

زمین‌ریخت‌شناسی و ساز و کار گسلش زمین‌لرزه‌های ۱۰ و ۲۱ آذرماه ۱۳۹۶ هجری کرمان

مرتضی طالبیان^۱، منوچهر قرشی^۱ و احسان کوثری^۲

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

^۲دانشجوی دکتری، مرکز مطالعات علوم زمین آلمان، پتسدام، آلمان

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۰۲ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۳

چکیده

در آذرماه سال ۱۳۹۶ سه زمین‌لرزه با بزرگی ۵/۹ تا ۶/۱ در منطقه هجدک کرمان روی داد. این زمین‌لرزه‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، تداخل‌سنجی رادار و بازدید میدانی مورد مطالعه قرار گرفت. رومرکز زمین‌لرزه اول و دوم در مرز کوه و دشت در دامنه شمالی میان کوه که بلندی اصلی منطقه است، قرار می‌گیرند. هیچ‌گونه گسیختگی سطحی همراه با این زمین‌لرزه‌ها در سطح زمین دیده نشده است و تداخل‌سنجی رادار نیز بالا آمدگی نسبتاً متقارن سطح زمین را برای این زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد. بر این اساس، دو سناریوی گسل زمین‌لرزه‌ای با شیب به سوی جنوب باختری و یا گسل زمین‌لرزه با شیب به سوی شمال خاوری برای این زمین‌لرزه‌ها امکان‌پذیر است. رومرکز رویداد سوم در دشت آبرفتی شمال میان کوه قرار می‌گیرد. آثار گسلش سطحی همراه با این رویداد نخست در تصاویر ماهواره‌ای پس از رویداد و تداخل‌سنجی رادار دیده شد و سپس در بازدید صحرائی مورد تأیید قرار گرفت. این زمین‌لرزه با حدود ۶ کیلومتر گسیختگی سطحی و بیش از یک متر بالا آمدگی بلوک جنوبی در راستای گسله با ساز و کار راندگی و شیب به سوی جنوب باختری همراه بود. هیچ‌گونه آثار گسلش پیش از رویداد زمین‌لرزه در دشت آبرفتی دیده نشده است که احتمالاً ناشی از شسته شدن آن به وسیله سیلاب‌های فصلی است. با این وجود، در ادامه گسله به سوی شمال باختری پریدگی آبرفت‌های جوان بیانگر وجود گسله‌ای جوان و جنباً در این منطقه است. جنبش گسل‌های پنهان پیش از این نیز زمین‌لرزه‌های بزرگی همچون طیس، بم، و سرپل ذهاب را موجب شده است. زمین‌لرزه هجدک نیز یک بار دیگر اهمیت شناسایی و توجه به این گسل‌ها در برآورد خطر زمین‌لرزه به‌ویژه در مجاورت شهرهای بزرگ را یادآور می‌شود.

کلیدواژه‌ها: زمین‌لرزه هجدک، گسلش سطحی، گسل پنهان، زمین‌ریخت‌شناسی، تداخل‌سنجی رادار

*نویسنده مسئول: مرتضی طالبیان

E-mail: talebian@ries.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

در فاصله زمانی ۱۰ تا ۲۱ آذرماه ۱۳۹۶ سه زمین‌لرزه با بزرگی ۶/۱، ۵/۹ و ۶/۰ منطقه هجدک در شمال خاوری کرمان را لرزاند. رومرکز زمین‌لرزه‌ها در منطقه‌ای خالی از سکنه محصور در میانه کوهستان قرار می‌گیرد، از این رو خسارات چندانی را به همراه نداشت. بیشترین خسارت مربوط به روستای گورک در فاصله ۱۳ کیلومتری جنوب باختری نزدیک‌ترین رومرکز بود که در آن تعدادی از ساختمان‌های با کیفیت ضعیف تخریب گردید.

زون لرزه‌زای باختر کویر لوت یکی از لرزه‌خیزترین بخش‌های کشور است و حدود ۵ میلی‌متر در سال حرکت راستالغز بین ایران مرکزی و کویر لوت را در خود جای می‌دهد (Walker and Jackson, 2002; Vernant et al., 2004). چندین زمین‌لرزه بزرگ در دهه‌های گذشته نتیجه جنبش این سامانه است که از آن جمله می‌توان به زمین‌لرزه‌های سال‌های ۱۹۸۱ (با بزرگی گشتاوری ۶/۶ و ۷/۲) و زمین‌لرزه ۱۹۹۸ (با بزرگی گشتاوری ۶/۶) در راستای گسل گوک (Berberian et al., 2001)، زمین‌لرزه سال ۲۰۰۳ بم با بزرگی گشتاوری ۶/۶ (Talebian et al., 2004) و زمین‌لرزه سال ۲۰۰۵ داهوئی با بزرگی گشتاوری ۶/۴ (Jackson et al., 2006) (Talebian et al., 2006) نام برد (شکل ۱).

ساز و کار هر سه زمین‌لرزه آذرماه ۱۳۹۶ منطقه هجدک راندگی است که از این نظر با زمین‌لرزه‌های گسله گوک و بم متفاوت است، اما با ساز و کار زمین‌لرزه داهوئی که ناشی از جنبش انشعابات راندگی پایانی گسله امتداد لغز کوهبنان است همخوانی دارد. از سه رویداد زمین‌لرزه هجدک، رومرکز دو رویداد نخست در لبه کوهستان قرار می‌گیرند. رومرکز رویداد سوم در میانه دشت هموار، جایی که هیچ‌گونه نشان زمین‌ریخت‌شناختی از وجود گسله جنباً وجود ندارد، واقع شده است. رویداد اول و دوم گسیختگی سطحی ایجاد نموده‌اند و احتمالاً مربوط به جنبش بخش‌های ژرف‌تر پوسته‌اند در حالی که رویداد سوم با گسیختگی سطحی مشخصی با درازای حدود ۶ کیلومتر در میانه دشت آبرفتی همراه بوده است.

زمین‌لرزه هجدک یک بار دیگر اهمیت مطالعه گسل‌های ناشناخته و وجود گسل‌های پنهان در دشت‌های کشور را یادآور می‌شود. شناخت این گسله‌ها کاربرد مستقیم در مطالعات برآورد خطر زمین‌لرزه در کشور دارد.

۲- جایگاه زمین‌ساختی

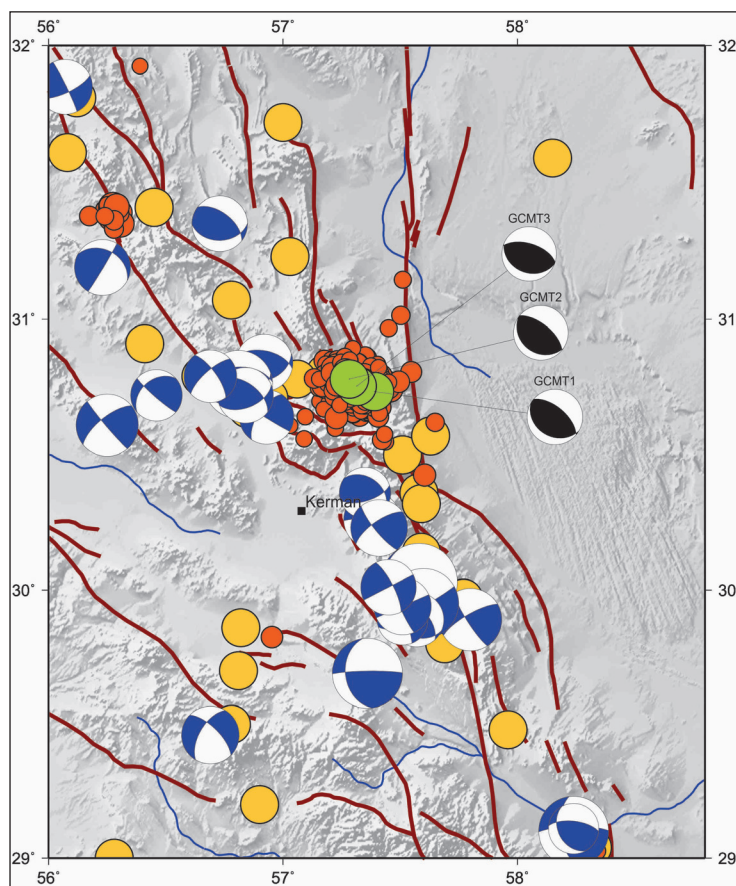
بلوک صلب لوت در خاور ایران بین دو بلوک افغانستان در خاور و ایران مرکزی در باختر قرار می‌گیرد و به‌وسیله گسل‌های راستالغز با روند شمالی - جنوبی از آنها جدا شده است. بلوک افغانستان از شمال به اوراسیا متصل می‌شود و تغییر شکل چندانی در داخل آن اتفاق نمی‌افتد از این رو حرکتی نسبت به اوراسیا در آن دیده نمی‌شود. اما در سوی باختر بردارهای جی پی اس حرکت حدود ۱۳ میلی‌متر در سال به سوی شمال ایران مرکزی نسبت به اوراسیا را نشان می‌دهند. این میزان حرکت نسبی در طول گسل‌های خاور و باختر لوت جای می‌گیرد. مطالعات زمین‌شناسی و ژئودتیک بیانگر نرخ لغزش حدود ۵ میلی‌متر در سال برای مجموعه گسل‌های باختر لوت و حدود ۸ میلی‌متر در سال برای زون راستالغز خاور لوت است (طالبیان و همکاران، ۱۳۸۸).

در باختر لوت زون گسله کوهبنان، لکرکوه و نایبند در شمال خاور کرمان، گسل گوک و شهداد در خاور و گسل‌های بم و سبزواران در جنوب خاوری جنباترین گسل‌های منطقه را تشکیل می‌دهند. مطالعات زمین‌ریخت‌شناسی و سن‌یابی مطلق، نرخ لغزش راست‌گرد حدود ۵ میلی‌متر در سال را برای گسل گوک پیشنهاد می‌نماید (Walker and Jackson, 2002; Vernant et al., 2004). به سوی جنوب این حرکت به گسل‌های راستالغز بم و سبزواران منتقل می‌شود. به کمک مطالعات زمین‌ریخت‌شناسی و تعیین سن مطلق نرخ لغزش گسل بم حدود ۲ میلی‌متر در سال تعیین گردیده است (طالبیان و همکاران، ۱۳۸۸). بنابراین، مانده آن یعنی حدود ۳ میلی‌متر در سال احتمالاً بر روی گسله سبزواران تجمع می‌یابد. به سوی شمال گسل گوک، حرکت نسبی ایران مرکزی نسبت به بلوک لوت بر روی گسل‌های نایبند، لکرکوه و کوهبنان توزیع شده است.

۳- لرزه‌خیزی

ویژگی اصلی لرزه‌خیزی خاور ایران رویداد زمین‌لرزه با سازوکار کانونی راست‌الغز راست‌گرد بر روی گسل‌های با راستای شمالی-جنوبی و یا ساز و کار راندگی بر روی انشعابات راندگی انتهایی آنها در دو سوی بلوک لوت است. بخش مرکزی لوت لرزه‌خیزی قابل توجهی ندارد اما زمین‌لرزه‌های بزرگی در دو سوی آن روی داده‌اند که از آن جمله می‌توان به زمین‌لرزه‌های سال ۱۳۵۷ طیس با بزرگی ۷/۳ که از نوع گسله‌های پنهان با رخمون سطحی چین‌خوردگی و بالاآمدگی سطح زمین بود، زمین‌لرزه سال ۱۳۴۷ دشت بیاض با بزرگی ۷/۴، زمین‌لرزه سال ۱۳۷۶ زیرکوه قاین با بزرگی ۷/۲، و زمین‌لرزه سال ۱۳۸۲ بم با بزرگی ۶/۶ اشاره نمود. بر روی سامانه راست‌الغز باختر لوت حدود ۱۰ زمین‌لرزه با بزرگی بیش از ۶ طی صد سال اخیر ثبت شده است (شکل ۱).

گسل نایبند روانه‌های آتشفشانی جوان در شمال گندم بریان با سن تقریبی ۲/۲۵ میلیون سال را به صورت راست‌گرد جابه‌جا نموده است. بر این اساس، نرخ لغزش این گسله حدود ۱/۴ میلی‌متر بر سال محاسبه شده است (Walker et al., 2009). نرخ حرکت گسل‌های لکرکوه و کوهبنان به‌طور مستقیم تعیین نشده است اما با فرض اینکه مجموعه این گسل‌ها و همچنین خرد گسله‌های موجود در این زون دگرشکلی در مجموع نرخی برابر با گسل گوک داشته باشند می‌توان نرخ لغزش حدود ۵ میلی‌متر در سال را برای مجموعه این گسل‌ها در نظر گرفت. گسل‌های امتدادلغز خاور ایران اغلب به وسیله انشعابات چندگانه راندگی درپایانه خود خاتمه می‌یابند. این انشعابات گاه به جنبش درمی‌آیند و زمین‌لرزه‌هایی با سازوکار راندگی را ایجاد می‌نمایند. از جمله این زمین‌لرزه‌ها می‌توان به زمین‌لرزه ۴ اسفند ۱۳۸۳ داهوتیه زرنند با بزرگی ۶/۴ و زمین‌لرزه‌های اخیر منطقه هجدک کرمان اشاره نمود.



شکل ۱- گسل‌های اصلی و لرزه‌خیزی زون لرزه‌زای باختر لوت. نقاط زرد رنگ رومرکز زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ و نقاط نارنجی زمین‌لرزه‌های دوره شش ماه پس از رویداد زمین‌لرزه اند. ساز و کار زمین‌لرزه‌ها از کاتالوگ دانشگاه هاروارد برگرفته شده است.

آنها دیده می‌شود. زمین‌لرزه اخیر هجدک نیز از نوع دسته‌ای به شمار می‌آیند که ۳ زمین‌لرزه اصلی با بزرگی حدود ۶ در بازه زمانی ۱۱ روز روی داده است. مشابه این زمین‌لرزه در سال ۱۳۷۲ در منطقه سفیدابه در خاور لوت دیده شده است که ۴ زمین‌لرزه با بزرگی ۵/۵ تا ۶/۲ طی ۵ روز روی داد (جدول ۱).

۴- سنجش از دور

داده‌های ماهواره Sentinel نخستین تصاویر ماهواره‌ای بودند که در روزهای پس از زمین‌لرزه هجدک در اختیار پژوهشگران قرار گرفت. گسیختگی سطحی به‌خوبی در تصاویر Sentinel-2 دیده می‌شد و راهنمای برداشت‌های صحرائی گردید (شکل ۲-b).

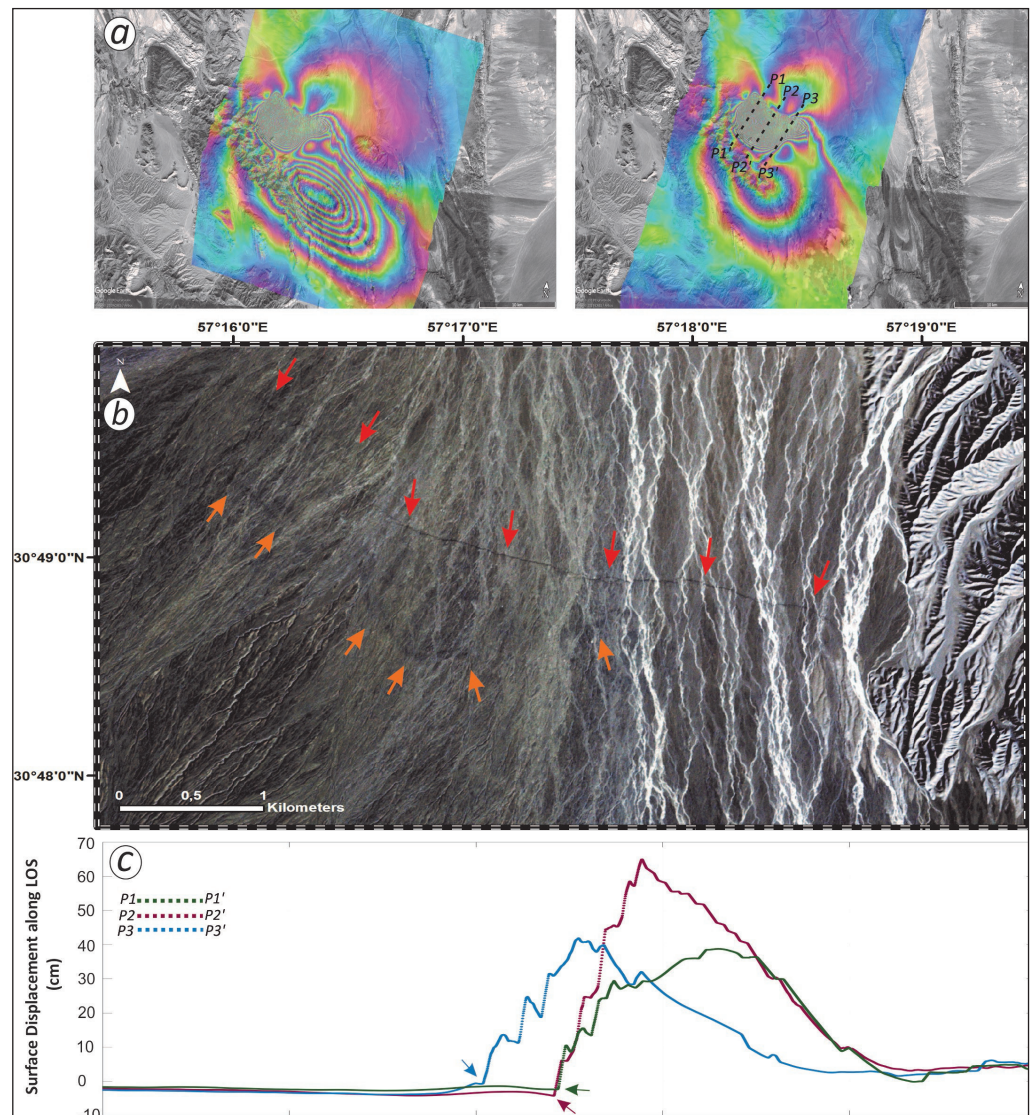
این زمین‌لرزه‌ها در راستای گسله‌های راست‌گرد گلباف، کوهبنان و بم روی داده‌اند. سازوکار زمین‌لرزه‌های گلباف و بم کم و بیش به‌طور کامل راست‌الغز است. گسل‌های کوهبنان و لکرکوه با توجه به راستای شمال باختری - جنوب خاوری و زاویه‌ای که با راستای شمالی جنوبی ایران مرکزی می‌سازد، و همچنین شواهد توپوگرافی بالا آمدگی نسبی بلوک خاوری، به نظر می‌رسد به‌طور کامل راست‌الغز نباشد. از هر دو گسله کوهبنان و لکرکوه در انتهای جنوبی انشعابات متعدد راندگی خارج می‌شوند که زمین‌لرزه‌های با سازوکار راندگی همچون زمین‌لرزه سال ۱۳۸۴ داهوتیه زرنند و زمین‌لرزه اخیر هجدک را موجب شده‌اند. زمین‌لرزه‌های خاور ایران اغلب به صورت منفرد همراه با پس‌لرزه‌ها روی می‌دهند اما گاه رفتار دسته‌ای نیز از

جدول ۱- مشخصات سه زمین لرزه منطقه هجدک (برگرفته از USGS)

No.	Date	Time (UTC)	Lat	Lon	Mag (Mw)
1	12/1/2017	2:32:46	30.743	57.314	6.1
2	12/12/2017	8:43:17	30.72	57.271	5.9
3	12/12/2017	21:41:31	30.823	57.286	6.0

وجود گسیختگی سطحی قابل توجه مربوط به زمین لرزه اول دیده نشد ولی همانطور که در شکل a- ۲ نشان داده شده است، تداخل سنجی رادار زمین لرزه دوم و سوم گسیختگی سطحی به طول ۵ تا ۶ کیلومتر در مرز بالایی ناهنجاری و ژرفای کم صفحه گسلی را پیشنهاد می‌دهد. اندازه‌گیری انجام شده حدود ۲۵-۲۰ سانتی‌متر بالا آمدگی سطح زمین در راستای دید ماهواره برای زمین لرزه اول پیشنهاد می‌دهد در حالی که شواهدی بر وجود گسیختگی سطحی در آن دیده نمی‌شود. برای زمین لرزه آخر این جابه‌جایی به حدود ۷۰ سانتی‌متر می‌رسد که همانگونه که در پروفیل‌های عمود بر گسیختگی نشان داده شده است بیشترین جابه‌جایی مربوط به بخش میانی گسیختگی است که به تدریج به سمت پایانه‌های گسیختگی این جابه‌جایی‌ها کاهش یافته است و به حدود ۴۰ سانتی‌متر و کمتر رسیده است (شکل c- ۲).

به‌طور همزمان به کمک تکنیک تداخل سنجی رادار و بر اساس داده‌های ماهواره sentinel-1 جابه‌جایی سطحی همراه با زمین لرزه‌های هجدک در راستای دید ماهواره به فاصله چند روز از زمین لرزه‌ها مورد پردازش و اندازه‌گیری قرار گرفت. در این پژوهش چهار داده ماهواره‌ای شامل دو داده ماهواره بالارونده (ascending interferogram) و دو داده ماهواره پایین‌رونده (descending interferogram) پردازش گردید که در اینجا داده‌های ماهواره پایین‌رونده در بازه‌های زمانی ۱۲ و ۱۶ دسامبر (۲۱ تا ۲۵ آذر) برای پوشش دو زمین لرزه آخر که به فاصله زمانی چند ساعت از هم به‌وقوع پیوسته بود و داده ۳۰ نوامبر (۹ آذر) و ۲۴ دسامبر (۳ دی ماه) برای پوشش هر سه زمین لرزه با بزرگای ۶ و بزرگ‌تر از ۶ به نمایش درآمده است (شکل a- ۲). بر این اساس شواهدی مبنی بر



شکل ۲- a) سمت چپ: تداخل سنج پردازش شده از داده ۳۰ نوامبر و ۲۴ دسامبر برای نمایش دگر بختی سطحی همراه با زمین لرزه هر سه زمین لرزه هجدک. سمت راست: تداخل سنج پردازش شده از داده ۱۲ و ۱۶ دسامبر برای پوشش دو زمین لرزه آخر که به فاصله زمانی چند ساعت از هم به‌وقوع پیوسته‌اند. b) تصویر ماهواره‌ای از گسیختگی سطحی (پیکان‌های قرمز) و انتشار دگر بختی دو فرادواره گسل ناشی از زمین لرزه آخر (پیکان‌های نارنجی)؛ c) پروفیل‌های میزان جابه‌جایی در راستای دید ماهواره در محل‌های نمایش داده شده در شکل a. بیشترین جابه‌جایی در بخش میانی گسیختگی دیده می‌شود. پیکان‌ها محل گسیختگی را نشان می‌دهند.

نقشه‌های زمین‌شناسی آورده شده بود اما شواهدی بر جنبایی آن وجود نداشت، گسله همراه با زمین‌لرزه سال ۲۰۰۵ داهوییه است. دشت هموار منطقه کلان‌لرزه‌ای زمین‌لرزه هجدهک به وسیله ارتفاعات میان کوه در جنوب محدود می‌شود. این ارتفاعات روندی شمال باختری - جنوب خاوری دارد و به نظر می‌رسد که به وسیله گسل‌های راندگی در دو سوی آن کنترل می‌شود. مرز باختری این دشت را گسل راست‌الغز راست‌گرد لکر کوه تشکیل می‌دهد که مؤلفه شاقولی آن موجب بالا آمدن بلوک باختری گردیده است. گسله لکر کوه در انتهای جنوبی خود به وسیله گسله راندگی با روند شمال باختر خاتمه می‌یابد (شکل ۳). این گسله آبرفت‌های جوان کواترن را جابه‌جا نموده است و بلوک جنوبی نسبت به بلوک شمال بالا آمدگی دارد. بر این اساس به نظر می‌رسد که شیب راندگی انتهایی گسله لکر کوه به سوی جنوب باختر باشد. آبراهه‌های جوان در دو سوی راندگی لکر کوه ادامه دارند و جابه‌جایی راست‌الغز مشخصی در راستای آن دیده نمی‌شود بنابراین، به نظر می‌رسد که سازوکار گسله در این بخش به‌طور کامل راندگی باشد. این موضوع با سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های هجدهک نیز همخوانی دارد. گسلش زمین‌لرزه‌ای اخیر در ادامه خاوری این راندگی قرار می‌گیرد اما هیچگونه آثاری از آن در عکس‌هایی هوایی پیش از زمین‌لرزه دیده نمی‌شود.

نکته قابل توجه وجود زون دگرریختی در فرادیواره گسله زمین‌لرزه سوم است که آثار آن در تصویر ماهواره‌ای دیده می‌شود. بیشینه پهنای زون دگرریختی حدود ۸۰۰ تا ۹۰۰ متر است و ممکن است با خمش و گسیختگی‌های پراکنده همراه باشد. در بازدید میدانی برخی از این گسیختگی‌ها به صورت درزه‌های کششی در فرادیواره گسل زمین‌لرزه‌ای دیده شده است.

۵- زمین‌ریخت‌شناسی و گسلش سطحی

ارتفاعات میان کوه در خاور هجدهک عارضه شاخص توپوگرافی در محل تلاقی گسل‌های نابیند، لکر کوه، کوه بنان و گوک است. این ارتفاعات از سازندهای با سن پرکامبرین تا پالئوسن که به شدت چین‌خورده و راستاهای مختلف دگرشکلی در آن دیده می‌شود تشکیل شده است. روند ساختاری کلی منطقه شمال باختری - جنوب خاوری است که به وسیله گسل‌های امتدادلغز محدود می‌شود. در بخش جنوبی منطقه انشعابات متعدد راندگی از گسل‌های امتداد لغز جدا می‌شوند که با توجه به میان کوهستانی بودن آنها و نبود رسوبات جوان، عوارض زمین‌ریخت‌شناختی قابل توجهی از آنها در سطح زمین دیده نمی‌شود. یک نمونه بارز این نوع گسل‌های جنب‌ها که در



شکل ۳- تصویر ماهواره Copernicus (Google earth)؛ (a) گسلش سطحی همراه با زمین‌لرزه در راستای انشعابات پایانی گسله لکر کوه قرار می‌گیرد. دایره سیاه رنگ محل‌های بازدید میدانی را نشان می‌دهد؛ (b) نمای نزدیک‌تر از راندگی پایانه گسل لکر کوه. فلش‌های سفید رنگ محل گسلش سطحی احتمالی پیش از رویداد زمین‌لرزه اخیر را نشان می‌دهد؛ (c) بریدگی آبرفت‌های کواترن به وسیله راندگی پایانه گسل لکر کوه. برخاستگی بلوک جنوب باختری با شیب به سوی جنوب باختر راندگی همخوانی دارد.

به‌خوبی دیده می‌شد که همراه با خمیدگی در بخش میانی است و حداقل از دو قطعه تشکیل شده است: قطعه باختری و خاوری که به ترتیب حدود ۲ و ۴ کیلومتر درازا دارند. بازدید صحرایی در سوم دی ماه ۱۳۹۶ وجود این گسیختگی را تأیید نمود اما به دلیل دشواری‌های دسترسی به منطقه تنها قطعه باختری و بخشی از قطعه خاوری مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). بازدید میدانی بالا آمدگی حداقل یک متری بلوک جنوبی نسبت به بلوک شمالی در بخش میانی گسل را تأیید می‌نماید. گسیختگی قطعه باختری شامل حداقل سه شاخه موازی با هم است و در مجموع زون گسیختگی با پهنای حدود ۵۰ متر را تشکیل می‌دهند (شکل ۴). این ویژگی موجب شده است که این قطعه در تصاویر ماهواره‌ای نمود مبهم‌تری داشته باشد. در مقابل، قطعه خاوری به‌صورت یک خط پیوسته و مشخص در تصاویر دیده می‌شود (شکل ۴). در بازدید میدانی این بخش، افزاز گسله با جابه‌جایی حداقل یک متر دیده شد (شکل ۴).

از دیگر عوارض زمین‌ریخت‌شناختی قابل توجه، خطواره‌ای با راستای کم و بیش موازی با گسله لکرکوه در فاصله ۷۰۰ تا ۹۰۰ متری خاور آن در داخل رسوبات جوان دشت آبرفتی است. این خطواره در تصاویر با دقت بالای گوگل (ماهواره کوپرنیکوس) به‌خوبی دیده می‌شود و به‌نظر می‌رسد که بلوک باختری آن اندکی نسبت به بلوک خاوری بالا آمدگی دارد. در گذر از این خطواره نیز آبراهه‌های جوان پیوسته‌اند و جابه‌جایی قابل اندازه‌گیری در راستای گسل نشان نمی‌دهند. متأسفانه با توجه به دشواری‌های دسترسی به منطقه، امکان بازدید صحرایی این خطواره تاکنون میسر نشده است اما در صورت تأیید آن در بازدیدهای میدانی، می‌تواند مربوط به آخرین زمین‌لرزه پیش از رویدادهای اخیر باشند که جوان‌ترین رسوبات دشت را بریده است (شکل ۳-ب).

زمین‌لرزه ۲۱ آذرماه هجده ۶ کیلومتر گسیختگی سطحی ایجاد نمود. در نخستین روزهای پس از زمین‌لرزه، این گسیختگی در تصاویر ماهواره Sentinel



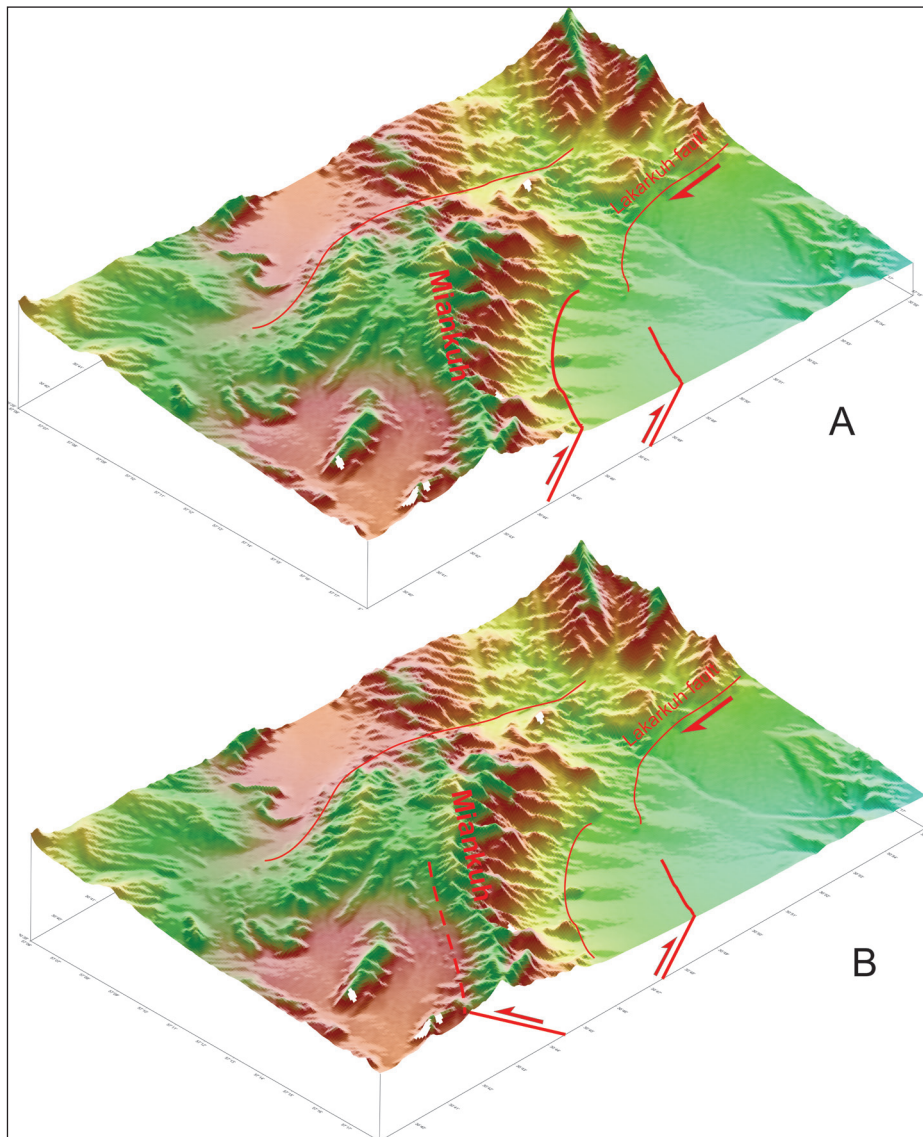
شکل ۴- گسیختگی سطحی همراه با زمین‌لرزه هجده ۶. (a) بیش از یک متر جابه‌جایی شاقولی در موقعیت ۵۷/۲۶۹ طول و ۳۰/۸۲۸ عرض جغرافیایی؛ (b) بالا آمدگی بلوک جنوبی در موقعیت ۵۷/۲۶۹ طول و ۳۰/۸۲۷ عرض جغرافیایی؛ (c) دگر ریختی در فرادیواره راندگی که به‌صورت درزه‌های کششی دیده می‌شود در موقعیت ۵۹/۲۶۹ طول و ۳۰/۸۲۷ عرض جغرافیایی؛ (d) جابه‌جایی حدود نیم متر در موقعیت ۵۷/۲۷۶ طول و ۳۰/۸۲۰ عرض جغرافیایی؛ (e) و (f) در موقعیت ۵۷/۲۷۷ طول و ۳۰/۸۲۰ عرض جغرافیایی گسیختگی حداقل از سه شاخه تشکیل شده است که زون گسیختگی با حداقل پهنای ۵۰ متر را تشکیل می‌دهند.

است. در داده‌های تداخل‌سنجی رادار نیز ناپیوستگی دیده نمی‌شود و رسیدن گسلش به سطح زمین را پیشنهاد نمی‌نماید. از سوی دیگر این داده‌ها اگرچه اندکی با شیب به سوی شمال‌خاوری گسله همخوانی بیشتری دارند، اما امکان وجود گسیختگی با شیب به سوی جنوب‌باختری را نیز رد نمی‌نمایند. بنابراین، دو سناریوی احتمالی برای گسله‌های مسبب دو رویداد نخست وجود دارد (شکل ۵). بر اساس سناریوی نخست، بلندی‌های میان کوه از دشت هموار شمال آن به وسیله گسله جنبایی جدا می‌شود که جنبش آن رویداد اول و دوم زمین لرزه هجدک را آفریده است. این سناریو با شواهد زمین‌ریخت‌شناسی منطقه که وجود گسله‌ای در مرز کوه و دشت در شمال میان کوه را پیشنهاد می‌نماید (Walker et al., 2010) همخوانی بهتری دارد. با این وجود امکان وجود گسله‌ای با شیب به سوی شمال و در دامنه جنوبی میان کوه نیز وجود دارد. با توجه به اینکه رسوبات آبرفتی جوان چندانی در مکان احتمالی برونزد گسله در جنوب میان کوه وجود ندارند، بنابراین، رد و یا قبول سناریوی دوم به آسانی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

دو قطعه به وسیله یک زون گسیختگی عریض شامل هر دو نوع گسل‌های امتدادلغز چپ‌بر و راست‌بر به یکدیگر متصل می‌شوند. اما در مجموع گسیختگی‌های با سازوکار راست‌گرد و راستای شمالی- جنوبی فراوانی بیشتری دارند. به نظر می‌رسد که دو قطعه گسله به وسیله زون گسیختگی با سازوکار چپ‌بر راست‌گرد به یکدیگر متصل می‌شوند. در بخش‌های میانی هر دو قطعه گسله هیچگونه جابه‌جایی راستالغزی دیده نمی‌شود و گسل به‌طور کامل جابه‌جایی راندگی را نشان می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

زمین‌لرزه هجدک مجموعه‌ای از سه رویداد بزرگ بود که در فاصله ۱۱ روز (۱۰ تا ۲۱ آذرماه ۱۳۹۶) منطقه هجدک کرمان را لرزاند. رو مرکز دو رویداد نخست با بزرگی ۶/۱ و ۵/۹ (۱۰ و ۲۱ آذرماه) در مرز منطقه میان کوه و دشت شمالی آن قرار می‌گیرد. همراه با این دو رویداد هیچگونه گسیختگی سطحی در منطقه مشاهده نشده



شکل ۵- دو سناریوی محتمل برای گسلش همراه با زمین‌لرزه هجدک: در سناریوی نخست هر دو گسله به سوی جنوب‌باختری شیب دارند. در سناریوی دوم شیب دو گسله خلاف جهت یکدیگرند.

زمین‌لرزه‌های طبس (۱۳۵۷)، بم (۱۳۸۲)، و سرپل ذهاب (۱۳۹۶) اشاره نمود. این گسله‌ها گاه با عوارض سطحی قابل بررسی همچون چین‌خوردگی‌های جوان و پویا همراهند و بدین ترتیب پیش از رویداد زمین‌لرزه قابل شناسایی‌اند (به‌عنوان مثال گسله پردیسان در تهران؛ Talebian et al., 2016؛ Talebian et al., 2004; Fielding et al., 2005). گسله زمین‌لرزه‌های جنوب بم (Funning et al., 2006; Jackson et al. 2006) نیاز به کاوش دقیق‌تر دارد. نکته قابل توجه در مورد گسل‌های جوان با سازوکار رانندگی این است که آنها اغلب انشعاباتی از گسل‌های قدیمی‌ترند که از لبه کوهستان به سمت دشت جوان‌تر می‌شوند و به‌آسانی به‌وسیله گسترش شهرها پوشیده شده‌اند. مطالعه این گونه گسل‌ها در مناطق غیرمسکونی می‌تواند راهنمای مناسبی برای شناخت آنها در مناطق شهری مشابه باشد.

سپاسگزاری

از مدیریت محترم اداره کل زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی مرکز کرمان، آقای مهندس علی رشیدی و همراهی آقای دکتر احمد رشیدی در برداشت‌های میدانی صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایم.

رومرکز رویداد سوم در دشت هموار شمال کوه قرار می‌گیرد. مدل‌سازی امواج درونی این زمین‌لرزه ژرفای ۰ تا ۳ کیلومتر برای گسیختگی آن پیشنهاد می‌نماید (Savidge et al., In preparation)، و بر این اساس، در رده کم‌ژرفاترین زمین‌لرزه‌های فلات ایران قرار می‌گیرد. در بازدید صحرایی جابه‌جایی شاقولی بیش از ۱ متر در بخش میانی گسیختگی اندازه‌گیری شد که با توجه به درازای حدود ۶ کیلومتری گسله، جابه‌جایی قابل توجهی است (Wells and Coppersmith, 1994). تصاویر هوایی منطقه هیچگونه عارضه زمین‌ریخت‌شناسی را در محل گسیختگی پیش از رویداد زمین‌لرزه نشان نمی‌دهد و از این رو به نظر می‌رسد که نرخ فزایش این گسله از نرخ فرسایش منطقه کمتر است و از این رو سیلاب‌های فصلی جاری از کوهستان میان کوه قادرند که آثار گسلش سطحی را محو نمایند. با این وجود در راستای گسله به سوی باخت فرافز آبرفت‌های کهن‌تر وجود این گسله را پیش از رویداد زمین‌لرزه تأیید می‌نمایند (شکل ۳). بر این اساس، گسله زمین‌لرزه سوم هجدک را می‌توان در رده گسل‌های پنهان به شمار آورد که شناخت و تعیین مشخصات آنها در برآورد خطر زمین‌لرزه اهمیت قابل توجهی دارد. جنبش گسله‌های پنهان در دهه‌های اخیر رویدادهای زمین‌لرزه‌های بزرگی را موجب شده‌اند که از آن جمله می‌توان به

کتابنگاری

طالبیان م.، هاشمی طباطبایی ه.، فتاحی م.، قرشی م.، بیت الهی ع.، قلندر زاده ع. و ریاحی م.، ۱۳۸۸- برآورد نرخ لغزش گسل‌های پیرامون بم و کاربرد آن در ارزیابی خطر زمین‌لرزه، فصلنامه علمی پژوهشی علوم زمین، شماره ۷۴، ص ۱۴۹-۱۵۶.

References

- Berberian, M., Jackson, J.A., Fielding, E., Parsons, B.E., Priestley, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, R., Wright, T.J. and Baker, C., 2001- The 1998 March 14 Fandoqa earthquake (Mw 6.6) in Kerman province, southeast Iran: re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts and the active tectonics of the Gowk fault zone. *Geophysical Journal International*, 146(2), pp.371-398.
- Fielding, E.J., Talebian, M., Rosen, P.A., Nazari, H., Jackson, J.A., Ghorashi, M. & Walker, R., 2005- Surface ruptures and building damage of the 2003 Bam, Iran earthquake mapped by satellite synthetic aperture radar, interferometric correlation, *J. geophys. Res.*, 110, B03302.
- Funning, G.J., Parsons, B.E., Wright, T.J., Jackson, J.A. & Fielding, E.J., 2006- Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery, *J. geophys. Res.*, Vol. 110, B09406.
- Jackson, J., Bouchon, M., Fielding, E., Funning, G., Ghorashi, M., Hatzfeld, D., Nazari, H., Parsons, B., Priestley, K., Talebian, M. and Tatar, M., 2006- Seismotectonic, rupture process, and earthquake-hazard aspects of the 2003 December 26 Bam, Iran, earthquake. *Geophysical Journal International*, 166(3), pp.1270-1292.
- Savidge, E., Nissen, E., Nemat, M., Karasözen, E., Hollingsworth, J., Talebian, M., Bergman, E., Ghods, A., Ghorashi, M., Kosari, E. and Rashidi, A., 2019- The December 2017 Hojedk (Iran) earthquake triplet—sequential rupture of shallow reverse faults in a strike-slip restraining bend. *Geophysical Journal International* (in preparation).
- Talebian, M., Fielding, E. J., Funning, G. J., Ghorashi, M., Jackson, J., Nazari, H., Parsons, B., Priestley, K., Rosen, P. A., Walker, R. and Wright, T.J., 2004- The 2003 Bam (Iran) earthquake: Rupture of a blind strike-slip fault. *Geophysical Research Letters*, 31(11).
- Talebian, M., Biggs, J., Bolourchi, M., Copley, A., Ghassemi, A., Ghorashi, M., Hollingsworth, J., Jackson, J., Nissen, E., Oveisi, B. and Parsons, B., 2006- The Dahuyeh (Zarand) earthquake of 2005 February 22 in central Iran: reactivation of an intramountain reverse fault. *Geophysical Journal International*, 164(1), pp.137-148.
- 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 Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 207(3), pp.1688-1699.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R. and Tavakoli, F., 2004- Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International*, 157(1), pp.381-398.

- Walker, R. and Jackson, J., 2002- Offset and evolution of the Gowk fault, SE Iran: a major intra-continental strike-slip system. *Journal of structural Geology*, 24(11), pp.1677-1698.
- Walker, R.T., Gans, P., Allen, M.B., Jackson, J., Khatib, M., Marsh, N. and Zarrinkoub, M., 2009- Late Cenozoic volcanism and rates of active faulting in eastern Iran. *Geophysical Journal International*, 177(2), pp.783-805.
- Walker, R.T., Talebian, M., Saiffori, S., Sloan, R.A., Rasheedi, A., MacBean, N. and Ghassemi, A., 2010- Active faulting, earthquakes, and restraining bend development near Kerman city in southeastern Iran. *Journal of Structural Geology*, 32(8), pp.1046-1060.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. T., 1994- New empirical relation among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), pp. 974-1002.

Geomorphology and faulting mechanism of 1-12 December 2017, Hojedk earthquakes

M. Talebian ^{1*}, M. Ghorashi ¹ and E. Kosari²

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

²Ph. D. Student, Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

Received: 2018 January 22

Accepted: 2018 March 14

Abstract

On 1-12 December 2017 three earthquakes (Mw 5.9 -6.1) shake Hojedk region in Kerman province. We used satellite images, radar interferometry and field investigation to examine the source processes of these earthquakes in south-central Iran. The epicenter of first two events located near northern boundary of the Miankuh, a major topographic feature of the region. No surface rupture has been seen with these events and InSAR results show semi symmetric uplift of the region. Therefore, two scenarios of faulting with dip to the SW or NE are possible. Epicenter of the third event located further north within the alluvial plane. Evidence for coseismic surface rupture associated with this event was first observed on Sentinel satellite image and InSAR analysis. It was then confirmed by field investigation. The event produced a coseismic scarps with more than 1 m vertical displacement over a total distance of ~6 km, along a fault with reverse mechanism and dip to the SW. Any signs of earlier coseismic ruptures along this fault had been obliterated by the time of the 2017 earthquake, probably by occasional flash floods, so that the fault could not be identified beforehand. However, there is evidence of young alluvial offsets further to the NW along strike of the fault, suggesting existence of active structures in the region. Reactivation of blind faults have caused other major earthquakes such as 1978 Mw 7.4 Tabas, 2003 Mw 6.6 Bam, and 2017 Mw 7.3 Sarpol Zahab earthquakes in the past. The Hojedk earthquakes remind us about importance of recognizing and studying blind faults, especially if they are close to population centers.

Key words: Hojedk earthquake, Surface faulting, Blind fault, Morphotectonic, InSAR

For Persian Version see pages 247 to 254

*Corresponding author: M. Talebian; E-mail: talebian@ries.ac.ir