مطالعه دگرشگلی حین‌زلزله زمین‌لرزه ۲۰۱۳ سراوان با استفاده از مدل‌سازی هم‌زمان داده‌های ژئودتیک و امواج دورلرز

میثم امیری[۱]، زهرا موسوی[۲]، آندرا والپرزدورف[۳]، اروان پتیر[۴]
[۱]دانشجوی دکتری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، m.amiri@iasbs.ac.ir
[۲]دانشیار، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، z.mousavi@iasbs.ac.ir
[۳]دانشیار، دانشگاه آلپ گرنوبل فرانسه، andrea.walpersdorf@univ-grenoble-alpes.fr
[۴]دانشیار، دانشگاه آلپ گرنوبل فرانسه، erwan.pathier@univ-grenoble-alpes.fr

چکیده

زمین‌لرزه سراوان با بزرگای Mw ۷/۷ در پهنه فرورانشی مکران در سال ۲۰۱۳ رخداده است. طبق بردارهای GPS منطقه، ایستگاه سراوان (SRVN) مقدار جابجایی افقی ۵۴/۱ میلی‌متر و جابجایی عمودی ۴۲ میلی‌متر را برای رخداد زمین‌لرزه ثبت کرده است. نقشه‌های تداخل‌سنجی راداری نشان‌دهنده ۲۵ سانتی‌متر جابجایی در راستای خط دید ماهواره به صورت دور شدن هستند. براساس مدل‌سازی همزمان این دو داده با امواج دورلرز، زمین‌لرزه سراوان در یک گسله با امتداد شمال‌شرقی-جنوب‌غربی با شیب رو به شمال و سازوکار نرمال رخداده است. طبق نقشه توزیع لغزش بدست آمده، بیشینه لغزش تقریباً چهارونیم متری در عمق ۵۵ تا ۶۵ کیلومتری قرار دارد که گشتاور آزادشده معادل با زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۷/۶ است. براساس توزیع لغزش و هندسه فرورانش مکران، بیشترین لغرش در پوسته اقیانوسی فرورونده رخ می‌دهد. سازوکارهای شکست در اثر آب‌زدایی کانی‌های پوسته اقیانوسی فرورونده، به همراه نیروهای کششی ورقه، به عنوان سازوکار مسبب زمین‌لرزه ۲۰۱۳ سراوان پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: زمین‌لرزه سراوان، پهنه فرورانشی مکران، تداخل‌سنجی راداری، بردارهای GPS، امواج دورلرز

Coseismic study of Saravan 2013 earthquake using joint inversion of geodetic and teleseismic data

Meysam Amiri [1], Zahra Mousavi [2], Andrea Walpersdorf [3], Erwan Pathier [3]
[1]Ph.D Student, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences
[2]Associate Professor, Earth science faculty, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS)
3 Associate Professor, ISTerre, Université Grenoble Alpes

Abstract

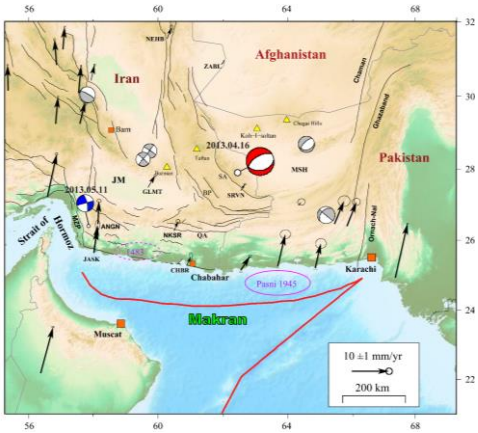
The Saravan 2013 M_w 7.7 earthquake occurred in the Makran subduction zone. The coseismic GPS vectors show that the SRVN station exhibits 54.1 mm horizontal and 42 mm vertical displacement. Moreover, the InSAR analysis shows 25 cm displacement in the LOS with going away motion. Based on the joint inversion of these datasets with the teleseismic waveforms, the Saravan earthquake occurred on a NE-SW striking and north dipping fault with a Normal focal mechanism. The slip distribution map demonstrates that the maximum displacement of 4.5 m occurred in the 55-65 km. The release moment tensor is equivalent to an earthquake with a magnitude of 7.6. According to the new geometries of the Makran subduction zone, the Saravan earthquake slip concentrates on the downgoing oceanic lithosphere.

Keywords: Saravan earthquake, Makran Subduction Zone, InSAR, GPS vectors, Teleseismic waveforms.

۱ مقدمه

در۱۶ آوریل ۲۰۱۳ زمین‌لرزه سراوان با بزرگای Mw 7.7، شهر سراوان را در قسمت شرقی پهنه فرورانشی مکران که محل فرورانش لیتوسفر اقیانوسی ورقه عربی به زیر ایران و پاکستان است را لرزاند. زمین‌لرزه ۲۰۱۳ سراوان یک زمین‌لرزه درون ورقی با سازوکار نرمال بوده (سازوکار قرمز در شکل ۴) و لرزش‌های حاصل از آن در کشورهای همسایه نظیر عمان و افغانستان نیز احساس شده است. پهنه فرورانشی مکران دارای یکی از بزرگترین منشورهای افزایشی ضخیم در دنیا بوده و بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی، سنگ‌های سنوزوئیک غالب هستند. این مرز ورقی، فرورانش رو به شمال ورقه‌های

عربی و عمان به زیر اوراسیا را با سرعت تقریبا ۲۷ میلی‌متر بر سال جذب می‌کند (خرمی و همکاران ۲۰۱۹). مکران غربی و شرقی از نظر شیب ورقه فرورونده، نرخ همگرایی، عمق رسوبات و لرزه‌خیزی تاریخی و دستگاهی متفاوت‌اند (بیرنه و همکاران ۱۹۹۲). زمین‌لرزه‌های بزرگ و کم‌عمق (زلزله مگاتراستی) مانند زلزله ۲۷ نوامبر ۱۹۴۵ پاسنی با بزرگای ۸ در مکران شرقی رخ داده است (بیضی بنفش در شکل ۴)، ولی در مکران غربی علی‌رغم سرعت همگرایی نسبتا بالا، در دوره‌های تاریخی و دستگاهی تقریبا عاری از زلزله مگاتراستی بوده است و یا به دلیل جمعیت کم منطقه در گذشته و محدودیت‌های بازدید میدانی، احتمالا زمین‌لرزه بزرگی ثبت نشده است.



شکل ۴. نقشه تکتونیکی مکران به همراه گسله‌های فعال (خطوط مشکی رنگ) و آتشفشان‌ها (مثلث‌های زرد). سازوکار قرمز رنگ برای زمین‌لرزه ۲۰۱۳ سراوان برگرفته از کاتالوگ CMT است. بردارها نشان‌دهنده میدان سرعت GPS نسبت به چارچوب ثابت اوراسیا هستند. سازوکارهای خاکستری زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیشتر از ۶ رخداده در منطقه از کاتالوگ CMT بوده و سازوکار آبی مربوط به زمین‌لرزه ۲۰۱۳ میناب است. زمین‌لرزه پاسنی ۱۹۴۵ با بیضی بنفش نشان داده شده است.

براساس جدیدترین مطالعات زلزله‌شناسی و ژئودینامیکی انجام شده (نعمتی ۲۰۱۹؛ متقی ۲۰۲۰؛ خالدزاده و قدس ۲۰۲۲)، اطلاعات سودمندی شامل هندسه فرورانش، لرزه‌خیزی و ژئوترم حرارتی منطقه در دست است. بر اساس این مطالعات، شیب ورقه فرورونده در مکران غربی بیشتر از مکران شرقی است.

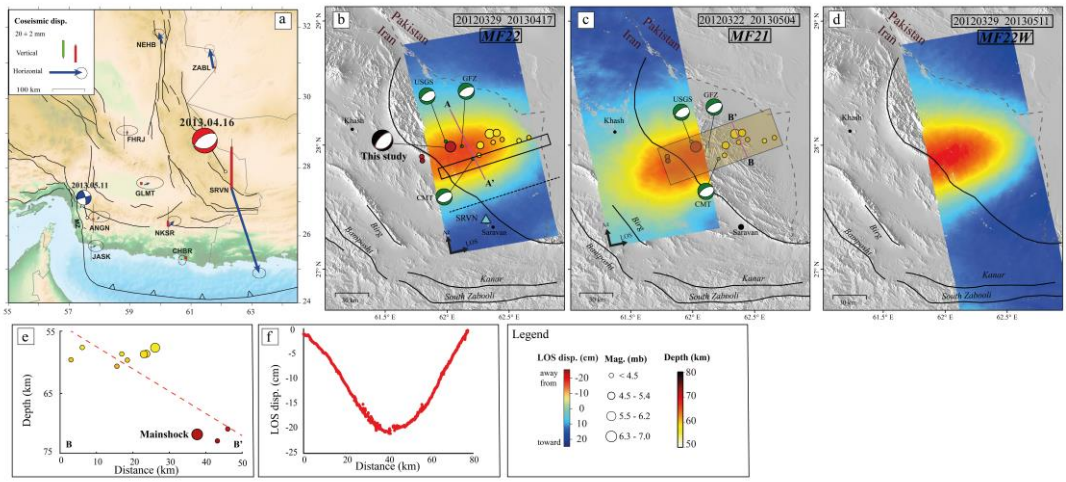
ما در این مطالعه ابتدا میزان جابجایی سطحی زمین به دلیل زمین‌لرزه سراوان را با استفاده از بردارهای GPS و تداخل‌نگارهای بدست آمده از ماهواره Radarsat-2 بدست می‌آوریم. سپس پارامترهای گسله مسبب زمین‌لرزه را با مدل‌سازی همزمان داده‌های GPS، اینسار و افزودن امواج دورلرز می‌یابیم. پس از بدست آوردن توزیع لغزش گسله در تکه‌های مختلف گسله، با استفاده از اطلاعات به‌روز برای فرورانش مکران و زمین‌لرزه‌های با مکان‌یابی مجدد با دقت بالا، سازوکار زمین‌لرزه سراوان را بررسی می‌کنیم.

۲ روش تحقیق

۱.۲ جابجایی حین‌زلزله زمین‌لرزه ۲۰۱۳ سروان با استفاده از بردارهای GPS و تداخل‌سنجی راداری

شکل ۲ جابجایی حین‌زلزله نه ایستگاه GPS را تا فاصله ۴۵۰ کیلومتری از رومرکز زمین‌لرزه سراوان نشان می‌دهد. در این شکل رنگ آبی جابجایی افقی و رنگ‌های قرمز و سبز جابجایی عمودی را به‌ترتیب برای حرکت بالاآمدگی و پایین‌رفتگی نشان می‌دهند. ایستگاه SRVN، نزدیک‌ترین ایستگاه به زمین‌لرزه، بیشترین جابجایی افقی و عمودی را به‌ترتیب با ۵۹ و ۴۲ میلی‌متر ثبت کرده است. روش تداخل‌سنجی راداری یا اینسار در ده‌های اخیر به صورت وسیعی برای مشاهده و اندازه‌گیری جابجایی‌های زمین حاصل از پدیده‌های ژئوفیزیکی شامل زمین‌لرزه، فرورانش، گنبد نمکی و فوران‌های آتشفشانی استفاده شده است (افلاکی و همکاران ۲۰۱۹؛ امیری و همکاران ۲۰۲۰). ما برای اندازه‌گیری دگرشکلی زمین‌لرزه ۲۰۱۳ سراوان، از تصاویر ماهواره Radarsat-2 در سه گذر با جهت بالارونده استفاده کردیم. شکل

۲ داخل‌نگارهای حاصل از تصحیح و حذف فازهای اضافی نظیر فاز توپوگرافی، فاز حاصل از خطای مداری و سپس بازیابی فاز و زمین‌مرجع کردن آن‌ها را نشان می‌دهد. علاوه بر این ما تاخیر فاز تروپوسفری را از هر تداخل‌نگار با استفاده از سرویس آنلاین تصحیح اتمسفری (GACOS) حذف کردیم. شکل ۲ توزیع رومرکز مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه سراوان و پس لرزه‌های آن را سه ساعت پس از زمین‌لرزه تا ۲۰ دسامبر ۲۰۱۳ نشان می‌دهد. براساس پروفیل عرضی رسم‌شده روی این زمین‌لرزه‌ها ’BB، الگوی توزیع پس‌لرزه‌ها یک راستای جنوب‌غربی-شمال‌شرقی را نشان می‌دهد. عمق زمین‌لرزه ۷۲ کیلومتر است که عمیق‌تر از عمق‌کانونی پیشنهادی توسط CMT (~۵۰km) و کم‌عمق‌تر از عمق کانونی بارنهارت و همکاران (۲۰۱۴) یعنی ۸۰ کیلومتر است. نقشه‌های جابجایی در راستای خط دید ماهواره و پروفیل ’AA نشان‌دهنده جابجایی حین‌لرزه با بیشینه مقدار تقریباً ۲۵ سانتی‌متر و در راستای دور شدن از ماهواره است که متناظر با فرونشست با صرف‌نظر کردن از حرکت افقی است.



شکل ۲. جابجایی حین‌زلزله ایستگاه‌های GPS و تداخل‌نگارهای بدست آمده برای جابجایی حاصل از زمین‌لرزه ۲۰۱۳ سراوان. b: تداخل‌نگار گذر c.MF22: گذرMF21، d: گذر MF22W، e: پروفیل عرضی روی پس‌لرزه‌های نشان داده شده در شکل c، و f: پروفیل تغییرات جابجایی سطحی در راستای خط دید ماهواره روی خط ’AA. در این شکل رنگ‌های آبی و قرمز به ترتیب جابجایی زمین به صورت نزدیک شدن و دور شدن از ماهواره در راستای خط دید آن است. دایره‌ها پس‌لرزه‌های مکان‌یابی مجدد شده برگرفته از قدس و همکاران (۲۰۲۱) هستند.

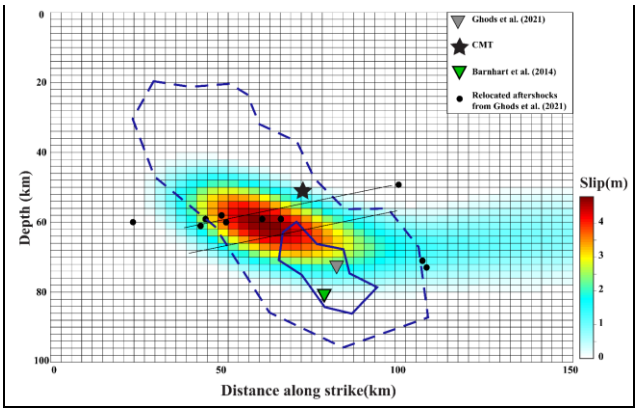
۲.۲ مدل‌سازی پارامترهای گسله مسبب سراوان در فاز حین‌زمین‌لرزه با وارون‌سازی همزمان داده‌های اینسار، GPS و امواج دورلرز

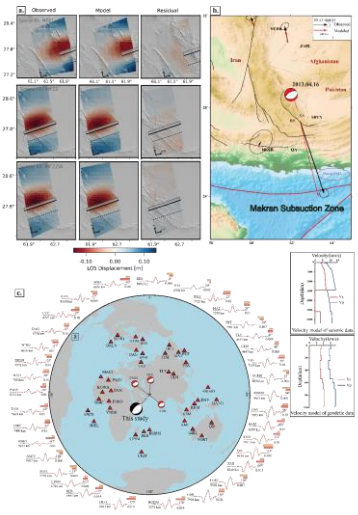
علاوه بر داده‌های اینسار و GPS، ما شکل‌موج‌های دورلرز را از سایت IRIS در فاصله رومرکزی ۳۰ تا ۹۰ درجه دانلود کردیم که در مجموع داده‌های ۳۴ ایستگاه لرزه‌ای به منظور داشتن پوشش آزیموتی یکسان گردآوری شدند. تمام مراحل آماده‌سازی داده‌ها و محاسبات تحت نرم‌افزار Pyrocko انجام شده است (هایمن و همکاران ۲۰۱۷). پارامترهای چشمه، شامل هندسه گسله، جهت‌گیری گسله، محل صفحه گسله و مقدار لغزش هستند. بازه‌های مقید شده هر پارامتر عبارتند از: عمق ۷۰-۳۰ کیلومتر، شیب ۸۰-۴۰ درجه، امتداد ۲۷۰-۲۰۰ درجه، طول ۱۵۰-۵۰ کیلومتر، عرض ۴۰-۰ کیلومتر و ریک ۸۰- - ۱۳۰- درجه. بهینه‌سازی در این مرحله با روش بوت استرپ بر پایه یک روش تکراری و یک روش جستجوی تصادفی مستقیم انجام می‌شود که در آن پارامترهای مدل تصادفی از فضای مدل تعیین‌شده انتخاب می‌شوند. این مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی برای یافتن کمترین عدم‌انطباق، مقایسه می‌شوند. مقایسه بین نقشه‌های جابجایی مشاهداتی اینسار، GPS و شکل‌موج P دورلرز با نتایج مدل‌شده نشان‌دهنده مدل‌سازی بسیار خوب با کمترین باقی‌مانده است (شکل ۳). نتیجه مدل‌سازی در این مطالعه یک گسله مستطیلی با عمق ۵۲ کیلومتر از سطح زمین، طول ۹۵ کیلومتر و عرض ۱۵ کیلومتر (مستطیل مشکی در شکل ۳) است. گسله مسبب زمین‌لرزه ۲۰۱۳ سراوان امتداد ۲۴۴ درجه با شیب ۵۶ درجه

رو به شمال را دارد که فاصله تصویر آن روی سطح زمین (خط‌چین مشکی در شکل ۲) در فاصله ۶۰-۵۰ کیلومتری از رومرکز زمین‌لرزه قرار دارد. ریک گسله ۱۱۶- درجه است که نشان‌دهنده یک سازوکار نرمال غالب با مولفه امتدادلغز راست بر است.

۳.۲ توزیع لغزش گسله مسبب زمین‌لرزه ۲۰۱۳ سراوان

برای بدست‌آوردن توزیع عمقی لغزش، از صفحه گسله بدست‌آمده در مرحله قبلی با ثابت درنظرگرفتن همه پارامترها به جز لغزش وارون‌سازی انجام می‌دهیم. برای جلوگیری از لغزش در گوشه‌های گسله، طول و عرض گسله را به ترتیب به مقادیر ۱۵۰ و ۱۰۰ کیلومتر گسترش داده و صفحه گسله به ۲۵۰۰ تکه با ابعاد 3 km × 2 km تقسیم شد. محل توزیع لغزش و تمرکز بیشترین لغزش بدست آمده توسط بارنهارت و همکاران (۲۰۱۴) به ترتیب با چندضلعی خط‌چین و چندضلعی ضخیم آبی در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه اصلی سراوان و پس‌لرزه‌های آن (قدس و همکاران ۲۰۲۱) با مثلث خاکستری و دایره‌های مشکی نشان داده شده است. مثلث سبز نیز محل رومرکز زمین‌لرزه بدست آمده توسط بارنهارت و همکاران (۲۰۱۴) را نشان می‌دهد. با درنظرگرفتن مدول صلبیت ۳۰ گیگاپاسکال، گشتاور لرزه‌ای بدست آمده برابر با 4.84E+20 Nm و معادل با زمین‌لرزه‌ای با بزرگای 7.8 است.





شکل ۳. چپ: نتایج مرحله اول مدل‌سازی. راست: شکل دو بعدی توزیع لغزش روی گسله

۳ نتیجه‌گیری

در این مطالعه ما پارامترهای مسبب زمین‌لرزه ۲۰۱۳ سراوان را با استفاده از مدل‌سازی همزمان داده‌های اینسار، GPS و امواج دورلرز بدست آوردیم. نتیجه توزیع لغزش بدست آمده روی یک گسله با سازوکار نرمال با شیب رو به شمال، نشان می‌دهد که بیشینه لغزش تقریباً ۴/۵ متری در عمق ۶۵-۵۵ کیلومتری متمرکز است. الگوی توزیع لغزش با الگوی لرزه‌خیزی بدست آمده با مکان‌یابی مجدد هم‌خوانی خوبی دارد. محل تقاطع نقشه توزیع لغزش گسله با ورقه فرورونده اقیانوسی با شیب متغیر به ترتیب ۴ و ۹ درجه نشانگر تمرکز لغزش در پوسته اقیانوسی فرورونده است.

منابع

Aflaki, M., Mousavi, Z., Ghods, A., Shabanian, E., Vajedian, S. and Akbarzadeh, M., 2019. The 2017 M w 6 Sefid Sang earthquake and its implication for the geodynamics of NE Iran. Geophysical Journal International, 218(2), pp.1227-1245.

Amiri, M., Mousavi, Z., Atzori, S., Khorrami, F., Aflaki, M., Tolomei, C., Motaghi,k., & Salvi, S. (2020). Studying postseismic deformation of the 2010–2011 Rigan earthquake sequence in SE Iran using geodetic data. Tectonophysics, 795, 228630.

Barnhart, W.D., Hayes, G.P., Samsonov, S.V., Fielding, E.J. and Seidman, L.E., 2014. Breaking the oceanic

lithosphere of a subducting slab: The 2013 Khash, Iran earthquake. Geophysical Research Letters, 41(1), pp.32-36.

Byrne, D.E., Sykes, L.R. & Davis, D.M., 1992. Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone, J. geophys. Res., 97(91), 449–478.

Ghods, A., Bergman, E., Shabanian, E., Akbarzadeh-Aghdam, M. & Khaledzadeh, M., 2021. Allignment of intermediate events along NE-SW lineaments points to dehydration embrittlement of the Makran Subduction Zone, to be submitted to GJI, 2021.

Hanssen, R. F., 2001, Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis: Springer Science & Business Media.

Heimann, S., Isken, M., Kühn, D., Sudhaus, H., Steinberg, A., Daout, S., Cesca, S., Bathke, H. and Dahm, T., 2018. Grond: A probabilistic earthquake source inversion framework.

Heimann, S., Vasyura-Bathke, H., Sudhaus, H., Isken, M.P., Kriegerowski, M., Steinberg, A. and Dahm, T., 2019. A Python framework for efficient use of pre-computed Green's functions in seismological and other physical forward and inverse source problems. Solid Earth, 10(6), pp.1921-1935.

Khaledzadeh, M., & Ghods, A. (2022). Estimation of size of megathrust zone in the Makran subduction system by thermal modelling. Geophysical Journal International, 228(3), 1530-1540.

Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., Nilfouroushan, F., Mousavi, Z., Nankali, H., ... & Aghamohammadi, A. (2019). An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities. Geophysical Journal International, 217(2), 832-843.