصومی، زهرا. (۱۳۹۷). *مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن*، سنجش از دور و GIS/ایران، سال ۳، شماره ۱۰، صص ۳۳-۵۲.
- بابایی، ساسان؛ موسوی، زهرا؛ روستایی، مه‌آسا. (۱۳۹۵). *آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین*، علوم و فنون نقشه برداری، سال ۵، شماره ۴، صص ۹۵-۱۱۱.
- پورکرمانی، محسن؛ آرین، مهران. (۱۳۸۳). *مروری بر مطالعات لرزه‌خیزی گستره تهران*، مجله زمین‌شناسی، دوره ۱۰، شماره ۱، صص ۲۱-۲۷.
- پی‌کده، مهندسین مشاور. (۱۳۸۴). *بازنگری طرح جامع شهر جدید پردیس*، جلد اول و دوم، تهران.
- پیلهور، علی‌اصغر؛ رضایی‌خوشان، رضا. (۱۳۹۵). *تحلیل امنیت و ناپایداری در شهرهای جدید با استفاده از (مورد: شهر جدید پردیس)*. *مجله پژوهش‌های جغرافیای سیاسی*، سال ۱، شماره ۲، صص ۱۷۳-۲۰۲.
- حشمی، شیماء؛ المدرسی، سیدعلی. (۱۳۹۴). *مدل‌سازی فرونشست دشت نیشابور با استفاده از سری‌های زمانی و تکنیک DINSAR*، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۲۶، شماره ۱، صص ۶۷-۸۴.
- حیدری، شهریار؛ خالقی بابایی، امید. (۱۳۹۴). *مروری بر گسل‌های فعال شهر تهران*. *کنفرانس ملی مهندسی معماری، عمران و توسعه شهری*.

- رفیعی، جعفر؛ صدیقی، مرتضی. (۱۳۹۵). تعیین میزان فرونشست بر پایه تداخل‌سنجی راداری (InSAR) در میدان نفتی شهر، همایش ملی ژئوماتیک.
- شرکت عمران شهر جدید پردیس (۱۳۹۳)، شهر جدید پردیس.
- شریفی‌کیا، محمد. (۱۳۹۱). تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری در دشت نوق-بهرمان، برنامه‌ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)، دوره ۱۶، شماره ۳، صص ۵۵-۷۶.
- شیرانی، کوروش؛ خوش‌باطن، محبوبه. (۱۳۹۵). بررسی و پایش زمین‌لغزش فعال با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (مطالعه موردی: زمین‌لغزش نقل، سمیرم)، فصلنامه کوثرنری ایران، دوره ۲، شماره ۱، صص ۵۳-۶۵.
- صالحی، رضا؛ غفوری، محمد؛ لشکری پور، غلامرضا؛ دهقانی، مریم. (۱۳۹۲). بررسی فرونشست دشت مهبیار جنوبی با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، دوره ۳، شماره ۳، صص ۴۷-۵۷.
- صفاری، امیر، جعفری، فرهاد؛ سنجش مقدار و پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، مطالعه موردی: دشت کرج - شهریار؛ فصلنامه علمی - پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران، شماره ۴۸، صص ۱۷۵-۱۸۸.
- عابدینی، موسی؛ قاسمیان، بهاره؛ شیرزادی، عطاالله. (۱۳۹۳). مدل‌سازی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل آماری رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: استان کردستان، شهرستان بیجار)، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۳۷، صص ۸۵-۱۰۲.
- قنادی، محمدامین؛ عنایتی، حمید؛ خصالی؛ الهه؛ انصاری، امیر. (۱۳۹۷). تولید مدل رقومی ارتفاعی زمین با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری، فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۷، شماره ۱۰۸، صص ۱۰۹-۱۲۲.
- مسعودیان، ابوالفضل؛ کاویانی، محمدرضا. (۱۳۸۷)، اقلیم‌شناسی ایران، دانشگاه اصفهان، چاپ اول.
- نجفی، اسماعیل. (۱۳۹۴). مدل‌سازی ژئومورفولوژیکی احداث پل‌ها در مسیل‌های شهری (مطالعه موردی کلانشهر تهران)، رساله دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران.
- Aghdam I N, Morshed M H, Pradhan B. (2016). Landslide susceptibility mapping using an ensemble statistical index (Wi) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model at Alborz Mountains(Iran), Environmental Earth Science , 75, 533.



- Agustan S, Albertus IT. (2016). Measuring Deformation in Jakarta through Long Term Synthetic Aperture Radar(SAR) Data Analysis, Earth and Environmental Science. 47 (1), pp 012022
- Chaussard E, Wdowinski S, Cano C E, Amelung F. (2014). Lands subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series, Remote Sensing of Environment, 140, PP 94-106.
- Chen M, Tomás R, Li Zh, Motagh M, Li T, Hu L, Gong H, Li X, Yu J, Gong X. (2016). Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry, Remote Sens, 8(6), 468.
- Chengtai D. (1999). urban geomorphology in Chinese
- Declercq P, Walstra J, Gérard P, Pirard M E, Perissin D, Meyvis B, Devleeschouwer X. (2017). A Study of Ground Movements in Brussels (Belgium) Monitored by Persistent Scatterer Interferometry over a 25-Year Period, Geosciences 7(4). 115.
- Dinho, H., Le, V. T., Thuy, L. T. (2015). Mapping Ground Subsidence Phenomena in Ho Chi Minh City through the Radar Interferometry Technique Using ALOS PALSAR Data, Remote Sens, 7, 8543-8562.
- Dong S C, Samsonov S, Yin HW. (2014). Time-Series Analysis of Subsidence Associated with Rapid Urbanization in Shanghai, China Measured with SBAS InSAR Method. Environmental Earth Sciences, 72 (3): 677–691.
- Farrokhnia A, Pirasteh S, Pradhan B, Pourkermani M, Arian M. (2011). A recent scenario of mass wasting and its impact on the transportation in Alborz Mountains, Iran using geo information technology, Aeabiab Journal of Geosciences, 4(7-8), pp 1337-1349.
- Galloway D. Hudnut K, Ingebritsen S, Phillips S, Peltzer GF, Rosen P. (1998), Detection of aquifer system compaction and land subsidence using Interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California, Journal of Water Resource Research, Journal of water resource research , 34(10): 2573-2583.

- Hanssen, RF. (2001). Radar interferometry: data interpretation and error analysis (vol.2). Springer Science and Business Media.
- Hong Y R, Adler F, Huffman G. (2007). An experimental global prediction system for rainfall triggered landslides using satellite remote sensing and geospatial datasets. IEEE Transactions on Geoscience and Remote, 45: 1671–1680.
- Khavaninzadeh N, (2011), Using RADAR interferometry for landslide studying. MSc Thesis, Faculty of Engineering, Tehran University, 145 pages (in Persian).
- Kimura H, Yamaguchi Y. (2000). Detection of landslide Areas Using Satellite Radar Interferometry, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 66(3). Pp 337-344.
- Lanari R, Casu F, Manzo M, Lundgren P. (2007). Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep, A case study of the Hayward fault, California, Remote Sensing of Environment, 109, pages 20-28 .
- Long NT. (2008). Landslide susceptibility mapping of the mountainous area in a Luoi district, Thua thien Hue Province, Vietnam. Universiteit Brussel, Faculty of Engineering, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering. PhD Thesis. p .229.
- Marfai MA, King L. (2007). Monitoring Land Subsidence in Semarang, Indonesia, Environmental Geology, 53(3), pages 651-659.
- Motagh M, Djamour Y, Walter TR, Wetzel HU, Zschau, J, Arabi S. (2007). Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, leveling and GPS, Geophys. J. Int, vol. 168, pp. 518-526
- Motagh M, Walter TR, Sharifi M A, Feilding E, Schenk A, Anderssohn J, Zschau J. (2008), Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation, Geophysical Research Letter.
- Osmanoglu B, Dixon TH, Wdowinski S, Cabral–Cano E, Jiang Y. (2011). Mexico city subsidence observed with persistent Scatterer InSAR , International journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13(1), pp 1-12.



- Pradhan B, Lee S. (2007). Utilization of Optical Remote Sensing Data and GIS Tools for Regional Landslide Hazard Analysis Using an Artificial Neural Network Model, *Earth Science Frontiers*, 14(6), pages 143-151.
- Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, Li F K, Madsen SN, Rodriguez E. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *IEEE Proceedings*, 88, 333–376
- Sadeghi Z, Valadan Z, Dehghani M. (2013). An Improved Persistent Scatterer Interferometry for Subsidence Monitoring in the Tehran Basin, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* (6) 3 , pp 1571-1577.
- Xue YQ, Zhang Y, Ye SJ, Wu JC, Li QF. (2005). Land subsidence in China. *Environ Geol* 48:713–720
- Yagüe-Martínez N, Prats-Iraola P, González FR, Brcic R, Shau R, Geudtner D, Eineder M, Bamler R. (2016). Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4), pages 2220 – 2234.
- Zhou CH, Gong H, Chen B, Li J, Gao M, Zhu F, Chen W. (2017). InSAR Time-Series Analysis of Land Subsidence under Different Land Use Types in the Eastern Beijing Plain, China, *Remote Sens*, 9(4), 380.
- Zhou Z. (2013). The applications of InSAR time series analysis for monitoring long-term surface change in peatlands, University of Glasgow.
- Ziari k. (2005). New towns planning, Samt press. Tehran.