

بررسی پدیده برهم‌کنش بین زوج‌زمین‌لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر - ورزقان و توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها

فرشته جعفری حاجتی^۱ و مریم آق‌آتابای^{۱*}

^۱دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گلستان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۱)

چکیده

زوج‌زمین‌لرزه اهر - ورزقان به‌صورت دو رویداد پی‌درپی در فاصله زمانی نسبتاً کوتاهی از هم، در تاریخ ۲۱ مرداد ماه ۱۳۹۱ (۱۱ اوت ۲۰۱۲) شهرستان‌های ورزقان، اهر، هریس و پیرامون آن واقع در استان آذربایجان شرقی را به‌شدت لرزاند که موجب خسارت‌های جانی و مالی فراوان شد. این تحقیق به‌منظور بررسی رابطه برهم‌کنش بین زوج‌زمین‌لرزه و همچنین بین این حوادث و پس‌لرزه‌ها صورت گرفته است. بدین‌منظور، تغییرات تنش هم‌لرزه‌ای ناشی از زمین‌لرزه اول آذربایجان و همچنین زوج‌زمین‌لرزه به روش مدل تغییر تنش کولمب مورد محاسبه قرار گرفت. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که گسیختگی دوم در محدوده افزایش تنش اطراف کانون زمین‌لرزه اول و پس‌لرزه‌ها نیز در نواحی افزایش تنش حاصل از زوج‌زمین‌لرزه روی داده است. از این‌رو نتایج حاصل بیانگر رابطه برهم‌کنش بین زوج‌زمین‌لرزه اهر - ورزقان و همچنین بین این دو رویداد اصلی و پس‌لرزه‌ها است. علاوه‌براین، با توجه به قرارگیری پس‌لرزه‌ها در نواحی افزایش تنش ناشی از زوج‌زمین‌لرزه، می‌توان نتیجه گرفت که مدل تغییر تنش کولمب روش خوبی برای ارزیابی مناطق مستعد حوادث لرزه‌ای است. آگاهی از مناطق مستعد خطر، نقش مهمی در جهت کاهش خسارت‌های جانی و مالی پس از وقوع زمین‌لرزه اصلی ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: زوج‌زمین‌لرزه اهر - ورزقان، تغییر تنش کولمب، پدیده برهم‌کنش، توزیع مکانی پس‌لرزه

Analysis of interaction phenomenon between 11 August 2012 Ahar-Varzaghan double earthquakes and the spatial distribution of aftershocks

Fereshteh Jaafari Hajati¹ and Maryam Agh Atabai^{1*}

¹Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran

(Received: 2 October 2012, accepted: 21 April 2013)

*Corresponding author:

maryamatabai@yahoo.com

*نگارنده رابط:

Summary

During the past decade, studies related to earthquake forecasting and assessment of seismic hazard have been focused on stress transfer and fault interactions. According to the earthquake interaction phenomenon, occurrence of any earthquake alters the stress state (the shear and normal stress) on its neighboring faults which can delay (decrease), or trigger (increase) subsequent events (Stein, 1999). In recent years, one of the models which have been widely used to estimate coseismic stress perturbations has been the static Coulomb stress changes. These calculations are done based on Okada's code with assumption of a shear modulus of 3.2×10^5 bars and Poisson's ratio of 0.25 using the program Coulomb 3.3 (Toda et al. 2005, Lin and Stein, 2004).

The aim of this research is to explore the fault interaction through static stress transfer between Ahar-Varzaghan double earthquakes and the possible stress triggering relationships between these main shocks and their aftershocks. These double earthquakes occurred on August 11, 2012, near the cities of Ahar and Varzaghan in the East-Azerbaijan Province in the northwest of Iran. The first event with a magnitude of Mw 6.5 occurred at 16:53 local time, and the second one with Mw 6.3 took place about 10 minutes later. These earthquakes killed more than 306 people and a large number of people were injured. Ahar-Varzaghan double earthquakes followed by many aftershocks the largest of which occurred with a magnitude of M_N 5.4. These double earthquakes occurred in places where no active faults have been identified, but there are numerous active faults in their surrounding area such as the North Tabriz Fault, Bozquosh Fault, and Ahar Fault.

In order to investigate the fault interactions between Ahar-Varzaghan double earthquakes, Coulomb stress perturbations due to slip on the first source fault were calculated on a specified oriented receiver fault parallel to the second main shock. Receiver faults were planes with a specified strike, dip and rake, upon which the stress changes caused by source faults were resolved (Toda et al. 2005, Lin and Stein, 2004). Calculations of Coulomb stress changes indicated that the second earthquake occurred when the Coulomb stress was increased by the first event. Hence, the second event of Ahar-Varzaghan double earthquakes appears to have been triggered by an increase in the static Coulomb stress transferred by the first event. This means that the positive stress changes caused by the first source fault have promoted the failure on the second fault.

In order to examine the triggering relationship between the aftershocks and the main shocks, the stress field due to Ahar-Varzaghan double earthquakes were calculated along two kinds of receiver faults including a specified oriented receiver fault and an optimally oriented strike - slip receiver faults (OOPs). The optimal receiver fault orientation is defined by the orientation of the principal axes of the regional stress field. The analysis shows that there is a good correlation between the spatial distribution of the aftershocks and the stress increased in the regions along the specified orientation receiver fault. Therefore, the aftershocks took place in response to the coseismic stress caused by the occurrence of Ahar-Varzaghan double main shocks. Hence, the stress-enhanced regions on this type of receiver fault can be introduced as the most likely site of the next earthquakes.

Keywords: Ahar-Varzaghan double earthquakes, Coulomb stress change, interaction phenomenon, spatial distribution aftershocks

۱ مقدمه

حوادث طبیعی نظیر زمین لرزه همواره در طول دوران حیات بشر وجود داشته و خواهد داشت. وقوع زمین لرزه با وجود پیشرفت‌های حاصل از علم و فناوری، هنوز تحت کنترل بشر در نیامده است و هزینه‌های سنگینی را به جوامع انسانی وارد می‌سازد. در چند دهه اخیر، بررسی حوادث لرزه‌ای و پیش‌بینی احتمالی توزیع زمانی و مکانی این رویدادها روی انتقال تنش آزاد شده هنگام وقوع زمین لرزه‌های بزرگ در نواحی اطراف گسیختگی و همچنین پدیده برهم کنش بین این حوادث متمرکز شده است، به طوری که پیشرفت‌های قابل توجهی در این زمینه مشاهده می‌شود. براساس تحقیقات صورت گرفته، تنش آزاد شده ناشی از زمین لرزه‌های بزرگ می‌تواند میدان تنش نواحی اطراف خود را تغییر دهد و موجب تحریک گسل‌های اطراف و وقوع حوادث لرزه‌ای بعدی (پس لرزه‌ها و زمین لرزه‌های بزرگ) شود (دس و شولز، ۱۹۸۱؛ هرس، ۱۹۹۸؛ کینگ و کوکو، ۲۰۰۱؛ راج پوت و همکاران، ۲۰۰۵). از این رو، بررسی حالت تنش در امتداد گسل‌های مشخص، روش مفیدی برای پیش‌بینی احتمالی حوادث لرزه‌ای در یک توالی است. مدل تغییر تنش کولمب (یا تغییر تنش ایستا) یکی از رایج‌ترین مدل‌ها برای محاسبه حالت تنش یا به عبارت دیگر تغییر تنش هم لرزه‌ای بعد از وقوع زمین لرزه‌های بزرگ است.

رابطه بین تغییرات تنش ایستا و توزیع مکانی حوادث لرزه‌ای را اولین بار دس و شولز (۱۹۸۱) مطرح ساخته‌اند. باین حال این رابطه نخستین بار از سوی استاین و همکاران (۱۹۹۲) روی سامانه گسلی جنوب سن آندریاس ناشی از زلزله لندرس در ۱۹۹۲ به کار رفته است. پس از آن تحقیقات متعددی در ارتباط با معیار تغییر تنش کولمب و محل وقوع حوادث بعدی (پس لرزه‌ها و زلزله اصلی) صورت گرفته است. از جمله تحقیقات به عمل آمده در ایران می‌توان به پژوهش صورت گرفته نابت و همکاران

(۲۰۰۶) اشاره کرد که پدیده انتقال تنش را بین زمین لرزه‌های با بزرگای گشتاوری بزرگ‌تر و مساوی ۶/۴ از ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۵ در استان کرمان، مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از این بررسی، روابط تحریکی و برهم کنش را به وضوح بین زمین لرزه‌های ۱۹۸۱ گلبافت، ۱۹۸۱ سیرچ، ۱۹۹۸ شهداد و ۲۰۰۵ زرنند نشان داده است. راست بود و همکاران نیز در ۱۳۸۹ به بررسی تغییر تنش ایستا حاصل از زمین لرزه ۱۳۸۹ جنوب شرقی محمدآباد ریگان و توزیع مکانی پس لرزه‌های آن در کرمان پرداختند.

در این پژوهش پدیده برهم کنش بین زوج زمین لرزه ۱۳۹۱ اهر - ورزقان مورد بررسی قرار گرفته است. این زمین لرزه‌ها از جمله زمین لرزه‌های متوالی ویرانگری است که رویداد دوم در مدت زمان بسیار کوتاهی (تقریباً ۱۰ دقیقه) بعد از رویداد اول و در فاصله مکانی نزدیک رخ داده است. فاصله زمانی و مکانی خیلی کم این حوادث ممکن است به دلیل پدیده برهم کنش و تحریک رویداد دوم در نتیجه تنش هم لرزه‌ای رویداد اول باشد. لذا در این تحقیق سعی شده است به این سؤال که آیا گسیختگی اول موجب تحریک و بروز گسیختگی دوم شده است یا خیر؟ پاسخ داده شود. علاوه بر این، زوج زمین لرزه اهر - ورزقان با پس لرزه‌های متعددی همراه بوده است که بزرگ‌ترین آنها با بزرگای ناتلی $MN = 5/4$ در ساعت ۲۶ : ۰۶ به وقت بین‌المللی روز یازده اوت ۲۰۱۲ به وقوع پیوست. بنابراین، تغییر تنش کولمب حاصل از زوج زمین لرزه و رابطه آن با توزیع مکانی پس لرزه‌ها نیز در این مقاله بررسی شده است.

۲ لرزه زمین ساخت منطقه

زوج زمین لرزه اهر - ورزقان در گستره آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران و در ایالت لرزه زمین ساختی البرز - آذربایجان رخ داده است. منطقه شمال غرب ایران دارای

۲۰۰۴). گسل شمال تبریز از جمله گسل‌های فعال و پی‌سنگی است که رخنمون بارزی در سطح زمین دارد. این گسل، اگرچه در طی بیش از دو سده از لحاظ لرزه‌ای غیرفعال بوده اما در طول تاریخ، سبب رخداد زمین‌لرزه‌های مخربی شده است (سیاهکالی مرادی و همکاران، ۱۳۸۷). از جمله این زمین‌لرزه‌ها، می‌توان به زمین‌لرزه سال ۱۶۴۱ دهخوارقان ($M_s = 6/8$)، زمین‌لرزه ۱۷۲۱ در جنوب شرق تبریز ($M_s = 7/3$) و زمین‌لرزه ۱۷۸۰ تبریز ($M_s = 7/4$) اشاره کرد (بربریان و یتس، ۱۹۹۹). گسله اهر با راستای تقریبی شرقی - غربی و درازایی نزدیک به ۶۰ کیلومتر در شمال سبلان قرار دارد. این گسله از نظر هندسی به سه قطعه شمال غربی، مرکزی و جنوب شرقی قابل تقسیم است. سامانه گسلی شمال و جنوب بزقوش به‌منزله پایانه شرقی گسله شمال تبریز در قالب پهنه گسلی به‌نام‌های گسله شمال بزقوش و گسله - جنوب بزقوش با راستای تقریبی شرقی - غربی در دو سوی شمال و جنوب بلندی‌های بزقوش قابل دسته‌بندی است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۱).

۳ زوج زمین‌لرزه ۱۳۹۱ اهر - ورزقان

براساس گزارش‌های عرضه شده (اسلامی و همکاران، ۱۳۹۱؛ زارع و همکاران، ۱۳۹۱) دو زمین‌لرزه پی در پی، اولی در ساعت ۱۶:۵۳ با بزرگای گشتاوری $M_w = 6/5$ (CMT هاروارد) در غرب اهر و دومی در ساعت ۱۷:۰۴ با بزرگی گشتاوری $M_w = 6/3$ (CMT هاروارد) نیز در حوالی اهر در تاریخ ۲۱ مرداد ماه ۱۳۹۱ (۱۱ اوت ۲۰۱۲) شهرستان‌های ورزقان، اهر، هریس و پیرامون آن در استان آذربایجان شرقی را به شدت لرزاند. در اثر این زوج زمین‌لرزه حدود ۳۰۶ نفر کشته و بیش از ۳۰۰۰ نفر مجروح اعلام شده است (زارع و همکاران، ۱۳۹۱). موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC) رومرکز این

ساختاری به شدت تغییر شکل یافته و گسل‌خورده است که در ناحیه‌ای بین غرب دریای خزر، جنوب کمر بند روراندگی قفقاز، شرق آناتولی و شمال رشته‌کوه‌های زاگرس واقع است (حسامی و همکاران، ۲۰۰۳). زمین‌ساخت فعال و به‌طور عمده لرزه‌خیزی در این پهنه همانند دیگر نقاط ایران، از کوتاه‌شدگی قاره‌ای بین صفحه‌های عربی و اوراسیا ناشی می‌شود. وجود گسل‌های فعال با راستای شمال غربی - جنوب شرقی مانند گسل‌های شمال تبریز، بستان‌آباد و سلماس، سامانه گسل‌های فرعی متعدد با راستای شمالی - جنوبی در اطراف گسل تبریز و نیز سامانه گسل فرعی دیگر با راستای شمال شرقی - جنوب غربی، موجب شده منطقه شمال غربی ایران از جمله مناطق فعال لرزه‌خیز خاورمیانه به شمار آید (قیطانچی و همکاران، ۲۰۰۴). نتایج حاصل از بررسی‌های لرزه‌خیزی ژئودزی نشان‌دهنده مقدار کمی کوتاه‌شدگی در این ناحیه است (جکسون و همکاران، ۱۹۹۵؛ ماسون و همکاران، ۲۰۰۵) و بیشتر کوتاه‌شدگی در شمال این پهنه در قفقاز (مک‌کلوزکی و همکاران، ۲۰۰۰) و در جنوب آن در رشته‌کوه‌های زاگرس روی می‌دهد (سیاهکالی و همکاران، ۱۳۸۷). مقایسه داده‌های ژئودتیک و پارینه لرزه‌شناسی و همچنین الگوی پراکندگی تغییر شکل‌های فعال در گستره آذربایجان شرقی همگی گویای وجود پتانسیل لرزه‌زایی در این منطقه است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۱).

از جمله گسل‌های مهمی که در نواحی اطراف رومرکز زوج زمین‌لرزه اهر - ورزقان وجود دارد، می‌توان به گسل شمال تبریز، گسل اهر و گسل بزقوش اشاره کرد (شکل ۱). گسل شمال تبریز یک ساختار پیچیده با روند شمال غرب - جنوب شرق، دارای سازوکار امتداد لغز در ناحیه شمال غربی ایران است (بربریان و یتس، ۱۹۹۹) که به کمک عکس‌های هوایی، حرکت راست‌بر را در امتداد این گسل مشخص کرده‌اند (کارخانین و همکاران،



شکل ۱. نقشه گسل های مهم منطقه مورد مطالعه برگرفته از فخرائی و همکاران (۱۳۸۸).

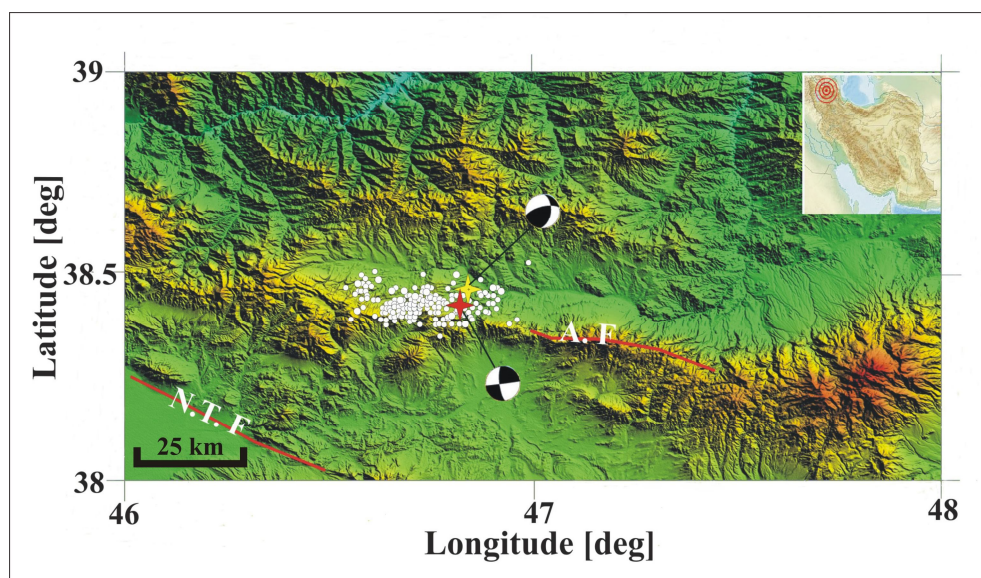
نزدیک به ۲۰۰ متر قابل مشاهده و رهگیری به دو سوی شرقی و غربی است (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۱). علاوه بر این، توزیع کانون های سطحی پس لرزه های ثبت شده توسط مرکز لرزه نگاری کشور نیز تایید کننده یک راستای شرقی - غربی است (شکل ۲).

۴ پدیده برهم کنش بین حوادث لرزه ای و معیار تغییر تنش کولمب

حالت تنش روی گسل یکی از مهم ترین فاکتورهای کنترل کننده در تعیین زمان گسیختگی آن و وقوع زمین لرزه است (شولز، ۱۹۹۰). یک زمین لرزه زمانی رخ می دهد که تنش برشی در پوسته زمین به مقاومت برشی سنگ در امتداد گسل برسد، در این هنگام سنگ تسلیم شده و انرژی کرنشی ذخیره شده در آن آزاد می شود. در واقع پیدایش پدیده زلزله با نظریه بازگشت کشسان راید توصیف می شود (راید، ۱۹۱۰)، که این نظریه بیانگر چرخه ذخیره و تخلیه انرژی کرنشی در گسل که تحت عنوان چرخه لرزه ای (Seismic Cycle) شناخته می شود، است.

رویدادها را به ترتیب برای زمین لرزه اول و دوم در نقاطی با مختصات ۳۸/۴۳ درجه عرض شمالی و ۴۶/۸۱ درجه طول شرقی و مختصات ۳۸/۴۶ درجه عرض شمالی و ۴۶/۸۴ درجه طول شرقی گزارش کرد. سازوکار کانونی مطرح شده برای زمین لرزه اول، امتداد لغز است ولی برای زلزله دوم، سازوکار امتداد لغز با مولفه تراستی گزارش شده است (CMT هاروارد) (شکل ۲). متعاقب رویداد زوج زمین لرزه اهر - ورزقان پس لرزه های زیادی در منطقه رخ داده است که بیش از ۴۰ پس لرزه با بزرگای ناتلی $MN \geq 4$ ثبت شده است.

در پهنه رومرکزی این زمین لرزه ها در مدت زمان ۱۳۰۰ سال اخیر شاهد رویداد زمین لرزه ویرانگری نبوده است (زارع و همکاران، ۱۳۹۱). این زمین لرزه در منطقه ای رخ داده که از قبل هیچ گسل فعالی شناسایی نشده است. همچنین به علت دور بودن کانون این حوادث از گسل شمال تبریز نمی توان وقوع آنها را به فعال شدن این گسله نسبت داد. گسیخت سطحی زمین لرزه ۲۱ مرداد ماه با راستای عمومی شرقی - غربی در ۱۳ کیلومتری جنوب شهرستان ورزقان در مسیر جاده ورزقان به محور اصلی اهر - تبریز با سازوکار چیره برشی راستگرد در پهنایی



شکل ۲. موقعیت و سازوکار ژرفی زوج زمین لرزه اهر- ورزقان به همراه پس لرزه های آن و همچنین گسل های اصلی منطقه روی تصویر SRTM، (داده های لرزه ای برگرفته از IRSC، سازوکارهای ژرفی از CMT هاروارد، دایره های سفید: پس لرزه ها با بزرگای $M_N \geq 3$ و دقت مکانی $1-3/4 \pm$ کیلومتر و به طور متوسط $2/2 \pm$ کیلومتر، ستاره های سرخ و زرد: به ترتیب موقعیت رومرکزی رویداد اول و دوم، N. T. F = گسل شمال تبریز، A. F = گسل اهر).

بررسی قرار گرفته است که یکی از رایج ترین آنها، معیار تغییر تنش کولمب است.

برآورد دقیق تنش ناشی از زمین لرزه ی مورد نظر کاری بس دشوار است. به منظور بررسی این امر، تغییر تنش قبل و بعد از زلزله از طریق تغییر تنش کولمب (تغییر تنش ایستا) به صورت رابطه (۱) مورد محاسبه قرار می گیرد (دس و شولز، ۱۹۸۱؛ استاین و همکاران، ۱۹۹۲؛ هرس، ۱۹۹۸):

$$\Delta\delta_f(\Delta CFS) = \Delta T + \mu' \Delta\delta_n, \quad (1)$$

که $\Delta\delta_f$ تغییر تنش گسیختگی ایجاد شده با گسل مرجع روی گسل گیرنده، ΔT تغییر تنش برشی در جهت لغزش، μ' ضریب اصطکاک مؤثر روی گسل گیرنده و $\Delta\delta_n$ تغییر تنش نرمال است.

در این مدل فرض شده است که اکثریت حوادث بعد از زلزله در مناطق افزایش تنش کولمب ناشی از وقوع زمین لرزه اصلی رخ می دهند. به طوری که، در نواحی با مقادیر مثبت تغییر تنش کولمب ($+\Delta\delta_f$)، افزایش آهنگ

در نظریه بازگشت کشسان راید، زمین لرزه به صورت یک پدیده مجزا مورد بررسی قرار گرفت. بررسی زمین لرزه به صورت یک پدیده مجزا، با وجود در اختیار گذاشتن اطلاعات مهمی در مورد فرایندهای گسیختگی گسل، برای پیش بینی احتمالی وقوع زمین لرزه مفید نیست (هینزل، ۲۰۰۹). از این رو در چند دهه اخیر نظریه انتقال تنش، به منظور شناسایی مناطق مستعد حوادث لرزه ای مطرح شده است. بر اساس نظریه انتقال تنش، وقوع زلزله موجب افزایش یا کاهش تنش (تنش برشی و نرمال) در نواحی اطراف محدوده گسیختگی می شود. این نظریه برای درک پدیده برهم کنش زمین لرزه ها مورد استفاده قرار می گیرد. پدیده برهم کنش، وقوع حوادث لرزه ای در یک توالی را در حکم رویدادهای وابسته به هم معرفی می کند (شولز، ۱۹۹۰) و اساساً به توصیف تغییرات تنش ناشی از وقوع زمین لرزه های متوسط - بزرگ در پوسته لرزه زا می پردازد (آکادا، ۱۹۹۲؛ کینگ و همکاران، ۱۹۹۴). این پدیده از طریق مدل های گوناگون مورد

زمین به شکل یک نیم‌فضای کشسان همگن و گسل‌ها به صورت یک جداشدگی مستطیل‌شکل درون آن، فرض شده است. علاوه بر این فرضیات، برای انجام محاسبات تغییر تنش هم‌لرزه‌ای باید پارامترهای توصیف‌کننده گسل مرجع، گسل گیرنده و ضریب اصطکاک نیز مشخص شود. گسل مرجع (گسل مسبب زلزله) با پارامترهای گسیختگی (عمق، طول و زاویه ریک) و هندسه گسل (زوایای امتداد و شیب) تعیین می‌شود. گسل گیرنده، صفحاتی با هندسه و سازوکار گسلش (زوایای امتداد، شیب و ریک) هستند که روی آنها تنش ایجاد شده حاصل از لغزش در امتداد گسل مرجع، قابل محاسبه است. معمولاً برای گسل‌های امتداد لغز و معکوس، به ترتیب مقدار ضریب اصطکاک ۰/۴ و ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود (لین و استاین، ۲۰۰۴؛ تودا و همکاران، ۲۰۰۵). اما در این پژوهش به دلیل وجود مولفه فرعی (تراستی) در سازوکار ژرفی گسل گیرنده (گسل مسبب رویداد دوم) مقدار ضریب اصطکاک، ۰/۶ فرض شده است.

به منظور بررسی پدیده برهم کنش بین زوج زمین لرزه اهر - ورزقان، ابتدا تغییر تنش هم‌لرزه‌ای ناشی از زمین لرزه اول آذربایجان محاسبه شد. این محاسبات روی گسل گیرنده راست بر با فرض دارا بودن پارامترهای گسیختگی زمین لرزه دوم آذربایجان، صورت گرفت. بر آورد تغییرات تنش ایستا ناشی از این رویدادها با استفاده از پارامترهای گسیختگی و هندسه گسلی داده شده در جدول ۱ صورت گرفت. این اطلاعات از فهرست‌نامه‌های CMT هاروارد و IRSC و همچنین روابط تجربی ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) به دست آمده است.

تغییرات تنش کولمب محاسبه شده یک الگوی ناحیه‌ای را نشان می‌دهد که نسبت به صفحه گسیختگی نامتقارن است. نواحی با رنگ‌های گرم بیانگر افزایش تنش و مناطق دارای رنگ‌های سرد نمایانگر افت تنش هستند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نواحی

فعالیت لرزه‌ای و در مناطق با مقادیر منفی $(\Delta\sigma)$ ، کاهش آهنگ لرزه‌خیزی مشاهده می‌شود (هرس، ۱۹۹۸؛ استاین، ۱۹۹۹؛ کینگ و کوکو، ۲۰۰۱). توجه به این نکته، حائز اهمیت است که تغییرات تنش کولمب نمی‌تواند منجر به وقوع زمین لرزه شود، بلکه فقط قادر است گسل‌هایی که در نتیجه فرایندهای زمین‌ساختی منطقه، نزدیک به نقطه شکست هستند را تحریک کند. به طوری که در نواحی افزایش تنش ناشی از زمین لرزه باعث وقوع زود هنگام حوادث لرزه‌ای و در مناطق کاهش تنش موجب تأخیر در زمان وقوع آنها می‌شود. همچنین باید توجه شود که محاسبات تغییرات تنش کولمب فقط قادر است توزیع مکانی احتمالی حوادث بعدی را مورد بررسی قرار دهد (استاین، ۱۹۹۹؛ راجپوت و همکاران، ۲۰۰۵).

تحقیقات مربوط به برهم کنش تنش هم‌لرزه‌ای از راه مدل تغییر تنش کولمب در دو گروه عمده صورت می‌پذیرد. در گروه اول، ارتباط بین یک زمین لرزه بزرگ و پس لرزه‌های بعد آن مورد بررسی قرار گرفته است که بازه‌های زمانی تقریباً کوتاهی را در بر می‌گیرد. در حالی که گروه دوم به برهم کنش بین زمین لرزه‌های بزرگ اختصاص دارد که معمولاً به بازه‌های زمانی بلندتری محدود می‌شود (نابت و همکاران، ۱۹۹۸؛ راجپوت و همکاران، ۲۰۰۵). هرچند در برخی از پژوهش‌ها از جمله در تحقیق حاضر، هر دو گروه را با هم مورد بررسی قرار می‌دهند.

۵ بررسی پدیده برهم کنش بین زوج زمین لرزه اهر - ورزقان

محاسبات تغییرات تنش کولمب ناشی از این زوج زمین لرزه بر اساس مدل تحلیلی آکادا با فرض مدول برشی $10^5 \times 3/2$ بار، نسبت پواسون ۰/۲۵ با کمک برنامه کولمب ۳.۳ صورت گرفت (لین و استاین، ۲۰۰۴؛ تودا و همکاران، ۲۰۰۵). در مدل تحلیلی آکادا (آکادا، ۱۹۹۲)،

جدول ۱. پارامترهای گسیختگی و هندسه گسل مسبب زوج زمین لرزه اهر- ورزقان.

زمین لرزه اهر- ورزقان	صفحه گره‌ی	امتداد ^۱ (°)	شیب ^۱ (°)	ریک ^۱ (°)	عمق ^۲ (km)	طول جغرافیایی ^۲ (°)	عرض جغرافیایی ^۲ (°)	دقت مکانی ^۲ (km)	طول گسیختگی ^۳ (km)
رویداد اول	گسلی	۸۲	۸۹	۱۶۴	۹	۴۶۸۱	۳۸.۴۳	±۱.۴۲	۲۸.۶
	کمکی	۱۷۳	۷۴	۱					
رویداد دوم	گسلی	۲۵۶	۶۷	۱۳۵	۴	۴۶۸۴	۳۸.۴۶	±۲.۴۱	۲۱
	کمکی	۷	۴۹	۳۱					

۱- استخراج شده از فهرست‌نامه CMT هاروارد

۲- استخراج شده از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC)

۳- محاسبه شده از رابطه تجربی (برگرفته از ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۴).

زمین‌ساختی غالب منطقه تبعیت می‌کند. نوع گسل گیرنده با جهت‌های بهینه با توجه به سازوکار ژرفی عرضه شده برای چندین پس‌لرزه بزرگ (CMT هاروارد) و همچنین رژیم تنش زمین‌ساختی غالب منطقه که برشی است، از نوع امتدادلغز انتخاب شد. به‌منظور برآورد تغییر تنش روی گسل‌های گیرنده با هندسه بهینه، جهت محورهای اصلی میدان تنش غالب محاسبه شده زمانی (۲۰۰۸)، مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲).

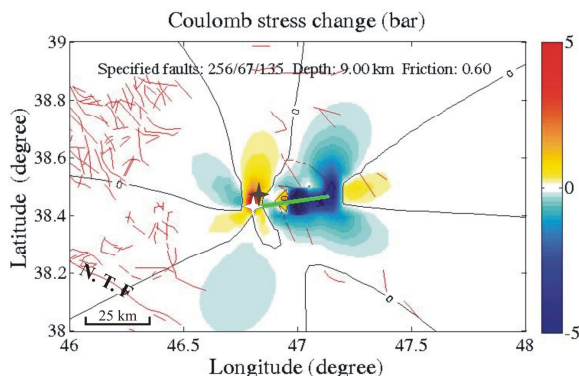
سپس روی نقشه‌های تنش برآورد شده، مراکز سطحی پس‌لرزه‌ها ترسیم شد. داده‌های لرزه‌ای از فهرست‌نامه مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC) استخراج شد. پس‌لرزه‌ها به‌طریق پنجره‌های متغیر گاردنر - نوپوف از سایر داده‌های لرزه‌ای تفکیک شد (گاردنر و نوپوف، ۱۹۷۴). براساس این روش، برای زلزله‌های با بزرگای حدود ۶-۷، پنجره مکانی به‌صورت دایره به شعاع حدود ۵۰-۶۰ کیلومتر به مرکزیت کانون زلزله در نظر می‌گیرند. بدین ترتیب، در این تحقیق یک توالی شامل ۲۹۷ پس‌لرزه با بزرگای ناتلی $M_N \geq 3$ و دقت مکانی $1 - 3/4$ ± کیلومتر (به‌طور متوسط $2/2 \pm$ کیلومتر) که در یک پنجره مکانی تقریباً به فاصله ۶۰ کیلومتری از کانون زوج‌زمین‌لرزه رخ داده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که با تغییر نوع

افزایش تنش در دو انتها و نیز بخش کوچکی از قسمت شمالی صفحه گسیختگی واقع شده است. اما در قسمت انتهای غربی گسیختگی، بیشترین مقدار افزایش تنش (تقریباً ۳ تا ۵ بار) محاسبه شده است. از این رو، با توجه به قرارگیری رومرکز زمین‌لرزه دوم آذربایجان در این ناحیه، منطقه افزایش تنش ناشی از رویداد اول، می‌توان اظهار داشت که افزایش تنش هم‌لرزه‌ای حاصل از گسیختگی اول موجب تحریک و وقوع زمین‌لرزه دوم در فاصله زمانی خیلی کم شده است.

۶ بررسی پدیده برهم‌کنش بین زوج‌زمین‌لرزه و پس‌لرزه‌ها

به‌منظور بررسی ارتباط بین زوج‌زمین‌لرزه اهر- ورزقان و توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها و همچنین پاسخ به این سؤال که آیا تنش هم‌لرزه‌ای ناشی از زوج‌زمین‌لرزه موجب بروز پس‌لرزه‌ها شده است یا خیر، ابتدا تغییرات تنش هم‌لرزه‌ای حاصل از این رویدادها محاسبه شده است.

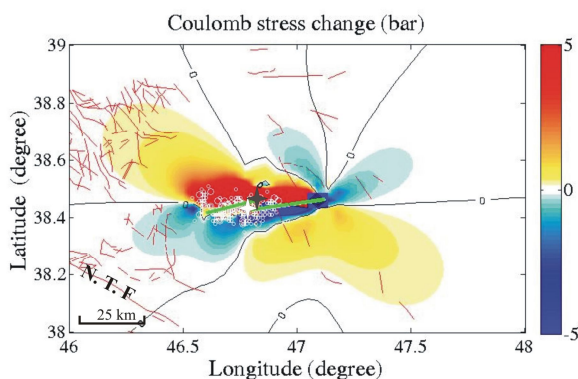
محاسبات تغییرات تنش کولمب روی دو نوع گسل گیرنده انجام شده است: ۱- گسل گیرنده با هندسه مشخص که پارامترهای گسلش گسل مسبب زوج‌زمین‌لرزه (گسل مرجع) را دارا است ۲- صفحات گسلی با هندسه بهینه، که جهت‌های آنها از جهت



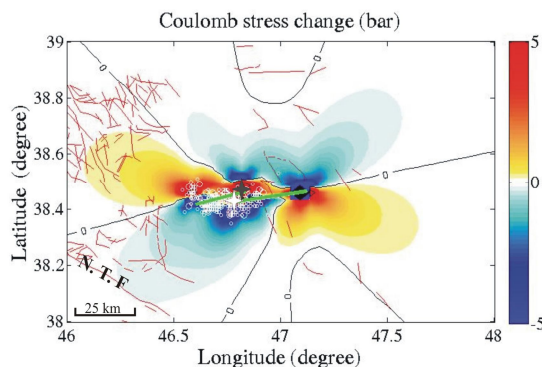
شکل ۳. تغییر تنش ایستا حاصل از زمین لرزه اول اهر - ورزقان قبل از وقوع رویداد دوم برحسب (bar)، ستاره‌های سفید و سیاه: به ترتیب موقعیت رومرکزی رویداد اول و دوم زوج زمین لرزه، خط سبز: اثر گسیختگی رویداد اول در سطح زمین، خطوط سرخ: گسل‌ها، خطوط سیاه: پربندهای احاطه کننده نواحی افزایش تنش، نواحی با رنگ‌های گرم: افزایش تنش کولمب و نواحی با رنگ‌های سرد: افت تنش را نشان می‌دهند.

افزایش تنش واقع شده است (شکل ۴). اما محدوده افزایش تنش روی گسل گیرنده با جهت‌های بهینه منطقه کوچک‌تری را در برمی‌گیرد و مراکز سطحی اکثر پس لرزه‌ها در محدوده افت تنش قرار دارند (شکل ۵). از این رو با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد که در صورت انتخاب گسل گیرنده از نوع گسل مسبب زوج زمین لرزه، بهترین انطباق بین مراکز سطحی پس لرزه‌ها و نواحی افزایش تنش محاسبه شده، ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر، با توجه به قرارگیری اکثر پس لرزه‌ها در

گسل گیرنده الگوی توزیع مکانی تنش کولمب تغییر می‌کند. نواحی افزایش تنش هم لرزه‌ای روی گسل گیرنده از نوع گسل مرجع (گسل مسبب زوج زمین لرزه) به صورت گسترده و نامتقارن در محدوده اطراف گسیختگی تقریباً در راستای شمال غربی - جنوب شرقی منطقه واقع شده است، ولی بیشترین تمرکز افزایش تنش، در راستای گسیختگی‌ها (شرقی - غربی) آرایش یافته است. توزیع پس لرزه‌ها روی نقشه تنش نشان می‌دهد که تقریباً ۶۸ درصد از پس لرزه‌ها با بزرگای $MN \geq 4$ و بیش از ۵۰ درصد پس لرزه‌ها با بزرگی $3 \leq MN \leq 3/9$ در نواحی



شکل ۴. تغییر تنش ایستا حاصل از زوج زمین لرزه اهر - ورزقان روی گسل گیرنده با هندسه مشخص برحسب (bar)، ستاره‌های سفید و سیاه: به ترتیب موقعیت رومرکزی رویداد اول و دوم، دایره‌های سفید: مراکز سطحی پس لرزه‌ها با بزرگی $MN \geq 3$ و دقت مکانی $1 - 3/4 \pm$ کیلومتر و به طور متوسط $2/2 \pm$ کیلومتر (دایره‌های بزرگ‌تر بیانگر پس لرزه‌ها با بزرگی $MN \geq 4$ هستند)، خطوط سبز: اثر گسیختگی‌های ناشی از دو رویداد در سطح زمین، خطوط سرخ: گسل‌ها و خطوط سیاه: پربندهای احاطه کننده نواحی افزایش تنش را نشان می‌دهند.



شکل ۵. تغییر تنش ایستا حاصل از زوج زمین لرزه اهر - ورزقان روی گسل های گیرنده با جهت های بهینه برحسب (bar)، دایره های سفید: مراکز سطحی پس لرزه ها با بزرگی ≥ 3 MN و دقت مکانی $1-3/4 \pm$ کیلومتر (به طور متوسط $2/2 \pm$ کیلومتر) را نشان می دهند. سایر نشانگرها مشابه شکل ۴ هستند.

حاصل از زوج زمین لرزه در نظر گرفت و همچنین نواحی افزایش تنش (رنگ های گرم) روی گسل گیرنده از نوع مرجع را در حکم نواحی مستعد خطر لرزه ای معرفی کرد. در واقع این نتایج بیانگر رابطه برهم کنش بین زوج زمین لرزه اهر - ورزقان و همچنین بین حوادث اصلی و پس لرزه ها است.

بدین ترتیب با توجه به نتایج حاصل می توان اظهار داشت که مدل تغییر تنش کولمب روش مفیدی برای ارزیابی الگوی لرزه خیزی و آگاهی از مناطق مستعد زمین لرزه است. شناسایی نواحی مستعد حوادث لرزه ای، کمک شایانی در جهت عرضه الگوی مناسب ساخت و ساز و گسترش شهری و در نهایت کاهش خسارت های جانی و مالی به دست می دهد. البته زمانی این امر تحقق می یابد که پارامترهای ورودی، مراکز سطحی زمین لرزه اصلی و پس لرزه ها و مدل انتخابی دقیق و با کمترین خطا همراه باشد.

نواحی افزایش تنش در امتداد این نوع گسل گیرنده، می توان اظهار داشت که تنش هم لرزه ای ناشی از زوج زمین لرزه باعث بروز پس لرزه ها شده است.

۷ نتیجه گیری

در این پژوهش پدیده برهم کنش بین زوج زمین لرزه اهر - ورزقان و رابطه این رویدادها با توزیع مکانی پس لرزه ها از راه محاسبات تغییرات تنش کولمب مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات نشان داده که تغییر تنش ناشی از زمین لرزه اول، موجب افزایش تنش ایستا در محدوده کانون رویداد دوم شده است. با توجه به این امر، می توان تنش هم لرزه ای حاصل از زمین لرزه اول را به منزله یک عامل محرک ایجاد گسیختگی روی گسل مسبب زمین لرزه دوم اهر - ورزقان در نظر گرفت. علاوه بر این، مراکز سطحی اکثر پس لرزه ها به خوبی با نواحی افزایش تنش هم لرزه ای محاسبه شده روی گسل گیرنده از نوع گسل مرجع، منطبق است. از این رو می توان پس لرزه ها را به منزله رویدادی در پاسخ به تغییرات تنش هم لرزه ای

جدول ۲. مشخصات محورهای اصلی میدان تنش منطقه ای ناحیه مورد بررسی. این محورها به صورت روند و میل برحسب درجه آورده شده است (داده ها برگرفته شده از زمانی، ۲۰۰۸).

محور P (δ_1)		محور Z (δ_2)		محور T (δ_3)	
۱۸	۱۶۵	۷۱	۳۵۴	۰۳	۲۵۵

Berberian, M., and Yeats, R. S., 1999, Pattern of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 120-139.

Das, S., and Scholz, C. H., 1981, Off-fault aftershock clusters caused by shear stress increase: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **71**, 1669-1675.

Gardner, J. K., and Knopoff, L., 1974, Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **64**, 1363-1367.

Gheitanchi, M. R., Mirzai, N., and Bayramnadjad, E., 2004, Pattern of seismicity in Northwest Iran, revealed from local seismic network: *Geoscience*, **11**, 104-111.

Hainzl, S., 2009, Earthquake triggering and interaction, University of Potsdam.

Harris, R., 1998, Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implication for seismic hazard, J.: *Geophys. Res.*, **103**, 24347-24358.

Harvard Seismology CMT: <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>.

Hessami, K., Pantosti, D., Tabassi, H., Shabanian, E., Abbassi, M. R., Fegghi, K., and Solaymani, S., 2003, Paleoequakes and slip rates of the North Tabriz Fault, NW Iran: preliminary results: *Annals of Geophysics*, **64**, 903-915.

IRSC, Iranian Seismological Center, <http://irsc.ut.ac.ir>.

Jackson, J. A., Haines, A. J., and Holt, W. E., 1995, The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran: *J. Geophys. Res.*, **100**, 15205- 15209.

Karkhanian, A., Trifonov, V., Philip, H., Avagyan, A., Hessami, K., Jamali, F., Bayraktutan, M. S., Bagdassarian, H., Arakelian, S., Davtyan, V., and Adilkhanyan, A., 2004, Active faulting and natural hazards in Armenia, eastern Turkey and Northern Iran: *Tectonophysics*, **380**, 189-219.

King, G. C. P., and Cocco, M., 2001, Fault interaction by elastic stress changes: New clues from earthquake sequences: *Advanced Geophysics*, **44**, 1-38.

King, G. C. P., Stein, R. S., and Lin, J., 1994, Static stress changes and triggering of earthquakes: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 935-953.

Lin, J., and Stein, R. S., 2004, Stress triggering in thrust and subduction earthquakes, and stress interaction between the southern San Andreas

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از داوران محترم این پژوهش که با نظرات ارزنده شان موجب بهبود کیفیت مقاله حاضر شده اند، سپاسگزاری می شود. همچنین از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به خاطر در اختیار گذاشتن داده های لرزه ای قدردانی می شود.

منابع

اسلامی، آ.، تقابنی، م. و اشعری، ع.، ۱۳۹۱، گزارش زمین لرزه های ۱۳۹۱/۰۵/۲۱ اهر - ورزقان: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

راست بود، ا.، وثوقی، ب.، کاردر، ف. و کریمی دونا، ا.، ۱۳۸۹، مدل سازی زمین لرزه (۲۰۱۰/۱۲/۲۰) $M_w = 6/5$ منطقه جنوب خاوری محمدآباد ریگان: بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران.

زارع، م.، کلاتری، ا.، انصاری، ا.، حق شناس، ا.، داوودی، م. و مصطفی زاده، م.، ۱۳۹۱، گزارش شناسایی مقدماتی زمین لرزه های دو گانه ورزقان (شهرستان اهر - استان آذربایجان شرقی) ۲۱-۵-۱۳۹۱: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳ ص.

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۱، گزارش مقدماتی زمین لرزه ۲۱ مرداد ورزقان - اهر.

سیاهکالی مرادی، ع.، تاتار، م.، هاتسفلد، د. و پل، آ.، ۱۳۸۷، مطالعه ساختار سرعتی پوسته و سازوکار گسلش در زون گسلی امتداد لغز تبریز: علوم زمین، ۷۰، ۱۴۰-۱۵۳.

فخرائی، ز.، پورکرمانی، م. و مؤید، م.، ۱۳۸۸، زمین شناسی ساختمانی، لرزه خیزی و لرزه زمین ساخت سد خاکی ورزقان میانه: فصلنامه علمی پژوهشی زمین و منابع واحد لاهیجان، ۱، ۵۷-۶۴.

- Rajput, S., Gahalaut, V. K., and Sahu, V. K., 2005, Coulomb stress changes and aftershocks of recent Indian earthquake: *Current Science*, **88** (4), 576-588.
- Reid, H. F., 1910, The mechanics of the earthquake, the California earthquake of April 18, 1906, Report of the State Investigation Commission, **2**, Carnegie Institution of Washington, Washington D.C.
- Scholz, C. H., 1990, *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge University Press, New York.
- Stein, R. S., 1999, The role of stress transfer in earthquake occurrence: *Nature*, **402**, 605-609.
- Stein, R. S., King, G. C. P., and Lin, J., 1992, Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude = 7.4 Landers earthquake: *Science*, **258**, 1328-1332.
- Toda, S., and Stein, R. S., 2005, Richards-Dinger K., Bozkurt S. B., Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer: *J. Geophys. Res.*, **110**, 1-17.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 974-1002.
- Zamani, B., 2008, Study of Tectonic Stress State of Crust of Iran: Ph. D. thesis, Shiraz University, Iran.
- and nearby thrust and strike-slip faults: *J. Geophys. Res.*, **109**, B02303.
- Masson, F., Chery, J., Martinod, J., Hatzfeld, D., Vernant, P., Tavakoli, F., and Ghafari-Ashtiani, M., 2005, Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from earthquake and geodetic data: *Geophys. J. Int.*, **160**, 217-226.
- McClusky, S., Bassalanian, C., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Hans-Gert, H.-G., Karstens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Relinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksaz, M. N. and Veis, G., 2000, Global Positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus: *J. Geophys. Res.*, **105** (B3), 5695-5719.
- Nalbant, S. S., Hubert, A., and King, G. C. P., 1998, Stress coupling between earthquakes in northwest turkey and the north Aegean sea: *J. Geophys. Res.*, **103**, 24469-24486.
- Nalbant, S. S., Steacy, S., and McCloskey, J., 2006, Stress transfer relations among the earthquakes that occurred in Kerman province, southern Iran since 1981: *Geophys. J. Int.*, **1**, 309-318.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.