

تعیین آستانه شدت-مدت بارندگی به منظور پیش بینی زمین لغزش های کم عمق در حوضه آبریز رودخانه های تجن و نکارود (شرق مازندران)

مصطفی محمدی و اوسری^۱، غلامرضا شعاعی^{۲*}، فرهاد شهیدی^۳

دریافت مقاله: ۹۲/۱۱/۰۲ پذیرش مقاله: ۹۳/۰۸/۰۷

چکیده

زمین لغزش های تحریک شده توسط بارندگی همه ساله موجب تحمیل خسارات جانی و مالی فراوان در سراسر دنیا می گردد. عامل اصلی تحریک زمین لغزش های کم عمق و جریان های واریزه ای در شرق مازندران نیز رخدادهای بارندگی است. این پژوهش به بررسی زمین لغزش های تحریک شده توسط رخدادهای بارندگی که در حوزه آبریز رودخانه های تجن و نکارود روی داده اند می پردازد. ۲۳ رخداد ثبت شده بارندگی در دوره ۶ ماهه دوم سال ۱۳۹۱ در شرق مازندران رخ داده اند. ۱۵ رخداد از ۲۳ رخداد بارندگی مورد پژوهش که از نوع کوتاه یا میان مدت است، موجب بروز ده ها زمین لغزش شده اند. شدت و مدت رخدادهای بارندگی محرک زمین لغزش های کم عمق و جریان های واریزه ای در نموداری تمام لگاریتمی رسم گردیدند. سپس آستانه شدت-مدت بارندگی برای لغزش هایی که در اثر بارندگی تحریک شده اند به دست آمد. این آستانه با استفاده از روش آماری رگرسیون چندک، به وسیله خط رگرسیون صدک پنجم به مرز پایینی داده بارندگی های محرک لغزش برآزش شده و به صورت $I=0.51 \times D^{0.60}$ بیان می شود که I شدت بارندگی برحسب میلی متر بر ساعت و D مدت بارندگی برحسب ساعت است. همچنین آستانه به دست آمده با آستانه های جهانی موجود مقایسه گردید و مشاهده شد که این آستانه، رویداد لغزش های با شدت میانگین بارندگی کمتری را پیش بینی می کند. از بین رخدادهای بارندگی مورد پژوهش، رخدادهای بارندگی کوتاه مدت با شدت بیشتر نسبت به رخدادهای بارندگی طولانی تر که شدت کمی دارند سبب تحریک زمین لغزش های بیشتری شده اند. این پدیده احتمالاً به دلیل زهکشی بالا در توده خاک کم عمق و نیز خردشدگی سنگ بستر مارنی و مارن آهکی است.

کلید واژه ها: پیش بینی زمین لغزش، آستانه شدت-مدت بارندگی، استان مازندران

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

۲. عضو هیئت علمی گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس shoaei@modares.ac.ir

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

زمین لغزش از جمله سوانح طبیعی است که همه ساله موجب وارد آمدن خسارت فراوان مالی به کشور می گردد. شریعت جعفری (۱۳۹۰) این خسارت را که بر اثر ۲۸۴۴۳ مورد لغزش روی داده در کشور وارد شده، رقمی معادل ۸۰۴۶۴۸ میلیارد ریال برآورد کرده است. تغییرات آب و هوای کره زمین در سال های اخیر به تدریج موجب افزایش و تشدید رویدادهای اقلیمی همانند رخدادهای بارندگی با شدت بالا و همچنین طوفان ها شده است (Duc, 2013). از طرف دیگر، همگام با افزایش جمعیت، نواحی حساس به زمین لغزش در حال گسترش بوده و همچنین فراوانی و بزرگی زمین لغزش ها و جریان های واریزه ای هم تحت تأثیر رشد جمعیت و توسعه تأسیسات زیربنایی در حال افزایش است (Staley et al., 2013). بروز پدیده زمین لغزش می تواند ناشی از عوامل متعدد زمین شناسی، زمین ریخت شناسی، هیدرولوژی، و انسانی باشد، ولی معمولاً در شروع زمین لغزش تنها یک محرک خارجی نقش محوری دارد. بارندگی، ذوب سریع برف، تغییرات ناگهانی سطح آب زیرزمینی، زلزله، فرسایش با سرعت زیاد، بارگذاری روی شیب و باربرداری از پای شیب (طبیعی و غیر طبیعی) از مهم ترین عوامل محرک زمین لغزش ها برشمرده می شوند (Sidle and Ochiai, 2006). تعدادی از پژوهشگران بارندگی را به عنوان متداول ترین عامل تحریک کننده وقوع زمین لغزش ها برشمرده اند. (به عنوان مثال Cannon and Ellen, 1985; Crozier, 1999; Jakob and Weatherly, 2003; Alfieri et al., 2012). از این رو، برای شناخت و تحلیل عوامل اصلی زمین لغزش ها، ضروری است که ارتباط بین بارندگی و رویداد زمین لغزش ها به خوبی درک شود (Ibsen and Casagli, 2004; Hong et al., 2005; Guzzetti et al., 2007; Petley, 2011). اثر بارندگی بر زمین لغزش ها، با توجه به ابعاد لغزش، حرکت شناسی فرآیند گسیختگی، نوع مواد درگیر، و برخی پارامترهای دیگر متفاوت است. گسیختگی های سطحی معمولاً توسط رخدادهای بارندگی کوتاه مدت و شدید، و لغزش های

عمیق توسط رخدادهای بارندگی طولانی مدت تحریک می شوند (Campbell, 1975; Cancelli and Nova, 1985; Cannon and Ellen, 1985; Wieczorek, 1987; Guzzetti et al., 1992; Crosta, 1998; Bonnard and Noverraz, 2001). یکی از مفاهیمی که از آن برای بیان ارتباط یک رخداد بارندگی با رویداد زمین لغزش استفاده می شود "آستانه بارندگی" است. بسیاری از پژوهشگران در راستای بررسی ارتباط زمین لغزش و بارندگی و در نهایت، توسعه آستانه های بارندگی شروع زمین لغزش کوشیده اند (به عنوان مثال Caine, 1980; Larsen and Simon, 1993; Clarizia et al., 1996; Montgomery et al., 2000; Jakob and Weatherly, 2003; Cannon and Gartner, 2005; Crosta and Frattini, 2008; Dahal and Hasegawaa, 2008; Guzzetti et al., 2007, 2008; Tiranti and Rabuffetti, 2010; Staley et al., 2013). لغزش های تحریک شده توسط بارندگی، آستانه همان میزان بارشی است که هنگام رسیدن به آن، لغزش رخ خواهد داد. شناسایی و توسعه این آستانه ها، یکی از راهکارهای موجود برای کاستن پی آمدهای اقتصادی و اجتماعی زمین لغزش هاست (Jakob and Weatherly, 2003). بسیاری از محققان در سراسر جهان، آستانه بارندگی شروع زمین لغزش را به منظور پیش بینی رویداد زمین لغزش ها و هشدار به مقامات مربوطه برای آگاهی از خطرات بالقوه توسعه داده اند (به عنوان مثال Kay and Chen, 1995; Pun et al., 1999; Aleotti, 2004; Dahal and Hasegawaa, 2008; Guzzetti et al., 2008; Baum and Godt, 2010; Saito et al., 2010; Tiranti and Rabuffetti, 2010; Martelloni et al., 2012; Staley et al., 2013). سامانه ای که در آن رویداد زمین لغزش ها پیش بینی و به مقامات مسئول برای کاهش خسارات جانی و مالی هشدار داده می شود "سامانه هشدار سریع زمین لغزش" (Landslide Early Warning System, LEWS) نام دارد. اصطلاح "سامانه هشدار سریع" توسط UNISDR (2009) بدین صورت تعریف شده است: "مجموعه ای از ظرفیت های مورد نیاز برای تولید و انتشار اطلاعات هشدار

Guzzetti et al., ۲۰۰۷) آستانه‌های رخداد- شدت بارندگی (۴)

(2007).

مفهوم "آستانه بارندگی" برای وقوع زمین‌لغزش را نخستین بار Campbell (1975) بیان کرد. از آن زمان تاکنون پژوهشگران با بسط و گسترش روش‌های مختلف، به آستانه‌های متنوعی دست یافته‌اند که رایج‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها، آستانه‌های شدت-مدت بارندگی است. آستانه شدت-مدت بارندگی برای شروع زمین‌لغزش‌ها نخستین بار توسط Caine (1980) ارائه گردید. در نمودارهای شدت-مدت رخدادهای بارندگی محرک زمین‌لغزش، مدت رخداد بارندگی، از شروع رخداد تا زمان رویداد ناپایداری یا پایان رخداد و عموماً بر حسب ساعت محاسبه می‌شود. از تقسیم مقدار بارندگی طی مدت بارندگی بر مدت آن نیز می‌توان شدت بارندگی را به دست آورد. در نمودارهای شدت-مدت که به صورت کارترین، نیمه‌لگاریتمی و تمام‌لگاریتمی رسم می‌شوند، آستانه، سطحی است که بیانگر پایین‌ترین مقادیر شرایط شدت (در محور Yها) و مدت (در محور Xها) به وجود آورنده زمین‌لغزش باشد. این آستانه‌ها که جزء آستانه‌های تجربی شروع زمین‌لغزش‌ها محسوب می‌شوند، از نظر وسعت در سه دسته جهانی، ناحیه‌ای و محلی قرار می‌گیرند (Guzzetti et al., 2007).

Caine (1980) با بررسی ۷۳ زمین‌لغزش و جریان واریزه‌ای روی داده در سراسر دنیا، آستانه‌ای جهانی تعیین کرد. Saito et al. (2010) با استفاده از ۱۱۷۴ لغزش که طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ در ژاپن روی داده‌اند، آستانه ناحیه‌ای شدت-مدت را به صورت $I = 2.18 \times D^{-0.26}$ برای کشور ژاپن به دست آوردند. Dahal and Hasegawa (2008) برای ۱۹۳ لغزش که طی سال‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۶ در کوه‌های هیمالایا و محدوده کشور نپال روی داده‌اند، آستانه ناحیه‌ای شدت-مدت را به صورت $I = 73.9 \times D^{-0.79}$ محاسبه کرده‌اند. Cannon et al. (2008) برای جریان‌های واریزه‌ای که بعد از تخریب پوشش گیاهی توسط آتش‌سوزی در ۹۳ حوضه آبریز در جنوب ایالت‌های کلرادو و کالیفرنای ایالات متحده آمریکا روی داده‌اند، آستانه محلی شدت-مدت تعیین کرده است.

به‌موقع و معنی‌دار به اشخاص، جوامع و سازمان‌های در معرض خطر، تا آن‌ها را آماده و قادر به انجام عکس‌العمل مناسب در زمان کافی بگرداند و احتمال یا میزان ضرر و زیان را کاهش دهد". این سامانه برای زمین‌لغزش نیز در برخی نقاط دنیا از جمله ژاپن، هنگ‌کنگ، ایتالیا، آمریکا و بسیاری کشورهای دیگر به‌خوبی شکل گرفته است (برای مثال Chen and Lee, 2004; Baum and Godt, 2010; Osanai et al., 2010; Tiranti and Rabuffetti, 2010). یک سامانه هشدار سریع برای زمین‌لغزش‌های تحریک شده توسط بارندگی از نظر فنی زمانی قابل‌اجرا، مؤثر و مفید است که اجزاء هواشناسی، هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی قدرتمندی داشته باشد که تعیین آستانه بارندگی بخش مهمی از اجزاء هواشناسی و هیدرولوژیکی آن است (Baum and Godt, 2010). از این‌رو تعیین آستانه بارندگی برای شروع زمین‌لغزش دارای نقش مهمی در شکل‌گیری این سامانه است.

آستانه، سطح کمینه یا بیشینه یک کمیت برای رخ دادن یا تغییر یک فرآیند است (White et al., 1996). آستانه کمینه، سطحی است که در زیر آن فرآیند موردنظر هرگز رخ نخواهد داد و آستانه بیشینه، بیانگر سطحی است که در بالای آن فرآیند همیشه رخ خواهد داد. آستانه‌های تجربی بارندگی از نظر پارامترهای مورد بررسی، به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱- آستانه‌هایی که حاصل ترکیب پارامترهای بارش ویژه هر رخداد بارندگی است.

۲- آستانه‌هایی که شرایط رطوبت پیشین (حاصل بارندگی‌های قبلی) را در نظر می‌گیرند.

۳- دیگر آستانه‌ها؛ آستانه‌هایی که با استفاده از پارامترهای بارش یک یا چند رخداد بارندگی به دست می‌آیند به چهار دسته تقسیم می‌شوند:

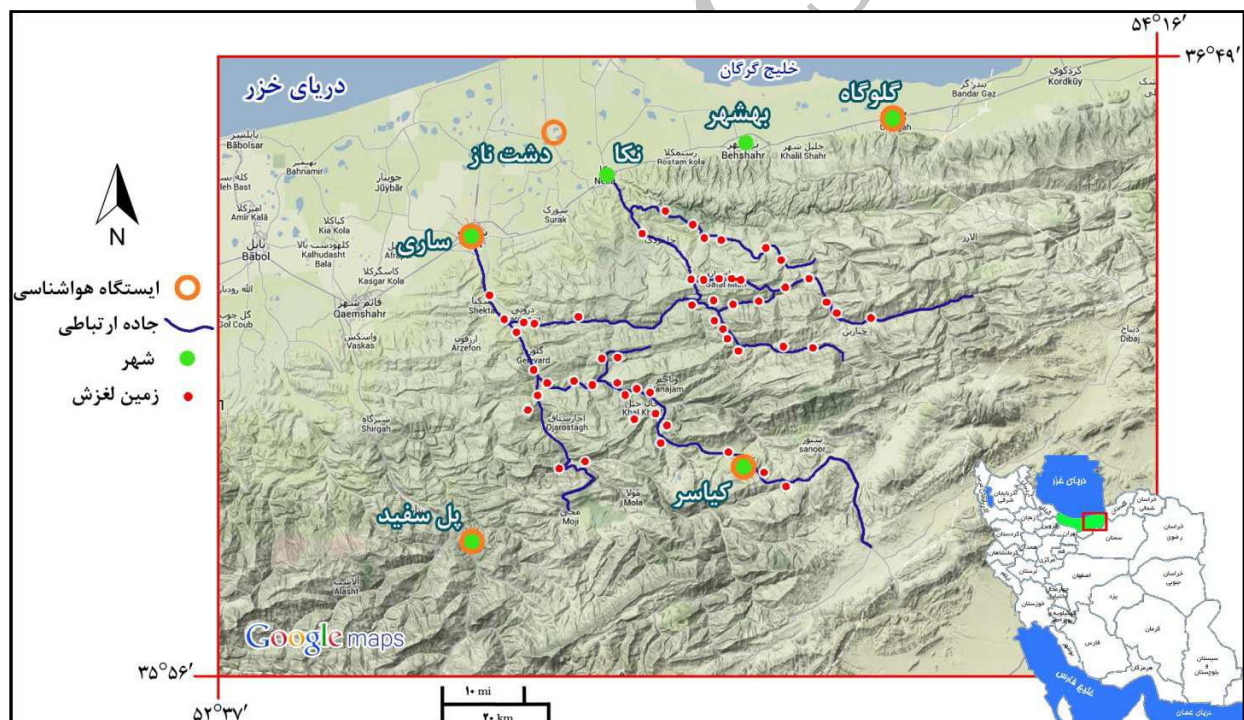
- (۱) آستانه‌های شدت-مدت بارندگی؛
- (۲) آستانه‌های بر اساس مجموع بارش رخداد بارندگی؛
- (۳) آستانه‌های رخداد-مدت بارندگی؛

محاسبه و تحلیل آماری و همچنین مقایسه با نتایج دیگر پژوهش‌ها قرار گرفته است.

۲. منطقه مورد پژوهش

منطقه‌ای که این پژوهش در آن انجام گردیده، بخشی از حوضه آبریز رودخانه‌های تجن و نکارود به مساحت تقریبی ۳۰۰۰ کیلومترمربع است که در شرق استان مازندران، در دامنه شمالی رشته‌کوه البرز و بین طول‌های $53^{\circ}02'$ و $53^{\circ}45'$ و عرض‌های $36^{\circ}12'$ و $36^{\circ}37'$ قرار دارد. در شکل ۱ موقعیت منطقه، راه‌های ارتباطی، نقاط لغزش‌خیز (نقاطی که طی دوره پژوهش، شاهد رویداد حداقل یک زمین‌لغزش بوده‌اند) و ایستگاه‌های هواشناسی به تصویر کشیده شده است.

Hosseini and Hosseini (2011) نیز با تطابق زمان رویداد ۴۰۳ لغزش (که طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۹ در استان مازندران رخ داده‌اند) و میزان بارندگی تجمعی سالیانه، رابطه مستقیمی بین میزان بارش و رویداد لغزش‌ها مشاهده نمودند. محمدی و اوسری و همکاران (۱۳۹۲) نیز به تبیین و تشریح ارتباط بین شروع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های واریزه‌ای و الگوی بارندگی پرداختند اما آستانه شدت-مدت بارندگی برای شروع زمین‌لغزش‌ها را تعیین نکردند. در این پژوهش آستانه شدت-مدت بارندگی برای شروع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های واریزه‌ای که در اثر رخداد‌های بارندگی تحریک شده‌اند، تعریف شده و مورد



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد پژوهش.

بارندگی سالیانه آن در ده سال گذشته $647/3$ میلی‌متر است (بر اساس داده‌های ایستگاهی اداره کل هواشناسی استان مازندران، ۱۳۹۲).

بر اساس نقشه زمین‌شناسی $1:100000$ ورقه‌های ساری، بیشه‌ر، کیاسر و پل سفید که توسط سازمان زمین‌شناسی و

این منطقه دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای گرم (در دشت) تا مدیترانه‌ای سرد (در ارتفاعات) و اغلب پوشش جنگل‌های تابستانی است (مروی‌مهاجر، ۱۳۹۲، Kottek, Köppen, 1931, et al., 2006). میانگین سالیانه دما $15/5$ و میانگین بیشینه و کمینه دما $20/3$ و $10/4$ درجه سلسیوس است. میانگین

شیب‌هایی روی داده‌اند که پوشش جنگلی آن توسط انسان برای ایجاد تغییر کاربری به کشاورزی یا که در اثر فعالیت‌های قبلی لغزش از بین رفته است. تعدادی از لغزش‌های مورد پژوهش، بر روی شیب‌هایی قرار دارند که در گذشته حداقل یک‌بار یا بیشتر در اثر رخداد‌های بارندگی مختلف دچار گسیختگی شدند. لغزش‌هایی که در این پژوهش به آن‌ها پرداخته می‌شود، از نظر عمق، لغزش‌هایی کم‌عمق (کمتر از ۳ تا ۵ متر) هستند و از نظر سرعت با آنکه دارای گستره وسیعی (از چند متر در ماه تا چندین متر در دقیقه) است، اما بیشتر زمین‌لغزش‌ها در دسته لغزش‌های سریع قرار می‌گیرند (Sidle and Ochiai, 2006). این زمین‌لغزش‌ها بیشتر در مناطق کوهستانی با پوشش جنگل و اغلب در اثر احداث جاده‌های ساری-کیاسر و جاده‌های روستایی شهرستان نکا روی داده‌اند. طبق گزارش اداره نگهداری راه و ابنیه فنی اداره کل راه و شهرسازی استان مازندران، این دو محور مواصلاتی جزء محورهای دارای بیشترین نقاط بحرانی لغزش در این استان گزارش شده‌اند.

در شکل ۲ قسمتی از جاده روستایی کوهستانی شهرستان نکا موسوم به جاده استخرپشت به سوچلما به تصویر کشیده شده که دارای بیشترین تمرکز ناپایداری‌ها در منطقه مورد پژوهش است.

اکتشافات معدنی کشور تهیه شده، در این منطقه رخنمون‌های سنگی مربوط به دوره‌های زمانی دونین تا کواترنری وجود دارد. طی بازدیدهای صحرایی مشاهده گردید که عمده زمین‌لغزش‌ها بر روی پی‌سنگ‌هایی با جنس‌های مارن، سنگ‌آهک مارنی و تعداد کمی از آن‌ها هم بر روی پی‌سنگ‌های آهکی، سیلت‌سنگ، و ماسه‌سنگ روی داده است. سن این سنگ‌ها کرتاسه بالایی، پالئوسن و اغلب میوسن است. در پژوهشی که احمدیان و همکاران (۱۳۸۸) به روی لغزش‌های جاده کیاسر (واقع در حوضه آبریز رودخانه تجن) انجام داده‌اند، واحدهای سنگی میوسن با سنگ‌های مارنی و به‌ندرت ماسه‌سنگ آهکی از میان واحدهای سنگی مختلف، از نظر تعداد و سطح منطقه لغزیده، بالاترین میزان و واحدهای سنگی کرتاسه بالایی کمترین مقدار را دارا هستند. از نظر ریخت‌شناسی محدوده مورد پژوهش منطقه‌ای نیمه‌کوهستانی تا کوهستانی با ارتفاع بین ۲۰ تا ۲۷۰۰ متر است (شکل ۲). ویژگی‌های طبیعی منطقه مانند سنگ‌شناسی (سنگ‌کف ضعیف و خردشده همراه با هوازدگی عمیق)، وجود پهنه گسلی و نرخ بالای لرزه‌خیزی، ویژگی‌های آب‌وهوایی و توپوگرافی مرتفع با دامنه‌های پرشیب، این منطقه را جزء مناطق مستعد وقوع لغزش قرار داده است (ناجی و حافظی مقدس، ۱۳۸۴).

پوشش گیاهی توده‌هایی که لغزش در آن‌ها روی داده اغلب جنگل بوده و تنها تعداد کمی از زمین‌لغزش‌ها بر روی



شکل ۲. قسمتی از جاده روستایی استخرپشت به سوچلما. جاده با خط قرمز رنگ و لغزش‌ها با دایره‌های سفید رنگ مشخص شده‌اند.

مانده یا مورد غفلت واقع شده باشند؛ در نتیجه محتمل است که تعداد دقیق زمین لغزش‌های روی داده در منطقه مورد پژوهش و طی دوره پژوهش بیشتر از تعدادی باشد که در این جا به آن پرداخته شده است.

در پژوهش کنونی این گونه دانسته شد که زمین لغزش‌هایی که در هنگام بارندگی یا بلافاصله پس از اتمام رخداد بارندگی روی داده‌اند، مرتبط با بارندگی هستند. برای افزایش اطمینان از این یافته و بررسی ارتباط زمین لغزش و دیگر عوامل محرک آن، نقش زمین لرزه‌های احتمالی روی داده در منطقه بر رویداد زمین لغزش‌ها بررسی شد. طی این بررسی مشخص گردید که طی دوره پژوهش در شعاع ۵۰ کیلومتری از مرکز منطقه مورد پژوهش، پنج زمین لرزه با بزرگی بیش تر از ۲ در مقیاس ریشتر روی داده است (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۹۳) (جدول ۱).

دوره زمانی این پژوهش از تاریخ ۱۳۹۱/۰۷/۰۱ تا تاریخ ۱۳۹۱/۱۲/۳۰ به مدت ۱۸۰ روز است. در طول دوره پژوهش، با همکاری اداره راه و شهرسازی شهرستان‌های ساری و نکا و همچنین اداره کل راه و شهرسازی استان مازندران، مکان دقیق و زمان تقریبی رویداد لغزش‌ها به صورت روزانه ثبت گردید.

لازم به ذکر است که در مورد زمان و تعداد دقیق لغزش‌ها کمی تردید و عدم قطعیت وجود دارد؛ به دلیل رویداد تعدادی از زمین لغزش‌ها در طول شب یا در مناطق دور از دسترس و همچنین به علت طبیعت چندگانه یا تدریجی بودن بعضی از زمین لغزش‌ها یا جریان‌های واریزه‌ای، و بیشتر از همه به دلیل طبیعت روش پایش زمین لغزش‌ها (که به صورت روزانه توسط تیم راهداری اداره راه و شهرسازی شهرستان‌های ساری و نکا در زمان خاصی از شبانه روز انجام گردید)، زمان رویداد با دقت ± 12 ساعت ثبت شده است. به علاوه ممکن است تعدادی از زمین لغزش‌ها از چشم دیده‌بانان این پژوهش دور

جدول ۱. زمین لرزه‌های روی داده در منطقه طی دوره پژوهش. فواصل ذکر شده در ستون آخر، فاصله مرکز سطحی زمین لرزه تا مرکز منطقه مورد پژوهش است.

ردیف	زمان رویداد به وقت محلی	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	عمق (km)	بزرگی (ریشتر)	مرکز سطحی	فاصله (km)
۱	۱۳۹۱/۰۷/۰۲ - ۰۴:۳۴:۵۰	۳۶°۳۰'	۵۳°۲۶'	۱۴	۲/۹	جنوب‌خاور نکا	۱۲
۲	۱۳۹۱/۱۰/۲۱ - ۰۸:۴۶:۵۴	۳۶°۰۰'	۵۳°۳۵'	۱۸	۳/۵	جنوب کیاسر	۵۰
۳	۱۳۹۱/۱۱/۲۴ - ۱۴:۴۵:۰۳	۳۶°۰۸'	۵۳°۴۲'	۱۴	۳/۱	خاور جنوب‌خاور کیاسر	۴۴
۴	۱۳۹۱/۱۲/۲۰ - ۱۰:۱۱:۰۶	۳۵°۵۹'	۵۳°۱۲'	۱۶	۲/۹	جنوب‌خاور پل سفید	۴۹
۵	۱۳۹۱/۱۲/۳۰ - ۲۲:۳۹:۵۳	۳۶°۱۳'	۵۳°۴۰'	۱۵	۳/۰	جنوب‌خاور کیاسر	۳۶

۳. بحث

در طول دوره این پژوهش تعداد ۱۵۱ واقعه لغزش که در ۶۵ نقطه روی داده‌اند به ثبت رسید. به صورت همزمان، داده‌های بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ آمده است، از دفاتر ثبت (که به صورت سه‌ساعته ثبت می‌شوند) و همچنین داده‌های باران‌سنج‌های ثبت (Data Logging Rain Gauge) استخراج شده و به صورت مدون درآمدند. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی که از داده‌های آن‌ها استفاده شده است، در شکل (۱) با دایره‌های توخالی نارنجی رنگ نشان داده شده است.

با مقایسه زمان رویداد این زمین لرزه‌ها با زمان رویداد زمین لغزش‌ها آشکار شد که از زمان رویداد زمین لرزه‌ها حداقل به مدت ۷۲ ساعت هیچ ناپایداری در منطقه روی نداده تا بتوان آن دو را به هم مربوط دانست.

از آنجایی که بررسی نقش دیگر عوامل محرک زمین لغزش‌ها، به‌سختی امکان‌پذیر بوده و یا نیاز به داده و بررسی دقیق‌تری دارد و مهم‌تر آن‌که این بررسی، هدف این پژوهش نبوده است، از انجام آن صرف‌نظر شد.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریای آزاد (متر)	میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر)	مجموع بارندگی در دوره پژوهش (میلی‌متر)
ساری	۵۳°۰۰'	۳۶°۳۳'	۲۶	۷۵۳/۸	۶۳۰/۸
دشت‌ناز	۵۳°۱۲'	۳۶°۳۸'	۱۳	۶۵۷/۸	۵۴۸/۲
گلوگاه	۵۳°۴۹'	۳۶°۴۷'	-۱۰	۵۵۱/۷	۵۲۹/۵
کیاسر	۵۳°۳۲'	۳۶°۱۴'	۱۲۹۴	۵۴۰/۷	۴۲۰
پل سفید	۵۳°۰۵'	۳۶°۰۸'	۶۲۵	۵۷۰/۹	۳۹۵

نظر می‌رسد برای بارندگی‌های این منطقه با شرایط اقلیمی و الگوی بارندگی نسبتاً مشابه نیز قابل استفاده باشد.

با مقایسه زمان رویدادهای لغزش و رخداد‌های بارندگی، دیده شد که از ۲۳ رخداد بارندگی، ۱۶ رخداد سبب رویداد زمین‌لغزش‌ها شده‌اند. همچنین طی این دوره، ۱۵۱ رویداد زمین‌لغزش کم‌عمق و جریان واریزه‌ای در نقاط مختلف منطقه ثبت گردید که با پردازش و مقایسه تمام داده‌ها در طول مدت این پژوهش دیده شد که ۱۱۱ رویداد در اثر تحریک مستقیم رخداد‌های بارندگی به وقوع پیوسته‌اند. به دیگر سخن، علت اصلی تحریک ناپایداری‌ها در این منطقه رخداد‌های بارندگی است. زمین‌لغزش‌های تحریک شده توسط بارندگی، با تعداد میانگین ۲۰/۲ زمین‌لغزش در هر ماه روی داده‌اند. ۴۰ زمین‌لغزش دیگر در زمانی روی داده‌اند که به‌سادگی نمی‌توان آخرین رخداد بارندگی را عامل رویداد آن‌ها دانست و به همین دلیل از فرآیند تحلیل برای محاسبه آستانه، حذف شدند. شکل ۳ میانگین حسابی بارندگی روزانه پنج ایستگاه هواشناسی که نقاط لغزش‌خیز، بین آن‌ها واقع شده‌اند را همراه با تعداد رویدادهای زمین‌لغزش و جریان واریزه‌ای به وقوع پیوسته به ازای هر رخداد بارندگی، در دوره ۱۸۰ روزه نشان می‌دهد.

در این شکل تعداد زمین‌لغزش‌های مربوط به هر رخداد بارندگی بر روی آن نوشته شده است. هر رخداد بارندگی توسط نبود ۲۴ ساعته بارش از رخداد‌های دیگر جدا شده است. به دلیل وجود فاصله زیاد بین محل زمین‌لغزش‌ها و ایستگاه‌های هواشناسی (بیشترین فاصله ۳۰~ کیلومتر)، امکان تعمیم مستقیم داده‌های بارندگی ایستگاه‌ها به نقاط زمین‌لغزش

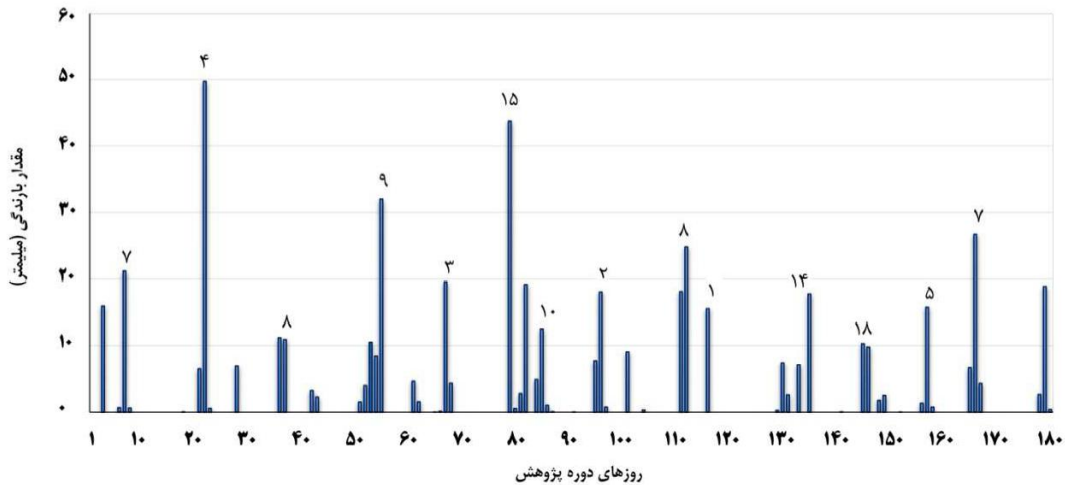
در هنگام بارندگی، مقداری از آب، به‌صورت رواناب و تبخیر و تعرق گیاهان از سیستم خارج شده و فقط مقداری از بارش که به داخل خاک نفوذ کرده و وارد توده می‌شود موجب افزایش تدریجی یا ناگهانی بیش‌ازحد فشار آب‌منفذی و در پی آن بروز گسیختگی در توده خواهد شد. از این‌رو، هنگام محاسبه مقدار آب وارد شده به توده، باید مقدار تبخیر و تعرق و همچنین رواناب را به دست آورد و از مقدار کل بارندگی کم کرد. اما از آنجایی که اندازه‌گیری مقدار آبی که وارد توده می‌شود به‌سادگی امکان‌پذیر نیست و خود موضوع پژوهش‌های بسیاری است، در این‌گونه پژوهش‌ها، داده‌های بارندگی ثبت شده توسط ایستگاه‌های هواشناسی بدون در نظر گرفتن این پارامترها، برای فرآیند تجزیه و تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای ارزیابی درستی داده‌های باران‌سنجی، داده‌های دوره زمانی مورد پژوهش با میانگین ده‌ساله آن مقایسه گردید که حاصل نسبت مجموع بارندگی دوره شش‌ماهه پژوهش به میانگین آن در ده سال گذشته مقدار ۱/۲۶ است. با توجه به افزایش تقریباً ۳۶ درصدی و ۲۰ درصدی بارش نسبت به میانگین درازمدت آن در منطقه مورد پژوهش به ترتیب در سال‌های آبی ۹۱-۹۰ و ۹۲-۹۱ (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۲)، این نسبت قابل قبول است.

Saito et al. (2010) در پژوهشی که بر روی لغزش‌های کم‌عمق (روی داده در نقاط مختلف کشور ژاپن) انجام داده‌اند، هر رخداد بارندگی را با یک دوره بدون بارندگی بیشتر از ۲۴ ساعت، از بارندگی‌های قبل و بعد از خود جدا کردند که به

درون‌یابی مقادیر بارندگی تقریباً منطبق با مقدار بارندگی در نقاط زمین‌لغزش‌ها می‌باشند. با تقسیم مقدار بارندگی هر رخداد بر مدت آن، شدت میانگین بارندگی در طول رخداد به دست آمد که به‌عنوان شدت بارندگی در نظر گرفته شد.

وجود نداشت؛ از این رو با استفاده از روش درون‌یابی، مقدار و مدت زمان بارندگی معادل هر لغزش محاسبه گردید. با توجه به اینکه نقاط ثبت‌شده زمین‌لغزش‌ها از نظر ارتفاعی در حد میانی ارتفاع ایستگاه‌های ثبت بارندگی بوده‌اند، فرض شد که



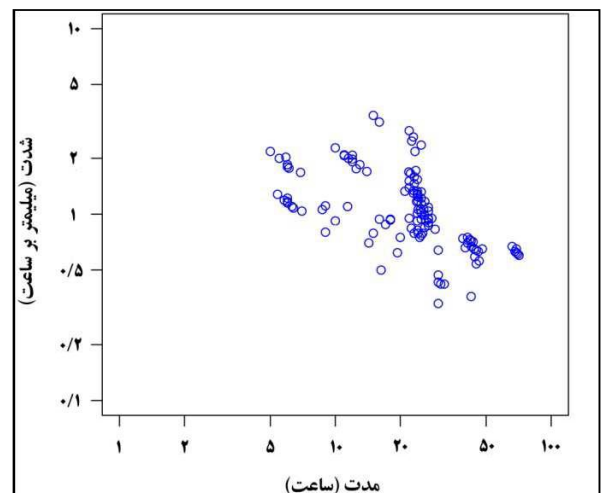
شکل ۳. تعداد رخداد بارندگی و میزان بارش در دوره پژوهش؛

اعداد روی هر نوار بارش نشان‌دهنده تعداد رویداد لغزش در آن رخداد بارندگی می‌باشند.

در نمودار به‌دست‌آمده، دیده می‌شود که داده‌های شدت و مدت رخدادهای بارندگی محرک لغزش، دارای یک میل کلی می‌باشند که با افزایش مدت رخداد بارندگی از شدت آن‌ها به‌صورت خطی کاسته می‌شود. در این حالت داده‌ها دارای میل کلی با شیب منفی هستند.

همچنین رخدادهای محرک زمین‌لغزش دارای شدت متوسط (به‌دست‌آمده از تقسیم مقدار کل بارندگی یک رخداد به مدت آن) با گستره ۰/۳۳ تا ۳/۴۱ میلی‌متر بر ساعت هستند و مدت آن‌ها نیز از ۵ تا ۷۱ ساعت است. لازم به ذکر است که رخدادهای بارندگی با شدت میانگین بیشتر از ۳/۵ میلی‌متر بر ساعت که در این منطقه اغلب کمتر از چند ساعت به طول می‌انجامند، قادر به ایجاد لغزش نبوده و بر اساس مشاهدات دیده‌بانان این پژوهش در اداره راه و شهرسازی شهرستان‌های ساری و نکا، تنها موجب به راه افتادن رواناب گلی می‌شوند. دلیل احتمالی این پدیده نبود فرصت کافی برای نفوذ آب باران به داخل توده و در پی آن افزایش فشار آب منفذی و در نهایت تحریک زمین‌لغزش است. همچنین به ازای بارندگی‌های با

ابتدا مقادیر شدت و مدت رخدادهای بارندگی محرک زمین‌لغزش و جریان واریزه‌ای در دستگاه مختصات تمام‌لگاریتمی به‌صورت شکل ۴ رسم گردیدند. به‌عنوان مثال (Caine, 1980; Larsen and Simon, 1993; Aleotti, 2004; Cannon and Gartner, 2005; Godt et al., 2006; Cannon et al., 2008; Guzzetti et al., 2008; Saito et al., 2010; Tiranti and Rabuffetti, 2010; Staley et al., 2013



شکل ۴. الگوی شدت-مدت بارش رخدادهای مسبب

زمین‌لغزش

کار با برازش الگوی رگرسیونی متعدد بر یک مجموعه داده‌ها به ازای چندک‌های مختلف صورت می‌گیرد. رگرسیون چندک یک بدنه در حال تحول از روش‌های آماری محاسبه و ترسیم نتایج توابع چندکی شرطی است.

پس از رسم کردن نقاط معرف الگوی بارندگی رویدادهای زمین‌لغزش در دستگاه مختصات لگاریتمی، بسته رگرسیون چندک برای ترسیم خطوط رگرسیون صدک‌های پنجم، دهم، بیستم، سی‌ام، چهلم، پنجاهم، شصتم، هفتادم، هشتادم و نودم بکار گرفته شد (شکل ۵). تمامی این خطوط دارای فرمول کلی به شکل معادله ۱ هستند:

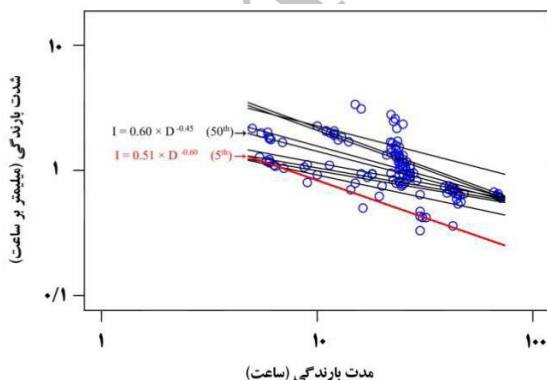
$$I = \alpha \times D^{\beta} \quad (1)$$

که در آن: I شدت بارندگی برحسب میلی‌متر بر ساعت، D مدت بارندگی برحسب ساعت و α و β ضرایب ثابت هستند. آنگاه خط رگرسیون صدک پنجاهم به‌عنوان میل عمومی شرایط شدت و مدت بارندگی‌های محرک زمین‌لغزش‌ها و جریان‌های واریزه‌ای در نظر گرفته شد که به‌صورت معادله ۲ است:

$$I = 0.60 \times D^{-0.45} \quad (5 < D < 71 \text{ h}) \quad (2)$$

سپس خط رگرسیون صدک پنجم (خط قرمز رنگ در شکل ۵ و ۶) که دارای معادله ۳ است، به‌عنوان آستانه شدت-مدت بارندگی شروع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق و جریان‌های واریزه‌ای در نظر گرفته شد:

$$I = 0.51 \times D^{-0.60} \quad (5 < D < 71 \text{ h}) \quad (3)$$



شکل ۵. برازش خطوط رگرسیون صدک‌های پنجم تا نودم. فرمول خط رگرسیون صدک پنجم و پنجاهم در کنار آن‌ها نوشته شده است.

شدت میانگین کمتر از ۰/۳۳ میلی‌متر بر ساعت نیز هیچ لغزشی در منطقه ثبت نشده چراکه احتمالاً به دلیل زهکشی بالا در توده خاک کم‌عمق و نیز خردشدگی سنگ‌بستر ماری و مارن آهکی سبب برابر شدن یا فراتر رفتن سرعت زهکشی از شدت بارندگی و به‌تبع آن نرخ نفوذ آب به داخل توده است.

بر اساس بازدیدهای میدانی به‌عمل آمده از زمین‌لغزش‌های روی داده در منطقه طی دوره پژوهش، اغلب زمین‌لغزش و جریان واریزه‌ای در اثر تحریک رخدادهای بارندگی با مدت تا ۱۰ ساعت روی نخواهد داد، مگر اینکه سطح و پوشش شیب در اثر تغییر کاربری و یا رویداد لغزش‌های قبلی به‌نوعی تغییر کرده باشد که نرخ نفوذ آب به داخل توده افزایش پیدا کند و یا شدت بارندگی به حدی افزایش پیدا کند که موجب نفوذ و تأمین آب موردنیاز برای بالا بردن فشار آب منفذی درون توده و تحریک آن شود.

همان‌طور که گفته شد آستانه بارندگی، سطحی در نظر گرفته می‌شود که در بالای این خط یک یا تعداد بیشتری لغزش می‌تواند تحریک شود. برای تعیین این سطح، نیاز به روش آماری مناسبی است و از آنجایی که ممکن است داده‌ها دارای مقداری خطا باشند، انتخاب روش آماری که در مقابل داده‌های پرت و خطاها مقاوم باشد دارای اهمیت فراوان است؛ از این‌رو محیط نرم‌افزار R و بسته رگرسیون چندک جهت انجام پردازش آماری و برازش خطوط رگرسیون و درنهایت تعیین خط آستانه انتخاب شد.

این روش اجازه می‌دهد تا توابع چندک مختلف از یک توزیع شرطی برآورد شود. هر رگرسیون چندکی یک نقطه منحصربه‌فرد (دم یا مرکز) از توزیع شرطی را مشخص می‌کند. قرار دادن رگرسیون‌های چندک مختلف در کنار یکدیگر، توزیع کامل‌تری از توزیع شرطی اصلی را فراهم می‌کند. این واکاوی به‌خصوص زمانی که توزیع شرطی ناهمگن است و شکل استاندارد ندارد از قبیل توزیع‌های نامتقارن، توزیع‌هایی با دم پهن و عریض و توزیع‌های بریده‌شده مفید است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای رگرسیون چندک، شناسایی شکل توزیع متغیر وابسته الگو در سطوح گوناگون متغیر مستقل است. این

بر روی مناطقی که دارای بیشترین شباهت اقلیمی بوده‌اند انجام گردید. Guzzetti و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهشی که به روی ۲۶۲۶ زمین لغزش کم عمق و جریان واریزه‌ای روی داده در سراسر دنیا انجام داده‌اند، آستانه جهانی شدت-مدت بارندگی را محاسبه نمودند. سپس داده لغزش‌های موجود را بر اساس سیستم طبقه‌بندی اقلیم کوپن به شش اقلیم اصلی و به صورت دقیق‌تر به پانزده اقلیم تقسیم کرده‌اند، و برای شش اقلیم از پانزده اقلیم که تعداد داده لغزش آن‌ها در مجموع نزدیک به ۸۲٪ داده‌ها بود، به طور جداگانه آستانه ویژه‌ای محاسبه کردند. از این میان اقلیمی که بیشترین شباهت را با اقلیم منطقه مورد پژوهش دارد، اقلیم مدیترانه‌ای گرم است (Köppen, 1931; Kottek et al., 2006). به همین دلیل، آستانه شدت-مدت بارندگی رخدادهای مسبب ایجاد زمین لغزش‌های کم عمق و جریان‌های واریزه‌ای در اقلیم مدیترانه‌ای گرم که در پژوهش Guzzetti et al. (2008) محاسبه شده، به همراه آستانه‌های جهانی پیشنهاد شده توسط پژوهشگران ذکر شده در جدول ۳ و همچنین آستانه محاسبه شده در پژوهش حاضر، همگی برای مقایسه در دستگاه مختصات واحدی رسم گردیدند (شکل ۶).

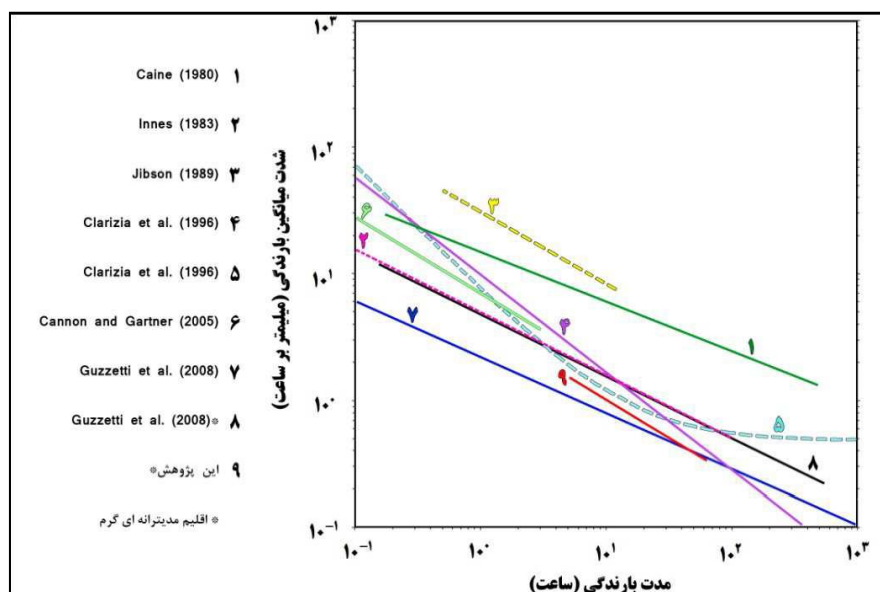
پس از رسم خط رگرسیون صدک پنجم، با اطمینان ۹۵٪ می‌توان گفت که رخدادهای بارندگی که الگوی بارش آن‌ها زیر خط آستانه (خط رگرسیون صدک پنجم) قرار بگیرد قادر به ایجاد زمین لغزش‌های کم عمق و جریان‌های واریزه‌ای در منطقه مورد پژوهش نیستند.

برای سنجش درستی و همچنین جهت مقایسه این آستانه با دیگر آستانه‌های شدت-مدت بارندگی، می‌توان پژوهش‌های مشابهی که در سراسر دنیا انجام شده را مورد بررسی قرار داد؛ اما یافتن منطقه یا مناطقی مشابه از نظر آب‌وهوا، ریخت‌شناسی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و سایر پارامترها برای مقایسه با نتایج پژوهش‌های انجام شده در آن‌ها، چندان آسان نیست؛ زیرا: نخست اینکه شرایط ایجاد و نوع زمین لغزش‌ها به عواملی همچون ریخت‌شناسی، زمین‌شناسی، نوع خاک و پوشش گیاهی بستگی دارد که ویژه همان منطقه است به عنوان مثال (Engel et al., 2011). و دوم اینکه کرانه جنوبی دریای خزر و منطقه مورد پژوهش (که بخش شرقی آن است)، دارای گستره بسیار کم و اقلیمی کاملاً منحصربه‌فرد در دنیاست. از این رو به بررسی و مقایسه با نتایج پژوهش‌هایی بسنده شد که آستانه‌ای جهانی پیشنهاد کردند، یا آنکه مقایسه

جدول ۳. آستانه‌های جهانی پیشنهاد شده تاکنون به همراه آستانه به دست آمده در این پژوهش

شماره آستانه در شکل ۶	نویسنده	معادله	نوع زمین لغزش	گستره (ساعت)
۱	Caine (1980)	$I = 14.82 \times D^{-0.39}$	زمین لغزش‌های سطحی و جریان‌های واریزه‌ای	$0.167 < D < 500$
۲	Innes (1983)	$I = 4.93 \times D^{-0.50}$	جریان‌های واریزه‌ای	$0.1 < D < 100$
۳	Jibson (1989)	$I = 30.53 \times D^{-0.57}$	جریان‌های واریزه‌ای	$0.5 < D < 12$
۴	Clarizia et al. (1996)	$I = 10.0 \times D^{-0.77}$	خاک‌سره	$0.1 < D < 1000$
۵	Crosta and Frattini (2001)	$I = 0.48 + 7.2 \times D^{-1.0}$	زمین لغزش‌های سطحی	$0.1 < D < 1000$
۶	Cannon and Gartner (2005)	$I = 7.0 \times D^{-0.60}$	جریان‌های واریزه‌ای مرتبط با آتش‌سوزی	$0.1 < D < 3$
۷	Guzzetti et al. (2008)	$I = 2.20 \times D^{-0.44}$	زمین لغزش‌های سطحی و جریان‌های واریزه‌ای	$0.1 < D < 1000$
۸	*Guzzetti et al. (2008)	$I = 4.53 \times D^{-0.49}$	زمین لغزش‌های سطحی و جریان‌های واریزه‌ای	$0.15 < D < 500$
۹	این پژوهش*	$I = 0.51 \times D^{-0.60}$	زمین لغزش‌های سطحی و جریان‌های واریزه‌ای	$5 < D < 71$

* اقلیم مدیترانه‌ای گرم



شکل ۶. مقایسه بین آستانه محلی به دست آمده در این پژوهش و آستانه‌های جهانی (داده‌ها در جدول ۳؛ خط آستانه ۹ مربوط به این پژوهش است)

می‌کند. این اختلاف ممکن است به چند دلیل باشد: ۱- دقت داده لغزش برای مدت رخداد‌های بارندگی در این پژوهش کمتر از دیگر پژوهش‌ها است که تا حدی باعث افزایش مدت هر رخداد و در نهایت کاهش شدت میانگین بارندگی خواهد شد؛ ۲- به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی، زمین‌ریخت‌شناسی، نوع پوشش گیاهی، نوع مواد درگیر و نزدیکی به جاده و برخی پارامترهای دیگر، زمین‌لغزش‌های سطحی و جریان‌های واریزه‌ای که در این پژوهش به آن‌ها پرداخته شده ممکن است نسبت به بارندگی حساسیت بیشتری داشته باشند و در اثر بارندگی با شدت‌های کمتر تحریک شوند؛ ۳- تعدادی از زمین‌لغزش‌هایی که داده شدت و مدت بارندگی محرک آن‌ها در این پژوهش برای محاسبه آستانه مورد استفاده قرار گرفت، دارای حرکت‌های پیشین و در نتیجه نسبت به بارندگی دارای حساسیت بیشتری بوده‌اند.

آستانه پیشنهادی این پژوهش (آستانه شماره ۹) تقریباً هم‌شیب با آستانه‌های شماره ۳ و ۶ (جریان‌های واریزه‌ای) و با شدت میانگین بارندگی کمتر از آن دو است. آستانه شماره ۷ و آستانه پیشنهاد شده در این پژوهش (آستانه شماره ۹) از جهت شیب و شدت میانگین بارندگی تنها کمی متفاوت‌اند و همدیگر را در مدت تقریباً ۴۲ ساعت قطع کرده‌اند و اختلاف این دو در

در پژوهش‌های پیشرو مانند Caine (1980)، داده‌های زمین‌لغزش که از آن‌ها در تعیین آستانه‌های شدت-مدت بارندگی برای شروع زمین‌لغزش استفاده شده، مربوط به رخداد‌هایی فاجعه‌بار است و به همین دلیل دارای شدت میانگین بالاتری (تقریباً ۵ تا ۱۰ برابر) نسبت به داده رویدادهای زمین‌لغزش در پژوهش‌های جدیدتر است. پژوهش‌های ۱ تا ۷ در جدول (۳) و شکل (۶) که همگی آستانه‌هایی جهانی تعیین کرده‌اند، به‌طور کلی ولی نامنظم از شدت بارندگی داده لغزش آن‌ها کاسته شده است. این کاهش می‌تواند به دلیل افزایش و تکامل مجموعه داده‌های لغزش این پژوهش‌ها باشد، زیرا که پژوهش‌های جدیدتر، از پایگاه داده بسیار جامعی نسبت به پژوهش‌های پیشین استفاده کرده‌اند و رخداد‌های بارندگی با شدت کمتر (که مسبب ناپایداری‌های کوچک‌تری هم شده‌اند) را نیز شامل می‌شوند.

شکل ۶ نشان می‌دهد که آستانه پیشنهاد شده در این پژوهش از تمامی آستانه‌های جهانی پیشنهاد شده تاکنون شامل Caine, 1980; Innes, 1983; Jibson, 1989; Clarizia et al., 1996; Crosta and Frattini, 2001; Cannon and Gartner, 2005; Guzzetti et al., 2008، به‌جز Guzzetti et al. (2008) (که آخرین آستانه پیشنهاد شده است) پایین‌تر است و رویداد لغزش‌های با شدت میانگین بارندگی کمتری را پیش‌بینی

نرم‌افزاری رگرسیون چندک و در نرم‌افزار R، به صورت $I = 0.51 \times D^{-0.60}$ (معادله شماره ۳) محاسبه شد که در آن I شدت بارندگی برحسب میلی‌متر بر ساعت و D مدت بارندگی برحسب ساعت است.

برای سنجش درستی و همچنین جهت مقایسه، این آستانه با آستانه‌های جهانی تطبیق داده شد. آستانه پیشنهاد شده در این پژوهش تقریباً از تمامی آستانه‌های جهانی پیشنهاد شده تاکنون پایین‌تر است.

با توجه به وسعت نسبتاً کم منطقه مورد پژوهش، این آستانه از نوع محلی است و تنها برای همین منطقه قابل استفاده است. از آستانه به دست آمده در این پژوهش، می‌توان در سامانه هشدار سریع زمین‌لغزش جهت پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های احتمالی به هنگام بارندگی‌هایی با الگوی بارش مشابه در منطقه استفاده کرد و هنگام وجود خطر، با هشدار به مقامات مسئول و ساکنین محلی، اقدامات مورد نیاز برای کاهش خسارت‌ها صورت گیرد.

قدردانی:

بر خود لازم می‌دانیم که از زحمات آقایان مهندس مهدی سهراب‌زاده و مهندس محمد فرمانبر، کارشناسان محترم اداره راه و شهرسازی شهرستان‌های نکا و ساری، برای یاری فراوانی که در تولید داده‌های مکان و زمان لغزش رساندند قدردانی کرده و سپاسگزار ایشان باشیم. همچنین از آقایان دکتر Hitoshi Saito، دکتر مهدی امیدوی و امید اخگری برای کمک‌های بی‌شائبه‌ای که در انجام پردازش آماری نمودند متشکریم.

مدت‌های کم بارندگی بیشتر است. آستانه شماره ۸، حاصل داده‌های لغزش اقلیم مدیترانه‌ای گرم است که از نظر اقلیم شباهت زیادی به منطقه مورد پژوهش دارد. این آستانه با شیب کمتر از آستانه پیشنهادی این پژوهش و شدت بارندگی بیشتر، کمی بالاتر واقع شده و آستانه این پژوهش بین آستانه شماره ۷ و ۸ واقع شده است. بزرگ‌ترین تفاوت آستانه پیشنهادی این پژوهش با دیگر آستانه‌های ذکر شده، گستره محدود مدت رخدادهای بارندگی محرک زمین‌لغزش در این پژوهش است. علت این مورد نیز می‌تواند به‌طور کلی، متوسط بودن مدت بارندگی در این منطقه نسبت به سایر نقاط دنیا باشد. همچنین کوتاه بودن دوره زمانی این پژوهش می‌تواند سبب شود تا رخدادهای نادر با شدت و یا مدت بیشتر دیده نشوند. پایین بودن دقت داده برای مدت بارندگی نیز می‌تواند علت نبود داده لغزش در مدت‌های کمتر از پنج ساعت در این پژوهش باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش آشکار گردید که به‌طور کلی رخدادهای بارندگی که مدت کمتری دارند یا همراه با نبوده‌های کوتاه در بارش هستند، موجب تحریک لغزش‌هایی شده‌اند که عمق کمی دارند. همچنین رخدادهای بارندگی که به مدت طولانی و تقریباً پیوسته باریده‌اند، مسبب لغزش‌های عمیق‌تری شده‌اند. نتایج، حاکی از آن‌اند که در شرق مازندران، بارندگی‌های با شدت میانگین ۰/۳۳ تا ۳/۴۱ میلی‌متر بر ساعت و مدت زمان ۵ تا ۷۱ ساعت، پتانسیل شروع زمین‌لغزش‌های سطحی (کم‌عمق جنگلی) و جریان واریزه‌ای را دارند. آستانه شدت-مدت شروع زمین‌لغزش‌های سطحی و جریان‌های واریزه‌ای در این پژوهش با استفاده از بسته

منابع

- احمدیان، س.ح.، صفایی، م.، سلامی، ا.، نوروزی، ش.، مهدیان، ح.، ۱۳۸۸. بررسی نقش لیتولوژی در بروز زمین‌لغزش‌های مهم جاده کیاسر (مطالعه موردی لغزش‌های مهم جاده کیاسر در جنوب شهرستان ساری). پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. اداره کل هواشناسی استان مازندران، ۱۳۹۲. اداره پیش‌بینی. اداره کل هواشناسی استان مازندران، ۱۳۹۲. دفاتر گزارش ماهیانه ایستگاه‌های سینوپتیک ساری، دشت‌ناز، گلوگاه، کیاسر و پل سفید. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۹۳. جستجوی زمین‌لرزه‌های ایران.

[http://www.iiees.ac.ir/iiees/EQsearch/\(S\(ozuvmvcpml1c1oiumzr05ma\)\)/EventQuery.aspx](http://www.iiees.ac.ir/iiees/EQsearch/(S(ozuvmvcpml1c1oiumzr05ma))/EventQuery.aspx)

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰، چهارگوش‌های ساری، بهشهر، کیاسر و پل سفید.

شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۲. آمار بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی مبنای وزارت نیرو.

http://wrs.wrm.ir/m3/istgah_baranlist.asp?RecPerPage=ALL

شریعت‌جعفری، م.، ۱۳۹۰. برنامه راهبردی رانش زمین در کشور. مجموعه مقالات هفتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران.

محمودی و اوسری، م.، شعاعی، غ.، شهیدی، ف.، ۱۳۹۲. نگرشی بر ارتباط بین شروع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق و الگوی بارندگی در حوضه آبریز رودخانه‌های تجن و نکارود (شرق مازندران). هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، ص ۲۰۱۶-۲۰۲۲.

مروی مهاجر، م.، ۱۳۸۴. جنگل‌شناسی و پرورش جنگل. انتشارات دانشگاه تهران.

ناجی، س.، حافظی‌مقدس، ن.، ۱۳۸۴. لغزش‌های تحریک جاده‌ای در محور ساری-کیاسر. چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و

محیط‌زیست ایران.

Aleotti, P., 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73(3-4):247-265.

Alfieri, L., Salamon, P., Pappenberger, F., Wetterhall, F., Thielen, J., 2012. Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. *Environmental Science & Policy*, 21: 35-49.

Baum, R.L., Godt, J.W., 2010. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides*, 7(3): 259-272.

Bonnard, Ch., Noverraz, F., 2001. Influence of climate change on large landslides: assessment of long term movements and trends. *Proc. of the Int. Con. on Landslides: causes impact and countermeasures*, Gluckauf, Essen, Davos, pp. 121-138.

Caine, N., 1980. The Rainfall Intensity-Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Physical Geography*, 62(1-2): 23-27.

Campbell, R.H., 1975. Soil slip, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California, U.S. Geological Survey Professional Paper 851, 51 p.

Cancelli, A., Nova, R., 1985. Landslides in soil debris cover triggered by rainstorm in Valtellina (Central Alps, Italy). *Proceeding of the IV International Conference on Landslides*, Tokyo, 1: 267-272.

Cannon, S.H., Ellen, S.D., 1985. Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California. *California Geology*, 38(12): 267-272.

Cannon, S.H., Gartner, J.E., 2005. Wildfire-related debris flow from a hazards perspective. In: Jakob, M., Hungr, O., (Eds), *Debris flow hazards and related phenomena*, Berlin Heidelberg, Springer, pp. 363-385.

Cannon, S.G., Gartner, J.E., Wilson, R.C., Bowers, J.C., Laber, J.L., 2008. Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California. *Geomorphology*, 96(3-4): 250-269.

Chen, H., Lee, C.F., 2004. Geohazards of slope mass movement and its prevention in Hong Kong. *Engineering Geology*, 76(1-2): 3-25.

Clarizia, M., Gulla, G., Sorbino, G. 1996. Sui meccanismi di innesco dei soil slip. *Proceeding of the International Conference on Prevention of Hydrogeological Hazards: The Role of Scientific Research* (Luino F, ed), 1: 585-597.

Crosta, G.B., 1998. Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. *Environmental Geology*, 35(2-3): 131-145.

Crosta, G.B., Frattini, P., 2001. Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. *Proceeding of 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms* (Mugnai A, Guzzetti F, Roth G, eds). Siena, 463-487.

Crosta, G.B., Frattini, P., 2008. Rainfall-induced landslides and debris flows. *Hydrological Processes*, 22(4): 473-477.

Crozier, M.J., 1999. Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the Antecedent Water Status Model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(9): 825-833.

Dahal, R.K., Hasegawa, S., 2008. Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. *Geomorphology*, 100(3-4): 429-443.

Duc, D.M., 2013. Rainfall-triggered large landslides on 15 December 2005 in Van Canh District, Binh Dinh Province, Vietnam. *Landslides*, 10(2): 219-230.

Engel, Z., Česák, J., Escobar, V.R., 2011. Rainfall-related debris flows in Carhuacocha Valley, Cordillera Huayhuash, Peru. *Landslides*, 8(3): 269-278.

- Godt, J.W., Baum, R.L., Chleborad, A.F. 2006. Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(1): 97-110.
- Guzzetti, F., Crosta, G.B., Marchetti, M., Reichenbach, P., 1992. Debris flows triggered by the July, 17-19, 1987 storm in the Valtellina Area (Northern Italy). *Proceeding of the VII International Congress Interpraevent, Bern*, 2: 193-204.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P., 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3-4): 239-267.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P., 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides* 5(1): 3-17.
- Hong, Y., Hiura, H., Shino, K., Sassa, K., Suemine, A., Fukuoka, H., Wang, G., 2005. The influence of intense rainfall on the activity of large-scale crystalline schist landslides in Shikoku Island, Japan. *Landslides*, 2(2): 97-105.
- Hosseini, S., Hosseini, S.A., 2011. Evaluation rainfall factor in the occurrence of landslide margin of the forest Road (Case Study: Watershed of Pahne kolla). *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(3): 67-72.
- Ibsen, M.L., Casagli, N., 2004. Rainfall patterns and related landslide incidence in the Porretta-Vergato region, Italy. *Landslides*, 1(2): 143-150.
- Innes, J.L., 1983. Debris flows. *Progress in Physical Geography*, 7(4): 469-501.
- Jakob, M., Weatherly, H., 2003. A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia. *Geomorphology*, 54(3-4): 137-156.
- Jibson, R.W., 1989. Debris flow in southern Porto Rico. *Geological Society of America*, special paper 236: 29-55.
- Kay, J.N., Chen, T., 1995. Rainfall-landslide relationship for Hong Kong. *Geotechnical Engineering, Proceedings of Institute of Civil Engineer*, 113: 117-118.
- Köppen, J.M., 1931. *Grundriss der Klimakunde*. Walter de Grayter, Berlin, pp. 388
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3): 259-263.
- Larsen, M.C., Simon, A., 1993. A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 75(1-2): 13-23.
- Martelloni, G., Segoni, S., Fanti, R., Catani, F., 2012. Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale. *Landslides*, 9(4): 485-495.
- Montgomery, D.R., Schmidt, K.M., Greenberg, H.M., 2000. Forest clearing and regional landsliding. *Geology*, 28(4): 311-314.
- Osanaï, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima, S., Noro, T., 2010. Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network. *Landslides*, 7(3): 325-338
- Petley, David., 2011. *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*, Mexico City: Cambridge University Press. Chapter 6. 63-74 p.
- Pun, W.K., Wong, A.C.W., Pang, P.L.R., 1999. Review of landslip warning criteria. Special Project Report, SPR 4/99, Geotechnical Engineering Office, the Government of the Hong Kong Special Administrative Region.
- Saito, H., Daichi, N., Matsuyama, H., 2010. Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity-duration thresholds in Japan. *Geomorphology*, 118(1-2): 167-175.
- Sidle, R.C., Ochiai, H., 2006. *Landslides processes, prediction and land use*. Washington. DC: American Geophysical Union. 312 p.
- Staley, D.M., Kean, J.W., Cannon, S.H., Schmidt, K.M., Laber, J.L., 2013. Objective definition of rainfall intensity-duration thresholds for the initiation of post-fire debris flows in southern California. *Landslides*, 10(5): 547-562.
- Tiranti, D., Rabuffetti, D., 2010. Estimation of rainfall thresholds triggering shallow landslides for an operational warning system implementation. *Landslides*, 7(4): 471-481.
- UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction), 2009. Terminology, Available at: http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf
- White, I.D., Mottershead, D.N., Harrison, J.J., 1996. *Environmental Systems*. London: 2nd Edition, 616 p.
- Wieczorek, G.F., 1987. Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. In: Costa, Wieczorek, (Eds.), *Debris Flows/Avalanches: Processes, Recognition and Mitigation*. Reviews in Engineering Geology, vol. 7. Geological Society of America, pp. 23-104.