

ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل رگرسیون خطی (LINEAR) و جغرافیایی وزنی (GWR) در پهنه‌بندی خطر اندازه زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۶۹ رودبار-منجیل ($W_w=7.3$) بر اساس پارامترهای کنترل‌کننده

علی اصغر قائدی و انانی^۱، غلامرضا شعاعی*^۲، مهدی زارع^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۲

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۲

چکیده

مطالعه حاضر به بازنگری و تکمیل پایگاه داده زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۶۹ رودبار-منجیل ($W_w=7.3$)، با استفاده از مطالعات پیشین، تفسیر استریوسکوپی عکس‌های هوایی و بررسی تصاویر ماهواره‌ای (قبل و بعد از زلزله) پرداخته است. تعداد ۲۲۳ زمین‌لغزش پیوسته (به صورت چندضلعی و نقاط مرکزی) با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM, 12.5m) توسط نرم افزار GIS، ترسیم شده‌اند. پهنه‌بندی کمی خطر اندازه (مساحت و حجم) زمین‌لغزش‌ها بر اساس پارامترهای کنترل‌کننده، توسط مدل رگرسیون خطی خودکار (LINEAR) و رگرسیون جغرافیایی وزنی (GWR) اجرا شد. پارامترهای کنترل‌کننده شامل گروه ژئوتکنیکی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی)، توپوگرافی (ارتفاع، شیب دامنه، جهت شیب لغزش و انحنای شیب) و لرزه‌ای (فاصله از سطح گسیختگی گسل و رومرکز زلزله، شدت آریاس و بیشینه شتاب زمین) هستند. نتایج نشان دادند که پهنه‌بندی کمی مدل GWR هم‌خوانی بیشتری با اندازه زمین‌لغزش‌های موجود در مقایسه با مدل LINEAR دارند. مساحت (LA) و حجم زمین‌لغزش‌ها (LV) نسبت به پارامترهای لرزه‌ای و توپوگرافی توزیع چندمندی دارند. از این رو مدل غیرخطی GWR، با توجه به اعمال اثرات محلی پارامترهای کنترل‌کننده بر اندازه زمین‌لغزش‌ها، نسبت به مدل رگرسیون خطی پیشینی دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

کلید واژه‌ها: زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، مدل رگرسیون خطی، رگرسیون جغرافیایی وزنی، رودبار-منجیل.

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران shoaei@modares.ac.ir

۳. استاد پژوهشکده زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

زلزله ۱۳۶۹ رودبار-منجیل ($M_s \sim 7.7$)، در رشته کوه البرز میانی واقع در شمال ایران رخ داد. این رخ داد موجب کشته شدن ۱۳۰۰۰-۴۰۰۰۰ نفر، زخمی شدن ۵۰۰۰۰ نفر و تخریب بیش از ۷۰۰ روستا در طول ۱۲۰ کیلومتری منطقه شد (شکل ۱) (Tatar and Hatzfeld, 2009). تعداد زمین لغزش‌های پیوسته از ۷۶ (Haeri, 1996) تا ۱۴۰ (Shoaei and Sassa, 1993) شمرده شده است. همچنین تعداد ۱۲۰ زمین لغزش پیوسته توسط حافظی مقدس و کمک‌پناه (۱۳۷۲) در منطقه رودبار- منجیل همراه با مختصات، نقشه برداری شد (شکل 4c).

اگرچه تقریباً هر دهه در ایران زلزله‌های ویرانگر و به تبع آن زمین لغزش‌های بزرگی رخ داده و منجر به تلفات فاجعه بار شده است، مطالعات زیادی در مورد تأثیر پارامترهای کنترل کننده بر اساس پایگاه داده کامل از زمین لغزش‌ها صورت نگرفته است.

خداشاهی و همکاران (Khodashahi et al., 2018) از روش کیفی CAMEL برای ارزیابی زمین لغزش ناشی از زلزله ۱۳۶۹ رودبار-منجیل استفاده کردند و نقشه پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه (۶۵۰ کیلومتر مربع) را تهیه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش CAMEL می‌تواند عملکرد بهتری را در پیش‌بینی و پهنه‌بندی زمین لغزش‌های حاکی لرزه‌ای نسبت به لغزش‌های سنگی لرزه‌ای نشان دهد. در حالی که بخش قابل توجه‌ای از زمین لغزش‌های زلزله رودبار- منجیل، شامل بلوک سنگی، ریزش بهمن سنگی، ریزش سنگی و ریزش بلوکی سنگی هستند (Komak Panah and Hafezi Moghadas, 1993).

معماریان (۱۳۹۶) با استفاده از پایگاه داده‌های لرزه‌ای ایران (به عنوان مثال، زلزله ۱۳۶۹ رودبار-منجیل) به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش ناشی از زلزله با استفاده از روش منطق فازی پرداخت. وی پارامتر جدیدی به نام آزمون نسبی -به دست آمده از مفهوم اثر سایت توپوگرافی و جهت انتشار موج، نسبت به جنبه شیب- برای ارزیابی توزیع زمین لغزش ناشی از زلزله تعریف کرد. مهدوی فر و معماریان (MahdaviFar and

Memarian, 2013) خطر لغزش ناشی از زلزله ۱۳۶۹ رودبار- منجیل ($M_w=7.3$) را در چهار ضلعی زمین‌شناسی رستم آباد (۶۵۰ کیلومتر مربع) با استفاده از نرم‌افزار GIS ارزیابی کردند و یک پهنه‌بندی لغزشی ارائه دادند. (Rajabi et al. (2013) با استفاده از رویکرد (Del Gaudio et al. (2003) و مدل Newmark (1965) موقعیت و شرایط فعال شدن لرزه‌ای شیب در کل ایران را ارزیابی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که در منطقه رشته کوه‌های البرز، شتاب‌هایی تا حدود $0.1g$ ، با احتمال ۱۰ درصد منجر به لغزش‌های لرزه‌ای نوع منسجم طی ۵۰ سال می‌شوند.

بسیاری از مطالعات خارجی، رابطه کیفی بین الگوی توزیع فضایی زمین لغزش‌ها و پارامترهای کنترل کننده لرزه‌ای، توپوگرافی و زمین شناسی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند (Keefer, 1984; Jibson and Keefer; 1989, Meunier et al., 2007, 2008; Tatar et al., 2010; Huang and Li, 2009; Xu et al., 2009; Yin et al., 2009; Chigira et al., 2010; Qi et al., 2010; Dai et al., 2011; Gorum et al., 2011; Xu and Xu, 2012; Xu, et al., 2015; Marc et al., 2016, 2017; Li et al., 2019). بررسی رابطه کمی بین اندازه زمین لغزش‌ها (مساحت یا حجم) بر اساس پارامترهای کنترل کننده لرزه‌ای و زمین شناسی صورت گرفته است (Guthrie and Evans, 2004; Guzzetti et al., 2009; Guo and Hamada, 2013; Xu et al., 2016; Guo et al., 2017; al., 2018; Ma et al., 2019; Ma et al., 2019; Shao et al., 2019; Valagussa et al., 2019).

همچنین مطالعات داخلی پارامترهای مؤثر بر وقوع زمین لغزش‌ها را بررسی کرده‌اند (سوری و همکاران، ۱۳۹۲؛ شریعت جعفری، ۱۳۸۷، طلائی و شریعت جعفری، ۱۳۸۶).

با توجه به اینکه پیش‌بینی اندازه زمین لغزش‌ها (LA, LV) بر اساس پارامترهای کنترل کننده، نقش مهمی در ارزیابی حساسیت پذیری و پهنه‌بندی کمی خطر لغزش‌های لرزه‌ای دارد؛ از این رو رویکردهای آماری تحلیل زمین لغزش‌ها بر اساس ترکیبی از پارامترهای کنترل کننده در پهنه‌بندی کمی خطر استفاده می‌گردند (He and Beighley; 2008, Piacentini et al., 2012; Martino et al., 2019). رویکرد آماری به روش‌های دو متغیره یا چند متغیره طبقه‌بندی می‌شوند (Baeza and Corominas, 2001; Bai et al., 2014; Chalkias et

نقشه‌های اندازه (مساحت زمین‌لغزش، LA و حجم زمین‌لغزش، LV) و توزیع (درصد منطقه‌ای لغزش، LAP% و تعداد زمین‌لغزش‌ها بر مساحت، LND) زمین‌لغزش‌ها در نرم افزار GIS تهیه گردید. در گام دوم، پیش‌بینی و پهنه‌بندی اندازه (LA, LV) زمین‌لغزش‌ها بر اساس پارامترهای لرزه‌ای، ژئوتکنیکی و توپوگرافی، توسط مدل رگرسیون جغرافیایی وزن دهی شده (GWR) و رگرسیون چندگانه خطی خودکار (LINEAR)، به ترتیب با استفاده از نرم افزار GIS و (IMB و SPSS Co. Ver. 21)، صورت گرفت و در گام سوم نقشه‌های پهنه‌بندی کمی (حساسیت‌پذیری مساحت و حجم لغزش‌های لرزه‌ای) در کل منطقه رودبار منجیل، بر اساس مدل LINEAR و GWR ارائه شدند و با اندازه زمین‌لغزش‌های رخ داده (در زلزله ۱۳۶۹) مقایسه گردیدند تا میزان هم‌خوانی آنان با واقعیت مشخص گردد.

۲. منطقه و محیط تکتونیکی

منطقه مورد مطالعه $37^{\circ}00'N$ - $36^{\circ}35'$ و $49^{\circ}00'E$ - $49^{\circ}50'E$ در منطقه لرزه‌نگاری البرز غربی - یکی از مهم‌ترین مناطق لرزه‌ای پویا در ایران - واقع شده است. در تاریخ ۳۱ خرداد ۱۳۶۹، زلزله‌ای برابر $M_w=7.3$ در منطقه رودبار-منجیل در جنوب شهر رشت رخ داد. زلزله سه قطعه مجزا را به عنوان گسل لرزه‌ای گسیخته کرد: قطعه بکلور در غرب، قطعه کبته در قسمت مرکزی و بخش زرد-گلی در شرق که در یک چارچوب درون پله‌ای WNW-ESE قرار گرفته‌اند (شکل ۱) (Berberian et al., 1992). این تحول در قسمت بکلور، کبته و زرد-گلی در یک صفحه تقریباً عمودی یا شیب دار با مکانیسم چپگرد قرار گرفته‌اند (Berberian et al., 1992). مکانیسم لغزش به دلیل غالب بودن گسل‌های معکوس در این محل پیش‌بینی نشده بود. پس لرزه‌های رخ داده پس از روزها، مخلوطی از حرکت لغزشی چپ‌گرد و معکوس را در صفحه‌ای با روند NW - SE نشان داد (Gao and Wallace, 1995).

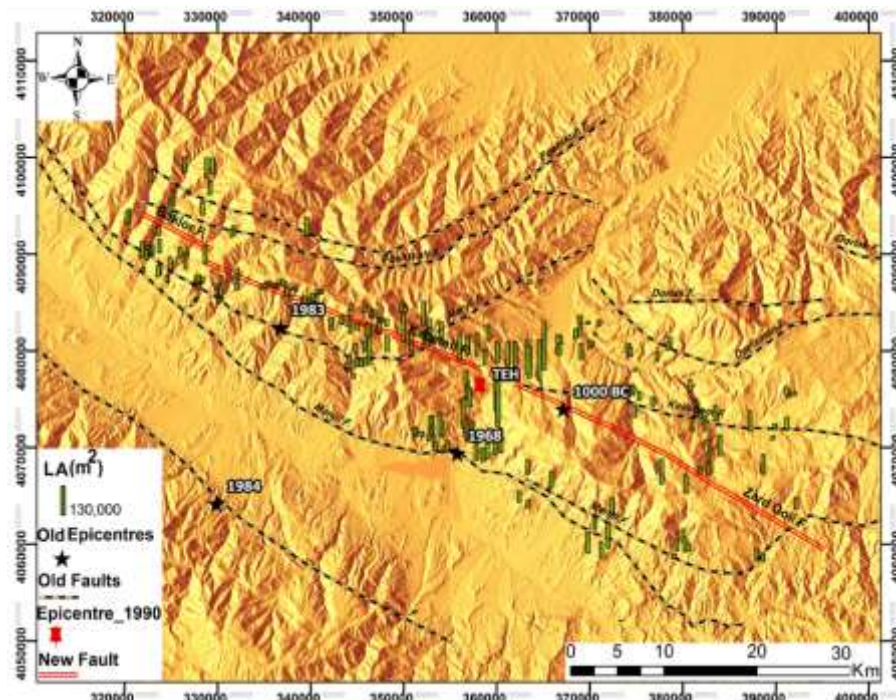
منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، ۲۵۰۰ کیلومتر مربع در امتداد ۸۰ کیلومتر طول گسل و کانون لرزه‌ای به مختصات $49^{\circ}24'36.00''E$ - $36^{\circ}49'12.00''N$ (بر اساس مرکز لرزه‌نگاری

(al., 2014a; Kavzoglu et al., 2014; Youssef et al., 2015a تجزیه و تحلیل آماری چند متغیره به طور عمده توسط مدل‌های رگرسیون عمومی خطی و رگرسیون لجستیک (LR) به طور گسترده اعمال می‌شوند (Kavzoglu et al., 2014; Dagdelenler et al., 2015; Youssef et al., 2015b) که میزان تأثیر پارامترهای مؤثر بر وقوع زمین لغزش را برای کل منطقه ثابت می‌دانند؛ در حالی که مدل‌های رگرسیون محلی، مانند رگرسیون جغرافیایی وزنی (GWR)، تغییرات مکانی را نیز در پارامترهای کنترل‌کننده اعمال می‌کنند. در دهه گذشته، GWR در زمینه‌های مختلف فیزیکی (Du et al., 2014; Xu et al., 2015) مورد آزمایش قرار گرفته است. با این حال، استفاده از آن در مطالعه خطر لغزش بسیار محدود است. به طور خاص ایرنر و دوزگان (Erener and Düzgün, 2010) نتایج حاصل از دو مدل مختلف رگرسیون لجستیک و رگرسیون جغرافیایی - وزنی را جهت تخمین حساسیت لغزش در منطقه مورد مطالعه Romsdal و More نروژ ارزیابی و مقایسه کردند. آن‌ها با یافتن تفاوت بین نقشه‌های خروجی LR و GWR با زمین‌لغزش‌های مشاهده‌شده، عملکرد مدل GWR را معتبرتر یافتند. همچنین چالکیس و همکاران (Chalkias et al., 2014b) نتیجه گرفتند که GWR در مقایسه با مدل‌های سنتی رگرسیون عمومی، بهبود بالقوه‌ای در ارزیابی حساسیت به لغزش در شبه جزیره Peloponnese (یونان جنوبی) ارائه می‌دهد. علاوه بر این فویلیت و همکاران (Feuillet et al., 2014) مدل‌های رگرسیون لجستیک (LR) و محلی (GWR) را جهت بررسی غیر ثابت بودن پارامترهای زمینه ساز وقوع زمین‌لغزش‌ها در شمال ایسلند اجرا کردند.

هدف اصلی مطالعه حاضر، بررسی و مقایسه دو رویکرد آماری: رگرسیون چندمتغیره خطی و رگرسیون جغرافیایی وزنی (غیرخطی) در پهنه‌بندی کمی خطر اندازه (LA, LV) لغزش در منطقه رودبار-منجیل، بر اساس پارامترهای کنترل‌کننده با داده‌های واقعی زمین‌لغزش‌های رخ داده (در زلزله ۱۳۶۹) است. در اولین گام، بانک اطلاعاتی مربوط به زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۶۹ رودبار- منجیل بازنگری و جمع‌آوری شده است.

زرد-گلی گسل رودبار- منجیل و شکل 2b، عکس هوایی (۱:۴۵۰۰۰) رودبار- فتلک (توسط سازمان نقشه برداری ایران (۱۹۹۱) و تصاویر ماهواره‌ای زمین لغزش‌های رودبار و فتلک، بعد از زلزله ۱۳۶۹ را نشان می‌دهد.

ژئوفیزیک دانشگاه تهران) در نظر گرفته شده است. سه بخش اصلی پارگی سطح با خطوط دوگانه قرمز (از شمال غربی به جنوب شرقی) برچسب گذاری شده‌اند (Tatar and Hatzfeld, 2009) که پایه محاسبه در مطالعه حاضر هستند (شکل ۱). شکل 2a محل چند ضلعی زمین لغزش‌ها در بخش‌های کبته و



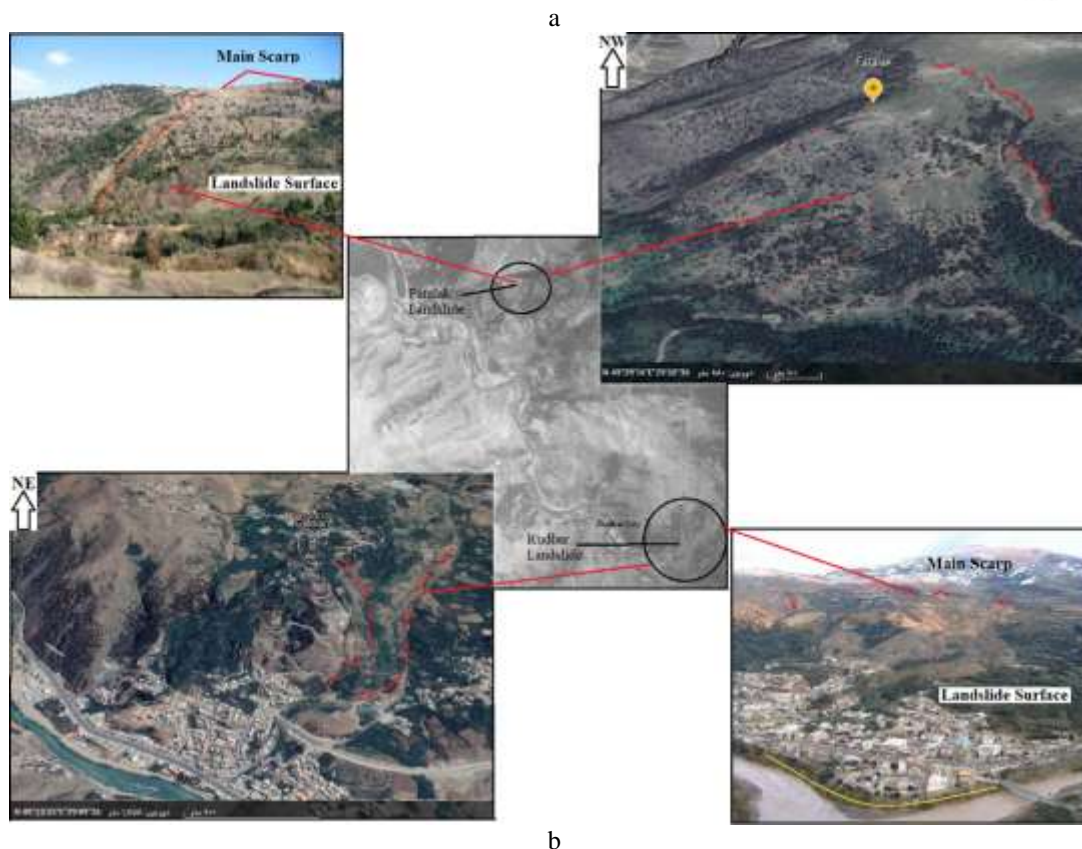
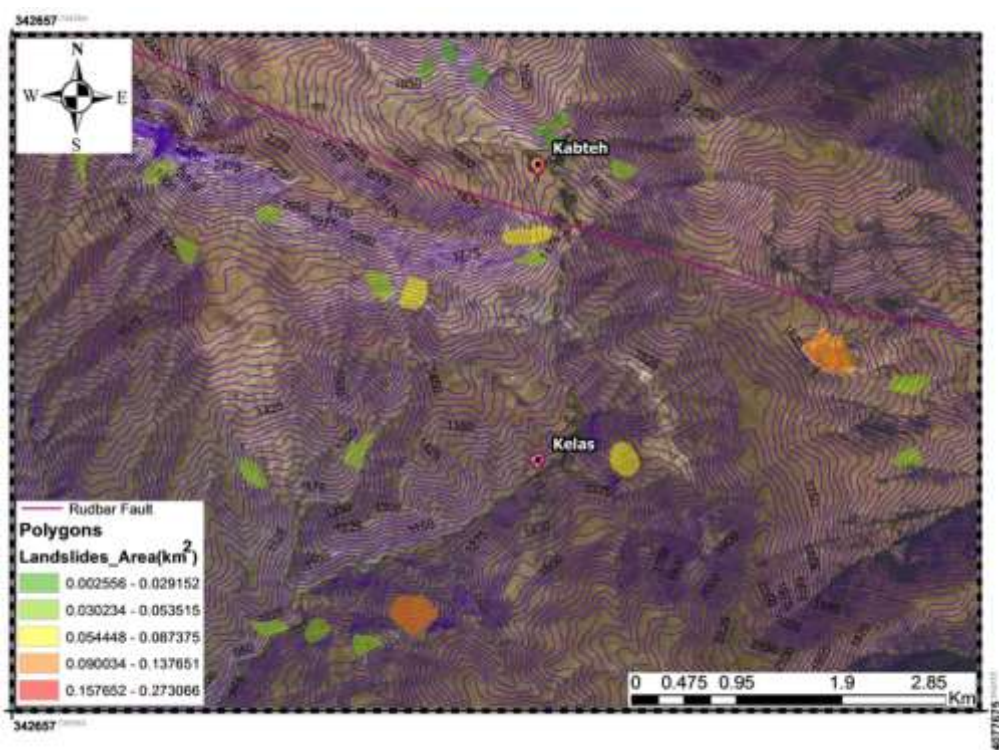
شکل ۱. نقشه منطقه رودبار-منجیل. گسل‌ها. پارگی سطح گسل بصورت یک خط قرمز مضاعف رسم شده است. بخش شمال غربی Baklor F.، بخش میانی Kabteh F. و بخش جنوب شرقی Zard Goli F. این اعداد تاریخ و کانون تقریبی زمین لرزه‌های تاریخی از Ambraseys and Melville (1983) and Berberian (1994) است. محل و مساحت (m^2) زمین لغزش قرار داده شده است.

۳. مواد و روش‌ها

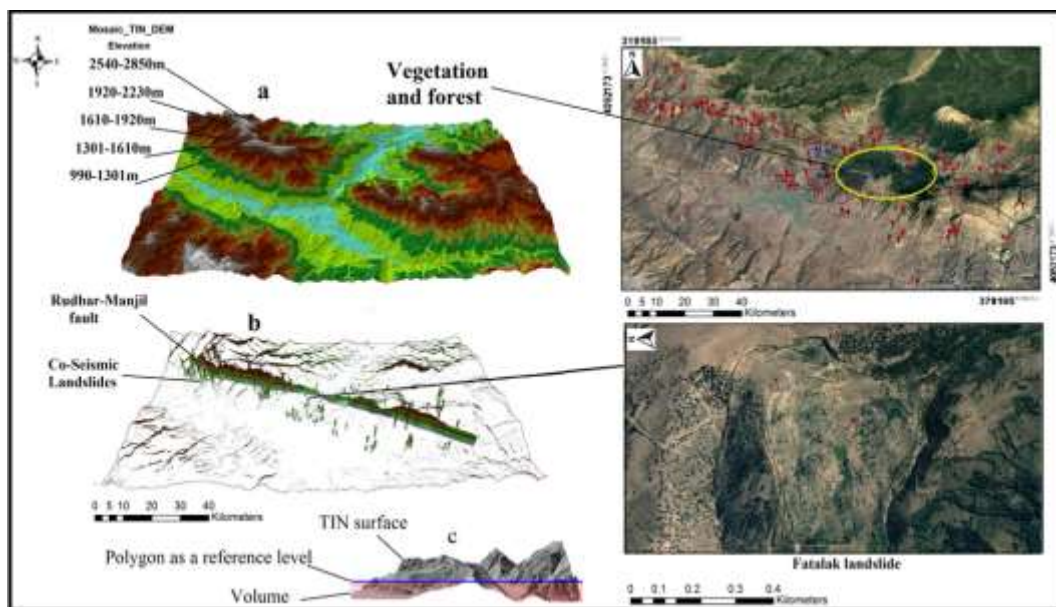
۳-۱. جمع‌آوری و تنظیم پایگاه داده‌ها

در مطالعات مختلف از تصاویر ماهواره‌ای جهت شناسایی زمین لغزش‌ها و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی آنان استفاده شده است (De La Ville et al., 2002; Van Westen et al., 2006; Petley, 2008; Youssef et al., 2009, 2016). در این مطالعه، ۱۳۳ زمین لغزش با استفاده از مطالعه استریو سکوپي از عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰، گرفته شده قبل و بعد از زلزله (۱۹۸۱ تا < ۱۹۹۰)، تهیه شده توسط مرکز نقشه برداری ملی ایران (NCC) و تصاویر ماهواره‌ای Google Earth ترسیم شد.

تجزیه و تحلیل آماری اندازه و توزیع فضایی بر اساس پایگاه اطلاعاتی زمین لغزش‌ها شکل می‌گیرد (Xu and Xu, 2012; Xu et al., 2015; Dai et al., 2011; Gorum et al., 2011, 2013; Harp et al., 2011). یک بانک اطلاعاتی جامع لغزش جهت درک مکانیسم لغزش و خطر زمین لغزش‌ها ضروری است (Xu et al., 2012, 2013a,b; Xu and Xu, 2012). در مطالعه حاضر یک بانک اطلاعاتی اصلاح شده از زمین لغزش‌های منسجم ناشی از زلزله ۱۳۶۹ رودبار-منجیل، فراهم گردیده است و روش‌های مختلف آماری جهت پهنه‌بندی خطر اندازه زمین لغزش‌ها بر اساس پارامترهای کنترل کننده بکارگرفته شده است.



شکل ۲. a. موقعیت چند ضلعی زمین‌لغزش‌ها (m²) در بخش‌های کبته از گسل رودبار-منجیل. b. عکس هوایی (ICC: 1/45000) و عکس‌های ماهواره‌ای Google Earth از منطقه رودبار-فتلک که زمین‌لغزش‌های، شهر رودبار و روستای فتلک بعد از زلزله ۱۳۶۹ را نشان می‌دهد.



شکل ۳. یک نمای پانوراما از مدل نهایی تجسم سه بعدی منطقه رودبار-منجیل. a: شبکه نامنظم مثلثی (TIN) بر روی یک مدل سطح دیجیتال با وضوح بالا (12.5m) DSM در هر سلول و عکس Google Earth منطقه رودبار-منجیل با لغزش‌های مشترک لرزه‌ای ناشی از زلزله رودبار-منجیل ۱۹۹۰، b: نمایی زیرسطحی از زمین لغزش‌ها و گسل لرزه‌ای، عکس Google Earth از فتلک، c: نمایش شماتیک محاسبه حجم زمین لغزش.

همچنین، ۹۰ زمین لغزش دیگر با مرزهای مشخص توسط پایگاه داده کمک‌پناه و حافظ مقدس، (۱۳۷۳) و داده‌های میدانی ترسیم شدند. شکل 4c نشان دهنده توزیع زمین لغزش‌ها به تفکیک ۱ (یافته جدید) و ۲ (پایگاه داده حافظی مقدس و کمک‌پناه، ۱۳۷۲) است. مکان‌ها و مرزهای دقیق ۲۲۳ رانش زمین در بستر GIS به صورت چند ضلعی و نقاط مرکزی اجرا شد (شکل ۳ و ۴). برای نمایش مورفولوژی منطقه مورد مطالعه، محل لغزش‌ها و خط گسل، پس از زلزله رودبار-منجیل ۱۳۶۹، با استفاده از پرونده شبکه بی‌نظم مثلثی (TIN) با خطوط

کانتور با فاصله ۱۲،۵ متر، یک مدل سطح دیجیتال (DSM) ایجاد گردید (شکل 3a-b). موقعیت خط گسل رودبار-منجیل به صورت یک صفحه عمودی با استفاده از نرم افزار ArcScene در داخل فایل TIN شبیه سازی شده است (شکل 3b). مساحت زمین لغزش‌ها (LA, m^2) با استفاده از چند ضلعی‌ها با مرزهای تعیین شده در داخل نرم افزار GIS استخراج شد. حجم زمین لغزش (LV, m^3) با ورود چند ضلعی‌های زمین لغزش، به عنوان صفحه مرجع، روی سطح

TIN در داخل نرم افزار GIS بدست آمد. حداکثر حجم به عنوان منطقه‌ای بین صفحه مرجع تعریف شده، توسط چند ضلعی‌ها و سطح TIN محاسبه شد (شکل 3c).

نقشه‌های توزیع فضایی و اندازه زمین لغزش‌ها توسط یک مدل ارتفاع دیجیتال (DEM) با وضوح 12.5m پس از زلزله روی پلتفرم GIS تهیه شده و جهت پهنه‌بندی خطر اندازه زمین لغزش‌ها براساس پارامترهای کنترل کننده، استفاده شده است (شکل 4a-b). سه گروه از پارامترهای کنترل شامل: توپوگرافی (ارتفاع، زاویه شیب، جنبه شیب و انحنا)، ژئوتکنیکی (زاویه اصطکاک، degree و چسبندگی، kPa) و پارامترهای لرزه‌ای (فاصله از کانون زلزله و گسیختگی سطح گسل، شدت آریاس Ia و شتاب بیشینه زمین PGA) می‌باشند. جهت تهیه نقشه حاوی ویژگی‌های توپوگرافی (زاویه شیب، جهت شیب، ارتفاع و انحنا شیب) از DEM قبل از زلزله با وضوح ۱۲،۵ متر استفاده شد. پارامترهای کنترل با توجه به نقاطی که در وسط چند ضلعی‌های زمین لغزش‌ها قرار دارند، مشابه روش دای و همکاران (Dai et al., 2011) بدون

همچنین، ۹۰ زمین لغزش دیگر با مرزهای مشخص توسط پایگاه داده کمک‌پناه و حافظ مقدس، (۱۳۷۳) و داده‌های میدانی ترسیم شدند. شکل 4c نشان دهنده توزیع زمین لغزش‌ها به تفکیک ۱ (یافته جدید) و ۲ (پایگاه داده حافظی مقدس و کمک‌پناه، ۱۳۷۲) است. مکان‌ها و مرزهای دقیق ۲۲۳ رانش زمین در بستر GIS به صورت چند ضلعی و نقاط مرکزی اجرا شد (شکل ۳ و ۴). برای نمایش مورفولوژی منطقه مورد مطالعه، محل لغزش‌ها و خط گسل، پس از زلزله رودبار-منجیل ۱۳۶۹، با استفاده از پرونده شبکه بی‌نظم مثلثی (TIN) با خطوط کانتور با فاصله ۱۲،۵ متر، یک مدل سطح دیجیتال (DSM) ایجاد گردید (شکل 3a-b). موقعیت خط گسل رودبار-منجیل به صورت یک صفحه عمودی با استفاده از نرم افزار ArcScene در داخل فایل TIN شبیه سازی شده است (شکل 3b). مساحت زمین لغزش‌ها (LA, m^2) با استفاده از چند ضلعی‌ها با مرزهای تعیین شده در داخل نرم افزار GIS استخراج شد. حجم زمین لغزش (LV, m^3) با ورود چند ضلعی‌های زمین لغزش، به عنوان صفحه مرجع، روی سطح

(Yang, 2013). همچنین، مسئله تصمیم‌گیری در مورد اینکه کدام زیر مجموعه پیش‌بینی‌کننده در یک مدل رگرسیون خطی گنجانده شود، پیچیده و مسلماً سخت‌ترین قسمت مدل‌سازی رگرسیون است (Ratner, 2012). در نتیجه پیش‌بینی‌ها با استفاده از روش‌های مناسب شناسایی (به عنوان مثال، روش گام به گام و زیر مجموعه‌های ممکن)، تخمین‌های دقیق‌تری را ارائه می‌دهند (Weisberg, 2005). با توجه به محدودیت‌ها و مشکلات رویه سنتی REGRESSION در این مطالعه از روش LINEAR در نرم افزار SPSS (نسخه 21، IMB) استفاده شده است. روش جدید LINEAR از نسخه ۱۹،۰ موجود است و از طریق چندین مکانیزم خودکار، روند تحلیل داده‌ها را تسریع می‌کند. رویه LINEAR از روش گام به گام استفاده می‌کند که با توجه به در دسترس بودن در برنامه‌های رایانه‌ای آماری، یک روش محبوب است. این رویکرد پس از در نظر گرفتن سهم حاشیه‌ای یک پیش‌بینی‌کننده برای سایر متغیرهای مدل، پارامتر مربوطه را وارد پیش‌بینی می‌کند یا کنار می‌گذارد (Yang, 2013). در این مطالعه مدل LINEAR با رویکرد گام به گام پیش‌رونده انجام شد تا یک مدل پهنه بر اساس آزمون R^2 بدست آید.

رگرسیون جغرافیایی وزن‌دهی شده (GWR): تحولات اخیر در تحلیل آمار فضایی محلی، نمایش‌های دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تری نسبت به مدل‌سازی‌های عمومی (چندمتغیره خطی) ارائه می‌دهد. رگرسیون وزنی جغرافیایی که یک روش مدل‌سازی محلی است، به دلیل توانایی آن در کشف تغییرات محلی در مناطق مورد مطالعه، از جذابیت خاصی برخوردار است (Brunsdon et al., 1996). مفهوم وزن دهی جغرافیایی توسط فُترینگهام و همکاران (Fotheringham et al., 2002) معرفی و با استفاده از رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) آغاز شد. روش پایه GWR رابطه بین یک متغیر مکانی وابسته (y) و یک یا مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل (xi) را بررسی می‌کند. سازوکار اساسی GWR متکی بر به دست آوردن معادلات رگرسیون جداگانه برای هر منطقه فضایی است (Kazar et al., 2005). در GWR:

$$Y = (\beta \times X)1 + \varepsilon \quad (1)$$

هیچی وزنی نسبت به تفاوت در حجم لغزش‌ها، به دست آمدند. پارامترهای لرزه‌ای (PGA) و (Ia) با استفاده از روابط (۹ و ۱۰) مطالعات مهدوی‌فر و همکاران (Mahdavifar et al., 2008) و قاسمی و همکاران (Ghasemi et al., 2009) بدست آمدند. آن‌ها فاکتورهای PGA و Ia را برای منطقه رودبار-منجیل و منطقه البرز توسعه دادند. یک نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برای تعیین واحدهای سنگ‌شناسی منطقه، از سازمان زمین‌شناسی ایران به دست آمد (شکل ۶). پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای سنگ‌شناسی (چسبندگی و زاویه اصطکاک) از مطالعات مهدوی‌فر (Mahdavifar, 2006) و معماریان، (۱۳۹۶) بدست آمده است.

۳-۲. روش شناسی

مساحت و حجم لغزش‌ها دو مشخصه قابل توجه هستند که خطرات ناشی از زمین‌لغزش‌های لرزه‌ای را تحت تأثیر پارامترهای مختلف نشان می‌دهند (Li et al., 2014; Parker et al., 2011). مطالعه حاضر با استفاده از دو مدل LINEAR و GWR، بر اساس پارامترهای کنترل‌کننده به پهنه‌بندی کمی خطر اندازه زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۶۹ رودبار-منجیل می‌پردازد: در گام اول، ارتباط پارامترهای کنترل‌کننده با اندازه (LA, m²) و (LV, m³)، توزیع (LND, N/km²) و (LAP%) زمین‌لغزش‌ها به طور جداگانه بررسی شده است. در گام دوم، پهنه‌بندی کمی خطر اندازه زمین‌لغزش‌ها با استفاده از مدل‌های آماری LINEAR و GWR صورت گرفته است و در نهایت عملکرد دو روش بایکدیگر و با زمین‌لغزش‌های رخ داده (در زلزله ۱۳۶۹) منطقه رودبار-منجیل، مقایسه و ارزیابی گردیده‌اند.

رگرسیون خطی خودکار (LINEAR): مدل‌سازی سنتی REGRESSION محدودیت‌هایی دارد؛ فقط به روش همزمان (Enter Method) محدود می‌شود، توانایی انجام رگرسیون زیرمجموعه‌های ممکن، امکان شناسایی خودکار و مدیریت داده‌های پرت و توانایی انجام مجموعه روش‌های پیش‌رونده و پس‌رونده) برای بهبود پیش‌بینی‌ها را ندارد

خطی بالا» کنار گذاشته می‌شوند. در روش OLS، مقادیر VIF بیش از ۷، نشانگر افزونگی در متغیرهای توضیحی است. در نهایت، از روش GWR جهت پهنه‌بندی دقیق‌تر خطرپذیری بر اساس پارامترهای کنترل کننده در بُعد حجم و مساحت زمین لغزش‌های ناشی از زلزله استفاده خواهد شد.

۴. توزیع فضایی و اندازه زمین لغزش‌ها

نقشه‌های توزیع فضایی و اندازه زمین لغزش‌های ناشی از زلزله در بستر GIS تهیه شد و جهت انجام تجزیه و تحلیل آماری زمین لغزش‌ها استفاده شده است (شکل ۴). شکل ۴a، بیشترین مقدار LAP=2.9% درصد در حوالی نقطه کانونی زلزله را نشان می‌دهد. شکل 4b نشان می‌دهد که بیشترین مقدار (N/km^2) در امتداد بخش غربی گسل است که توزیع متراکم زمین لغزش‌ها را نشان می‌دهد. این مقدار، همچنین نشان می‌دهد که زمین لغزش‌ها در درجه اول در امتداد پارگی سطح گسل رودبار-منجیل متمرکز شده است. بزرگ‌ترین LA, m^2 در اطراف رومرکز (کانون) زلزله و هر دو قسمت انتهایی گسل وجود دارند. همبستگی بین عدد لغزش تجمعی (N) و مساحت زمین لغزش‌ها (m^2) به عنوان لگاریتم N ، عدد تجمعی و مساحت زمین لغزش‌ها A به طور خطی نشان داده شده است. همانطور که در رابطه ۶ شرح داده شده است (Xu et al., 2013a).

$$\log N(A) = a + bA \quad (6)$$

جایی که $N(A)$ عدد لغزش تجمعی را نشان می‌دهد که مساحت آن بزرگتر یا برابر با A است. a و b مقادیر ثابت هستند و A در مقیاس لگاریتمی اندازه‌گیری می‌شود. این رابطه یک خط مستقیم در مقیاس "Log" است. در شکل 5a عدد لغزش تجمعی به عنوان تابعی از مساحت (m^2) برای زلزله ۱۳۶۹ رودبار-منجیل با مساحت بین ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰۰۰ مترمربع تعریف شده است (رابطه ۷).

$$\log N(A) = -0.0016 \log A + 191.48 \quad R^2 = 0.75 \quad (7)$$

جایی که X یک عملگر ضرب است که برای ضرب هر عنصر β با عنصر مربوطه X خدمت می‌کند، 1 بردار 1 بعدی است (Kazar et al., 2005).

برای n تعداد مناطق فضایی با تعداد k متغیرهای مستقل، β و X دارای $n \times (k + 1)$ هستند و از این رو 1 دارای $(k + 1) \times 1$ بعد است. سپس تخمین حداقل مربعات ($\hat{\beta}_i$) و واریانس آن‌ها:

$$\widehat{(\beta_i)} = (X^T W_i X)^{-1} X^T W_i Y \quad (2)$$

$$VAR(\hat{\beta}_i) = (X^T W_i^{-1} X)^{-1} \quad (3)$$

جایی که W_i مجهز به n ماتریس وزنی است که عناصر غیرمورب آن صفر و عناصر مورب آن توزین جغرافیایی هستند (رابطه ۴):

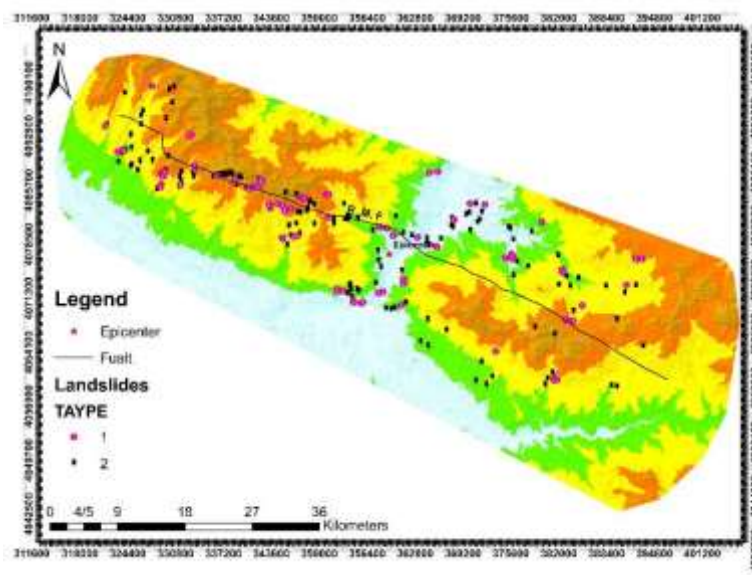
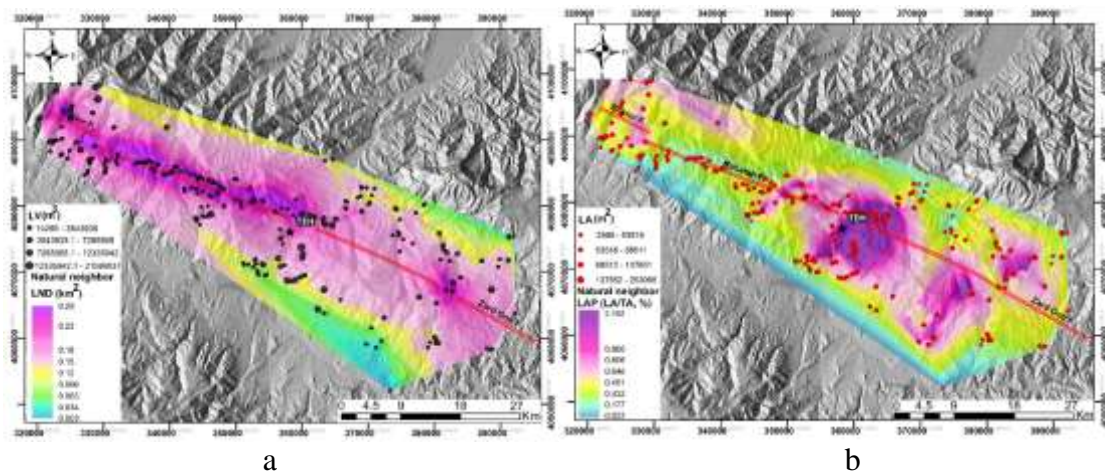
$$W_i = \begin{bmatrix} w_{i1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_{i2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & w_{in} \end{bmatrix} \quad (4)$$

انتخاب W_i به انتخاب عملکرد هسته بستگی دارد، که ممکن است به صورت هسته ثابت (یعنی پهنای باند ثابت) یا هسته انطباقی (یعنی پهنای باند متفاوت) باشد. یک هسته معمولی برای W_i در Eq ۵ آورده شده است.

$$w_{ij} = \exp\left[-\frac{d_{ij}^2}{2b^2}\right] \quad (5)$$

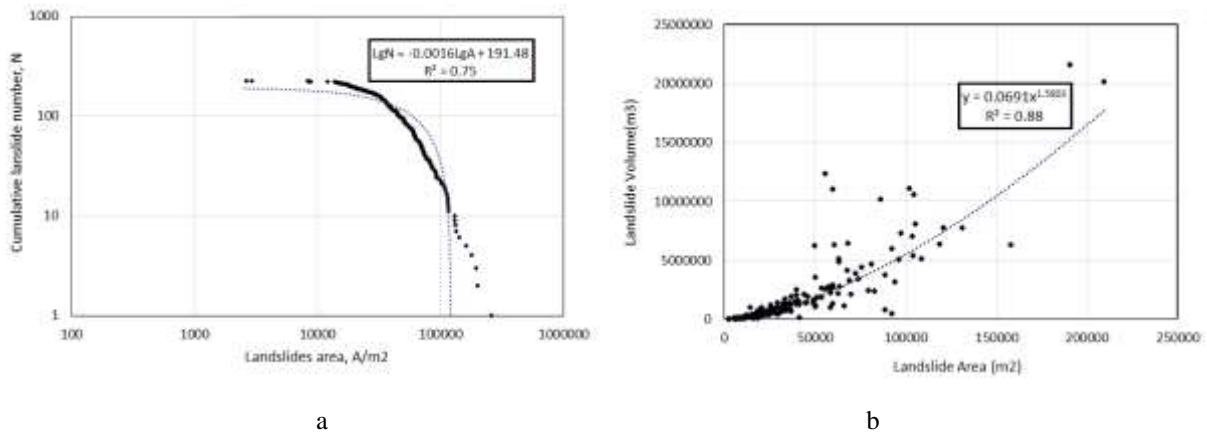
جایی که b آستانه فاصله است و d_{ij} فاصله از نقطه بازگشت به نقطه داده j است.

در این مطالعه به منظور پهنه‌بندی خطر کمی اندازه لغزش‌ها (HZ_LA, HZ_LV) بر اساس اعمال اثر غیرایستایی فضایی پارامترهای کنترل کننده در مقیاس محلی، از مدل GWR استفاده شد. ابتدا در روش GWR، نقاط مرکزی چند ضلعی‌های لغزش، در یک ستون عمودی نرم افزار GIS آماده می‌شوند، سپس مقادیر پارامترهای کنترل، مقابل هر نقطه (که نماینده یک لغزش است) به صورت ستون‌های عمودی نظیر به نظیر به جدول ویژگی‌ها اضافه می‌شود. میزان هم‌خطی بودن پارامترها با استفاده از پارامتر VIF بر اساس مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS) تعیین می‌گردد و پارامترهای با «هم



c

شکل ۴. نقشه‌های توزیع (a) LAP (LA/LT, %) و LND (N/km²); (b) نقشه تراکم LAP با حجم لغزش (LV, m³); (c) توزیع زمین‌لغزش‌ها به تفکیک ۱ (یافته جدید) و ۲ (حفاظی مقدس و کمک‌پناه، ۱۳۷۲)



a

b

شکل ۵. a، منحنی همبستگی بین عدد لغزش تجمعی (N) و مساحت لغزش‌ها (m²) را نشان می‌دهد. b، همبستگی بین سطح زمین‌لغزش (m²) و حجم زمین‌لغزش (m³).

تغییرات در LA، LV و تعداد زمین لغزشها (N) توسط واحدهای سنگ شناسی است. بیشترین درصد مساحت زمین لغزش در واحدهای سنگ شناسی ماسه سنگ و شیل، تراس جوان و آبرفت، شیل سنگ و ماسه سنگ آرکوسیک، سنگ آهک تبلور مجدد، سنگهای متاولکانیک سیلتی در سنگهای سخت (LA=65٪ از کل منطقه) وجود دارد. همچنین ماسه سنگ سیلتی متناوب و سایر واحدها در سنگ نرم (LA=35٪ از کل مساحت) موجود می‌باشند (شکل ۷، جدول ۱). بیشترین درصد حجم لغزش (m³) مربوط به واحدهای ماسه سنگ و شیل، شیل سنگ و ماسه سنگ آرکوسیک، تراس جوان و آبرفت، سنگ آهک تبلور مجدد، سنگهای متاولکانیک سیلتی در سنگ سخت بود (LV=80٪ از کل مساحت) و LV=20٪ مربوط به ماسه سنگ سیلتی متناوب و سایر واحدها در سنگ نرم می‌باشند مشاهده شده است که حجم و مساحت بیشتر زمین لغزشها در سنگهای سخت به جای سنگهای نرم رخ داده است، که احتمالاً به دلیل چسبندگی بالاتر در سنگهای سخت است (شکل ۷، جدول ۱). همچنین در جدول ۱ مشاهده می‌شود که ۱۴۲ زمین لغزش شامل ۶۵ درصد از LAP و ۶۹/۴ درصد از کل LND، در سنگهای با مقاومت بالا وجود دارند. در حالی که ۸۱ زمین لغزش در سنگ نرم (مقاومت کم) با LAP=35٪ و LND=30.6 (N/km²) در زلزله ۱۳۶۹ رودبار-منجیل رخ داده است (جدول ۱).

حجم زمین لغزشها با استفاده از پرونده TIN و ورود پلیگون‌های LA به عنوان سطح مرجع در نرم افزار GIS بدست آمد. در نتیجه یک صفحه مرجع در بالاترین سطوح TIN اعمال شده و حداکثر حجم زمین لغزشها از برخورد سطوح TIN با چند ضلعی‌های وارد شده، بدست آمده است. شکل 5b همبستگی بین سطح زمین لغزش (m²) و حجم زمین لغزش (m³) را با R²=0.88 نشان می‌دهد که می‌تواند در منطقه البرز در ایران استفاده شود (رابطه ۸).

$$LV(m^3) = 0.069A^{1.5803} \quad R^2=0.88 \quad (8)$$

۵. بررسی پارامترهای مؤثر بر زمین لغزش های رودبار-

منجیل

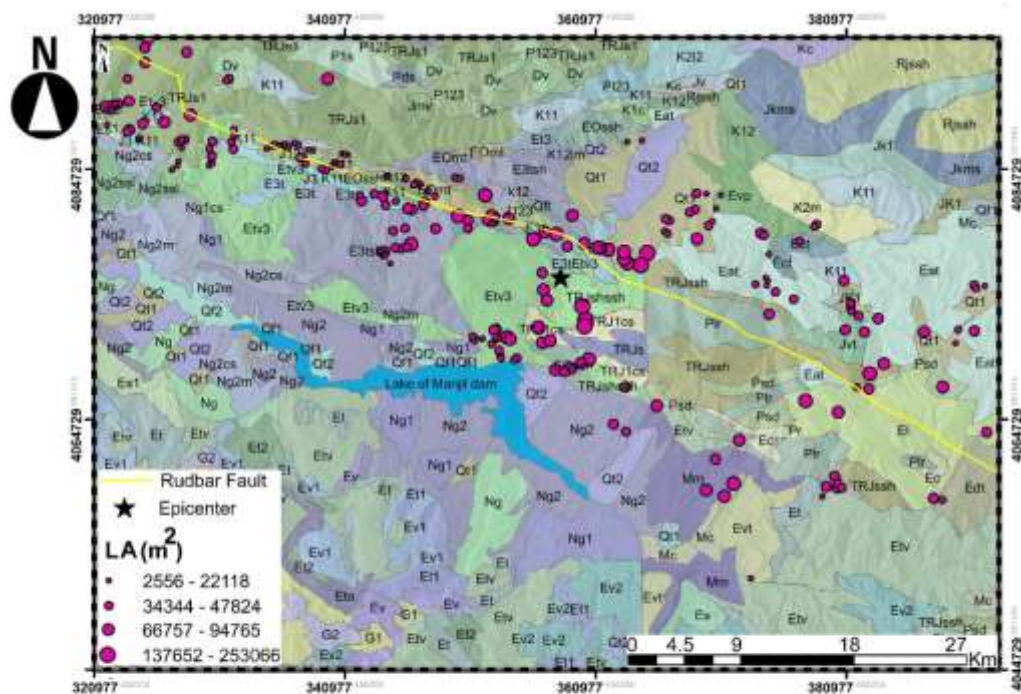
۵-۱. پارامترهای ژئوتکنیکی

پارامترهای ژئوتکنیکی مانند مقاومت (زاویه اصطکاک و چسبندگی) می‌تواند به طور گسترده، نقشی اساسی در خطرات اندازه زمین لغزشها ایفا کنند. در این مطالعه از سه نقشه زمین شناسی (طارم، رودبار و جیرنده) با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (سازمان زمین شناسی ایران) برای ارائه اطلاعات در مورد سنگ شناسی منطقه مورد مطالعه در نرم افزار GIS استفاده شد (شکل ۶). پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای سنگ شناسی (چسبندگی و زاویه اصطکاک) از مطالعات مهدوی فر (MahdaviFar, 2006) و معماریان، (۱۳۹۶) انتخاب شده است. آنها پارامترهای ژئوتکنیکی منطقه مورد نظر را با استفاده از شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI) تخمین زدند و نتایج خود را به واحدهای مشابه زمین شناسی گسترش دادند (مشابه Jibson et al., 1998; Wilson and Keefer, 1983; Yassaghi et al., 2005).

جدول ۱، ۲۷ واحد سنگی (سازنده‌های مختلف) در منطقه مورد مطالعه، LND (N/Units area km²), LAP%, تعداد زمین لغزشها (N)، زاویه اصطکاک (درجه) و چسبندگی (MPa) براساس لیتولوژی واحد (Unit) را نشان می‌دهد. واحدهای سنگی به دو دسته مقاومت بالا با میانگین زاویه اصطکاک ۳۰ تا ۵۰ درجه و چسبندگی ۰,۰۸ تا ۰,۲۷ مگاپاسکال و مقاومت کم با میانگین زاویه اصطکاک ۱۸ تا ۲۵ و چسبندگی ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ مگاپاسکال طبقه بندی شده‌اند. شکل ۷ نشانگر درصد

جدول ۱. مقاومت برشی، مساحت لغزش، تعداد، LAP و مقادیر LND هر واحد زمین‌شناسی در منطقه رودبار-منجیل

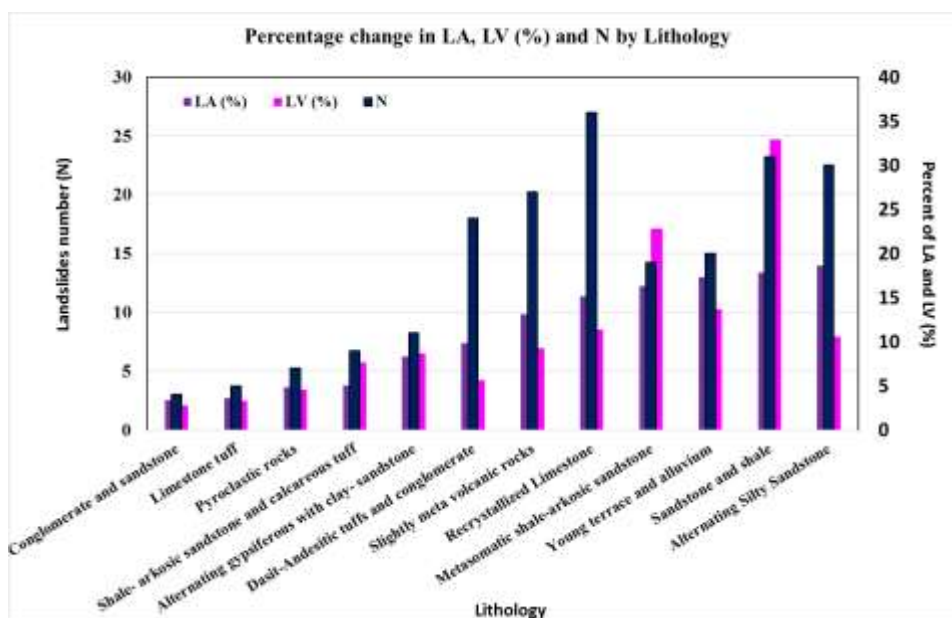
Lithology	Unit	Area unit (km ²)	Landslide Area (km ²)	Landslides number (N)	LAP% (LA/Area unit)	LND (N/km ²)	Friction angle (degree)	Cohesion (MPa)
Volcanic rocks	TRJ ^{sl} , EO ^{ssh} , D ^v , E ^{iv} , E ₃ ^{iv}	410.13	2.89	64	3.37	0.74	32.25	0.22
Alternating Silty Sandstone and Shale	E ₃ ^{ssh} , TRJ _{sh} ^{ssh}	186.63	2.37	36	3.35	0.37	25.5	0.05
Limestone	JK ₁ , K ¹ ₁ , K ¹ ₂ , K ₂ ^m , E ^l	157.53	1	28	4.99	1.48	37.2	0.27
Dasit-Andesitic Tuffs and Conglomerate	E ^{vp} , E ^{ct} , E ^{ta}	228.26	0.68	20	0.96	0.38	18	0.02
Young terrace and alluvium	Q ₁₁	70.32	1.47	20	2.09	0.28	30	0.08
Rrecrystallized limestone	E ₃ ^l , J ¹ ₂₋₃ , J ₃ K ¹ ₁	50.69	0.81	16	5.49	1.13	36.43	0.26
Rocks shale and arkosic sandstone	EO ^{mt}	20.23	0.48	12	2.38	0.59	18	0.09
Gypsiferous with clay and sandstone	M _m , Ng ₂ , P ^{lr}	273.07	0.71	11	1	0.14	20.67	0.02
Pyroclastic andesite and tuff	E ^{iv}	156.3	0.51	5	0.33	0.03	20	0.02
Conglomerate and Sandstone	TRJ ₁ ^{cs}	20.64	0.29	4	1.39	0.19	33	0.14
Andesite-Basaltic volcanic and tuff	J ^{vt}	14.81	0.16	3	1.08	0.2	31	0.05
Sandstone and shale	P ^{sd}	30.21	0.17	3	0.55	0.1	50	0.15



P^{sd}: Sandstone and shale
 JK₁, K¹₁, K¹₂, K₂^m, E^l: Limestone
 Q₁₁: Young terrace and alluvium
 TRJ₁^{cs}: Conglomerate and Sandstone
 J^{vt}: Andesite-Basaltic volcanic and tuff
 TRJ^{sl}, EO^{ssh}, D^v, E^{iv}, E₃^{iv}: Volcanic rocks
 E₃^l, J¹₂₋₃, J₃K¹₁: Rrecrystallized limestone
 M_m, Ng₂, P^{lr}: Gypsiferous with clay and sandstone
 E₃^{ssh}, TRJ_{sh}^{ssh}: Alternating Silty Sandstone and Shale
 E^{vp}, E^{ct}, E^{ta}: Dasit-Andesitic Tuffs and Conglomerate

Rudbar Fault
 Dam
 Lake
 River

شکل ۶. نقشه زمین‌شناسی رودبار-منجیل همراه با مکان و مساحت زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۶۹ رودبار.



شکل ۷. نمودار میله‌ای درصد تغییر در مساحت لغزش‌ها (LA%)، حجم زمین لغزش‌ها (LV%) و تعداد زمین لغزش‌ها (N) توسط واحدهای سنگ شناسی.

فراوانی در ارتفاعات پایین‌تر (۵۰۰-۱۵۰۰ متر) مشاهده شده است و در حدود ۶۶٪ از مساحت زمین لغزش‌ها ناشی از زلزله ۱۹۹۰ رودبار-منجیل در مکان‌هایی با ارتفاع کمتر از ۱۵۰۰ متر رخ داده است (شکل 8a).

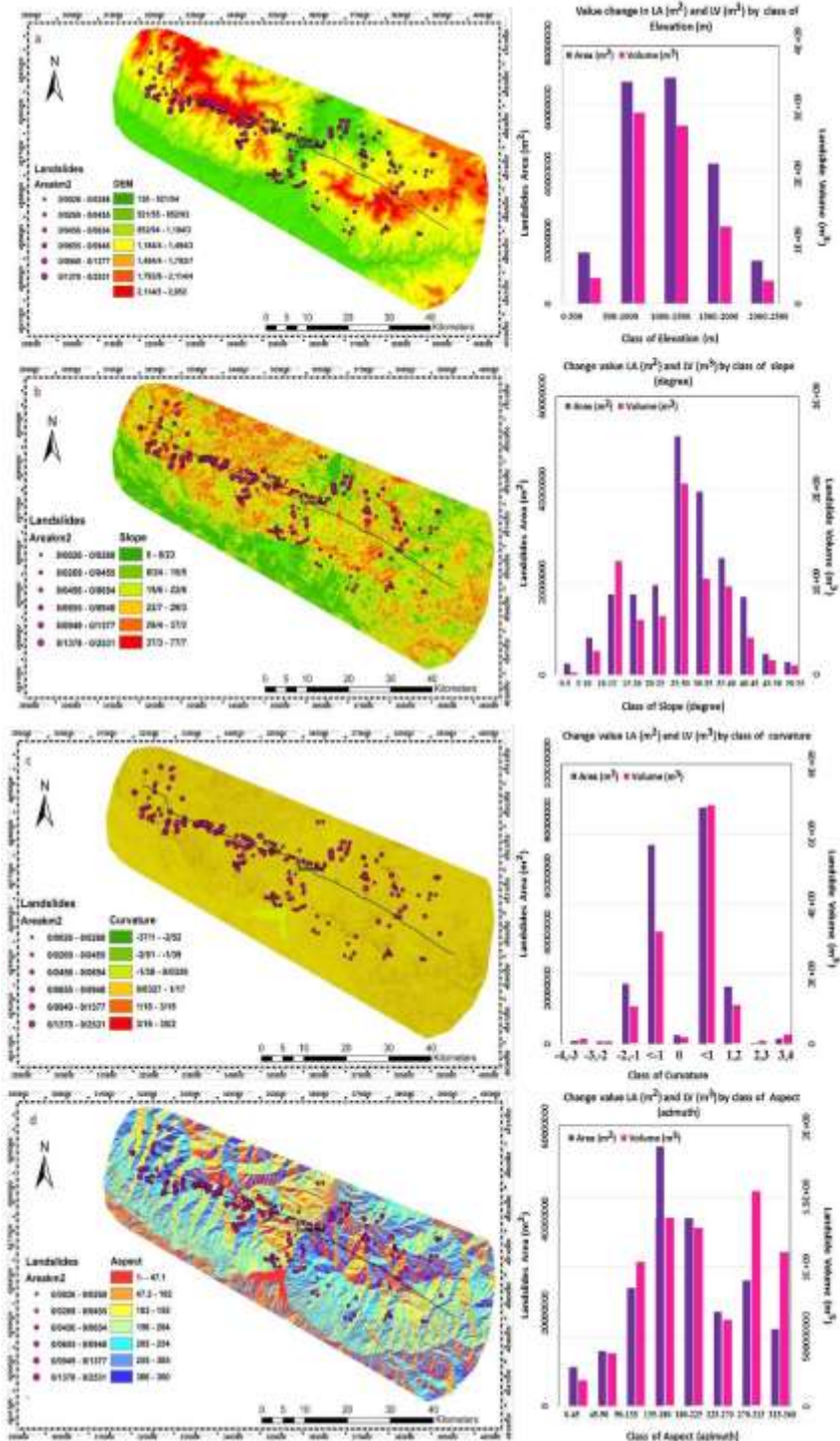
مقادیر LV و LA به تدریج از شیب کم به شیب زیاد (۰-۵° تا ۳۰-۳۵°) افزایش یافته و در شیب‌های < ۳۵° درجه به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد (شکل 8b). روند LV نسبت به شیب، به صورت بایومدال است. LV تا شیب ۱۵° صعود می‌کند و به طور قابل توجهی تا شیب ۲۰° کاهش می‌یابد (شکل 8b). تقریباً ۶۷٪ از مقادیر LV و LA در دامنه‌های ۲۰-۴۰° مشاهده شده و بیشترین درصد LA و LV (۲۵٪)، در شیب ۲۵ تا ۳۰ درجه می‌باشد (شکل 8b). بنابراین، زمین لغزش‌ها در ارتفاعات بالاتر (< ۱۵۰۰ متر) و دامنه‌های شیب دار (۳۰ تا ۴۵ درجه) دارای تراکم بیشتر با مساحت کمتری (بیشتر قسمت شمال غربی گسل نسبت به جنوب شرقی) است. در حالی که تراکم کمتری از زمین لغزش‌ها با مساحت بیشتری در قسمت جنوب شرقی با ارتفاعات پایین‌تر و شیب ملایم وجود دارد (شکل 6 و 8b). در منطقه شمال غربی منجیل-رودبار، سنگ‌های با مقاومت کم و شکستگی بیشتر باعث ایجاد تراکم بیشتر زمین لغزش (با LA کوچک) در ارتفاعات بالاتر و شیب‌های تندتر می‌شوند. در مقابل، بخش جنوب شرقی گسل،

بیشترین فراوانی رانش‌زمین (N) مربوط به سنگ آهک، ماسه سنگ و شیل تبلور مجدد در سنگ سخت و توف‌های داکیت-آندزیتی و کنگلومرا در سنگ نرم بود (شکل ۷، جدول ۱). گنو و همکاران (Guo et al. 2014a) و هئونگ و لی (Huang and Li 2009) نشان دادند که وقوع زمین لغزش در سنگ‌های سخت (به عنوان مثال، سنگ‌های آذرین، کربناته و کنگلومرا) بیش از سنگ‌های نرم (به عنوان مثال، فلیت، تخته سنگ شنی و شیل) در زلزله ۲۰۰۸ ونچوان بود. کیو و همکاران (Cui et al. 2014) عنوان کردند که ۳۶۱ زمین لغزش در سنگ‌های سخت و ۱۷۱ مورد در سنگ‌های نرم ناشی از زلزله ۲۰۱۳ لوشان رخ داده است.

۵-۲. همبستگی اندازه زمین لغزش‌ها با پارامترهای توپوگرافی

در این بخش همبستگی بین LA (m²) و LV (m³) با چهار فاکتور توپوگرافی (ارتفاع، متر، زاویه شیب، درجه، جنبه شیب، آزیموت و انحنای شیب) بررسی شده است. در این مطالعه پارامترهای توپوگرافی توسط نرم افزار GIS از مدل ارتفاع رقومی DEM با وضوح ۱۲,۵ متر، استخراج شد (شکل 8a-d). منطقه مورد مطالعه با شیب‌های ملایم تا تند، ارتفاعات کم تا زیاد از ۰ تا ۲۵۰۰ متر و عمدتاً کمتر از ۱۵۰۰ متر تشکیل شده است. بیشترین مقادیر LA و LV زمین لغزش‌ها با کمترین

دارای سنگ‌های مقاومت بالا، ارتفاعات کمتر با پوشش گیاهی بیشتر منجر به تراکم کم زمین لغزش‌ها با LA بزرگ‌تر شده است (شکل، 3a و 6).



شکل ۸. ارتباط اندازه زمین لغزش با پارامترهای توپوگرافی: a، توزیع و اندازه زمین لغزش بر اساس ارتفاع (متر)؛ b، توزیع و اندازه زمین لغزش بر اساس شیب (درجه)؛ c، توزیع و اندازه زمین لغزش با انحنا شیب؛ d، توزیع و اندازه زمین لغزش با زاویه جهت شیب (درجه).

در این بخش فاکتورهای Ia و PGA از مطالعات مهدوی فر و همکاران (Mahdavifar et al. 2008) و قاسمی و همکاران (Ghasemi et al. 2009) که برای منطقه رودبار-منجیل و منطقه البرز توسعه یافته‌اند، به دست آمدند (روابط ۹ و ۱۰). پارگی سطح گسل رودبار-منجیل به عنوان پایه مطالعات آماری مورد استفاده قرار گرفت، به عنوان مثال، فاصله لغزش از پارگی سطح در Ia (رابطه ۹) و PGA (رابطه ۱۰) (Mahdavifar et al., 2008, Ghasemi et al., 2009).

$$\log Ia = -3.88 + 0.81M - \log D - 0.002D \quad (9)$$

جایی که Ia شدت آریاس بر حسب متر بر ثانیه است، M بزرگی زلزله است و در صورت شناخته شدن گسل، D نزدیک‌ترین فاصله از سایت تا سطح گسل زلزله است. در غیر این صورت، D فاصله کانون زلزله است (Mahdavifar et al., 2008).

$$\log PGA = 0.886 + 0.405M - 1.424 \log(D + 0.014 \times 10^{0.42M}) + 0.859S_1 + 0.836S_2 \quad (10)$$

رابطه ۱۰ ضرایب میرایی تخمین زده شده و انحراف استاندارد لگاریتمی را برای مقادیر شتاب طیفی میرایی ۵٪ در دوره زمانی ۰/۰۵ نشان می‌دهد، جایی که Log(PGA) شتاب طیفی با ۵٪ میرایی در cm/s^2 است. متغیرهای S1 و S2 مقادیری به خود می‌گیرند: S1=1 و S2=0 برای سنگ و S1=0 و S2=1 برای خاک و D نزدیک‌ترین فاصله از سایت تا رد سطح گسل زلزله است (Ghasemi et al., 2008).

شکل 9a، نقشه $\log Ia$ (m/s) با توزیع LA (m^2) بر روی بستر GIS را نشان می‌دهد. مقادیر بالای Ia (m/s) و مساحت زمین لغزش‌ها (m^2) در راستای گسل امتداد لغز، همبستگی مستقیم دارند. شکل 9b، نقشه PGA با توزیع LV (m^3) بر روی بستر GIS را نشان می‌دهد. مقادیر بالای LV (m^3) در حوالی کانون زلزله (در شعاع ۵ تا ۱۰ کیلومتر) و هر دو قسمت انتهایی گسل است، در حالی که مقادیر PGA از مرکز به دو انتهای گسل کاهش می‌یابد (شکل 9b). باید تأکید کرد که بزرگترین زمین لغزش‌ها لزوماً در کانون زلزله مشاهده نمی‌شود (Bao et al., 2019, Zhang et al., 2016, Tong et al., 2010).

وانگ و همکاران (Wang et al., 2019) و دیگران (Alonso Rodriguez and Miranda, 2015; Mavroeidis and Gordo Monso Papageorgiou, 2003 Archila et al., 2017;

از نظر انحنای شیب، انحنای منفی نمایانگر سطوح مقعر است، انحنای صفر نشان دهنده سطح صاف است و انحنای مثبت سطوح محدب را نشان می‌دهد (Pradhan et al., 2010; Xu et al., 2013a). طبقه‌بندی انحنای شیب در شکل 8c ارائه شده است. در حالی که مقادیر انحنای شیب از صفر فاصله می‌گیرد، حساسیت اندازه (LV و LA) تا مقادیر ۱ به ۲ و ۱- به ۲- افزایش می‌یابد، سپس در کلاس‌های انحنای ۳ تا ۴ و ۳- تا ۵ کاهش می‌یابد. بنابراین، وقوع زمین‌لغزش در انحنای صفر، حداکثر انحنای مقعر و محدب خیلی سخت رخ می‌دهد (شکل 8c).

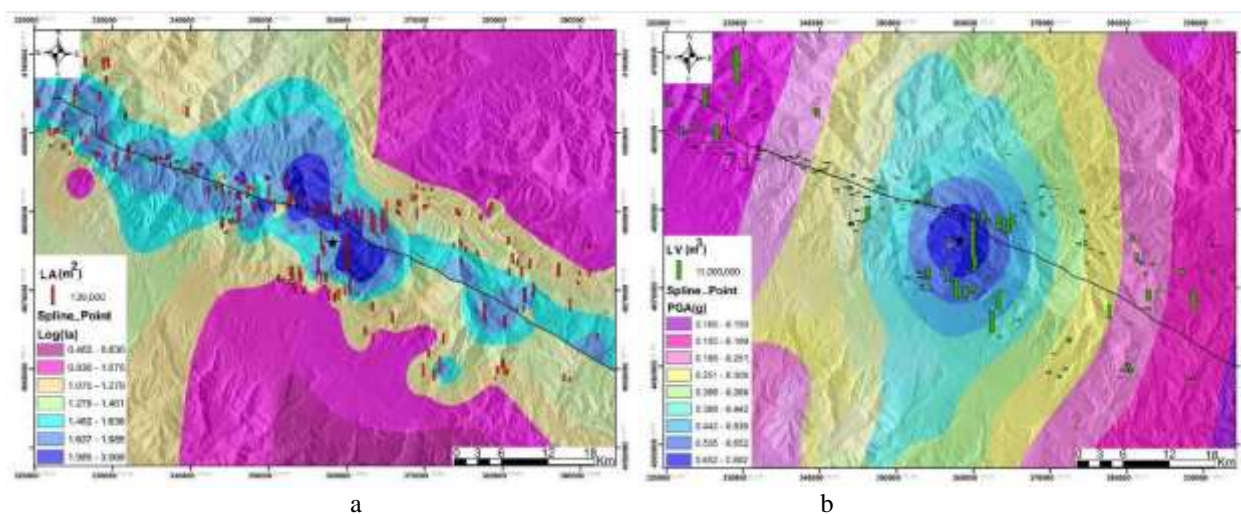
جهت شیب به عنوان جهت حداکثر شیب سطح زمین تعیین می‌شود و به پارامترهایی مانند قرار گرفتن در معرض نور خورشید، خشک شدن بادها و ناپیوستگی‌ها وابسته است که می‌توانند وقوع زمین لغزش را کنترل کننده (Yalcin, 2008). جهت ورودی PGAs به جنبه شیب می‌تواند بر وقوع زمین لغزش تأثیر بگذارد (Dai et al., 2011; معماریان, ۱۳۹۶). جنبه شیب در این مطالعه به هشت کلاس تقسیم شده است، از جمله آزیموت: ۰-۴۵، ۴۵-۹۰، ۹۰-۱۳۵، ۱۳۵-۱۸۰، ۱۸۰-۲۲۵، ۲۲۵-۲۷۰، ۲۷۰-۳۱۵ و ۳۱۵-۳۶۰ (شکل 8d). شکل 8d بیشترین مقدار LA و LV را در آزیموت ۱۳۵-۱۸۰، ۱۸۰-۲۲۵ (SE-SW) تا ۲۷۰-۳۱۵ (NW) (به ترتیب کلاس‌های ۴، ۵ و ۷) نشان می‌دهد که هم راستا در جهت گسترش خط گسلی (NW-SE) است. همچنین بیش‌ترین فراوانی زمین لغزش‌ها در کلاس‌های آزیموت‌های SE-SW و NW-NE بود (شکل 8d). این جهت‌های شیب در زاویه ۳۰ درجه نسبت به امتداد گسل و به موازات آن قرار دارند که احتمالاً مربوط به جهت پذیری گسل لرزه‌زا و انتشار موج لرزه‌ای است.

۳-۵. همبستگی با پارامترهای لرزه‌ای

همبستگی بین وقوع زمین لغزش و پارامترهای لرزه‌ای با استفاده از پنج عامل بررسی شد: (۱) فاصله از پارگی گسل لرزه‌ای، (۲) فاصله از مرکز زمین، (۳) بیشینه شتاب زلزله (PGA) و (۴) شدت آریاس (Ia).

کیفر (Keefer, 1984) و رودریگز و همکاران (Rodriguez et al., 1999) نشان داد که بین فاصله از پارگی سطح گسل و مرکز زلزله با $LND(n/km^2)$ زمین لغزش‌های ناشی از زلزله، همبستگی معنی‌دار (معکوس) وجود دارد. در مطالعه حاضر، بافر با فاصله‌های ۱ کیلومتری جهت بررسی همبستگی بین اندازه و توزیع زمین‌لغزش‌ها با فاصله از پارگی سطح گسل و کانون زلزله، انتخاب شده است (شکل 10a-d). شکل 10a، نشان می‌دهد که روند $LND(N/km^2)$ به طور کلی با فاصله از پارگی سطح گسل کاهش می‌یابد، برخلاف فاصله از مرکز زلزله (شکل 10c). همبستگی معکوس بین اندازه زمین لغزش و فاصله از سطح گسیختگی گسل کاملاً مشهود است (شکل 10b).

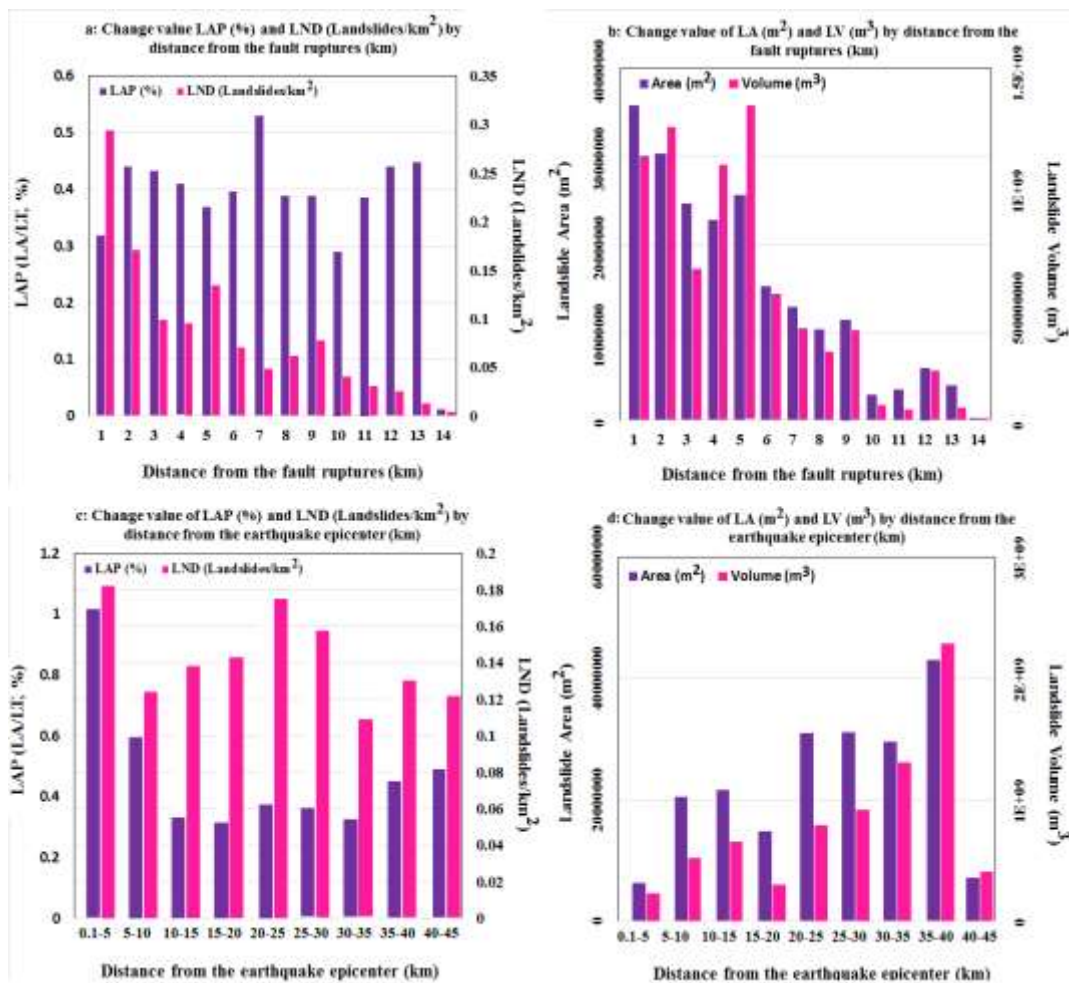
(and Miranda, 2018) نشان دادند که تأثیر PGA در اندازه زمین‌لغزش‌ها می‌تواند مربوط به سوابق حرکت زمین در فاصله‌های نزدیک به پارگی گسل باشد که منجر به ایجاد پالس‌های با دامنه بالا و فرکانس پایین می‌شوند و به تبع آن جابجایی‌های جدی در دامنه‌های طبیعی رخ می‌دهند. در منطقه منجیل-رودبار، مقادیر بالای LA و LV به دور از کانون‌لرزه‌ای باید مربوط به انرژی آزاد شده در امتداد سه بخش گسل رودبار-منجیل با توجه مکانیسم امتداد لغز آن می‌باشد (شکل 9a-b). به نظر می‌رسد که در تجزیه و تحلیل ارتباط بین وقوع زمین لغزش با پارامترهای لرزه‌ای، Ia معتبرتر از PGA است (شکل 9a-b).



شکل ۹. (a) نقشه درونی شده Log (Ia) با توزیع $LA(m^2)$ ؛ (b) نقشه درونی شده PGA با $LV(m^3)$.

(Chen et al., 2017) نشان دادند که توزیع زمین‌لغزش‌های عمیق ایجاد شده، توسط زلزله‌هایی با گسل معکوس به طور مساوی (شعاعی) در طیف حدود ۲۰ کیلومتر از گسل‌ها رخ می‌دهند، در حالی که $< 80\%$ از زمین لغزش‌های عمیق ناشی از زلزله‌هایی با گسل امتداد لغز در محدوده کوچکی (۵-۱۰ کیلومتر) از گسل متمرکز شده است. به‌طور مشابه، توزیع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله رودبار-منجیل بیشترین تمرکز را در محدوده ۱۰-۵ کیلومتری گسل امتداد لغز دارند.

به نظر می‌رسد که بین توزیع و اندازه زمین‌لغزش با فاصله از مرکز زلزله همبستگی محلی وجود دارد (شکل 10c-d). شکل 10c نشان می‌دهد که LAP بالاترین مقادیر را در اطراف مرکز کانون (> 10 کیلومتر) دارد و با دور شدن از مرکز کانونی به تدریج کاهش می‌یابد. این روند در LND به عنوان یک توزیع طبیعی با فاصله از مرکز زلزله مشاهده می‌شود. همچنین حجم و مساحت زمین لغزش‌ها به صورت بایومدال (حالت اول در ۱۰-۱۵ کیلومتر و حالت دوم در ۳۰ تا ۴۰ کیلومتری) با فاصله از مرکز زمین توزیع می‌شود (شکل 10d). چن و همکاران



شکل ۱۰. ارتباط وقوع زمین لغزش‌ها با فاصله از پارگی گسل و فاصله از مرکز زلزله: a، توزیع زمین لغزش‌ها بر اساس فاصله از گسیختگی گسل (km)؛ b، اندازه زمین لغزش با فاصله از پارگی گسل (km)؛ c، توزیع زمین لغزش بر اساس فاصله از مرکز زلزله (km)؛ d، اندازه زمین لغزش با فاصله از مرکز زلزله (km).

پارامترهای تبدیل شده (Transformed) جهت اجرای مدل (LA, km²) و (LV, m³) تبدیل می‌کند (شکل 11a-b). شکل - های 11a و 11b نشان دهنده میزان اهمیت (ضرایب رگرسیونی) پارامترهای کنترل کننده (تبدیل شده)، بر مساحت و حجم است.

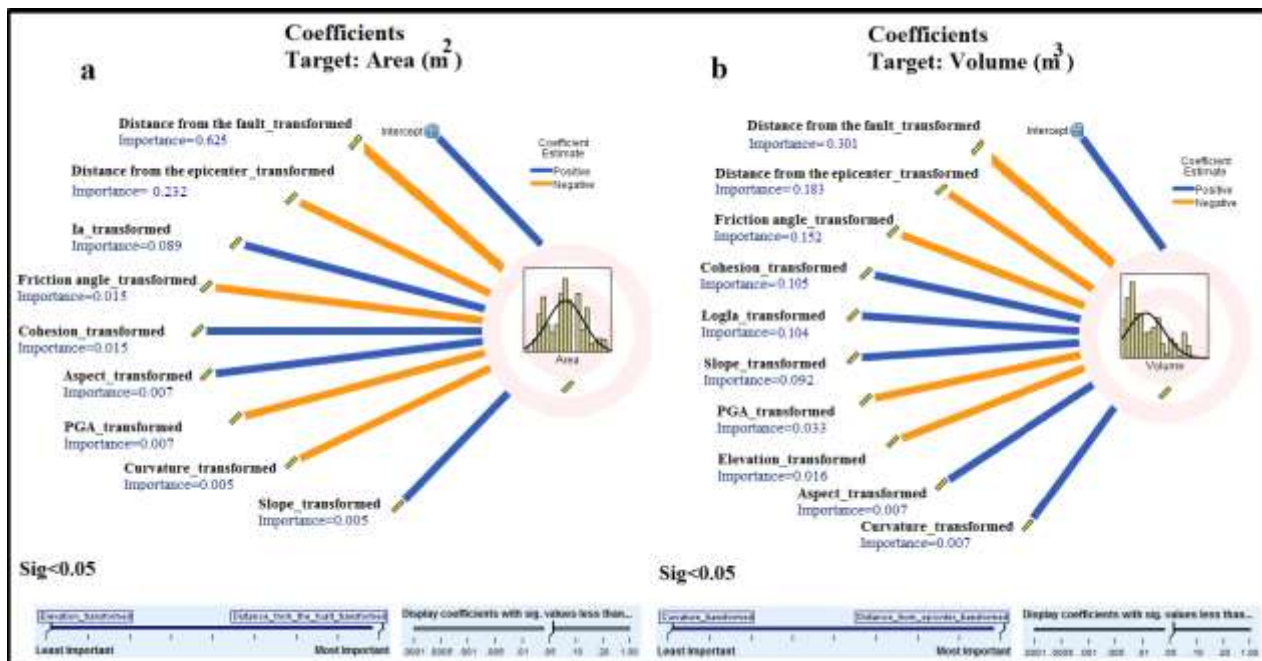
در شکل 11a، اهمیت پارامترها بر اساس ترتیب پارامترهای تأثیرگذار بر LA(km²) طبقه بندی شده‌اند. مشاهده می‌شود که پارامترهای فاصله از سطح گسیختگی گسل (km)، فاصله از مرکز زلزله (km)، Ja (m/s)، چسبندگی (kPa)، زاویه اصطکاک (degree)، PGA(g) از مهمترین پارامترهای مؤثر بر LA است (11a). بنابراین، بیشترین پارامتر تأثیرگذار بر LA(km²) مربوط

۶. مدل‌سازی خطی خودکار (LINEAR)

در این بخش، از روش LINEAR، بر اساس روش گام به گام رو به جلو، برای بررسی مهمترین پارامترهای مؤثر بر اندازه زمین‌لغزش استفاده شده است. به این ترتیب، همبستگی مساحت زمین‌لغزش‌ها (LA, km²) و حجم زمین‌لغزش‌ها (LV, m³) (به عنوان متغیرهای وابسته) با کلیه پارامترهای تأثیرگذار (به‌عنوان متغیرهای مستقل) با استفاده از نرم افزار SPSS-21 تحلیل شده است. شکل ۱۱ نتایج مدل LINEAR بین اندازه زمین لغزش (LA, km² و LV, m³) و متغیرهای مستقل (پارامترهای تأثیرگذار) را نشان می‌دهد. فرآیند آماده‌سازی خودکار داده‌ها (ADP) پارامترهای ورودی را به

اصطکاک داخلی (degree)، شیب (degree)، چسبندگی (kPa)، I_a (m/s)، PGA (g)، جهت شیب (azimuth)، ارتفاع (m) و انحنا هستند. در نتیجه، میزان حجم زمین لغزش‌ها نسبت به مساحت آنان، کمتر به پارامترهای لرزه‌ای وابسته و بیشتر به پارامترهای ژئوتکنیکی و توپوگرافی بستگی دارند. پارامتر فاصله از سطح گسیختگی گسل و رومرکز زلزله، زاویه اصطکاک داخلی، PGA و ارتفاع، دارای همبستگی معکوس (ضرایب منفی) با حجم لغزش هستند. سایر پارامترهای تأثیرگذار در سطح اطمینان ۹۵٪ در مدل LINEAR, LV تأثیرگذاری مستقیم معنی‌داری ($P\text{-Value} < 0.05$) دارند (شکل 11b). شکل 12b به ترتیب خلاصه‌ای از ضرایب R^2 تنظیم شده در مدل رگرسیون خطی خودکار پیش‌رونده حجم زمین‌لغزش‌ها را برای پارامترهای کنترل کننده مربوطه ارائه می‌دهد. سرانجام مدل LINEAR, LV (m^3) با $R^2=0.542$ و سطح معنی‌داری کمتر از ۰,۰۵ در سطح اطمینان ۹۵٪ تأیید شده است (شکل 12b).

به پارامترهای لرزه‌ای، ژئوتکنیکی و سپس توپوگرافی است. پارامترهای فاصله از سطح گسیختگی گسل، رومرکز زلزله، زاویه اصطکاک داخلی و PGA با مساحت زمین لغزش‌ها همبستگی معکوس (ضرایب منفی) دارند. سایر پارامترهای تأثیرگذار با LA (km^2)، در سطح اطمینان ۹۵٪ همبستگی مثبت معنی‌داری ($P\text{-value} < 0.05$) دارند (شکل 11a). در شکل 12a به ترتیب خلاصه‌ای از ضرایب R^2 تنظیم شده، مربوط به بیشترین پارامترهای تأثیرگذار، یعنی فاصله از سطح گسیختگی گسل ($R^2=0.479$) و سایر موارد در مدل رگرسیون خطی خودکار LA ، ارائه شده است. سرانجام مدل LINEAR, km^2 با LA و $R^2=0.66$ سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ در سطح اطمینان ۹۵٪ تأیید شده است (شکل 12a). شکل 11b نتایج همبستگی بین LV (m^3) و پارامترهای تأثیرگذار توسط مدل LINEAR را نشان می‌دهد. مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر $LV(m^3)$ به ترتیب فاصله از سطح گسیختگی گسل (km)، فاصله از مرکز زلزله (km)، زاویه



شکل ۱۱. به صورت خودکار مدل LA (m^2), $LV(m^3)$, LINEAR. a: مقدار اهمیت پارامترهای کنترل کننده و ضریب مثبت یا منفی در مدل LA (m^2), b: مقدار اهمیت پارامترهای کنترل کننده و ضریب مثبت یا منفی در مدل $LV(m^3)$.

Model Building Summary		Step									
Target: Area (m ²)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Adjusted R Square		0.479	0.538	0.543	0.543	0.549	0.551	0.552	0.559	0.599	0.666
Distance from the fault_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Distance from the Epicenter_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ia_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PGA_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aspect_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Curvature_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Slope_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Friction angle_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cohesion_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Elevation_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

The model building method is Forward Stepwise using the Adjusted R-Square criterion. A checkmark marks the effect it is in the model at this step.

Model Building Summary		Step									
Target: Volume (m ³)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Adjusted R Square		0.10	0.221	0.273	0.298	0.376	0.405	0.411	0.415	0.451	0.542
Distance from the fault_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Distance from the Epicenter_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Slope_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LogIa_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Shear Friction angle_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cohesion_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PGA_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Elevation_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aspect_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Curvature_transformed		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

The model building method is Forward Stepwise using the Adjusted R-Square criterion. A checkmark marks the effect it is in the model at this step.

شکل ۱۲. خلاصه ضرایب R² اصلاح شده توسط مدل LINEAR؛ a، مدل LA (km²)؛ b، مدل LV (m³)

زمین لغزش‌های رخ داده (زلزله ۱۳۶۹) با مساحت زیاد وجود دارند (شکل 13a). پهنه‌بندی خطر مساحت لغزش (HZ_LA_{LINEAR})، در امتداد گسل (با دور شدن از رومرکز زلزله در دو جهت مخالف) و همچنین دو بخش انتهایی گسل نشان دهنده مقادیر متوسط و بالای لغزش (0.096-0.253 km²) منطبق بر لغزش‌های رخ داده زلزله ۱۳۶۹ هستند. در نتیجه پهنه-بندی خطر مساحت (HZ_LA_{LINEAR}) بجز در مناطق نزدیک کانون زلزله، در مناطق دیگر پیش‌بینی‌های نسبتاً قابل قبولی از مساحت لغزش‌های واقعی و میزان حساسیت‌پذیری آتی ارائه داده است (شکل 13a).

با ضرب ضرایب ثابت پارامترهای کنترل کننده حجم LV(m³) (به دست آمده از مدل LINEAR، شکل 11b و رابطه ۱۲)، در هریک از لایه‌های رستری مربوط به آن پارامتر (در نرم افزار GIS) و حاصل جمع تمام لایه‌های رستری، نقشه پهنه‌بندی خطر حجم لغزش (HZ_LV_{LINEAR}) در بستر GIS ارائه گردیده است (شکل 13b). در شکل 13b بیشترین مقدار عددی (0.0216 km³) نشان‌دهنده بالاترین رده پهنه‌بندی (Very High) خطر حجم لغزش‌های ناشی از زلزله است و کمترین مقدار (LV=15290m³) نشان دهنده کمترین خطر (Very Low) حجم لغزش‌های لرزه‌ای است. پهنه‌بندی صورت گرفته با حجم زمین لغزش‌های رخ داده (LV, m³) در زلزله ۱۳۶۹ بر روی نقشه 13b تطابق داده شده است.

$$HZ_LV_{LINEAR} (m^3) = -0.301(DF) - 0.183(DE) - 0.152(FA) + 0.105(C) + 0.104(LogIa) + 0.092(S) -$$

با ضرب ضرایب ثابت به دست آمده برای پارامترهای کنترل کننده مساحت LA(km²) (از مدل LINEAR، شکل 11a و رابطه ۱۱)، در هریک از لایه‌های رستری مربوط به آن پارامتر (در نرم افزار GIS) و حاصل جمع تمام لایه‌های رستری، نقشه پهنه‌بندی خطر مساحت لغزش (HZ_LA_{LINEAR}) در بستر GIS ارائه گردیده است (شکل 13a).

$$HZ_LA_{LINEAR} (km^2) = -0.65(DF) - 0.232(DE) + 0.089(Ia) - 0.015(FA) + 0.015(C) + 0.007(A) - 0.007(PGA) - 0.005(Cu) \quad (11)$$

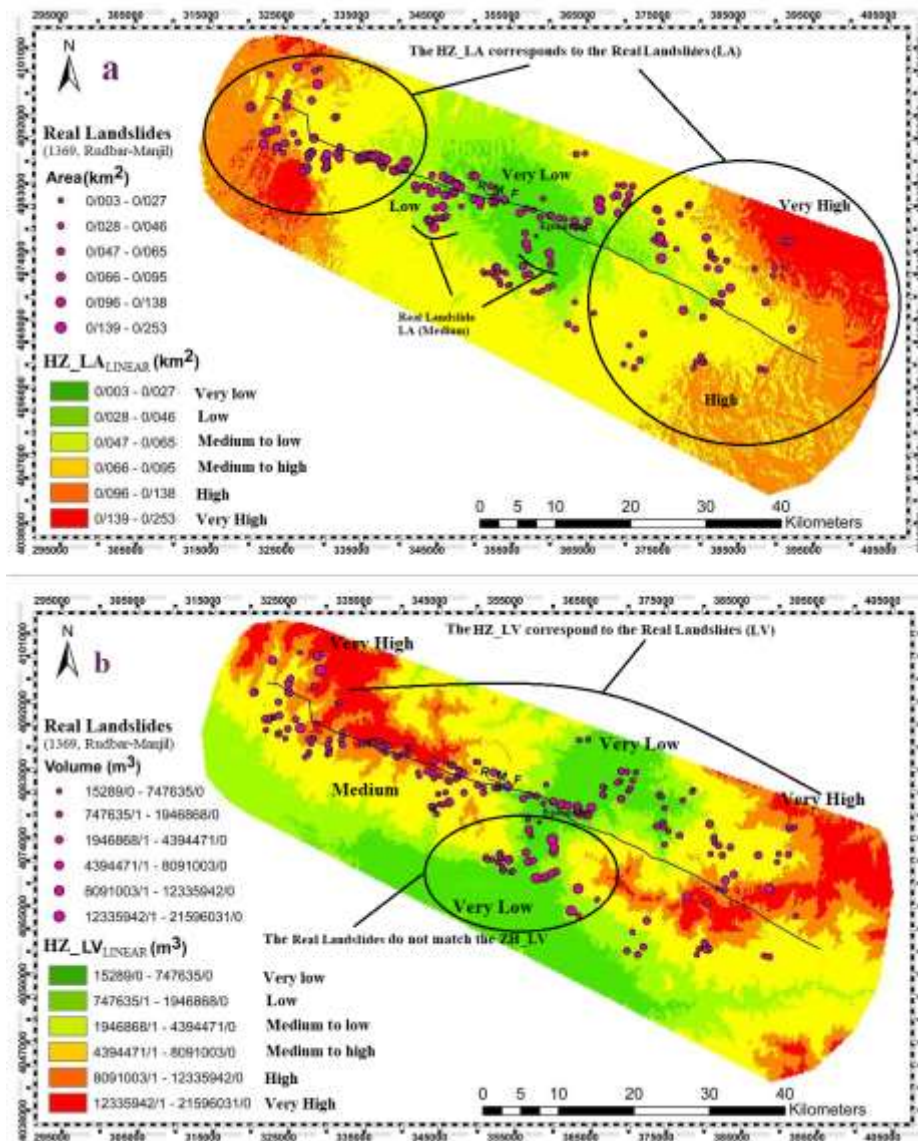
در رابطه ۱۱، HZ_LA_{LINEAR} پهنه‌بندی خطر مساحت لغزش برحسب کیلومتر مربع، DF فاصله از سطح گسیختگی بر حسب (km)، DE فاصله از رومرکز زلزله بر حسب (km)، Ia(m/s) شدت آریاس، FA زاویه اصطکاک داخلی (درجه)، C چسبندگی (kPa)، A جهت شیب (آزیموت)، PGA (m/s²) بیشینه شتاب لرزه‌ای و Cu انحنا شیب (بر حسب اعداد صحیح) است.

در شکل 13a بیشترین رده لغزش (0.139-0.253 km²) نشان-دهنده بالاترین میزان خطر (Very High) مساحت لغزش‌های ناشی از زلزله است و کمترین رده 0.003-0.027 km² نشان دهنده پایین‌ترین میزان خطر (Very Low) است. پهنه‌بندی صورت گرفته با اندازه زمین لغزش‌های رخ داده (LA, km²) در زلزله ۱۳۶۹ بر روی نقشه 13a تطابق داده شده است. مدل HZ_LA_{LINEAR} (km²) در منطقه رومرکز زلزله کمترین مقادیر لغزش را نشان می‌دهد؛ در حالی که در این مناطق

چسبندگی (kPa)، جهت شیب (آزیموت)، $PGA (m/s^2)$ بیشینه شتاب لرزه‌ای Cu انحنای شیب (بر حسب اعداد صحیح)، ارتفاع دامنه برحسب متر و S شیب دامنه بر حسب درجه است.

$$0.033(PGA) - 0.016(E) + 0.007(A) + 0.007(Cu) \quad (12)$$

در رابطه ۱۲، HZ_LV_{LINEAR} پهنه بندی خطر حجم لغزش برحسب مترمکعب، DF فاصله از سطح گسیختگی بر حسب (km)، DE فاصله از رومرکز زلزله بر حسب (km)، Ia(m/s) شدت آریاس، FA زاویه اصطکاک داخلی (درجه)، C



شکل ۱۳. a، مقادیر پیش‌بینی شده مساحت زمین‌لغزش‌ها (LA, km^2) در مقایسه با مقادیر واقعی LA, km^2 ؛ b، مقادیر پیش‌بینی شده

حجم زمین‌لغزش‌ها (LV, m^3) در مقایسه با مقادیر LV, m^3 در مدل LINEAR.

کمی خطر و حساسیت‌پذیری لغزش‌های لرزه‌ای نسبت به مدل HZ_LA_{LINEAR} نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد. بنابراین استفاده از مدل حجم جهت پهنه‌بندی حساسیت‌پذیری کمی در زون‌ها و مناطق با شرایط مشابه پیشنهاد می‌شود.

سطوح Very High در HZ_LV_{LINEAR} (شکل 13b)، انطباق بیشتری با حجم‌های واقعی (زلزله ۱۳۶۹) در امتداد و هر دو انتهای گسل نسبت به سطوح مشابه HZ_LA_{LINEAR} دارند (شکل 13a). در واقع مدل HZ_LV_{LINEAR} جهت پهنه‌بندی

۷. مدل سازی غیرخطی جغرافیایی وزنی (GWR)

جدول ۲ خلاصه مدل نتایج آزمون OLS بر اساس پارامترهای کنترل کننده در مدل جغرافیایی وزنی (GWR) مساحت و حجم زمین لغزش ها را نشان می دهد. مقادیر $VIF \leq 7$ نشان دهنده میزان

بالای هم پوشی پارامترهای کنترل کننده است. مشاهده می شود که پارامترهای فاصله از رومرکز زلزله و PGA بالاترین مقادیر VIF در هر دو مدل مساحت و حجم را دارند و در نتیجه از مدل GWR حذف می گردند.

جدول ۲. خلاصه مدل نتایج آزمون OLS بر اساس پارامترهای کنترل کننده

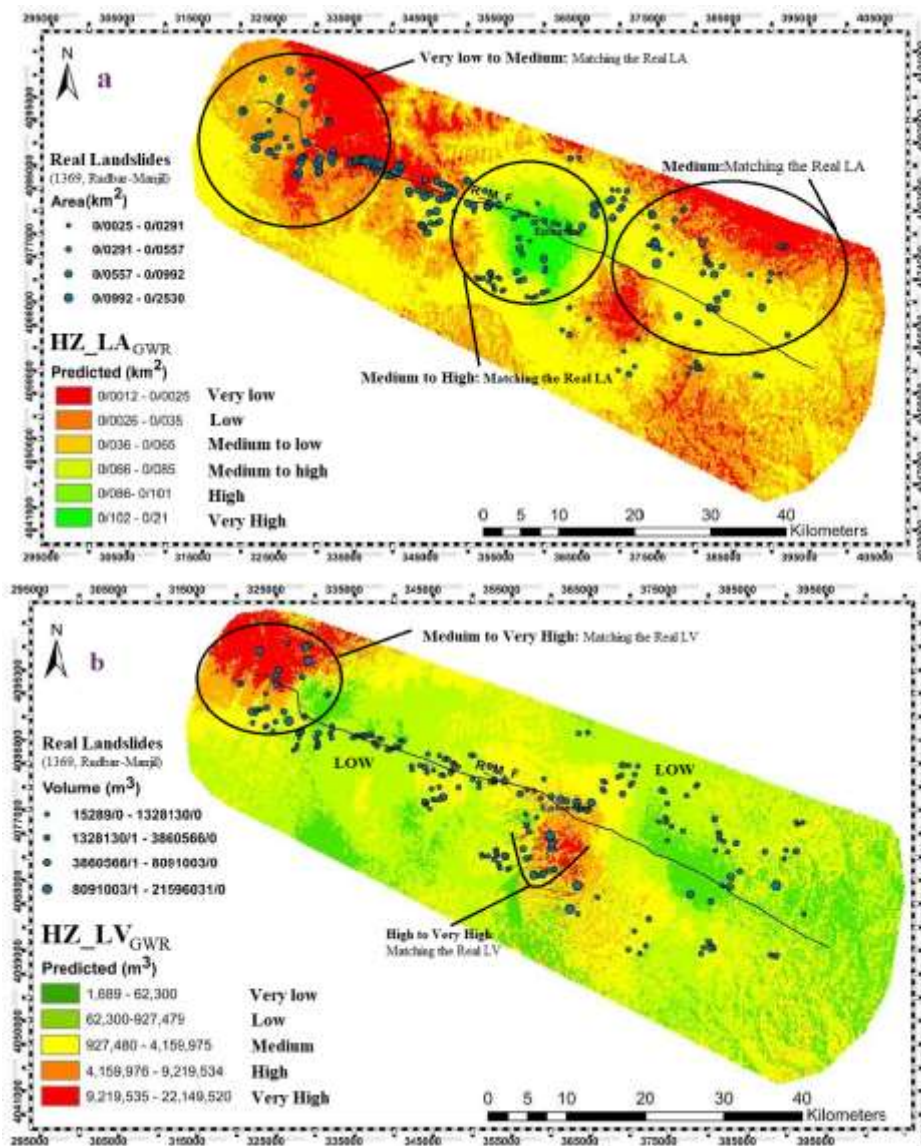
Controlling Parameters	LA			LV		
	Coefficients	t	VIF	Coefficients	t	VIF
Distance of fault	-1983.08	-1.33	5.63	-131952.99	-0.87	5.63
Distance of epicenter	1471.28	3.28	9.42	146248.26	3.21	9.42
Elevation	-15.09	-3.28	2.18	-132.97	-0.28	2.18
Aspect	61.91	2.49	3.1	10058.75	3.98	3.1
Slope	-482.32	-2.22	1.14	-34563.76	-1.80	1.14
cohesion	-45998.98	-1.78	2.65	-4379700.29	-1.66	2.65
Friction angle	76.76	2.5	2.29	24914.3	0.81	2.29
PGA	160295.7	4.33	11.82	1228955.93	3.27	11.82
Curvature	-3063.46	-1.55	1.4	-171180.86	-0.85	1.4
Log (Ia)	22132.5	1.97	6.4	24322.41	2.1	6.4

در مدل GWR مساحت، پارامترهای ورودی (متغیرهای مستقل-پیش بینی کننده) بر اساس جدول ۲ و شرط $VIF < 7$ شامل فاصله از سطح گسل، ارتفاع، جهت شیب، شیب لغزش، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، انحنای شیب و $\log(Ia)$ در برابر متغیر وابسته (LA, km^2) قرار گرفتند. بعد از اجرای مدل، هر کدام از پارامترهای ورودی فوق الذکر، ضرایب محلی ($C_1 \dots C_n, n=2,3,4, \dots$) دریافت کردند. با ضرب ضرایب محلی هر پارامتر (C_n) در لایه رستری همان پارامتر (R_n) و جمع لایه های رستری، مناطق با حساسیت پذیری مختلف، مساحت لغزشی ($HZ-LA_{GWR}$) به صورت یک لایه رستری در بستر GIS ارائه و پهنه بندی شد (شکل 14a و رابطه ۱۳).

جهت ارزیابی مدل $HZ-LA_{GWR}$ مساحت های واقعی رخ داده در زلزله ۱۳۶۹ با پهنه بندی موجود در شکل 14a انطباق داده شدند.

$$HZ_LA (or LV)_{GWR} = (C_1 \times R_1 + \dots + C_n \times R_n); n=2, 3, 4, \dots \quad (13)$$

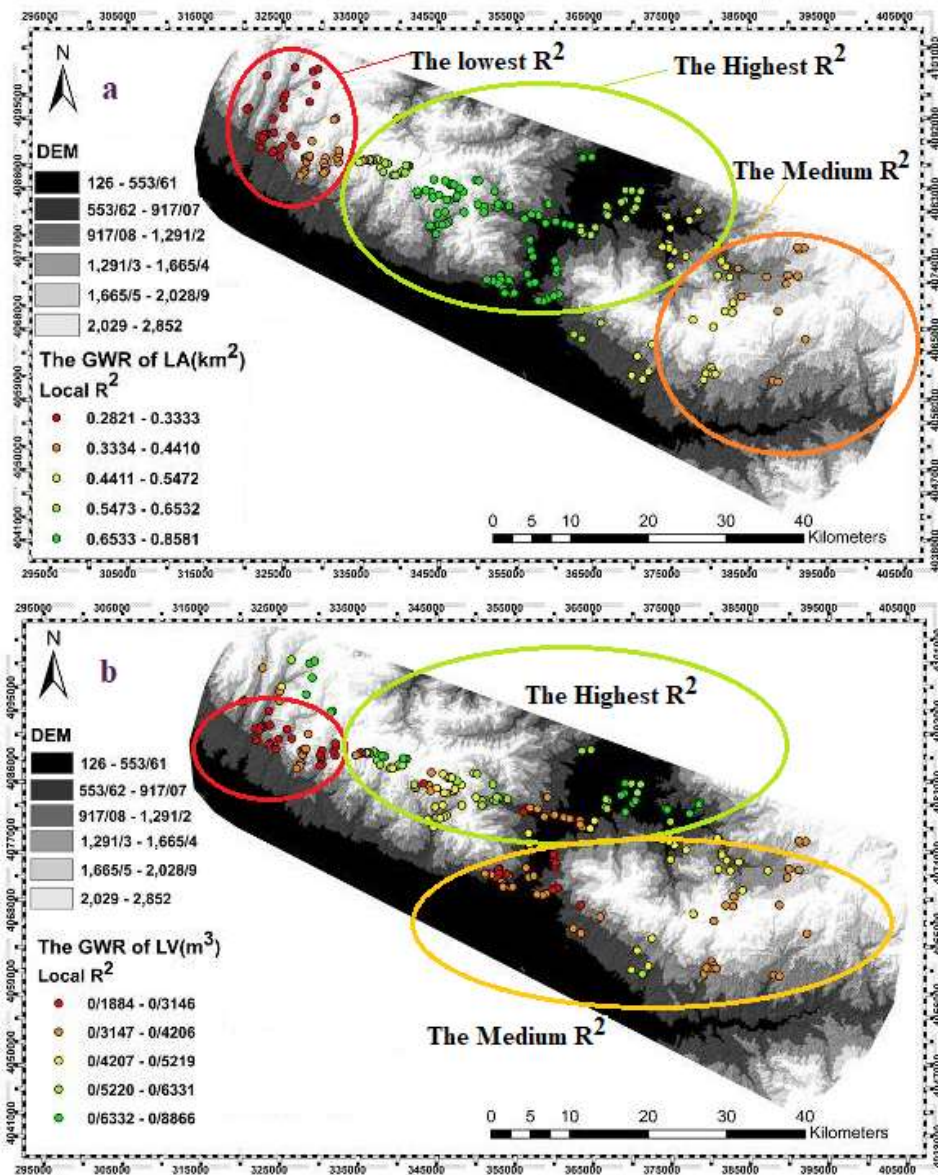
در مدل $HZ-LA_{GWR}$ مشاهده می شود که مقادیر مساحت (LA, km^2) پیش بینی شده منطبق با مساحت زمین لغزش های رخ داده (زلزله ۱۳۶۹) در کانون زلزله و هر دو انتهای گسل است. عدم انطباق پهنه بندی با مساحت لغزش های رخ داده، در امتداد شمال غربی گسل به صورت محدود در ارتفاعات بالا مشاهده می شود (شکل 14a).



شکل ۱۴. a، پهنه‌های پیش‌بینی شده مساحت زمین‌لغزش‌ها (HZ_LA_{GWR}) در مقایسه با مقادیر LA، km² واقعی؛ b، پهنه‌های پیش‌بینی شده حجم زمین‌لغزش‌ها (HZ_LV_{GWR}) در مقایسه با مقادیر LV، m³ واقعی در زلزله ۱۳۶۹.

رستری در بستر GIS ارائه و پهنه‌بندی شد (شکل 14b و رابطه 13). جهت ارزیابی مدل HZ_LV_{GWR} حجم واقعی رخ داده در زلزله ۱۳۶۹ با پهنه‌بندی موجود در شکل 14a انطباق داده شدند. در مدل HZ_LV_{GWR}، مقادیر حجم (LV, m³) پیش‌بینی شده در همه منطقه به جز انتهای جنوب شرقی گسل و انتهای شمال غربی به صورت محدود، منطبق با حجم زمین‌لغزش‌های رخ داده (زلزله ۱۳۶۹) است (شکل 14b).

در مدل HZ-LV_{GWR} پارامترهای ورودی (متغیرهای مستقل - پیش‌بینی کننده) براساس جدول ۲ و شرط $VIF < 7$ مشابه مدل HZ_LA_{GWR} در برابر متغیر وابسته (LV, m³) قرار گرفتند. بعد از اجرای مدل، هرکدام از پارامترهای ورودی فوق الذکر، ضرایب محلی (C₁...C_n, n=2,3,4, ...) دریافت کردند. با ضرب ضرایب محلی هر پارامتر (C_n) در لایه رستری همان پارامتر (R_n) و جمع لایه‌های رستری، مناطق با حساسیت‌پذیری مختلف حجم لغزشی (HZ-LV_{GWR}) به صورت یک لایه



شکل ۱۵. a، ضرایب R² محلی مدل GWR مساحت (km²) بر بستر DEM در منطقه رودبار-منجیل؛ b، ضرایب R² محلی مدل GWR حجم (m³) بر بستر DEM در منطقه رودبار-منجیل

بین ۵۰ تا ۸۵ درصد و در قطع جنوب شرقی گسل R²=0.30-0.50 است. همچنین کمترین عدم مطابقت بین حجم پیش‌بینی شده با واقعی زمین‌لغزش‌ها در انتهای شمال غربی گسل با ضرایب همبستگی محلی (۰.۱۸-۰.۴۰) است. در نتیجه مدل GWR با ضرایب همبستگی محلی (۰.۳۵ تا ۰.۵۵ درصد) نسبت به مدل LINEAR با ضرایب همبستگی ثابت ۶۶-۵۴ درصد، پیش‌بینی محلی بهتری در پهنه‌بندی خطر مساحت و حجم زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ارائه می‌دهد.

شکل 15a، نشان‌دهنده ضرایب همبستگی R² محلی مدل GWR مساحت، بر بستر مدل رقومی ارتفاعی (DEM) در منطقه رودبار-منجیل است. مشاهده می‌شود که به صورت محلی R² در قطعه میانی گسل ۶۵ تا ۸۵ درصد و در قطع جنوب شرقی گسل R²=0.35-0.55 است. شکل 15b، نشان‌دهنده ضرایب R² محلی مدل GWR حجم (m³) بر بستر مدل رقومی ارتفاعی (DEM) در منطقه رودبار-منجیل است. مشاهده می‌شود که به صورت محلی R² در قطع میانی و امتداد شمال غربی گسل،

۸. بحث

به طور خلاصه، مطالعه حاضر به بازنگری و تکمیل پایگاه داده زمین لغزش‌های ناشی از زلزله رودبار-منجیل ۱۳۶۹ ($M_w = 7.3$) در ایران و پهنه کمی اندازه زمین لغزش‌ها با استفاده از پارامترهای کنترل کننده در سه گروه (ژئوتکنیکی، توپوگرافی و لرزه‌ای) توسط مدل‌های رگرسیون خطی خودکار (LINEAR) و غیرخطی جغرافیایی وزنی (GWR) پرداخت. در زلزله ۱۳۶۹ منجیل-رودبار مساحت لغزش‌ها (LA) در دامنه‌های بیش از ۳۰-۴۰ درجه کاهش یافته و تراکم زمین‌لغزش‌ها در شیب‌های بالاتر در منطقه شمال غربی گسل در مقایسه با منطقه جنوب شرقی گسل، افزایش می‌یابد؛ همانند زلزله ۲۰۰۸ ونچوان و Xu and Xu, 2014; Xu et al., 2013a; Liu et al., 2015). دلیل توزیع فضایی مذکور، می‌تواند مربوط به ارتفاعات بالاتر و شیب‌های تندتر در قسمت شمال غربی گسل باشد (شکل 3a و 6). همچنین، لایه‌های درزه‌دار و مقاومت کم سنگ در ارتفاعات بالاتر -بخش شمال غربی- در مقایسه با ارتفاعات پایین‌تر -بخش جنوب شرقی- که دارای پوشش گیاهی و جنگلی با مقاومت سنگ بالاتر است، می‌تواند از دلایل تاثیرگذار بر تراکم زمین لغزش‌ها در زلزله ۱۳۶۹ رودبار-منجیل باشد (شکل 3a).

در مدل LINEAR مشخص گردید که بیشترین تأثیر بر روی مساحت (LA)، مربوط به پارامترهای فاصله از سطح گسیختگی گسل و رومرکز ($PI = 23.2\% - 62.5\%$)، ($PI = 8.9\%$) و زاویه اصطکاک و چسبندگی ($PI = 1.5\% - 1.5\%$) است. همچنین، پارامترهای فاصله از سطح گسیختگی گسل و رومرکز با مقدار اهمیت ($PI = 18.3\% - 30.1\%$)، زاویه اصطکاک و چسبندگی ($PI = 10.5\% - 15.2\%$) و شیب ($PI = 9.2\%$) بیشترین تأثیر بر LV را در مدل خطی خودکار داشتند. بنابراین، فاصله از سطح گسیختگی گسل در پیش بینی و پهنه‌بندی خطر اندازه لغزش، مهم‌تر از سایر پارامترهای لرزه‌ای، توپوگرافی و ژئوتکنیکی است که منطبق با مطالعات (Tang et al. و Xu and Xu (2014) و al. (2019) است. والاگوسا و همکاران (Valagussa et al. (2019) نشان داد که اندازه زمین لغزش با فاصله از سطح

گسیختگی گسل کاهش می‌یابد؛ در حالی که این روند برای فاصله از مرکز زلزله مشخص نیست. ماسی و همکاران (Massey et al., 2018) دریافت که فاصله از گسل پیش‌بینی بهتری از احتمال رانش زمین نسبت به PGA مدل شده از (Shake Map) ارائه می‌دهد.

نتایج این مطالعه بر اساس پارامترهای مرتبط با شیب و نوع لیتولوژی، با مطالعه گئو و همادا (Guo and Hamada, 2013) در زلزله ۲۰۰۸ ونچوان مطابقت ندارد. آن‌ها با استفاده از روش چند متغیره خطی نشان دادند که ارتفاع شیب، شتاب پیشینه زمین و ساختار زمین شناسی تأثیر بیشتری نسبت به زاویه شیب و نوع لیتولوژی بر سطح و حجم لغزش‌ها دارند. این اختلاف ممکن است به دلیل توپوگرافی خاص (ارتفاعات بالاتر و شیب‌های تندتر) منطقه رودبار-منجیل در مقایسه با ونچوان ۲۰۰۸ باشد. علاوه بر این، در مطالعه حاضر از پارامترهای ژئوتکنیکی (زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) در مقایسه با فاکتورهای کیفی لیتولوژی (ساختار لایه‌بندی و درزه‌ها) نسبت به مطالعه (Guo and Hamada (2013) استفاده شده است. سبکبار و همکاران (Sabokbar et al., 2014)، ایرنر و دوزگان (Erener and Duzgun, 2010) س در یافتند که مدل رگرسیون فضایی که ضرایب را در مقیاس محلی تخمین می‌زند، عملکرد بهتری نسبت به مدل رگرسیون عمومی دارد. فیولت و همکاران (Feuillet et al., 2014) پیشنهاد کردند که مدل سازی مبتنی بر GWR با برجسته سازی متغیرهای محلی (غیرقابل توصیف در مدل‌های خطی) و ورودی‌های قابل توجهی را برای نقشه برداری از حساسیت‌پذیری زمین لغزش‌ها فراهم می‌کند. هم راستا با مطالعات پیشین، مطالعه حاضر نشان داد که مدل GWR نسبت به مدل رگرسیون خطی عملکرد بهتری در پهنه‌بندی خطر اندازه زمین لغزش‌ها دارد.

۹. نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی و مقایسه پهنه‌بندی کمی خطر اندازه زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ۱۳۶۹ رودبار-منجیل توسط دو روش رگرسیون خطی و جغرافیایی وزنی (غیرخطی)، بر اساس پارامترهای کنترل‌کننده بود. در این راستا، با توجه به

به اعمال تاثیرات محلی پارامترها کنترل کننده توسط مدل GWR. نسبت به اعمال یکنواخت اثر پارامترها توسط مدل LINEAR، است. در نهایت ادغام مدل‌های رگرسیون مکانی GWR، همراه با سایر روش‌های آماری و داده‌کاوی، جهت بهبود قابلیت مدل‌های پهنه‌بندی و حساسیت پذیری خطر اندازه زمین‌لغزش‌ها توصیه می‌شود.

حساسیت عملکرد مدل‌های آماری (پهنه‌بندی) به کمبود داده‌ها، جهت حصول به نتایج معتبر پهنه‌بندی، بانک اطلاعاتی جامعی تهیه گردید. یافته‌های مطالعه حاضر نشان داد که مقادیر پیش-بینی شده مساحت و حجم زمین‌لغزش‌ها توسط مدل GWR نسبت به مدل LINEAR، در مقایسه با مساحت و حجم واقعی زمین‌لغزش‌ها، دقیق‌تر و معتبرتر بود که یکی از دلایل آن مربوط

منابع

- حافظی مقدس، ن.، و کمک پناه، ع.، ۱۳۷۲. پهنه بندی خطر زمین لغزش در ایران: شناسایی و به نقشه در آوردن زمین‌لغزش‌های مهم تحریک شده در زلزله خرداد ۱۳۶۹ منجیل، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- سوری، س.، لشکری پور، غ.، غفوری، م.، فرهادی، ط.، ۱۳۹۲. اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش و تهیه نقشه خطر آن با استفاده از مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: حوضه کشوری). نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران ۶ (شماره ۱ و ۶) ۱-۱۲.
- شریعت جعفری، م.، ۱۳۸۷. ارزیابی ریسک ویژه زمین لغزش در بخشی از البرز جنوبی. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران ۱ (شماره ۳ و ۴) ۱-۱۴.
- طلائی، ر.، و شریعت جعفری، م.، ۱۳۸۶. بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش در جنوب غرب خلخال با استفاده از جداول توافقی و آزمون های آماری مربع کای. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران ۱ (شماره ۲ و ۱) ۶۲-۴۳.
- مهدویفر، م.، ۱۳۸۵. پایان نامه برای دریافت درجه دکتری، ارزیابی تحلیلی و طراحی سامانه مدیریت ریسک زمین لغزش‌های ناشی از زلزله در کشور، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.
- معماریان، پ.، ۱۳۹۶. توسعه مدل پهنه بندی خطر زمین لغزش ناشی از زلزله با استفاده از پایگاه داده ایران و به کارگیری منطق فازی. رساله دکتری. موسسه بین‌المللی مهندسی زلزله و زلزله شناسی.
- Alonso Rodriguez, A., Miranda, E., 2015. Assessment of building behavior under near-fault pulse-like ground motions through simplified models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 47-58. doi:https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.08.009.
- Ambraseys, N.N., Melville, C.P., 1983. A history of Persian earthquakes. (Cambridge Earth Science Series.) xvii, 219 pp. Cambridge, etc.: Cambridge University Press, 1982. £35. *Bulletin of the School of Oriental and African Studies*, 46(2), 360-360. doi:10.1017/S0041977X00079131.
- Archila, M., Ventura, C.E., Liam Finn, W.D., 2017. New insights on effects of directionality and duration of near-field ground motions on seismic response of tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(11), e1363. doi:10.1002/tal.1363.
- Baeza C, Corominas J., 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surf Process Landf* 26:1251-1263
- Bai, SB., Wang, J., Thiebes, B., Cheng, C., Chang, Z.Y., 2014. Susceptibility assessments of the Wenchuan earthquake-triggered landslides in Longnan using logistic regression. *Environ Earth Sci* 71:731-743.
- Bao, H., Ampuero, J.P., Meng, L., Fielding, E.J., Liang, C., Milner, C.W.D., Feng, T., Huang, H., 2019. Early and persistent supershear rupture of the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake. *Nat Geosci* 12:200-205.
- Berberian, M., Qorashi, M., Jackson, J.A., Priestley, K., Wallace, T., 1992. The Rudbar-Tarom earthquake of 20 June 1990 in NW Persia: Preliminary field and seismological observations, and its tectonic significance. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(4), 1726-1755.
- Berberian, M., 1994. Natural hazards and the first earthquake catalog of Iran, Vol. 1: historical hazards in Iran prior 1900, I.I.E.E.S. report.

- Brunsdon, C., Fotheringham, A.S., Charlton, M., 1996. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. *Geogr Anal* 28(4):281–298.
- mapping on the Peloponnese Peninsula, Greece. *Geosciences* 4:176–190.
- Chalkias, C., Kalogirou, S., Ferentinou, M., 2014b. Landslide susceptibility map of the Peloponnese peninsula in South Greece. *J Maps* 10(2): 211–222.
- Chen, C.-W., Iida, T., Yamada, R., 2017. Effects of active fault types on earthquake-induced deep-seated landslides: A study of historical cases in Japan. *Geomorphology*, 295, 680-689. doi:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.030.
- Chigira, M., Wu, X., Inokuchi, T., Wang, G., 2010. Landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Geomorphology*, 118(3), 225-238. doi:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.01.003.
- Cui, P., Guo, C.X., Zhou, J.W., Hao, M.h., Xu, F.G., 2014. The mechanisms behind shallow failures in slopes comprised of landslide deposits. *Engineering Geology*, 180, 34-44. doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.04.009.
- Dai, F.C., Xu, C., Yao, X., Xu, L., Tu, X.B., Gong, Q.M., 2011. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40 (4), 883-895. doi:https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.04.010.
- Del Gaudio, V., Pierri, P., Wasowski, J., 2003. An Approach to Time-Probabilistic Evaluation of Seismically Induced Landslide Hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93 (2), 557-569. doi:10.1785/0120020016.
- De La Ville N., Diaz, A.C., Ramirez, D., 2002. Remote sensing and GIS technologies as tools to support sustainable management of areas devastated by landslides. *Environ Dev Sustain* 4 (2):221–229.
- Dagdelenler, G., Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., 2015. Modification of seed cell sampling strategy for landslide susceptibility mapping: an application from the eastern part of the Gallipoli Peninsula (Canakkale, Turkey). *Bull Eng Geol Environ* 75(2):575–590.
- Du, S., Wang, Q., Guo, L., 2014. Spatially varying relationships between land-cover change and driving factors at multiple sampling scales. *J Environ Manag* 137:101–110.
- Erener, A., Düzgün, HSB., 2010. Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of More and Romsdal (Norway). *Landslides* 7(1):55–68.
- Feuillet, T., Coquin, J., Mercier, D., Cossart, E., Decaulne, A., Páll Jónsson, H., Sæmundsson, Þ., 2014. Focusing on the spatial non-stationarity of landslide predisposing factors in northern Iceland: do paraglacial factors vary over space. *Progress in Physical Geography*, pp 1–24.
- Fotheringham, A.S., Brunsdon, C., Charlton, M., 2002. Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships. Wiley, Chichester.
- Gao, L., Wallace, T.C., 1995. The 1990 Rudbar-Tarom Iranian earthquake sequence: Evidence for slip partitioning. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100 (B8), 15317-15332. doi:10.1029/95jb00320.
- Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y., Koketsu, K., 2009. An empirical spectral ground-motion model for Iran. *Journal of Seismology*, 13(4), 499-515. doi:10.1007/s10950-008-9143-x.
- Gordo-Monsó, C., Miranda, E., 2018. Significance of directivity effects during the 2011 Lorca earthquake in Spain. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16 (7), 2711-2728. doi:10.1007/s10518-017-0301-9.
- Gorum, T., Fan, X., Van Westen, C.J., Huang, R.Q., Xu, Q., Tang, C., Wang, G., 2011. Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake. *Geomorphology*, 133(3), 152-167. doi:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.12.030.
- factors during Wenchuan earthquake: A case study in Wenchuan County. *Engineering Geology*, 152(1), 202-209.

- Guo, D., Hamada, M., He, C., 2014a. An evaluation of influential factors on landslide mobility during the 2008 Wenchuan earthquake. *Nat Hazards Earth Syst Sci Discuss* 2 (1): 613–647. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.10.012>.
- Guo, D., Hamada, M., He, C., Wang, Y., Zou, Y., 2014b. An empirical model for landslide travel distance prediction in Wenchuan earthquake area. *Landslides*, 11 (2), 281-291. doi:10.1007/s10346-013-0444-y.
- Guo, C.W., Huang, Y.D., Yao, L.K., Alradi, H., 2017. Size and spatial distribution of landslides induced by the 2015 Gorkha earthquake in the Bhote Koshi river watershed. *Journal of Mountain Science*, 14(10), 1938-1950. doi:10.1007/s11629-016-4140-y.
- Guthrie, R.H., Evans, S.G., 2004. Analysis of landslide frequencies and characteristics in a natural system, coastal British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (11), 1321-1339. doi:10.1002/esp.1095.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., Valigi, D., 2009. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 279(3), 222-229. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.01.005>.
- Haeri, S. M., 1996. Landslides induced by earthquake, a specific observation on earthquake induced landslides of Manjil 1990, Islamic Revolution Foundation for Housing, Tehran Iran, 165 p, (in Persian).
- Harp, E.L., Keefer, D.K., Sato, H.P., Yagi, H., 2011. Landslide inventories: The essential part of seismic landslide hazard analyses. *Engineering Geology*, 12 (2), 9-21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.06.013>.
- He, Y., Beighley, R.E., 2008. GIS-based regional landslide susceptibility mapping: a case study in southern California. *Earth Surf Process Landf* 33(3):380–393.
- Huang, R.Q., Li, W.L., 2009. Analysis of the geo-hazards triggered by the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68(3), 363-371. doi:10.1007/s10064-009-0207-0.
- Jibson, R.W., Harp, E.L., Michael, J.A., 1998. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps; an example from the Los Angeles, California, area (98-113). Retrieved from <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr98113>.
- Jibson, R.W., Keefer D.K., 1989. Statistical analysis of factors affecting landslide distribution in the new Madrid seismic zone, Tennessee and Kentucky. *Engineering Geology*, 27 (1), 509-542. doi:[https://doi.org/10.1016/0013-7952\(89\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(89)90044-6).
- Kavzoglu T, Sahin EK, Colkesen, I., 2014. Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides* 11:425–439.
- Kazar, B.M., Shekhar, S., Boley, D., Lilja, D.J., Pace, R.K., LeSage, J.P., 2005. Parameter estimation for the spatial autoregression model: a rigorous approach. *IEEE Transactions On Knowledge and Data Engineering. Technical Report*. Revisited date 13.01.2010 from http://www.cs.umn.edu/tech_reports_upload/tr2007/old_files/07-004.pdf.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *GSA Bulletin*, 95(4), 406-421. doi:10.1130/0016-7606(1984)95<406:LCBE>2.0.CO;2.
- Keefer, D.K., 2002. Investigating landslides caused by earthquakes-a historical review. *Surv Geophys* 23(6):473–510.
- Khodashahi, M., Rahimi, E., Bagheri, V., 2018. Earthquake-Induced Landslides Hazard Zonation of Rudbar-Manjil Using CAMEL Model. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(2), 1319-1340. doi:10.1007/s10706-017-0395-5.
- Komak Panah, A., Hafezi Moghadas, N., 1993. Landslide hazard zonation study in affected area by Manjil earthquake, 1990. In *Manual for zonation or seismic geotechnical hazards / prepared by the Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, of the International Society for Soil Mechanics*

- and Foundation Engineering.: [Tokyo]: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, c1993.
- Li, G., West, A.J., Densmore, A.L., Jin, Z., Parker, R.N., Hilton, R.G., 2014. Seismic mountain building: Landslides associated with the 2008 Wenchuan earthquake in the context of a generalized model for earthquake volume balance. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15 (4), 833-844. doi:10.1002/2013gc005067.
- Li, S., Xu, Q., Tang, M., Iqbal, J., Liu, J., Zhu, X., Zhu, D., 2019. Characterizing the spatial distribution and fundamental controls of landslides in the three gorges reservoir area, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(6), 4275-4290. doi:10.1007/s10064-018-1404-5.
- Liu, L., Xu, C., Xu, X., Tian, Y., Ran, Y., Chen, J., 2015. Interactive statistical analysis of predisposing factors for earthquake-triggered landslides: a case study of the 2013 Lushan, China Ms7.0 earthquake. *Environmental Earth Sciences*, 73(8), 4729-4738. doi:10.1007/s12665-014-3758-8.
- Ma, S.Y., Xu, C., Xu, X.W., 2019. Volume expansion rates of seismic landslides and influencing factors: A case study of the 2008 Wenchuan earthquake. *Journal of Mountain Science*, 16 (8), 1731-1742. doi:10.1007/s11629-019-5479-7.
- Martino, S., Bozzano, F., Caporossi, P., D'Angiò, D., Della Seta, M., Esposito, C., Fantini, A., Fiorucci, M., Giannini, L.M., Iannucci, R., Marmoni, G.M., Mazzanti, P., Missori, C., Moretto, S., Piacentini, D., Rivellino, S., Romeo, R.W., Sarandrea, P., Schilirò, L., Troiani, F., Varone, C., 2019. Impact of landslides on transportation routes during the 2016-2017 Central Italy seismic sequence. *Landslides* 16(6):1221–1241.
- Mahdavifar, M., 2006. Analytical evaluation and design of the system (GIS) for seismic landslides hazard management in Iran. PhD thesis. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology; 2006 [inPersian].
- Mahdavifar, M., Jafari, M.K., Zolfaghari, M., 2008. Real-Time Generation of Arias Intensity and Seismic Landslides Hazards Maps Using GIS. *JSEE*, 10 (2), 81-90.
- Mahdavifar, M., Memarian, P., 2013. Assessment of Earthquake-Induced Landslides Triggered by Roudbar-Manjil Earthquake in Rostamabad(Iran) Quadrangle Using Knowledge-Based Hazard Analysis Approach. In (pp. 769-780).
- Marc, O., Hovius, N., Meunier, P., Gorum, T., Uchida, T., 2016. A seismologically consistent expression for the total area and volume of earthquake-triggered landsliding. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(4), 640-663. doi:10.1002/2015jf003732.
- Marc, O., Meunier, P., Hovius, N., 2017. Prediction of the area affected by earthquake-induced landsliding based on seismological parameters. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17(7), 1159-1175. doi:10.5194/nhess-17-1159-2017.
- Massey, C., Townsend, D., Rathje, E., Allstadt, K. E., Lukovic, B., Kaneko, Y., Villeneuve, M., 2018. Landslides Triggered by the 14 November 2016 Mw 7.8 Kaikōura Earthquake, New Zealand. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(3B), 1630-1648. doi:10.1785/0120170305.
- Mavroedidis, G.P., Papageorgiou, A.S., 2003. A mathematical representation of near-fault ground motions. *Bull Seismol Soc Am* 93:1099–1131.
- Meunier, P., Hovius, N., Haines, A.J., 2007. Regional patterns of earthquake-triggered landslides and their relation to ground motion. *Geophysical Research Letters*, 34(20). doi:10.1029/2007gl031337.
- Meunier, P., Hovius, N., Haines, J.A., 2008. Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(3), 221-232. doi:https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.020.
- Newmark, N.M., 1965. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. *Géotechnique*, 15(2), 139-160. doi:10.1680/geot.1965.15.2.139.

- Parker, R.N., Densmore, A.L., Rosser, N.J., De Michele, M., Li Y, Huang R, Petley, D.N., 2011. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth. *Nature Geoscience*, 4(7), 449-452. doi:10.1038/ngeo1154.
- Petley, D.N., 2008. The global occurrence of fatal landslides in 2007. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 10, EGU General Assembly 2008, p 3.
- Pradhan, B., Youssef, A.M., Varathrajoo, R., 2010. Approaches for delineating landslide hazard areas using different training sites in an advanced artificial neural network model. *Geo-spatial Information Science*, 13(2), 93-102. doi:10.1007/s11806-010-0236-7.
- Piacentini, D., Troiani, F., Soldati, M., Notarnicola, C., Savelli, D., Schneiderbauer, S., Strada, C., 2012. Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (South-Eastern Alps, Italy). *Geomorphology* 151–152:196–206.
- Qi, S., Xu, Q., Lan, H., Zhang, B., Liu, J., 2010. Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China. *Engineering Geology*, 116 (1), 95-108. doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.07.011.
- Rajabi AM, Khamsehchiyan M, Mahdavi MR, Del Gaudio V, Capolongo D., 2013. A time probabilistic approach to seismic landslide hazard estimates in Iran. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 48, 25-34. doi:https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.09.005.
- Ratner., B., 2012. *Statistical and machine-learning data mining. Techniques for better predictive modeling and analysis of big data.* 2nd ed.
- Rodriguez CE, Bommer JJ, Chandler RJ (1999) Earthquake-induced landslides: 1980–1997. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 18 (5), 325–346.
- Shao C, Li Y, Lan H, Li P, Zhou R, Ding H, Deng T., 2019. The role of active faults and sliding mechanism analysis of the 2017 Maoxian postseismic landslide in Sichuan, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(8), 5635-5651. doi:10.1007/s10064-019-01480-8.
- Shoaei Z. and Sassa K., 1993. Mechanism of landslides triggered by the 1990 Iran earthquake: *Bull. Disas. Prev. Res. Kyoto University*, Vol. 43, Part 1, No. 372, P. 1-29.
- Sabokbar, H.F., Roodposhti, M.S., Tazik, E., 2014. Landslide susceptibility mapping using geographically-weighted principal component analysis. *Geomorphology*. 226:15–24.
- Tang, R., Fan, X., Scaringi, G., Xu, Q., van Westen, C. J., Ren, J., Havenith, H.-B., 2019. Distinctive controls on the distribution of river-damming and non-damming landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(6), 4075-4093. doi:10.1007/s10064-018-1381-8.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., 2009. Microseismic evidence of slip partitioning for the Rudbar-Tarom earthquake (Ms 7.7) of 1990 June 20 in NW Iran. *Geophysical Journal International*, 176 (2), 529-541. doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03976. x.
- Tatard L, Grasso JR, Helmstetter A, Garambois S., 2010. Characterization and comparison of landslide triggering in different tectonic and climatic settings. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F4). doi:10.1029/2009jf001624.
- Tong, X., Sandwell, D.T., Fialko, Y., 2010. Coseismic slip model of the 2008 Wenchuan earthquake derived from joint inversion of interferometric synthetic aperture radar, GPS and field data. *J Geophys Res* 115(B04314). <https://doi.org/10.1029/2009JB006625>.
- Valagussa, A., Marc, O., Frattini, P., Crosta, G.B., 2019. Seismic and geological controls on earthquake-induced landslide size. *Earth and Planetary Science Letters*, 506, 268-281. doi:https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.11.005.

- Van Westen, C.J., Van Asch. TWJ., Soeters, R., 2006. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 167-184. doi:10.1007/s10064-005-0023-0.
- Wang, F., Fan. X., Yunus, AP., Siva Subramanian, S., Alonso-Rodriguez, A., Dai, L., Huang, R., 2019. Coseismic landslides triggered by the 2018 Hokkaido, Japan (Mw 6.6), earthquake: spatial distribution, controlling factors, and possible failure mechanism. *Landslides*, 16(8), 1551-1566. doi:10.1007/s10346-019-01187-7
- Weisberg, S., 2005. *Applied linear regression* (3rd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Wilson, RC., Keefer, D.K., 1983. Dynamic analysis of a slope failure from the 1979 Coyote Lake, California earthquake. *Seismological Society of America Bulletin* 1983;73(3):863–77.
- Xu, C., Dai, FC., Yao, X., 2009. Incidence number and affected area of Wenchuan earthquake-induced landslides. *Science & Technology Review*, 27(11): 79-81.
- Xu, C., Xu, X., 2012. Comment on “Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China” by Shengwen Qi, Qiang Xu, Hengxing Lan, Bing Zhang, Jianyou Liu [Engineering Geology 116 (2010) 95–108]. *Engineering Geology*, 133-134, 4042. doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.02.017.
- Xu, C., Dai, F., Xu, X., Lee, YH., 2012. GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China. *Geomorphology*, 145-146, 70-80. doi:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.040.
- Xu, C., Xu, X., Yao, X., Dai, F., 2013a. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis. *Landslides*, 11. doi:10.1007/s10346-013-0404-6
- Xu, C., Xu, X., Dai, F., Wu, Z., He, H., Shi, F., Xu, S., 2013b. Application of an incomplete landslide inventory, logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping related to the May 12, 2008 Wenchuan earthquake of China. *Natural Hazards*, 68 (2), 883-900. doi:10.1007/s11069-013-0661-7.
- Xu, C., Xu, X., 2014. Statistical analysis of landslides caused by the Mw 6.9 Yushu, China, earthquake of April 14, 2010. *Natural Hazards*, 72(2), 871-893. doi:10.1007/s11069-014-1038-2.
- Xu, C., Xu, X., Pourghasemi, HR., Pradhan, B., Iqbal J., 2014. Volume, gravitational potential energy reduction, and regional centroid position change in the wake of landslides triggered by the 14 April 2010 Yushu earthquake of China. *Arabian Journal of Geosciences*, 7 (6), 2129-2138. doi:10.1007/s12517-013-1020-4.
- Xu, C., Xu, X., Shyu, JBH., 2015. Database and spatial distribution of landslides triggered by the Lushan, China Mw 6.6 earthquake of 20 April 2013. *Geomorphology*, 248, 77-92. doi:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.002.
- Xu, C., Xu, X., Shen, L., Yao, Q., Tan, X., Kang, W., Li, K., 2016. Optimized volume models of earthquake-triggered landslides. *Scientific Reports*, 6(1), 29797. doi:10.1038/srep29797.
- Yalcin, A., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. *CATENA*, 72(1), 1-12. doi:https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.01.003.
- Yang, H., 2013. The Case for Being Automatic: Introducing the Automatic Linear Modeling (LINEAR) Procedure in SPSS Statistics. *Multiple Linear Regression Viewpoints*, 39.
- Yassaghi, A., Salari-Rad, H., Kanani-Moghadam, H., 2005. Geomechanical evaluations of Karaj tuffs for rock tunneling in Tehran–Shomal Freeway, Iran. *Engineering Geology*, 77 (1), 83-98. doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.08.003.

-
- Yin, Y., Wang, F., Sun, P., 2009. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Landslides*, 6(2), 139-152. doi:10.1007/s10346-009-0148-5.
- Youssef, AM., Maerz, NH., Hassan AM., 2009. Remote sensing applications to geological problems in Egypt: case study, slope instability investigation, Sharm El-Sheikh/Ras-Nasrani Area, Southern Sinai. *Landslides*, 6(4), 353. doi:10.1007/s10346-009-0158-3.
- Youssef AM., Al-Kathery M., Pradhan, B., 2015a. Landslide susceptibility mapping at Al-Hasher area, Jizan (Saudi Arabia) using GIS-based frequency ratio and index of entropy models. *Geosci J* 19(1):113–134.
- Youssef, AM., Pradhan B., Jebur, MN., El-Harbi, HM., 2015b. Landslide susceptibility mapping using ensemble bivariate and multivariate statistical models in Fayfa area, Saudi Arabia. *Environ Earth Sci* 73:3745–3761.
- Youssef, A.M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z.S., Al-Katheeri, M.M., 2016. Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Landslides*, 13(5), 839-856. doi:10.1007/s10346-015-0614-1.
- Zhang, L., Chen, G., Wu, Y., Jiang, H., 2016. Stochastic ground-motion simulations for the 2016 Kumamoto, Japan, earthquake. *Earth, Planets and Space*, 68(1), 184. doi:10.1186/s40623-016-0565-3.