دایرکتیویتی گسیختگی زمین‌لرزه‌های اخیر ایران

نسا کوثری [۱] و عبدالرضا قدس [۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، nesakosari@iasbs.ac.ir

[۲] استاد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، aghods@iasbs.ac.ir

چکیده

دایرکتیویتی، اثر جهت گسیختگی گسل است که در آن پراکندگی زمین‌لرزه‌ها و شتاب افقی در جهت انتشار گسیختگی بیشتر از جهات دیگر است. میزان تخریب یک زمین‌لرزه در طول گسل بستگی شدید به دایرکتیویتی گسیختگی دارد. در این مطالعه ما با استفاده از مکان‌یابی دقیق زمین‌لرزه‌های بزرگ و پس‌لرزه‌های آن، اثر گسیختگی سطحی مشاهده شده برای این زمین‌لرزه‌ها، مدل‌های گسیختگی محاسبه شده توسط داده‌های اینسار، تغییرات شتاب بیشینه در منطقه اطراف گسل مسبب، دایرکتیویتی را برای زمین‌لرزه‌های بزرگ ایران بررسی می‌کنیم. نتایج این مطالعه برای اکثر بیست زمین‌لرزه بزرگ اخیر ایران نشان‌دهنده دایرکتیویتی غالب یک‌طرفه است. این یافته در نظر گرفتن اثر دایرکتیویتی در محاسبات خطر زمین‌لرزه را ضروری می‌داند.

واژه‌های کلیدی: دایرکتیویتی، گسیختگی، شتاب، مکان‌یابی، داده‌های اینسار، زمین‌لرزه‌های بزرگ

the Recent Major Earthquakes in Iran Rupture Directivity of

N. Kosari [1] & A. R. Ghods [2]

[1] *Master Student of Geophysics, Institute for Advanced Studies in Basic Science, Zanjan, Iran*

[2] *Associate Professor, Institute for Advanced Studies in Basic Science, Zanjan, Iran*

Abstract

Directivity is the effect of the direction of fault rupture in which the distribution of earthquakes and horizontal acceleration in the direction of propagation of the rupture is larger than in other directions. The destruction rate of an earthquake along a fault strongly depends on the directivity of the rupture. Here, we study the directivity of recent large earthquakes in the Iranian plateau by employing the available data, including relocated earthquakes and their aftershocks, the surface ruptures, the fault models estimated by InSAR data, and the maximum recorded PGAs. Our results for the 20 recent large earthquakes in Iran suggest a dominant directivity for most of the events. This finding highlights the importance of considering the directivity effect in earthquake hazard estimation.

Keywords: Directivity, rupture, acceleration, relocation, InSAR data, large earthquakes

۱ مقدمه

ایران کشوری زلزله‌خیزی است و سالانه زمین‌لرزه‌های خرد و متوسط زیادی فلات ایران را می‌لرزاند. اکثر زمین‌لرزه‌های ایران کم‌عمق بوده و زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده همه دارای بزرگی کمتر از ۸ هستند. گسیختگی سطحی زمانی رخ می‌دهد که گسیختگی گسل به سطح زمین برسد. زمین‌لرزه‌ها می‌توانند گسیختگی‌های یک طرفه یا دو طرفه متقارن و نامتقارن داشته باشند (لوپز-کامینو و همکاران، ۲۰۲۱). گسیختگی‌های یک طرفه در اکثر زمین‌لرزه‌های بزرگ مشاهده می‌شود (مک‌گوایر و همکاران، ۲۰۰۲). وقتی گسیختگی یک گسل بیشتر در جهت خاصی باشد می‌گوئیم گسیختگی دارای دایرکتیویتی است. میزان تخریب یک زمین‌لرزه در راستای حرکت گسیختگی گسل بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است.

درک الگوی زمین‌لرزه‌ها و گسل‌ها در کشورهای زلزله‌خیز از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه ما سعی داریم که، با استفاده از داده‌های دوباره مکان‌یابی شده دقیق زمین‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های آن، اثر گسیختگی برای زمین‌لرزه‌های دارای گسیختگی سطحی، سازوکارهای زمین‌لرزه‌ها، تغییرات دامنه-شتاب در اطراف گسل‌ها با استفاده از شتاب نگاشت‌ها و همچنین تصاویر تداخل‌سنجی رادار (اینسار) دایرکتیویتی را برای زمین‌لرزه‌های بزرگ ایران بررسی کنیم و برآورد کنیم که چند درصد از زمین‌لرزه‌های بزرگ ایران دارای دایرکتیویتی غالب هستند. از آنجائی که رفتار گسل‌ها ازجمله رفتار دایرکتیویتی آن‌ها بازمان تغییر فراوانی ندارد، بنابراین بررسی دایرکتیویتی زمین‌لرزه‌ها می‌تواند در تهیه نقشه‌های خطر زمین‌لرزه بکار برد و آن‌ها را بهبود داد.

۲ داده‌ها و روش کار

تعیین میزان دایرکتیویتی گسیختگی در زمین‌لرزه‌ها نیاز به مکان‌یابی دقیق زمین‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های آن‌ها و استفاده از رسم تغییرات دامنه-شتاب در اطراف گسل‌ها با استفاده از شتاب نگاشت‌ها دارد. در این مطالعه، با بهره برداری از داده‌های دوباره مکان‌یابی شده زمین‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها که از روش HDC جوردن و سورلپ (۱۹۸۱) به‌دست‌آمده (برگرفته از GSS)، گسیختگی‌های سطحی، داده‌های اینسار و سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها (برگفته شده Global CMT) ، دایرکتیویتی زمین‌لرزه‌ها را بررسی کنیم. با در نظر گرفتن ابر پس‌لرزه‌ها نسبت به زمین‌لرزه اصلی و امتدادگسل می‌توان دایرکتیویتی زمین‌لرزه را تا حدودی پیش بینی کرد. اگر زمین‌لرزه اصلی در منتهی‌الیه یک ابر پس‌لرزه‌ها قرار بگیرد دارای اثر دایرکتیویتی یک طرفه کامل هستیم.

اینسار یک روش شناخته شده برای اندازه‌گیری جابجایی سطح زمین بین دو دوره زمانی است. در تصاویر تداخل نگاری اینسار، جا به‌جایی سطح زمین به صورت یک یا چند چرخه رنگ نشان داده می‌شود. در این مطالعه با استفاده از تصاویر تداخل‌نگاری اینسار برای زمین‌لرزه‌هایی که بدون گسیختگی سطحی هستند، راستا صفحه گسل مسبب را که مرتبط با سازوکار گسل است و همچنین فرادیواره و فرودیواره گسل مسبب را شناسایی کرده تا با استفاده از داده‌های دیگر دایرکتیویتی را بررسی کنیم.

علاوه بر داده‌های رومرکز زمین‌لرزه‌ها و داده‌های اینسار، رسم تغییرات دامنه-شتاب در اطراف گسل‌ها که با استفاده از شتاب نگاشت‌ها به دست آمده می‌تواند به ما در بررسی دایرکتیویتی گسیختگی‌ها کمک کند، به طوریکه در فاصله‌ای یکسان از زمین‌لرزه اصلی تا شتاب‌نگارها، مقدار شتاب در راستای دایرکتیویتی بیشتر از راستاهای دیگر است. البته توجه به این نکته ضروری است که، تقریباً همه شتاب‌نگارها آستانه تریگرشدن یکسانی دارند. همچنین اینکه گستردگی شتاب‌نگارها در راستایی که دایرکتیویتی وجود دارد، بیشتر است.

۳ نتایج و بحث

در اینجا نتایج ما برای سه زمین‌لرزه ورزقان-اهر، رودبار و سفیدسنگ آورده شده است. زمین‌لرزه ورزقان-اهر با بزرگای گشتاوری Mw، ۶/۴ در تاریخ ۲۱ مرداد سال ۱۳۹۱ با سازوکار امتداد-لغز رخ داد. زمین‌لرزه دوم با بزرگای گشتاوری ۶/۲، ۱۱ دقیقه بعد با سازوکار مایل-لغز در آذربایجان شرقی اتفاق افتاد. با توجه به تغییرات دامنه-شتاب مطابق با شکل ۱a و ۱b بیشینه شتاب در اطراف نزدیک به زمین‌لرزه‌های اصلی مشاهده می‌شود. علاوه بر آن در فاصله ای یکسان از زمین‌لرزه اصلی تا شتاب‌نگارها، مقدار شتاب در راستا دایرکتیویتی که از شرق به غرب است، بیشتر از راستاهای دیگر

است. طبق شکل تداخل‌نگارهای اینسار زمین‌لرزه ورزقان-اهر و توزیع پس‌لرزه‌ها (شکل 1d)، حداکثر جابه‌جایی شرق-غرب، بر اساس توزیع پس‌لرزه‌ها نسبت به زمین‌لرزه اصلی با گرایش به غرب و افزایش اعماق کانونی آنها به سمت غرب نسبت به صفحه گسل شرقی-غربی که از طریق سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه اصلی به دست آمده، می‌توان دایرکتیویتی را از شرق به غرب برآورد کرد. در شکل 1e با توجه به نمایش لرزه‌خیزی پس‌لرزه‌ها، ابری به طول حدود ۲۵ کیلومتر در جهت شرقی-غربی با عرض حدود ۷ کیلومتر تشکیل می‌دهند که چندین کیلومتر به سمت شمال رد گسیختگی سطحی زمین‌لرزه اول گسترش دارد. بسیاری از پس‌لرزه‌ها در جهت غالب گسیختگی سطحی (شرق-غرب) نسبت به جهت مخالف رخ می‌دهند و همبستگی خوبی بین جهت گسیختگی و مکان‌های پس‌لرزه‌ها وجود دارد. این توزیع پس‌لرزه‌ها در امتداد گسیختگی سطحی می‌تواند نشان‌دهنده دایرکتیویتی یکطرفه از شرق به غرب در این رویداد باشد.

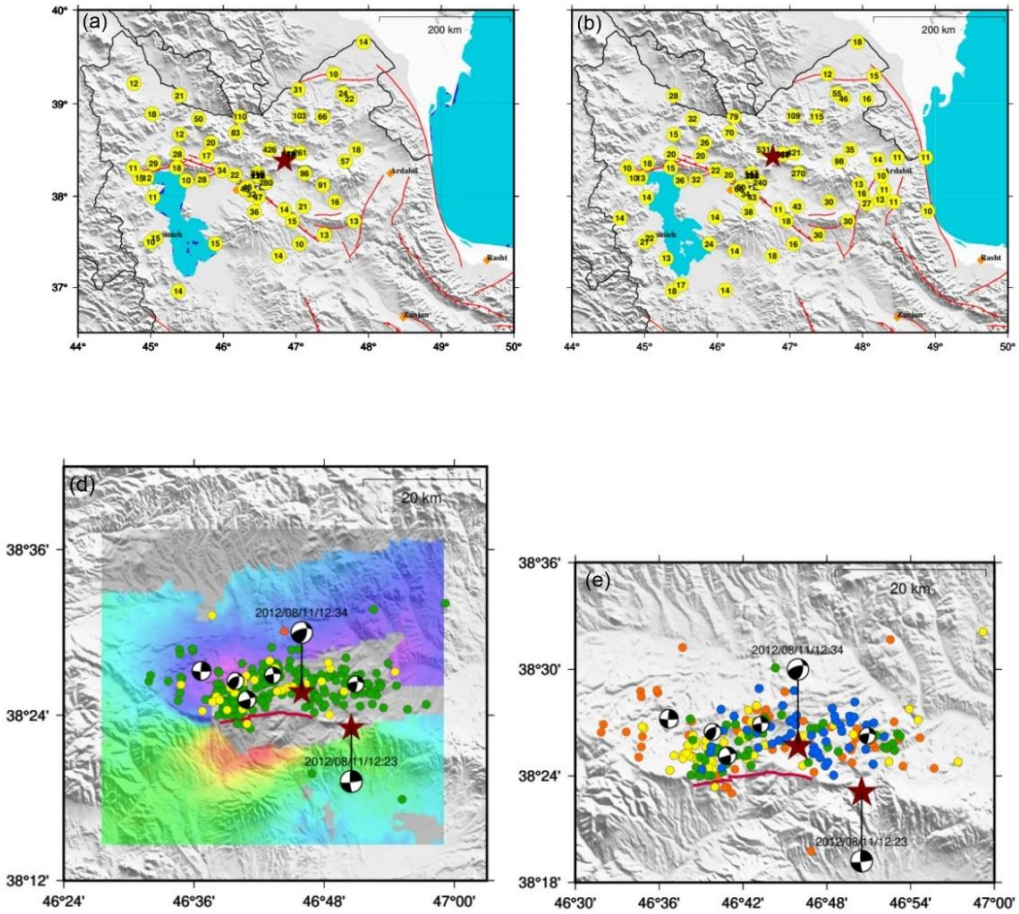
زمین‌لرزه رودبار-طارم در تاریخ ۳۰ خرداد سال ۱۳۶۹ در شمال غربی دریای خزر با بزرگای گشتاوری Mw، ۷/۳ رخ داد. تغییرات دامنه-شتاب زمین‌لرزه رودبار-طارم، بیشینه شتاب در اطراف نزدیک به زمین‌لرزه اصلی است. همچنین آنکه به طور واضح می‌توان روند شتاب‌نگارها را که اکثرا به سمت جنوب‌شرق هستند، مشاهده کرد. این روند می‌تواند نشان‌دهنده دایرکتیویتی به سمت جنوب‌شرق باشد. با توجه به نمایش لرزه‌خیزی پس‌لرزه‌ها، ابری به طول حدود ۱۰۰ کیلومتر در جهت شمال‌غرب-جنوب‌شرق با عرض حدود ۷۰ کیلومتر تشکیل می‌دهند. اکثر پس‌لرزه‌ها در جهت غالب گسیختگی سطحی نسبت به جهت مخالف رخ می‌دهند و همبستگی خوبی بین جهت گسیختگی سطحی و مکان‌های پس‌لرزه‌ها وجود دارد. این توزیع بیشتر پس‌لرزه‌ها در امتداد گسیختگی سطحی از شمال‌غرب به جنوب‌شرق می‌تواند نشان‌دهنده دایرکتیویتی دوطرفه به سمت شمال‌غرب و جنوب‌شرق در این رویداد باشد. در نتیجه آنکه، در زمین‌لرزه رودبار-طارم، دایرکتیویتی دوطرفه که حدود ۸۰ درصد آن به سمت جنوب شرق است را برآورد می‌کنیم. زمین‌لرزه رودبار-طارم و پراکندگی پس‌لرزه‌ها، حداکثر جابه‌جایی و روند توزیع پس‌لرزه‌ها در جهت غالب گسیختگی سطحی یعنی به سمت جنوب‌شرق را نشان می‌دهد. با این تفاسیر می‌توان دایرکتیویتی را به سمت جنوب‌شرق برآورد کنیم.

زمین‌لرزه سفیدسنگ در تاریخ ۱۶ فروردین سال ۱۳۹۶ با بزرگای گشتاوری ۶ در شهرستان فریمان استان خراسان رضوی رخ داد. پراکندگی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه سفیدسنگ به سمت جنوب‌شرق است. با توجه به توزیع پس‌لرزه می‌توان دایرکتیویتی آن را به سمت جنوب‌شرق تخمین زد. تداخل‌نگار اینسار به‌صورت بیضوی‌های رنگی پیوسته (گسیختگی به سطح نرسیده) زمین‌لرزه سفیدسنگ و پراکندگی پس‌لرزه‌ها، حداکثر جابه‌جایی و روند توزیع پس‌لرزه‌ها را در جهت جنوب‌شرق نشان می‌دهد. با این تفاسیر می‌توان برای زمین‌لرزه سفیدسنگ دایرکتیویتی را به سمت جنوب‌شرق برآورد کنیم. به دلیل کمبود شتاب ثبت شده توسط شتاب‌نگارها، نمی‌توان دایرکتیویتی را با استفاده از تغییرات دامنه-شتاب بررسی کرد.

۴ نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که در مورد زمین‌لرزه دوقلو ورزقان-اهر، دایرکتیویتی یکطرفه‌ای را از شرق به غرب شاهد هستیم. زمین‌لرزه رودبار-طارم دایرکتیویتی دوطرفه که حدود ۸۰ درصد آن به سمت جنوب‌شرق است را برآورد کردیم، و زمین‌لرزه سفیدسنگ دارای دایرکتیویتی یکطرفه به سمت جنوب‌شرق را نشان می‌دهد. ضمناً بررسی ۱۷ زمین‌لرزه اخیر دیگر (طبس-گلشن در سال ۱۳۵۷، گلباف ۱۳۶۰، سیرچ ۱۳۶۰، شیران ۱۳۷۵، زیرکوه ۱۳۷۶، آوج ۱۳۸۱، بم ۱۳۸۲،

بَلَده ۱۳۸۳، قشم ۱۳۸۴، سیلاخور ۱۳۸۵، ریگان ۱۳۸۹، خاش ۱۳۹۲، کاکی ۱۳۹۲، مورموری ۱۳۹۳، ازگله-سرپل ذهاب ۱۳۹۶، سه‌گانه هجدک ۱۳۹۶، قطور ۱۳۹۸) نشان‌دهنده دایرکتیویتی یک طرفه غالب در اکثر زمین‌لرزه‌ها است.



شکل ۱: ستاره‌های زرشکی محل زمین‌لرزه‌های اصلی دوقلو ورزقان-اهر با بزرگای گشتاوری به ترتیب ۶/۴ و ۶/۲ ، خطوط قرمز در شکل a و b گسل‌های فعال شناسایی شده برگرفته حسامی و همکاران (۲۰۰۳)، و در شکل‌های d و e خط قرمز گسیختگی سطحی این زمین‌لرزه (برگرفته از قدس و همکاران، ۲۰۱۵) هستند. دایره‌های سیاه و سفید سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های اصلی و پس‌لرزه‌ها را نشان می‌دهند. شکل a تغییرات دامنه-شتاب زمین‌لرزه اول ورزقان-اهر و شکل b تغییرات دامنه-شتاب زمین‌لرزه دوم. دایره‌های زردرنگ مقدار شتاب ناشی از زمین‌لرزهای اصلی ثبت شده توسط شتاب‌نگارها هستند. شکل d تغییر شکل سطح زمین به دست آمده از تصاویر تداخل نگار اینسار (برگرفته شده از علیپور، ۲۰۱۳) برای زمین‌لرزه ورزقان-اهر که روی یک توپوگرافی قرار گرفته است. حداکثر جابه‌جایی به رنگ قرمز ۱۵ سانتی‌متر و حداقل جابه‌جایی به رنگ آبی ۱۵- سانتی متر است. دایره‌های سبز رنگ پس‌لرزه‌هایی با بزرگای گشتاوری ۳<=Mw<۴، دایره‌های زرد رنگ پس‌لرزه‌هایی با بزرگای گشتاوری ۴<=Mw<۵ و دایره‌های نارنجی رنگ پس‌لرزه‌هایی با بزرگای ۵ به بالا هستند. شکل e توزیع پس‌لرزه‌ها در امتداد گسیختگی سطحی را نشان می‌دهد. سازوکارهای زمین‌لرزه اول از نوع امتداد-لغز و زمین‌لرزه دوم مایل-لغز است. دایره‌های آبی رنگ ۵۶ پس‌لرزه اول زمین‌لرزه، دایره‌های سبز رنگ ۱۱۲، زرد ۱۶۸ و نارنجی رنگ ۲۲۴ پس‌لرزه زمین‌لرزه دوقلو ورزقان-اهر هستند.

منابع

Ajorlou, Najmeh, et al. "Characterizing Near-Field Surface Deformation in the 1990 Rudbar Earthquake

(Iran) Using Optical Image Correlation." Geochemistry, Geophysics, Geosystems 22.6 (2021): e2021GC009704.

Alipour, S. (2013). Application of Differential and Polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry for Studying Natural Hazards.

Dziewonski, A. M., T.-A. Chou and J. H. Woodhouse, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, J. Geophys. Res., 86, 2825-2852, 1981. doi:10.1029/JB086iB04p02825.

Ekström, G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski, The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, Phys. Earth Planet. Inter., 200-201, 1-9, 2012. doi: 10.1016/j.pepi.2012.04.002.

Ghods, A., Shabanian, E., Bergman, E., Faridi, M., Donner, S., Mortezanejad, G., & Aziz-Zanjani, A. (2015). The Varzaghan–Ahar, Iran, Earthquake Doublet (M w 6.4, 6.2): implications for the geodynamics of northwest Iran. Geophysical Journal International, 203(1), 522-540.

Global Seismological Services (GSS, Global Seismological Services).

Hessami, K., Jamali, F., & Tabassi, H. (2003). Major active faults of Iran. IIEES, Tehran.

Jordan, T.H., and Sverdrup, K.A., 1981, Teleseismic location techniques and their application to earthquake clusters in the South-Central Pacific: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 71, no. 4, p. 1105-1130.

Lazecký, M., Spaans, K., González, P. J., Maghsoudi, Y., Morishita, Y., Albino, F., ... & Wright, T. J. (2020). LiCSAR: An automatic InSAR tool for measuring and monitoring tectonic and volcanic activity. Remote Sensing, 12(15), 2430.

López-Comino, J. Á., Cesca, S., Niemz, P., Dahm, T., & Zang, A. (2021). Rupture directivity in 3D inferred from acoustic emissions events in a mine-scale hydraulic fracturing experiment. Frontiers in Earth Science, 9, 392.

McGuire, J. J., Zhao, L., & Jordan, T. H. (2002). Predominance of unilateral rupture for a global catalog of large earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 92(8), 3309-3317.