تعیین پارامترهای گسله مسبب زمین‌لرزه قطور و توزیع لغزش برپایه مشاهدات اینسار

مهین جعفری[۱]، زهرا موسوی[۲]، عبدالرضا قدس[۳]

[۱]دانشجو دکترا، مرکز تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، mjafari@iasbs.ac.ir

[۲]دانشیار، مرکز تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، z.mousavi@iasbs.ac.ir

[۳]استاد تمام، مرکز تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان ، aghods@iasbs.ac.ir

چکیده

برای مطالعه خطرپذیری زمین‌لرزه‌ها، دستیابی به تخمینی از ویژگی‌های گسله‌های فعال مانند پارامترهای هندسی گسله و توزیع لغزش از اهمیت بسزایی برخوردار است. گسیختگی ناشی از زمین‌لرزه منجر به تغییر شکل و جابه‌جایی در سطح زمین می‌شود؛ در ۲۳ فوریه سال ۲۰۲۰ دو زمین‌لرزه به فاصله ۱۰ ساعت در مرز ایران و ترکیه به وقوع پیوست. زمین‌لرزه اول با بزرگای ۵.۹ Mw در ساعت ۰۵:۵۲ UTC با سازوکار نرمال و زمین‌لرزه دوم با بزرگای ۶.۰ Mw در ساعت UTC ۱۶:۰۰ با سازوکار امتدادلغز رخ دادند. در این پژوهش به منظور شناسایی گسله مسبب زمین‌لرزه از مشاهدات حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شده است. سپس با مدل‌سازی مستقیم پارامترهای هندسی گسله با توزیع لغزش یکنواخت برآورد گردید. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی زمین‌لرزه دوم، نشان‌دهنده یک گسله امتدادلغز چپ‌بر با مؤلفه نرمال با راستای ۲۴ درجه و شیب ۸۶ درجه است. با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای هندسی گسله که در مرحله اول تخمین زده شده‌اند، توزیع لغزش بر روی صفحه گسله محاسبه گردید. با توجه به توزیع لغزش محاسبه شده، بیشترین گسیختگی در عمق ۳ کیلومتری و مقدار لغزش ۸±۹۷ سانتی‌متر است. همچنین با استفاده از پارامترهای تخمین زده شده، بزرگای گشتاوری زمین لرزه دوم ۶.۰۵ Mw بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی، اینسار، پارامترهای گسله ، زمین لرزه قطور، توزیع لغزش

Coseismic slip modeling for 2020 Ghotor earthquake based on InSAR data

Mahin Jafari [1], Zahra Mousavi [2], Abdolreza Ghods [3]

[1]Phd Student, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences

[2]Associate Professor, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences

[3]Professor, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences

Abstract

The Ghotor doublet earthquake happened on 23 Feb 2020 in west Azerbaijan province of Iran near Iran-Turkey border. The first large event with a magnitude of 5.8 Mw happened at 5:52 UTC and followed by a second large event of magnitude 6.0 Mw at 16:00 UTC. In this study, we use the result of the interferometry processing as observations to derive the fault geometry and slip distribution along the fault. The two step modeling used to estimate the geometric parameters and slip distribution of the fault from the interferograms. We modeled the earthquake as a single rectangular dislocation in an elastic half space. The calculated optimal model parameters illustrate a northeast-striking (N24°) left-lateral rupture plane dipping ~86° towards the west. In the second step, to determine the distributed slip model, we considered fixed fault geometry that resulted from the uniform slip modeling. Using constraints acquired from the constant slip modeling, we model the rupture plane geometry using a distributed slip modeling. The coseismic rupture concentrates around a center depth of 3 km with a maximum slip of 97±8 cm. According to the distributed slip modeling, the mainshock occurred on a NE-striking fault plane dipping toward the west. Assuming a rigidity modulus of 30 GPa, the geodetic moment is estimated to be

1.517E+18 Nm, equivalent to a moment magnitude of 6.05 Mw.
Keywords: Modeling, InSar, fault parameters, Ghotor earthquake, slip distribution

۱ مقدمه

جابه‌جایی سطحی ناشی از زمین‌لرزه‌ها را می‌توان با استفاده از یک یا چند صفحه گسله مدل‌سازی نمود. بنابراین پس از اندازه‌گیری میدان جابه‌جایی توسط مشاهدات ژئودتیک می‌توان با استفاده از مدل مناسب پارامترهای گسله مسبب زمین‌لرزه را شناسایی نمود. زمین لرزه دوگانه قطور در ۲۳ فوریه ۲۰۲۰ در منطقه ای کوهستانی در نزدیکی شهرستان های خوی و سلماس در استان آذربایجان غربی ایران در نزدیکی مرز ایران و ترکیه رخ داد. اولین رویداد بزرگ با بزرگا گشتاوری ۵.۸ در ساعت ۹:۲۳ صبح به وقت محلی (05:52 UTC) و به دنبال آن دومین رویداد بزرگ با بزرگا گشتاوری ۶.۰ در ساعت ۱۹:۳۱ عصر به وقت محلی (16:00 UTC) رخ داد. با توجه به فوکال مکانیسم ارائه شده توسط USGS سازوکار زمین‌لرزه اول نرمال و سازوکار زمین‌لرزه دوم امتدادلغز است. رویداد دوم بیشترین آسیب را به ساختمان وارد کرد. هیچ پارگی سطحی برای رویدادها گزارش نشده است.این زمین لرزه حدود ۱۱۰ مجروح در ایران به همراه داشت اما حدود ۱۰ کشته و ۶۶ مجروح در منطقه باشکله منطقه وان به همراه داشت. به منظور شناسایی گسله مسبب از مشاهدات حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شده است. سپس پارامترهای هندسی گسله و توزیع لغزش با مدل‌سازی طی دو مرحله برآورد گردیده است.

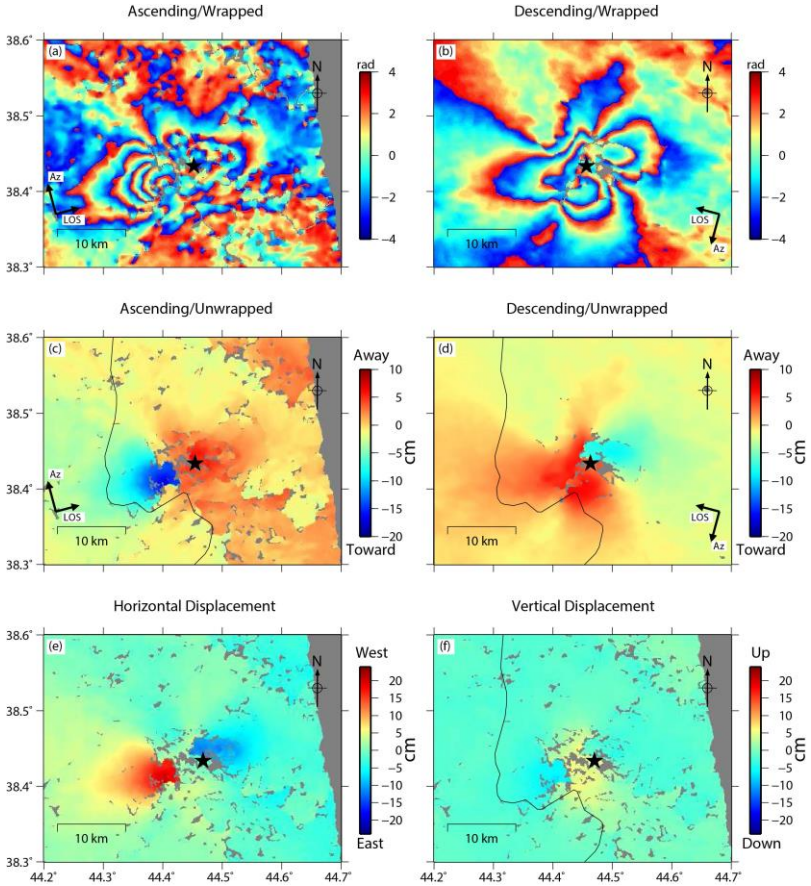
۲ روش تحقیق

در این پژوهش از میدان جابه‌جایی سطحی به دست آمده از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شده که به این منظور ۲ تصویر بالاگذر و ۲ تصویر پایین گذر ماهواره سنتینل۱ با نرم افزار NSBASS پردازش شده‌اند (Doin et al., 2011). برای حذف اثر توپوگرافی از مدل ۱رتفاعی رقومی با رزولوشن ۹۰ متری استفاده شده است. در جدول ۱ جزئیات مربوط به تصاویر بالاگذر و پایین‌گذر استفاده شده را مشاهده می‌کنید.

جدول ۱. جزئیات مربوط به داده‌های مورد استفاده در این پژوهش

	Orbit	Path	Master-Slave	Perpendicular Baseline (m)	Δt (day)
EQ1	Ascending	72	2020.02.17 (15:01)-2020.02.23 (15:00)	32	12
EQ2	Ascending	72	2020.02.23 (15:00)- 2020.03.06 (15:01)	3	12
	Descending	152	2020.02.23 (07:31) -2020.02.29 (03:09)	124	6

با توجه به اینکه میدان جابه‌جایی اندازه‌گیری شده زمین‌لرزه اول بسیار کوچک و در حدود ۴ سانتی‌متر بود، از مدل‌سازی این زمین‌لرزه صرف نظر گردید. شکل ۱ میدان جابه‌جایی هم لرزه در راستای خط دید ماهواره مربوط به زمین‌لرزه دوم را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۱a و ۱b شکل پروانه‌ای فرینج‌های اینترفروگرام‌ها در هر دو گذر بالا و پایین نشان می‌دهد که حرکت گسله مسبب زمین‌لرزه امتدادلغز است و گسیختگی سطحی ایجاد نکرده است. بنابراین گسله مسبب زمین‌لرزه دوم به سطح نرسیده است اما عمق قسمت بالای گسله کم عمق است. با توجه به شکل ۱c و ۱d جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره به ترتیب ۲۵ و ۱۵ سانتی‌متر برای گذر بالا و گذر پایین است. با تجزیه میدان جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره به دو مؤلفه افقی و عمودی ملاحظه می‌شود که مقدار جابه‌جایی در راستای عمودی بسیار کوچک‌تر از مؤلفه افقی است و این موضوع تأییدی بر سازوکار امتدادلغز زمین‌لرزه است. علاوه بر این، با توجه به مؤلفه افقی قسمت چپ گسله جابه‌جایی بیشتری نسبت به قسمت راست داشته و بدین ترتیب قسمت چپ فرودیواره است؛ بنابراین الگوی جابه‌جایی بیانگر گسله امتدادلغز چپ‌بر با مؤلفه نرمال در راستای NE-SW و با پرشیب و کم عمق است.



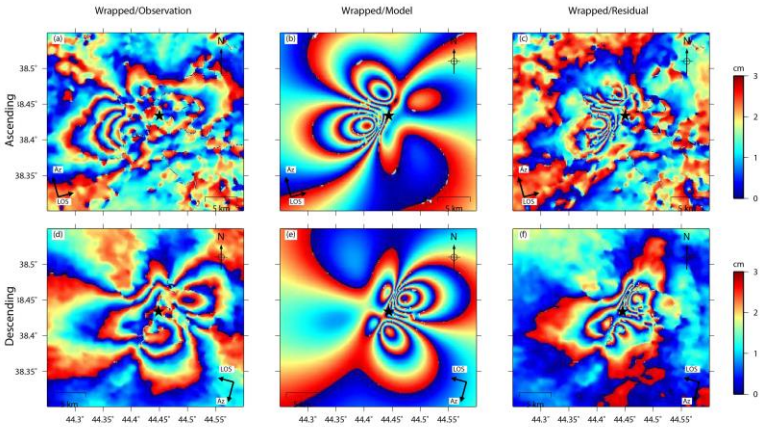
شکل ۱. میدان جابه‌جایی هم لرزه در راستای خط دید ماهواره. اینترفروگرام‌های wrapped و unwrapped حاصل از تصاویر سنتینل ۱ به ترتیب در راستای بالاگذر (a,c) و پایین گذر (b,d). مقادیر منفی حرکت در راستای خط دید به‌سوی ماهواره و مقادیر مثبت دور شدن سطح از ماهواره را نشان می‌دهد. محل رخداد زمین‌لرزه با ستاره سیاه نشان داده شده است. شکل (e) مؤلفه افقی و (f) مؤلفه عمودی میدان جابه‌جایی هم لرزه. مقادیر مثبت در مؤلفه افقی حرکت به سمت غرب و مقادیر منفی حرکت به سمت شرق و مقادیر مثبت در مؤلفه عمودی حرکت به سمت بالا و مقادیر منفی حرکت به سمت پایین را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی چشمه زمین‌لرزه به دو مرحله مدل‌سازی مستقیم و معکوس تقسیم می‌شود. در مرحله اول، مدل‌سازی مستقیم برای تعیین پارامترهای گسله با توزیع لغزش یکنواخت روی صفحه گسله صورت می‌گیرد. ارتباط بین مشاهدات میدان جابه‌جایی سطحی زمین با پارامترهای هندسی گسله با استفاده از مدل تحلیلی اکادا (Okada, 1985) برقرار می‌گردد. پارامترهای گسله یا مجهولات مسئله در این قسمت شامل طول، عرض، عمق قفل‌شدگی، شیب، راستا، مقدار لغزش یکنواخت، زاویه لغزش و مختصات نقطه ابتدایی گسله است. از آنجا که تعداد مشاهدات به دست آمده از تکنیک تداخل سنجی راداری بسیار زیاد است، بهتر است تا تعدادی از مشاهدات حذف شود. به عبارتی مناسب‌تر است تا از مشاهداتی بیشتر استفاده شود که مربوط به مناطقی هستند که بیشترین تغییر شکل را نشان می‌دهند. در این پژوهش از تکنیک Quadtree استفاده شده است (Jónsson et al., 2002). در تکنیک Quadtree بیشترین نمونه‌برداری تنها از مناطقی انجام می‌شود که بیشترین میزان تغییر شکل را دارند. از آنجا که در نزدیکی گسله میزان تغییر شکل بیشتر است بنابراین داده‌های کمتری حذف می‌شوند و در نزدیکی خط گسله رزولوشن داده‌ها بیشتر است. در این پژوهش از نرم افزار GBIS برای مدل‌سازی غیرخطی استفاده شده است (Bagnardi & Hooper 2018). در جدول ۲ حد بالا و پایین بازه تغییرات و نتایج حاصل از معکوس سازی مشترک میدان‌های جابه‌جایی بالاگذر و پایین گذر و پارامترهای هندسی برآورد شده ارائه شده است.

جدول ۲. بازه تغییرات تعیین‌شده برای پارامترهای گسله و پارامترهای برآورد شده گسله مسبب زمین‌لرزه قطور

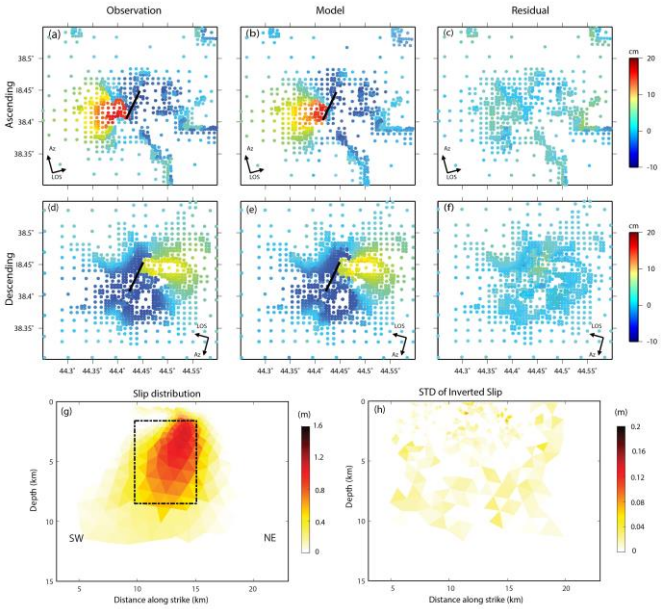
Parameter	X-pos (km)	Y-pos (km)	Length (km)	Width (km)	Depth (km)	Strike (degree)	Dip (degree)	Dip-slip (m)	Strike-slip (m)
Lower bound	4	4	4.5	3	1.5	10	65	-0.10	-3.00
Upper bound	10	14	12	15	5	45	90	0.50	0.00
Optimal	7.8	9.7	5.3	7.168	1.5	24.4	86	0.07	-1.11

در شکل ۲ مشاهدات میدان جابه‌جایی حاصل از اینسار (a,d)۲، مدل حاصل از مدل‌سازی مستقیم(b,e) ۲ و باقیمانده حاصل از مرحله اول از مدل‌سازی (c,f)۲ به ترتیب برای بالاگذر و پایین‌گذر نمایش داده شده است. نتایج به دست آمده در مدلسازی مرحله اول نشان‌دهنده یک گسله امتدادلغز چپ بر با مؤلفه نرمال با راستای ۲۴ درجه و شیب ۸۶ درجه و مقدار لغزش ۱.۱ متر است. مقادیر باقیمانده در مدل‌سازی با لغزش یکنواخت به ترتیب تقریبا ۶ و ۹ سانتی‌متر برای گذر بالا و گذر پایین بدست آمده است.



شکل ۲. به ترتیب نشان‌دهنده (a,d) مشاهدات ، (b,e) مدل و (c,f) باقیمانده مستخرج از مدل‌سازی مستقیم مربوط به گذر بالا و گذر پایین.

در مرحله دوم مدلسازی و به منظور برآورد توزیع لغزش بر روی صفحه گسله، از نتایج مدل‌سازی غیرخطی به‌عنوان مقادیر معلوم استفاده می‌شود. در این مرحله صفحه گسله باید به تکه‌های کوچکی تقسیم شود تا به آرامی و پیوستگی مقدار لغزش به سمت مقدار صفر میل کند. پس از برآورد هندسه گسله با لغزش یکنواخت و به منظور برآورد توزیع لغزش، صفحه گسله در راستای طول ۲۰ کیلومتر و در راستای عرض ۱۲ کیلومتر گسترش داده شد. سپس سطح گسله به ۱۲۹۱ تکه تقسیم‌بندی شد. به منظور مدل‌سازی خطی از روش کمترین مربعات مقید شده تیخانوف استفاده گردید (Tikhonov et al. 1998). در این پژوهش از نسخه اصلاح شده FaultResampler 1.4 برای محاسبه توزیع لغزش استفاده شده است (Barnhart & Lohman 2010). نتایج حاصل از مرحله دوم مدل‌سازی به همراه برآورد توزیع لغزش بر روی صفحه گسله در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۳. به ترتیب نشان‌دهنده (a,d) مشاهدات، (b,e) مدل، خط سیاه گسله تصویر شده بر روی سطح را نشان می‌دهد و (c,f) باقیمانده مستخرج از مدل‌سازی معکوس مربوط به گذر بالا و گذر پایین، (g) توزیع لغزش حاصل از مدل‌سازی معکوس مشاهدات اینسار؛ مستطیل خط‌چین سیاه محدوده گسله را نشان می‌دهد؛ نقطه آبی محل رخداد زمین‌لرزه است، (h) انحراف معیار توزیع لغزش.

همان‌گونه که در شکل‌های ۳c و ۳f مشاهده می‌شود، مقادیر باقیمانده به دست آمده در مرحله مدل‌سازی معکوس نسبت به مقادیر باقیمانده در مرحله مدل‌سازی مستقیم کاهش پیدا کرده است. در نتیجه مدل‌سازی معکوس انجام شده در انطباق خوبی با مشاهده است. با توجه به توزیع لغزش محاسبه شده، بیشترین گسیختگی در عمق ۳ کیلومتری و به میزان ۸±۹۷ سانتی‌متر است. با استفاده از پارامترهای تخمین زده شده، بزرگای گشتاوری ۶.۰۵ Mw برآورد شد که این مقدار اندکی بیشتر از بزرگای گشتاوری تخمین زده شده توسط USGS (۵.۹۸ Mw) است.

۳ نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی چشمه زمین‌لرزه از مشاهدات حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شد. ارتباط بین مشاهدات میدان جابه‌جایی سطحی زمین با پارامترهای هندسی گسله با استفاده از مدل تحلیلی اکادا برقرار و مقادیر پارامترهای هندسی گسله تخمین زده شد. بازه تغییرات پارامترهای هندسی گسله با توجه به داده‌های زلزله‌شناسی و تفسیر بصری اینترفروگرام‌ها تعیین گردید. الگوی میدان جابه‌جایی هم‌لرزه بیانگر گسله امتدادلغز چپ بر با مؤلفه نرمال در راستای NE-SW و با پرشیب و کم عمق است. با توجه به سازوکار فوکال، توزیع پس‌لرزه‌ها و الگوی میدان جابه‌جایی، پیشنهاد شد تا راستای NE-SW برای گسله مسبب در نظر گرفته شود و سازوکار گسله امتدادلغز چپ‌بر فرض شود. نتایج به دست آمده از مرحله اول مدل‌سازی نشان‌دهنده یک گسله امتدادلغز چپ بر با مؤلفه نرمال با راستای ۲۴ درجه و شیب ۸۶ درجه است که با تحلیل‌های صورت گرفته سازگاری کامل داشت. پس از برآورد هندسه گسله با لغزش یکنواخت و به منظور برآورد توزیع لغزش، صفحه گسله در راستای طول و عرض گسترش داده شد. سپس سطح گسله به ۱۲۹۱ تکه تقسیم‌بندی شد. مقادیر باقیمانده در مرحله مدل‌سازی معکوس نسبت به مقادیر باقیمانده تخمین زده شده در مرحله مدل‌سازی مستقیم کاهش پیدا کرده است. با توجه به نتایج حاصل از توزیع لغزش، بیشترین گسیختگی در عمق ۳ کیلومتری و به میزان ۸±۹۷ سانتی‌متر است.

منابع

Bagnardi, M. & Hooper, A., 2018. Inversion of surface deformation data for rapid estimates of source parameters and uncertainties: a Bayesian approach, Geochem. Geophys. Geosyst., 19(7), 2194–2211.

Barnhart, W.D., Lohman, R.B. (2010) Automated fault model discretization for inversions for coseismic slip distributions, Journal of Geophysical Research, doi:10.1029/2010JB007545.

Doin, M.P., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Lodge, F., Ducret, G., and Grandin, R., 2011, September. Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: the Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data. In Proceedings of the Fringe symposium (pp. 3434-3437). Frascati, Italy: ESA SP-697.

Farr, T.G., and Kobrick, M., 2000. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. Eos, Transactions American Geophysical Union, 81(48), pp.583-585.

Jónsson, S., Zebker, H., Segall, P. and Amelung, F., 2002. Fault slip distribution of the 1999 M w 7.1 Hector Mine, California, earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements. Bulletin of the Seismological Society of America, 92(4), pp.1377-1389.

Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. seism. Soc. Am., 75(4), 1135–1154.

Tikhonov, A.N., Leonov, A.S. & Yagola, A.G., 1998. Nonlinear Ill-Posed Problems, Chapman & Hall.Wessel, P. & Smith W.H.F., 1995. New version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans. AGU, 76, 329.