

ریخت زمین ساخت و نرخ لغزش گسله خزر در البرز مرکزی (شمال ایران)

حمید نظری^۱، ژان فرانسوا ریتز^۲، آرا آواکیان^۳

^۱ دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۲ استاد، دپارتمان علوم زمین، دانشگاه مونت پلیه، مونت پلیه، فرانسه

^۳ استاد، انستیتوی علوم زمین شناسی، آکادمی ملی علوم، ایروان، ارمنستان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵

چکیده

رشته کوه البرز در شمال ایران بخشی از همگرایی بین ایران مرکزی و اوراسیا را در خود جای داده است. سازوکار کنونی آن شامل سازوکاری از تقسیم شدگی کرنش به همراه چرخش ساعت گرد حوضه خزر جنوبی است. گسلش راستالغز چپ گرد و در امتداد کلی بخش داخلی البرز و گسلش معکوس مرزهای شمالی و جنوبی آن را تحت تأثیر قرار می دهد. پیش از این، پژوهش هایی چند به نرخ لغزش گسل های فعال در قسمت های داخلی و جنوبی پرداخته است. این پژوهش، داده های جدیدی از چگونگی فعالیت این رانندگی فعال و مهم را در جنوب کاسپین فراهم می کند. در این پژوهش مشخص خواهد شد که گسل به طور کلی یک گسل پنهان است، که اغلب با ساختارهای چین و خم گسلی و گسلش پیشرونده همراه است. در قسمت مرکزی گسل در نزدیکی جمستان، سن سنجی رادیو کربن بر یک پادگانه قدیمی فراز یافته امکان تخمین کمینه لغزش عمودی $2/0 \pm 0/5$ میلی متر در سال را فراهم می کند. با در نظر گرفتن شیب ۳۴ درجه ای برای گسل کمینه نرخ لغزش افقی ۳ میلی متر و حداقل نرخ لغزش در درازای صفحه گسلی تا $3/6$ میلی متر بر سال خواهد بود. این نتایج تأییدی است بر خطر لرزه ای قابل توجه گسل خزر به عنوان یک ساختار گسلی سترگ و فعال در گستره البرز.

کلیدواژه ها: گسل خزر، زمین ساخت جنب، گسل رانندگی، پیش ساخته، نرخ لغزش

* نویسنده مسئول: حمید نظری

E-mail: hamidnazari@hotmail.com

۱- پیش نوشتار

رشته کوه البرز در شمال ایران با ۶۰۰ کیلومتر درازا و ۷۰-۱۳۰ کیلومتر پهنا، تا ۴۰۰۰ متر بلندا دارد که حوضه کاسپین جنوبی را در شمال از حوضه کویر بزرگ در جنوب خود جدا می کند (شکل ۱). این گستره بخشی از همگرایی بین ایران مرکزی و اوراسیا را در بر گرفته و شامل ساختارهای چین و رانندگی در تمامی درازای آن است. سازوکار امروزی آن با تقسیم کرنش، با گسل خوردگی راستالغز چپ گرد به موازات و در امتداد بخش مرکزی و گسلش معکوس در لبه های شمالی و جنوبی آن مشخص می شود.

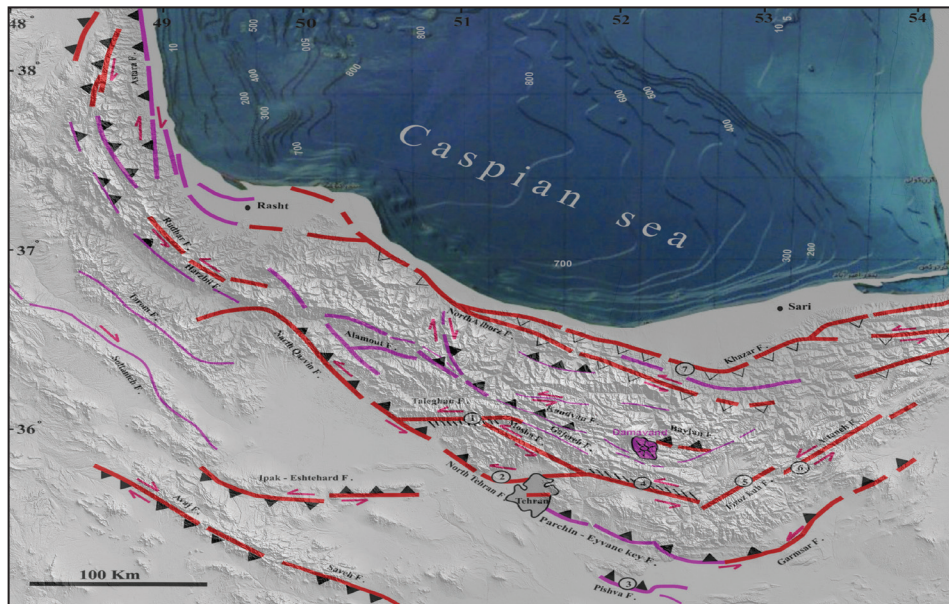
حوضه خزر جنوبی در شمال البرز در همگرایی و گردش ساعت گرد نسبت به اوراسیا در منطقه فرورانشی که از میانه دریای خزر می گذرد جمع می شود (Jackson et al., 2002; Allen et al., 2003; Ritz et al., 2006; Ritz, 2009). چندین مطالعه با نرخ لغزش در مورد گسل های فعال در قسمت مرکزی و جنوبی آن انجام شده است (برای نمونه: Ritz et al., 2006, 2012; Hollingworth et al., 2008; Landgraf et al., 2009; Nazari et al., 2009, 2010, 2014; Javidfakhr et al., 2010; Rizza et al., 2011; Solaymani Azad et al., 2011; Ghassemi et al., 2014; Talebian et al., 2016)، اما ویژگی های اصلی گسل محدود کننده مرز شمالی، گسل خزر (گسل کاسپین)، هنوز شناخته شده نیست. دانش کنونی در مورد میزان کوتاه شدگی کلی برآمده از اندازه گیری های GPS (Vernant et al., 2004; Djamour et al., 2010) همراه با داده های نرخ لغزش موجود برای اصلی ترین گسل های راستالغز و معکوس در مرکز و جنوب بخش هایی از البرز، (برای نمونه: Nazari, 2015)، نشان می دهد که قسمت بزرگی از کوتاه شدگی فعلی در حاشیه شمالی آن، نزدیک گسل خزر واقع شده است (شکل های ۱ و ۲). گسل رانندگی خزر، سنگ های مزوزوییک و نوژن البرز شمالی را بر روی نهشته های نوژن و کوآترنر حوضه خزر جنوبی به سبب ۲۰ کیلومتر قرار داده است (Ghassemi, 2005; Nazari et al., 2005; Brunet et al., 2003).

در این نوشتار، به ارایه نتایج مطالعات ریخت زمین ساختی و سن سنجی که به ما

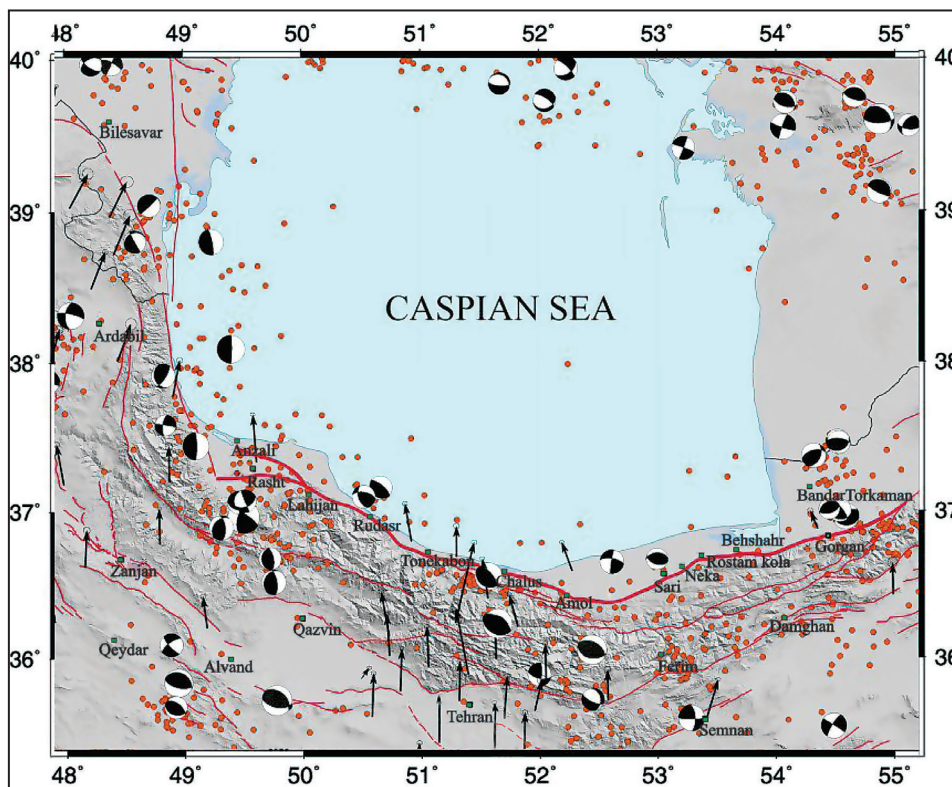
امکان تعیین هندسه، سازوکار و نرخ لغزش گسل جنبای خزر را می دهد، پرداخته می شود (شکل های ۱ و ۲). این پژوهش تأیید می نماید که این گسل سریع ترین گسل فعال در رشته کوه البرز مرکزی است و توانایی تولید زمین لرزه هایی به بزرگی ۷ و یا بیشتر را دارد.

۲- زمین ساخت

البرز مرکزی متأثر از کارکرد چند باره کوهزایی ها از اواخر پرکامبرین - پالئوزوییک آغازین تا زمان نوژن (Berberian and King, 1981; Alavi, 1996; Allen et al., 2003) به عنوان یک ساختار گل واره به همراه رانندگی های شمالی و جنوبی در مقیاس پوسته قرار گرفته است (Stöcklin, 1974; Allen et al., 2003; Nazari, 2006; Ritz et al., 2006; Guest et al., 2006; Shahidi, 2008). در حال حاضر، رشته کوه البرز مرکزی دگر شکلی فشاری همساز با حرکت بیشتر شمالی - جنوبی ایران مرکزی نسبت به حوضه خزر جنوبی را تجربه می کند (Jackson et al., 2002; Ritz et al., 2006). بیان داشتند که این حرکت با چرخش ساعت گرد پوسته خزر جنوبی نسبت به اوراسیا همراه است، که با یک مدل بلوکی گسلی محاسبه شده از داده های GPS در البرز مطابقت دارد (Vernant et al., 2004; Djamour et al., 2010). در مورد سن شروع حرکت خزر جنوبی با توجه به پوسته پایدار اوراسیا، دیدگاه های گوناگونی زمانی بین ۱-۱۰ میلیون سال را به بحث گذاشته اند، (نگاه کنید به Ritz et al., 2006; Allen et al., 2003; Hollingworth et al., 2008). خط اثر گسیختگی سطحی گسل خزر را می توان در شکست شیب جدا کننده دامنه های شمالی البرز مرکزی از پهنه مسطح دشت ساحلی در امتداد خط ساحلی جنوب دریای خزر دانست (Nazari, 2006, 2015). در بخش باختری، گسل می تواند به صورت یک رانندگی اصلی در سطح باشد، در حالی که در بخش خاوری بیشتر در قالب یک رانندگی نهان است که با پیوستگی کمتر، قطعه قطعه شده و در سطح به صورت چین های انتشار گسلی آشکار می شود (Ghassemi, 2005).



شکل ۱- نقشه ساده گسل‌های فعال در البرز مرکزی همراه با میزان نرخ لغزش سالیانه برآمده از پژوهش‌های ریخت زمین‌ساختی و پارینه‌لرزه‌شناسی در دایره‌های مشخص شده، گسل‌های فعال با گسیخت لرزه‌ای تأیید شده توسط کاتالوگ زمین لرزه‌های دستگاهی/ تاریخی و یا پژوهش‌های پارینه‌لرزه‌شناسی نشان داده شده با خطوط سرخ و صورتی نشانگر گسلش فعال در پیوند با شواهد ریخت‌زمین‌ساختی است، سه گوشه‌های سفید نشانگر محل گذر گسل خزر و شمال البرز به عنوان گسل‌های پنهان می‌باشد، (Nazari et al., 2009, 2014, 2021; Ritz et al., 2003, 2012; Majidi Niri et al., 2011; Solaymani Azad, 2011; Hollingworth et al., 2010; Rizza et al., 2011; Antoine et al., 2006).



شکل ۲- نقشه لرزه‌زمین‌ساختی گستره خزر جنوبی (با تغییرات پس از Talebian et al., 2013). خط چین‌های سرخ نازک و سبتر نشان دهنده گسل‌های استنباطی، فرعی و اصلی است. خط قرمز سبتر گسل خزر در حاشیه شمالی رشته کوه البرز مرکزی را تعریف می‌کند. سازوکار کانونی زلزله از (Tatar et al., 2007)، Jackson et al. (2002) و کاتالوگ جهانی CMT گرفته شده است (Engdahl et al., 1998; Engdahl and Villaseñor, 2002). نقاط نارنجی کانون زلزله‌ها را با $M_w > 5$ نشان می‌دهد، (<https://www.globalcmt.org/>). وپیکان‌های سیاه بردارهای سرعت GPS (بر حسب میلی‌متر در سال) نسبت به اوراسیا هستند (<http://www.ncc.ir>).

شکل ۴ نشانگر یک نمای مایل سه بعدی از افزایش پیشانی پرتگاه گسلی در بخشی از DEM بین طول‌های جغرافیایی $52^{\circ}25'$ و $52^{\circ}00'$ در پیرامون شهر چمستان است. از این ساختارها در ادبیات زمین‌شناسی به عنوان «پیش‌ساخته» (foreberg) یاد می‌شود (برای نمونه (Bayasgalan et al., 1999; Ritz et al., 2003; Walker et al., 2003)، و برخی دیگر از نمونه‌های ساختارهای پیش‌ساخته نیز در دامنه جنوبی البرز در کوهپایه‌های آبرفتی که کلان‌شهر تهران بر روی آن بنا شده است توصیف شده است (Ritz et al., 2012; Talebian et al., 2016). سازه‌های پیش‌ساخته چین‌های کنترل‌شده گسلی راندگی و کم ژرفا می‌باشند که در چند کیلومتری جلوی بلندی اصلی، در ژرفا به راندگی اصلی می‌پیوندند (شکل ۴).

۴- نرخ لغزش بلند مدت، بزرگ و دوره تکرار رخداد‌های سترگ

نرخ لغزش - تعیین میزان لغزش طولانی مدت در امتداد گسل خزر دشوار است، هم با جنگل انبوهی که دامنه شمالی البرز را پوشانده و هم به سبب فعالیت شدید انسانی، که در بسیاری از مکان‌ها زمین‌ریخت‌شناسی اصلی را دگرگون کرده‌اند. این حال، چند نشانگر آشکارا در ریخت‌شناسی برجسته می‌شوند و می‌توانند برای بررسی فعالیت زمین‌ساختی در طول گسل استفاده شوند. یکی از این‌ها، در ۲۰ کیلومتری باختر چمستان، نزدیک روستای منوچهرکلا (شکل ۵)، مربوط به یک سطح آبرفتی فراز یافته است که کمی به سمت جنوب متمایل شده و آبرفت‌های قدیمی را پوشانده است (شکل ۵). در پیشانی این سطح آبرفتی فراز یافته، در بستر رودخانه طبقات آبرفت قدیمی به شدت به سمت شمال کج شده‌اند (شکل ۶). چنین طبقات کج شده واحدهای آبرفتی قدیمی به سمت شمال در جاهای دیگری نیز در امتداد خط شکست اصلی شیب مشاهده می‌گردد. این مشاهدات، ما را به این نتیجه می‌رساند که گسل خزر (گسل کاسپین)، در بیشتر موارد، یک راندگی نهان و بدون گسیخت سطحی است.

هم‌سنجی ۴ برش توپوگرافی شمالی - جنوبی 'DD-AA با فواصل عرضی ۲۰۰ متر (شکل ۶-a) نشان از برخاستگی پادگانه آبرفتی بر فراز یک ساختار چین و گسل با سوی محوری حدود ۲٪ به سوی خاور بر پایه ۱۵ متر تفاوت میزان برخاستگی (کمینه جابجایی) پادگانه آبرفتی نزدیک به خط شکست شیب دارد (شکل ۶-b). با در نظر گرفتن میزان بیشینه جابه‌جایی قائم به‌دور از خط شکست در دو تراز بالایی از فراز پادگانه نسبت به تراز پایینی در بستر رودخانه، میانه جدایش عمودی تا ۵۶ متر افزایش می‌یابد (شکل ۶-c). با توجه به اینکه گسله در زیر دیواره آبرفتی پنهان مانده است، این برپایی در پیوند کمینه جدایش عمودی ناشی از کارکرد گسله راندگی خزر است. نمونه گرفته شده از نهشته‌های ستر سلیتی پوشاننده آبرفت در ژرفای ۳/۸ متری از سطح پادگانه فراز یافته در بلندای دیواره باختری رودخانه، (IR19-2B، شکل ۵، b-۷ و c) از نظر مواد آلی غنی بوده و بر پایه شیوه نامه سن‌سنجی رادیوکربن 14^{LMC} (Dumoulin et al., 2017) سن کالیبره شده کربن ۱۴ را برابر 2622 ± 2808 سال ارائه داد. تقسیم حداقل جابه‌جایی عمودی پادگانه فراز یافته (14 ± 56 متر، شکل ۶-c) بر این سن، کمینه سرعت فرایش قائم گسل خزر را برابر $0.5 \pm 2/0$ میلی متر در سال به‌دست می‌دهد.

برای برآورد کمینه نرخ لغزش مؤلفه افقی (یعنی حداقل سرعت کوتاه شدن) و کمینه سرعت لغزش بر صفحه گسل، همانطور که توسط Tatar et al. (2007) از پردازش شکل موج راه دور زمین لرزه بلده ۲۰۰۴ Mw 6.2 تعیین شده است، برای گسل خزر شیب ۳۴ درجه‌ای به سوی جنوب را در نظر گرفتیم. براین پایه، کمینه نرخ لغزش افقی ۳/۰ میلی متر در سال در برابر ۳/۶ میلی متر در سال به عنوان حداقل نرخ لغزش در طول صفحه گسل به‌دست آمد (شکل ۷-a).

۴-۱. بزرگ‌ترین لحظه‌ای بزرگ‌ترین رویدادها

وجود یک افزایش ریخت‌شناسی کاملاً آشکار در امتداد پهنه گسلی خزر نشان از توان گسیخت لرزه‌ای نزدیک به سطح زمین و یا رسیده به سطح دارد. با در نظر گرفتن این که گسیخت‌های هم‌لرزه زمین‌لرزه‌های احتمالی ناشی از جنبش دوباره گسله خزر

بدون هیچ گواه زمین‌شناختی چندین زمین‌لرزه تاریخی به گسل خزر نسبت داده شده است: برای نمونه زمین لرزه‌های آمل در ۱۸۰۹ پیش از میلاد و ۱۲۲۴ پس از میلاد، پلرود-تنکابن ۱۴۸۵ میلادی، رودسر ۱۴۰۰ میلادی، لاهیجان ۱۶۷۸ میلادی، رشت ۱۷۰۹، ۱۷۱۳، ۱۸۵۴، ۱۸۵۷ میلادی و انزلی-شماخدا در ۱۸۵۴ میلادی، (Berberian et al., 1992, 1982; Berberian, 1996). پس از زمین‌لرزه دستگاهی سال ۱۹۵۷ (M7.1) سنگچال در مسیر هراز، رویداد لرزه‌ای بلده ۲۰۰۴ (M 6.2) (Tatar et al., 2007)، آخرین زمین‌لرزه بزرگی است که البرز مرکزی از سده بیستم بدین سو به خود دیده است.

(Djamour et al. (2010) یک مدل بلوک گسلی را از داده‌های GPS محاسبه کردند که در آن گسل خزر یکی از اصلی‌ترین ساختارهای فعال در البرز مرکزی است. در این مدل، گسل خزر بخش باختری خود کوتاه شدگی ۶ میلی متر در سال به همراه یک مؤلفه کوچک چپگردی کوچک‌تر از ۱/۸ میلی متر در سال را جذب می‌کند، در حالی که در بخش خاوری آن، حرکت روی گسل بیشتر راستالغز (۵ میلی متر در سال) با کوتاه شدن جزئی ۲-۳ میلی متر در سال معرفی می‌شود. این مشاهدات کلی زمین‌شناسی، لرزه نگاری و ژئودتیکی این پرسش را به وجود می‌آورد که آیا گسیخت هم‌لرزه ناشی از رخداد زمین لرزه در گسل فعال خزر به سطح زمین رسیده است؟

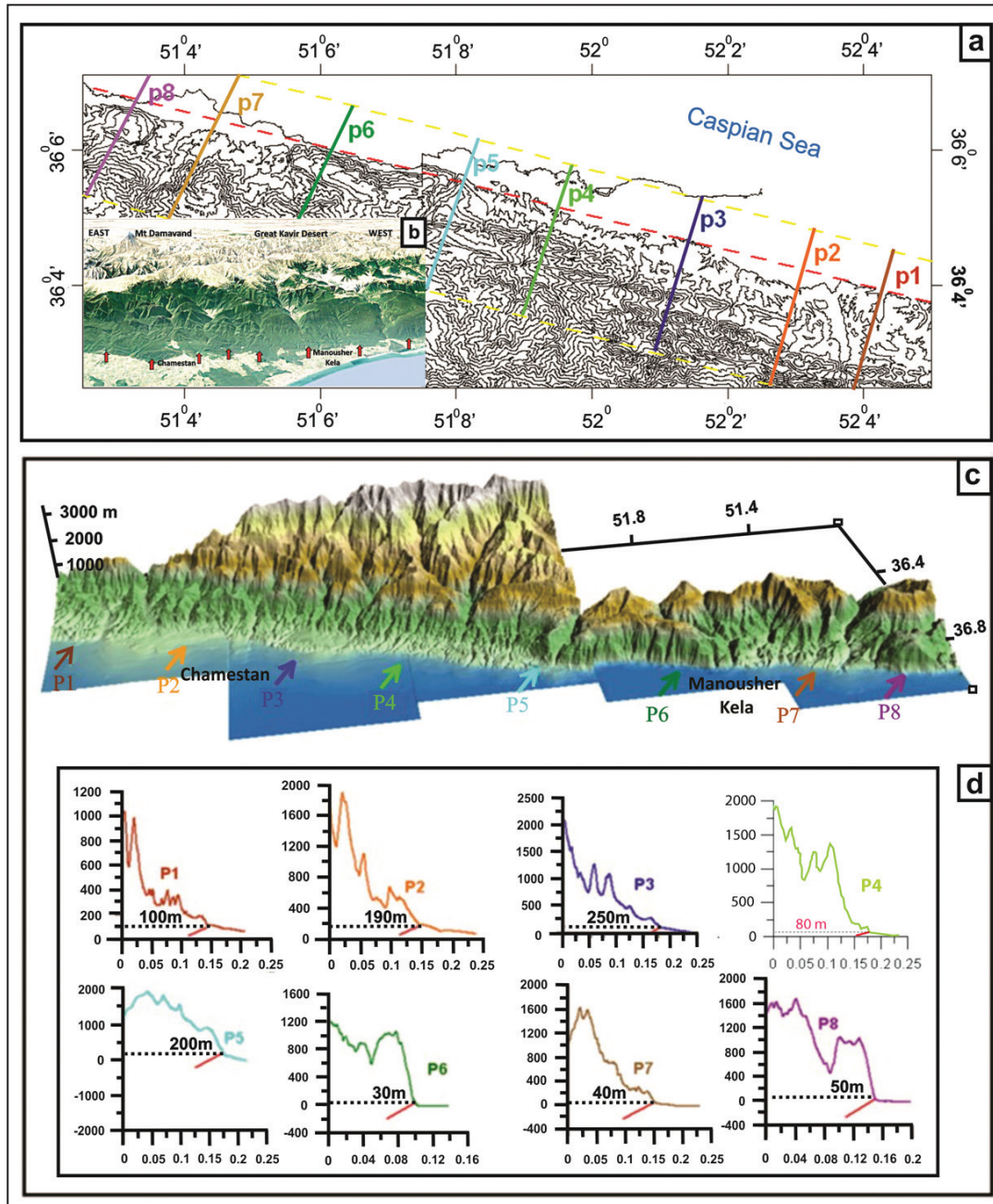
۳- تجزیه و تحلیل ریخت‌زمین ساخت

۳-۱. زمین‌ریخت‌شناسی کلی گسل خزر

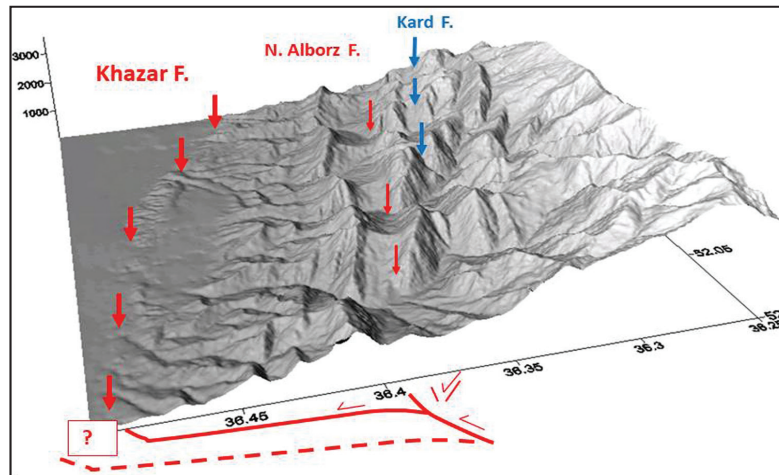
بر روی نقشه‌های نوزمین‌ساختی در امتداد جبهه شمالی البرز مرکزی، بین طول‌های ۴۹/۵ و ۵۵/۲ درجه خاوری (شکل‌های ۱ و ۲)، این گسل به عنوان یک گسل پنهان توصیف شده است (Nazari et al., 2005; Nazari, 2006). با این وجود، برخلاف پوشش گیاهی انبوه دامنه‌های شمالی البرز مرکزی، به طور کلی گسل خزر را می‌توان در محل شکست شیب کوهپایه و دشت مسطح ساحلی تشخیص داد. این ویژگی توپوگرافی را می‌توان به گونه‌ای پیوسته بین طول‌های جغرافیایی ۵۰/۰ درجه (لاهیجان) و ۵۲/۵ درجه خاوری (جنوب خاوری آمل) در روند WNW-ESE دنبال کرد (شکل ۳-a). سپس بین ۵۲/۵ درجه خاوری و ۵۳/۳ درجه خاوری (نکا)، پشته‌هایی که نشانگر شکست شیب با روندی مایل نسبت به راستای اصلی می‌باشد می‌تواند نشان از تقسیم‌بندی گسل به پاره‌گسل‌هایی چند باشد. بین ۵۳/۵ و ۵۴/۳ درجه خاوری (گرگان)، در امتداد بخش دیگری از رشته‌کوه با راستای خاوری-باختری، دوباره می‌توان یک شکستگی توپوگرافی آشکار را در داخل سطح باذن آبرفتی در شکست شیب مشاهده کرد. سرانجام، در خاور گرگان، جایی که البرز به راستای ENE-WSW متمایل می‌شود، اشاره به شواهد زمین‌ریخت‌شناختی آشکار برای فعالیت اخیر گسل خزر دشوار است. شکل ۳-b نشانگر یک مدل ارتفاعی رومویی (DEM) است که از نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ از دامنه شمالی البرز مرکزی بین شهرهای چالوس و آمل گرفته شده است، شکست شیب محل گذر گسل خزر را نشان می‌دهد. جانمایی شکست اصلی شیب در برش‌های توپوگرافی نشان از تغییر ارتفاع بین ۲۰ تا ۲۰۰ متر دارد (شکل ۳-b). بنابراین، برخلاف اینکه گاهی پیش از این در ماهیت زمین‌ساختی و گسلی افزایش خزر تردید شده است (Brookfield and Hashmat, 2001; Guest et al., 2006). با توجه به تغییر تراز توپوگرافی در محل شکست شیب دامنه‌ای این تغییر توپوگرافیک نمی‌تواند تابع یک ویژگی ریختاری چون خطوط تراز ساحلی منظور گردد و از این رو در شمار افزایش زمین‌ساختی قابل دست‌بندی است. با این حال، بر پایه برش‌های اجرا شده توپوگرافی عمود بر راستای البرز مشاهده می‌کنیم که ریختار کوهپایه‌های گسسته در همه جا همگن و یکسان نیست. در امتداد بخش باختری DEM، گسل خزر به خوبی در پی بلندای اصلی قرار گرفته است (برش P4 - P8)، در حالی که در امتداد بخش خاوری، پهنه گسل درمرز بخش فروافتاده دشت ساحلی در برابر جبهه اصلی کوه قرار می‌گیرد، (برش P1 - P3).

$M_w = a + b \times \log(RW)$ یعنی $M_w = (0.16 \pm 4.37) + (0.15 \pm 1.95) * \log(RW)$ بزرگای گشتاوری (M_w) با توجه به پهنای گسیخت پیشرونده به پایین شیب (RW) بین ۷/۳ تا ۸/۱ برآورد شد (شکل ۷-ا).

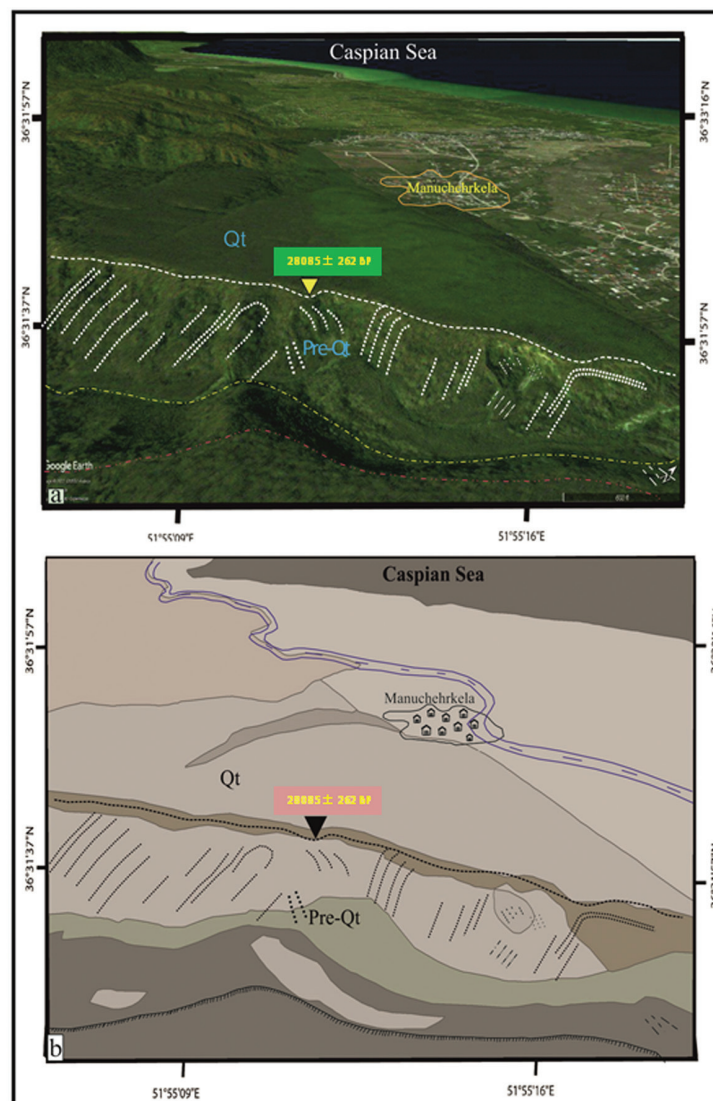
می‌توانند مشابه با آنچه در زلزله بلده $M_w 6.2 \times 10^4$ دیده شده است (Tatar et al., 2007)، ژرفای کانونی حدود ۲۲ کیلومتر و صفحه گسلی با شیبی حدود ۳۴ درجه به سوی جنوب را داشته باشند، با استفاده از قانون رگرسیون Wells and Coppersmith (1994)



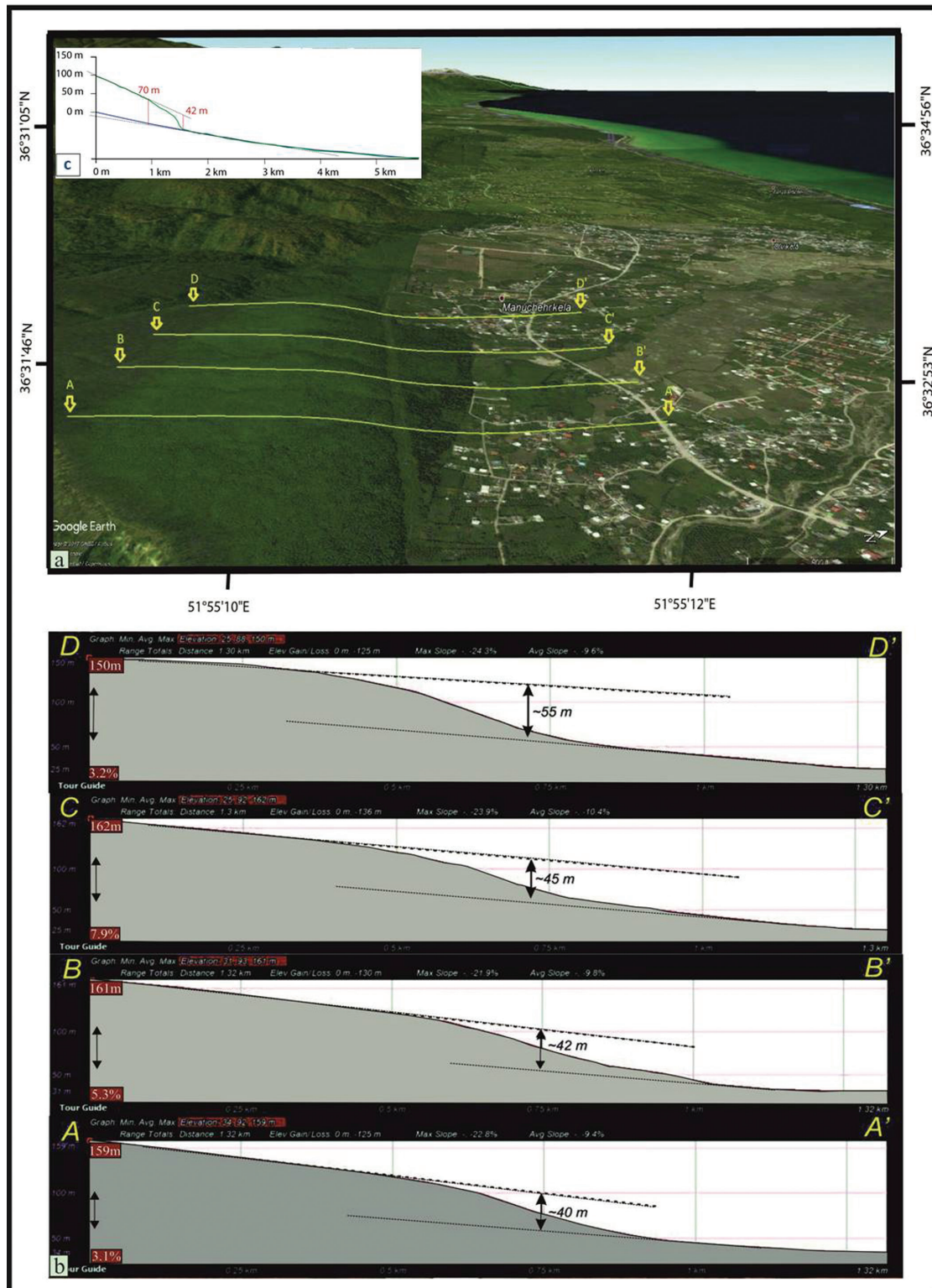
شکل ۳- (a) نقشه توپوگرافی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ همراه با جانمایی برش‌های توپوگرافی در دامنه شمالی البرز مرکزی؛ (b) نمای گوگل ارث به سوی جنوب از بخش مرکزی بلندی‌های البرز مرکزی (پیکان‌های سرخ نشان‌دهنده پرتگاه توپوگرافی در پیوند با گسل خزر است)؛ (c) نمای سه بعدی از مدل ارتفاعی رقمی برگرفته از نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ این شهرهای چالوس و آمل، با ۸ برش توپوگرافی که نشانگر بلندای خط اثر گسل خزر است؛ (d) برش‌های توپوگرافی در راستای شمالی- جنوبی به همراه جانمایی خط شکست شیب به عنوان محل گذر گسل خزر.



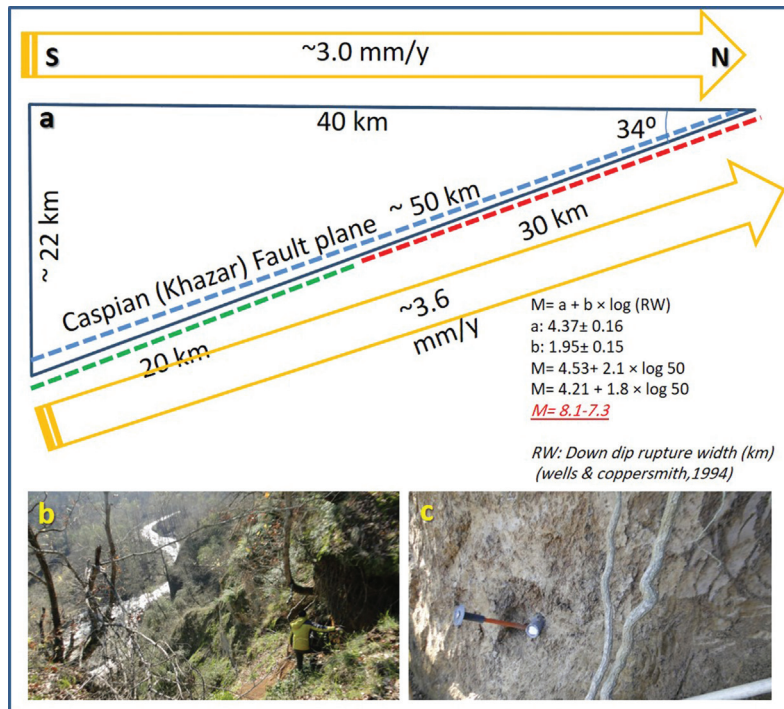
شکل ۴- نمای مورب بخشی از DEM بین طول جغرافیایی $E52^{\circ}$ و $E52.25^{\circ}$ (در اطراف شهر چمستان) که نشان‌دهنده افزایش توپوگرافی در پیوند با فعالیت گسل خزر است. پیکان‌های سرخ و آبی به ترتیب از شمال به جنوب نشانگر خط اثر گسل‌های خزر، شمال البرز و گسله کششی کرد بر فراز فرادیواره گسل شمال البرز می‌باشند.



شکل ۵- (a) نمایی از تصویر گوگل ارث به سوی باختر، نشانگر یک افزایش تجمعی همساز با کارکرد گسل خزر در نزدیکی روستای منوچهرکلا و طرح‌واره آن در (b).



شکل ۶- (a) نمای باختری از تصویر گوگل ارت از پادگانه آبرفتی بر فراز ساختار پیشرونده چین وایسته به گسلش ناشی از عملکرد گسله راندگی خزر در جنوب روستای منوچهرکلا به همراه جانمایی برش‌های چهارگانه توپوگرافی کوتاه (نزدیک به خط شکست شیب در مرز کوه و دشت)؛ (b) نمودارهای ارتفاعی؛ (c) نمودار ارتفاعی در برش‌های توپوگرافی بلند بر فراز سطح افراشته پادگانه آبرفتی و بستر رودخانه.



شکل ۷- (a) نمایی شماتیک از صفحه گسله کاسپین (خزر) و محاسبات انجام شده و بر پایه فاصله تقریبی رومرکز زمین لرزه بلده نسبت به لبه شمالی کوهستان و ژرفای کانون زمین لرزه (Tatar et al., 2007)، خط چین سبز نشانگر ۲۰ کیلومتر گسیخت هم لرز رخ داده در هنگام زمین لرزه بلده و خط چین سرخ بخش نگسیخته بر صفحه گسل را به نمایش می گذارد؛ (b) نمای میدانی از محل نمونه برداری برای آزمایشگاه رادیوکربن با نگاه به سوی جنوب و (c) نمای ترکیب از نهشته های آرژیلی نمونه برداری شده در ژرفای ۳/۸ متری از سطح زمین.

۵- نتیجه گیری

این واقعیت که ما می توانیم نشانه های ریخت شناختی آشکاری را در امتداد پهنه گسلی خزر مشاهده کنیم، توانایی آن را در تولید گسیخت های لرزه ای به سطح رسیده و یا نزدیک به سطح را نشان می دهد. گسل خزر توان تولید زمین لرزه های سترگ تا بسیار سترگ با کمینه بزرگای ۷/۰ تا ۸/۰ را داراست. اگرچه هیچ نشانه تاریخی از زمین لرزه با بزرگای ۸/۰ وجود ندارد. همان گونه که (Djamour et al. 2010) نیز نتیجه گیری کردند، از گسل خزرمی توان به عنوان سریع ترین گسل در البرز مرکزی یاد نمود. گسل خزر با شیب به سوی جنوب و توانایی ایجاد زمین لرزه های به نسبت ژرف (۲۰-۳۰ کیلومتری زمین)، مانند بلده در سال ۲۰۰۴، یک خطر لرزه ای قابل توجه برای کل منطقه البرز مرکزی و شهرهای پرجمعیت آن به شمار می رود.

سپاسگزاری

از سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، پژوهشکده علوم زمین و دپارتمان علوم زمین مونت پلیه-فرانسه به دلیل پشتیبانی از پروژه قدردانی می شود. نویسندگان از م. قنبرزاده و همکاران مرکز زمین شناسی ساری برای مشارکت میدانی در نمونه برداری تشکر می کنند. این مقاله از گزارش های پروژه GSCC در GSI /RIES بهره مند بوده است. سن سنجی رادیوکربن در چارچوب خدمات ملی INSU / بستر ملی LMC14 Gif-sur-Yvette، فرانسه انجام شد.

تجزیه و تحلیل ما از گسل خزر، بینش جدیدی درباره فعالیت آن ایجاد کرده است. نشانه های زمین ریخت شناسی آشکاری در پیوند با فعالیت های کوآترنری و اواخر آن وجود دارد که در جلگه ساحلی جنوب خزر نقش بسته است. به طور کلی، این گسل اصلی یک گسل راندگی پنهان است، که اغلب با ساختارهای چین و خم گسلی، گسلش پیشرونده و یا «پیش ساخته ها» همراه است.

در بخش مرکزی گسل، در نزدیکی شهر چمستان، شناسایی کارکرد یک ساختار چین و خم گسلی در بالا بردن پادگانه آبرفتی به ما اجازه برآورد نرخ لغزش عمودی ۰/۵ ± ۲/۰ میلی متر در سال را داده است. این میزان مشابه سرعت برپایی تخمین زده شده ۱/۹ - ۲/۸ میلی متر بر سال توسط Antoine et al. (2006) است. این نرخ لغزش کمینه بوده زیرا که نهشته های پادگانه آبرفتی فراز یافته در فرا دیواره گسل با رسوبات جوان تر در بخش فرو دیواره گسل پوشیده می شود. افزون بر آن به احتمال زیاد سطح تراز درای خزر در ۲۸ هزار سال پیش در آخرین عصر یخبندان پایین تراز کنونی آن بوده است.

در همخوانی با آنچه (Djamour et al. 2010) از اندازه گیری های شبکه GPS در مورد نرخ لغزش گسلی برآمده از مدل بلوکی (۲ ± ۴-۶ میلی متر در سال) به دست داده اند، در این پژوهش نرخ لغزش قائم دراز مدت (کوآترنری پسین) در امتداد گسل خزر برابر ۳/۶ میلی متر در سال برآورد می شود.

References

- Alavi, M., 1996- Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in Northern Iran. *Journal of Geodynamics*, 21(1), 1-33.
- Allen, M.B., Ghassemi, M.R., Shahrabi, M., and Qorashi, M., 2003- Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology*, 25, 659-672.
- Antoine, P., Bahain, J.J., Berillon, G., and Asgari Khaneghah, A., 2006- Tuf calcaire et séquence alluviale en contexte tectonique actif : La formation de Baliran (province du Mazandaran, Iran). *Quaternaire*, 17 (4), 321-331.
- Bayasgalan, A., Jackson, J., Ritz, J.F., and Carretier, S., 1999- Forebergs, flower structures, and the development of large intracontinental strike-slip faults: the Gurvan Bogd fault system in Mongolia, *Journal of Structural Geology* 21, 1285-1302.
- Berberian, M., and King, G., 1981- Towards a Paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 2, 210-265.
- Berberian, M., 1982- Aftershock tectonics of the 1978 Tabas- e- Golshan (Iran) earthquake sequence: A documented active 'thin- and thick-skinned tectonic' case. *Geophys. Jour. Roy. Astr. Soc.* 68: 499-530.
- Berberian, M., Qorashi, M., Jackson, J.A., Priestley, K., and Wallace, T., 1992- The Rudbar-Tarom earthquake of 20 June 1990 in NW Persia - Preliminary field and seismological observation, and its tectonic significance. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82, (4), 726-1755.
- Berberian, M., 1996- The Historical Earthquakes in Persia, pp. 635-640, <http://www.iranicaonline.org/articles/earthquakes#iv>.
- Brookfield, M.F., and Hashmat, A., 2001- The geology and petroleum potential of the north Afghan platform and adjacent areas (northern Afghanistan, with parts of southern Turkmenistan, Uzbekistan and Tajikistan). *Earth Sciences reviews*, 55, 41-71.
- Brunet, M. F., Korotaev, M.V., Ershov, A.V., and Nikishin, A.M., 2003- The South Caspian Basin: A review of its evolution from subsidence modelling. *Sedimentary Geology*, 156(1-4), 119-148.
- Djamour, Y., Vernant, P., Bayer, R., Nankali, H., Ritz, J.F., Hinderer, J., Hatam, Y., Luck, B., Le Moigne, N., Sedighi, M., and Khorrami F., 2010- GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz Mountain range, Iran, *Geophysical Journal International*, 183, 1287-1301.
- Dumoulin, J.P., Comby-Zerbino, C., Delqué-Količ, E., Moreau, C., Caffy, I., Hain, S., Perron, M., Thellier, B., Setti, V., Berthier, B., and Beck, L., 2017- Status report on sample preparation protocols developed at the LMC14 Laboratory, Saclay, France: from sample collection to 14C AMS measurement. *Radiocarbon* 59, 713-726.
- Engdahl, E. R., Van der Hilst, R. D., and Buland, R. P., 1998- Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88, 772-743.
- Engdahl, E.R., and Villaseñor, A., 2002- Global Seismicity: 1900–1999, in W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger (editors), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Part A, Chapter 41, pp. 665–690, Academic Press.
- Ghassemi, M., 2005- Drainage evolution in response to fold growth in the hanging-wall of the Khazar fault, north-eastern Alborz, Iran. *Basin Research*, 17, 425-436.
- Ghassemi, M.R., Fattahi, M., Landgraf, A., Ahmadi, M., Ballato, P., and Tabatabaei, S.H., 2014- Kinematic links between the Eastern Moshafault and the North Tehran Fault, Alborz range, northern Iran. *Tectonophysics*, 622, pp.81-95.
- Guest, B., Axen, G.J., Lam, P.S., and Hassanzadeh, J., 2006- Late Cenozoic shortening in the west-central Alborz Mountains, northern Iran, by combined conjugate strike-slip and thin-skinned deformation. *Geosphere*, 2 (1), 35–52.
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., and Nazari, H., 2008- Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since 10 Ma. *Geology*, 36, (10), 763-766.
- Hollingsworth, J., Nazari, H., Ritz, J.F., Salamati, R., Talebian, M., Bahroudi, A., Walker, R. T., Rizza, M., and Jackson, J. 2010- Active tectonics of the east Alborz mountains, NE Iran: Rupture of the left lateral Astaneh fault system during the great 856 A.D. Qumis earthquake. *Journal of geophysical research*, v. 115, B12313, doi:10.1029/2009JB007185.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M., and Berberian, M., 2002- Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geophysical Journal International*, 148, 214-245.
- Javidfakhr, B., Bellier, O., Shabaniyan, E., Siame, L., Leanni, L., Bourles, D., and Ahmadian, S., 2010- Fault kinematics and active tectonics at the southeastern boundary of the eastern Alborz (Abr and Khij fault zones): geodynamic implications for NNE Iran, *Journal of Geodynamics*, doi:10.1016/j.jog.2011.02.005.

- Landgraf, A., Ballato, P., Strecker, M. R., Friedrich, A., Tabatabaei, S. H., and Shahpasandzadeh, M., 2009- Fault-kinematic and geomorphic observations along the North Tehran Thrust and Mosha Fasham Fault, Alborz mountains Iran: Implications for fault-system evolution and interaction in a changing tectonic regime, *Geophysical Journal International*, Volume 177, Issue 2, May 2009, Pages 676–690, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04089.x>.
- Majidi Niri, T., Nazari, H., Ghorashi, M., Talebian, M., Kaveh Firooz, A., 2011- First records of 1348 AD Shahr-e-Rey's historical earthquake on Pishva Fault based on Paleoseismology researches, South East of Tehran. *Geosciences, Geological Survey of Iran*, 21, (81), 169-178.
- Nazari, H., 2006- Analyse de la tectonique recente et active dans l'Alborz Central et la region de Teheran: Approche morphotectonique et paleoseismologique, Ph.D. thesis, Montpellier II, pp. 247, Montpellier- France.
- Nazari, H., 2015- Analyse de la tectonique active en Iran : Approches morphotectonique at paléosismologique: Implication en termes d'aléa sismique. *Géosciences Montpellier*, HDR thesis, Université Montpellier, Montpellier, France, pp:116.
- Nazari, H., Ritz, J.F., Talebian, M., and Moosavi, A., 2005- Seismotectonic map of the Central Alborz, Scale 1:250000, Geological Survey of Iran.
- Nazari, H., and Ritz, J.F., 2008- Neotectonics in Central Alborz. *Geosciences, Geological Survey of Iran*. special issue, 17 (1), 74 -92.
- Nazari, H., Ritz, J.F., Salamati, R., Shafei, A., Ghassemi, A., Michelot, J.L., Massault, M., and Ghorashi, M., 2009- Morphological and Paleoseismological analysis along the Taleghan fault (Central Alborz, Iran). *Geophysical Journal International*, 178, 1028–1041.
- Nazari, H., Ritz, J.F., Salamati, R., Shahidi, A., Habibi, H., Ghorashi, M., and Bavandpur, A.K., 2010- Distinguishing between fault scarps and shorelines: the question of the nature of the Kahrizak, North Rey and South Rey features in the Tehran plain (Iran). *Terra Nova*, 22(3), pp.227-237.
- Nazari, H., Ritz, J.F., Walker, R., Salamati, R., Rizza, M., Ghassemi, A., Patnaik, R., Hollingsworth, J., Alimohammadian, H., Jalali, A., Kaveh Firooz, A., and Shahidi, A., 2014- Palaeoseismic evidence for a medieval earthquake, and preliminary estimate of late Pliocene slip-rate, on the Firouzkuh strike slip fault in the Central Alborz region of Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 82, 124 –135.
- Nazari, H., Ritz, J-F., Burg, J-B., Shokri, M., Haghypour, N., Mohammadi Vizheh, M., Avagyan, A., Fazeli Nashli, H., and Ensani, M., 2021- Active tectonics along the Khazar fault (Alborz, Iran), *JAES*, V. 219, 104893, <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2021.104893>.
- Ritz, J.F., Bourle's, D., Brown, E. T., Carretier, S., Che'ry, J., Enhtuvshin, B., Galsan, P., Finkel, R. C., Hanks, T. C., Kendrick, K. J., Philip, H., Raisbeck, G., Schlupp, A., Schwartz, D. P., and Yiou, F., 2003- Late Pleistocene to Holocene slip rates for the Gurvan Bulag thrust fault (Gobi-Altay, Mongolia) estimated with ^{10}Be dates, *J. Geophys. Res.*, 108(B3), 2162, doi:10.1029/2001JB000553.
- Ritz, J.F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., and Vernant, P., 2006- Active transtention inside Central Alborz: A new insight into the Northern Iran-Southern Caspian geodynamics, *Geology*, 34 (6), 477-480.
- Ritz, J.F., 2009- Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since 10 Ma: Comment: *Geology*.
- Ritz, J.F., Nazari, H., Balescu, S., Lamothe, M., Salamati, R., Ghassemi, A., Shafei, A., Ghorashi, M., and Saidi, A., 2012- Paleoeearthquakes of the past 30000 years along the North Tehran Fault, Iran. *Journal of Geophysical Research*, 117, 147, 1-15.
- Rizza, M., Mahan, S., Ritz, J.-F., Nazari, H., Hollingsworth, J., and Salamati, R., 2011- Using luminescence dating from coarse matrix material to estimate fault slip-rate in arid domain: Example of the Astaneh Fault (Iran). *Quaternary Geochronology*, vol. 6, issue 3-4, 390-406, doi: 10.1016/j.quageo.2011.03.001.
- Shahidi, A., 2008- Evolution tectonique du Nord de l'Iran (Alborz et Kopet-Dagh) depuis le Mésozoïque. Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie, pp. 500, Paris, France.
- Solaymani Azad, S., Ritz, J.F., and Abbassi, M., 2011- Analysing the junction between the Mosha and the North Tehran active faults, *Tectonophysics*, 497, 1–14.
- Stöcklin, J., 1974- Northern Iran: Alborz Mountains. Geological Society of London, Special publication, 4, 213-234.
- Talebian, M., Ghorashi, M., and Nazari, H., 2013- Seismotectonic map of the Central Alborz, Scale 1:750000, Geological Survey of Iran, <http://ries.ac.ir/eqhazard/wp/Resualts.htm>.
- Talebian, M., Copley, A. C., Fattahi, M., Ghorashi, M., Jackson, J. A., Nazari, H., Sloan, R. A., and Walker, R. T., 2016- Active faulting within a megacity: the geometry and slip rate of the Pardisan thrust in central Tehran, Iran, *Geophysical Journal International*, Volume 207, Issue 3, December 2016, Pages 1688–1699, <https://doi.org/10.1093/gji/ggw347>.
- Tatar, M., Jackson, J. , Hatzfeld, D. , and Bergman, E., 2007-The 28 May 2004 Baladeh earthquake (Mw 6.2) in the Alborz, Iran: overthrusting the South Caspian Basin margin, partitioning of oblique convergence, and the seismic hazard of Tehran. *Geophysical Journal International*, 170, 249–261.

- Vernant, P., Nilforoushan, F., Chery, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, J.F., Sedighi, and M., Tavakoli, F., 2004- Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data. *Earth and Planetary Science Letters*, 223, 177-185.
- Walker, R. T., Jackson, J., and Baker, C., 2003- Surface expression of thrust faulting in eastern Iran: Source parameters and surface deformation of the 1978 Tabas and 1968 Ferdows earthquake sequences, *Geophys. J. Int.*, 152, 749–765, doi:10.1046/j.1365-246X.2003.01886.x.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994- Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seismo. Soc. Am.* (84), 974-1002.

Morphotectonics and Slip rate of the Khazar fault in Central Alborz, (North of Iran)

H. Nazari ^{1*}, J-F. Ritz ² and A. Avagyan³

¹Associate Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

² Professor, Laboratoire Géosciences, Université de Montpellier-CNRS, Montpellier, France

³ Professor, Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences, Yerevan, Armenia

Received: 2020 December 05

Accepted: 2021 February 03

Abstract

The Alborz mountain range accommodates some of the convergence between Central Iran and Eurasia. At present, the kinematics of the range involves a strain partitioning mechanism, and is associated with clockwise rotation of the South Caspian Basin. Left-lateral strike-slip faulting is present along the entire of its central part, while reverse faulting is affects its northern and southern borders. Several slip-rate studies have been carried out along active faults in the internal and southern parts of the range. Our analysis provides new constraints on the activity of this important active thrust fault. We show that the fault generally is a hidden thrust fault, often associated with fault-bend and fault-propagation folds (forebergs). In the central part of the fault near Chamestan, radiocarbon dating on an old elevated terrace allows estimating the minimum vertical slip of 2.0 ± 0.5 mm/year. Considering a 34 degree slope for the fault, the minimum horizontal slip rate will be 3 mm/yr and the minimum slip rate along the fault plane will be up to 3.6 mm/year. Our results confirm that the Khazar Fault is a major active structure in northern Iran, and represents a significant seismic hazard for the entire Central Alborz region.

Keywords: Khazar fault, Active tectonics, Thrust fault, Foreberg, Slip rate

For Persian Version see pages 101 to 110

*Corresponding author: H. Nazari; E- mail:hamidnazari@hotmail.com