

بررسی جهت‌های اصلی تنش در شمال غرب ایران با استفاده از زمین‌لرزه‌های اصلی و پس‌لرزه‌های منطقه اهر - ورزقان

مهسا افرا^۱، علی مرادی^{۲*} و مهرداد پاکزاد^۲

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲آستادیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۰۷، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۲۹)

چکیده

شناخت جهت‌های اصلی تنش که تجمع آن عامل اصلی رویداد زمین‌لرزه محسوب می‌شود، سبب درک بهتر از نحوه حرکت گسل‌ها و سازوکارهای کانونی محتمل می‌شود. سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها متأثر از هندسه گسل و جهت‌های تنش می‌باشند. لذا سازوکار-های کانونی زمین‌لرزه‌ها در یک منطقه منبع اطلاعاتی ارزشمندی برای بررسی میدان تنش در آن منطقه هستند. در این مطالعه، ابتدا با استفاده از برنامه ایزولا پارامترهای چشمه ۱۵ زمین‌لرزه در شمال غرب ایران که غالب آنها پس‌لرزه‌های رخ داده در منطقه اهر-ورزقان بعد از زمین‌لرزه‌های سال ۱۳۹۱ بودند، تعیین شد. سپس، به منظور بررسی وضعیت تنش در این ناحیه، از پارامترهای چشمه زمین‌لرزه‌های اصلی تعیین شده در این مطالعه و نیز رویدادهای اصلی برگرفته از کاتالوگ تانسور گشتاور مرکزوار جهانی استفاده کرده و با به کارگیری روش وارون‌سازی چندگانه، جهت‌های اصلی تنش محاسبه شد. در شمال غرب ایران در ناحیه بین دریاچه ارومیه تا تالش، آزیموت متوسط تنش‌های اصلی σ_1 و σ_3 به ترتیب 141° و $50/2^\circ$ درجه با نسبت تنش $0/6$ محاسبه شد. برای منطقه اهر-ورزقان، با استفاده از سازوکارهای کانونی تعیین شده پس‌لرزه‌های این منطقه، آزیموت تنش‌های اصلی σ_1 و σ_3 به ترتیب $132/5^\circ$ و $42/4^\circ$ درجه با نسبت تنش $0/3$ به دست آمد. اختلاف بین جهت‌های اصلی تنش در منطقه اهر-ورزقان در دو روش حدود 8° درجه می‌باشد که به هم نزدیک است و نشان می‌دهد جهت‌های اصلی تنش به دست آمده حاصل از پس‌لرزه‌ها تفاوت زیادی با جهت‌های اصلی تنش حاصل از زمین‌لرزه‌های اصلی ندارد و تفاوت در میزان نسبت تنش‌ها حاکی از غالب بودن مؤلفه‌های معکوس در سازوکار پس‌لرزه‌های اهر-ورزقان در مقابل غالب بودن مؤلفه‌های امتدادلغز در زمین‌لرزه‌های اصلی منطقه می‌باشد. جهت حرکت امتدادلغز گسل‌های راست‌گرد که جهت آنها شرقی-غربی یا شمال غربی-جنوب شرقی است با جهت تنش به دست آمده کاملاً توجیه‌پذیر است.

واژه‌های کلیدی: تنش، سازوکار کانونی، روش وارون‌سازی چندگانه، اهر-ورزقان، شمال غرب ایران

۱ مقدمه

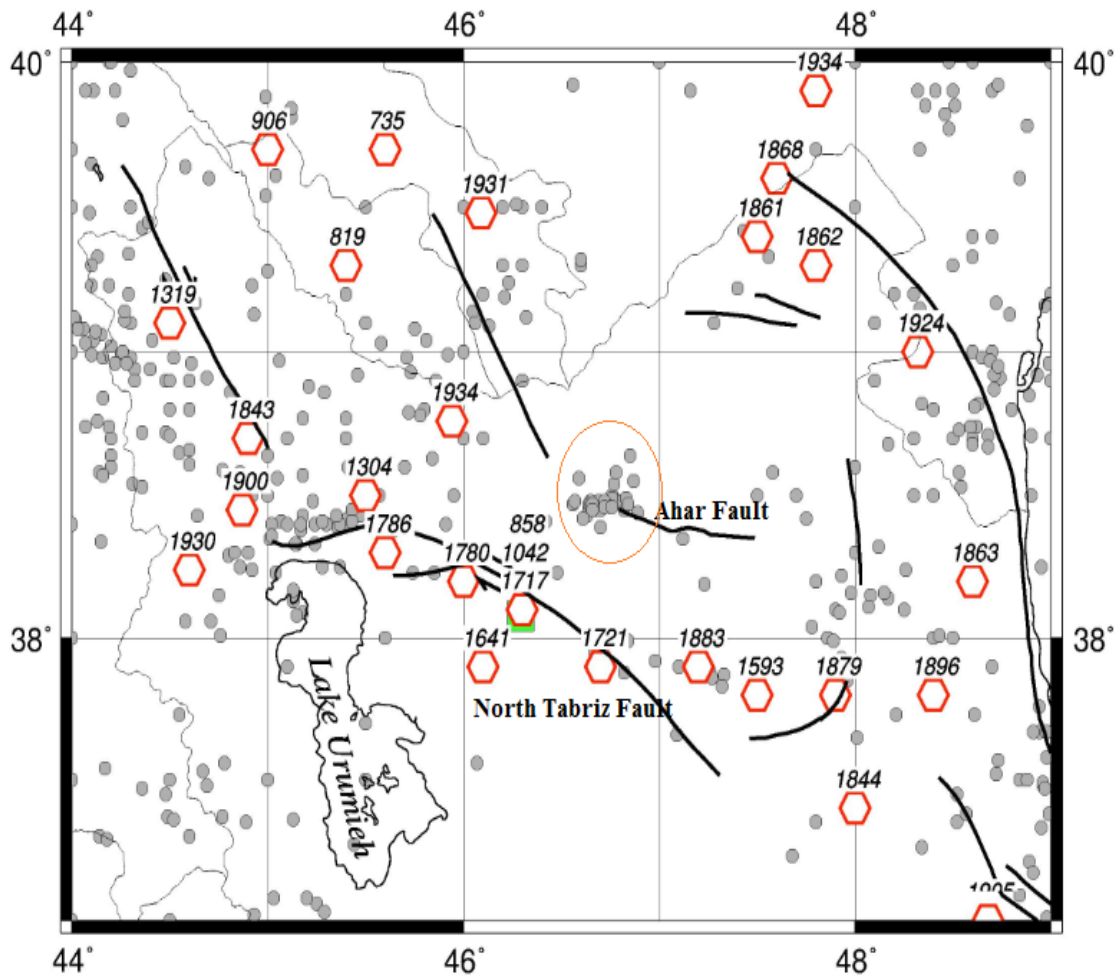
سامانه‌های پیچیده‌ای از گسل‌های معکوس و امتدادلغز شده است. این امر به صورت کمی نیز با استفاده از داده‌های GPS مشخص شده است (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴). نتایج حاصل از مطالعات لرزه‌خیزی و ژئودزی که در آنها میزان حرکت پوسته بر اساس محاسبه گشتاور

زمین‌ساخت فعال در ایران، ناشی از همگرایی صفحه‌های عربی و اوراسیا است که تمامی کشور را تحت تأثیر قرار داده است. همگرایی این دو صفحه که با آهنگک بیش از ۲۲ میلی‌متر در سال صورت می‌گیرد، سبب به وجود آمدن

جمعیتی منطقه، بررسی پارامترهای چشمه این دو زمین لرزه حائز اهمیت خواهد بود. با دانستن سازوکار کانونی که از مهم ترین پارامترهای چشمه زمین لرزه است می توان محورهای تنش، فشارش، تغییرات آنها و درکل میدان تنش را بررسی کرد. اطلاع از میدان تنش و چگونگی تغییرات آن، علاوه بر اهمیت اساسی در تشریح ژئودینامیک منطقه مورد بررسی، نقش مهمی در شاخه های متفاوتی از علوم زمین مانند ژئوتکنیک و زمین شناسی مهندسی دارد. همچنین بررسی تنش که تجمع آن عامل اصلی رخداد زمین لرزه است در تحقیقات پیش نشانگری و پیش بینی زمین لرزه نیز دارای اهمیت خاص است. بررسی و برآورد تنش زمین ساختی در یک منطقه می تواند با روش های مختلفی انجام گیرد. رایج ترین روش ها در تعیین جهت های اصلی تنش، روش هایی هستند که از داده شکست گمانه ها در اعماق سطحی (مک گار و گی، ۱۹۷۸) و یا داده سطح صیقلی استفاده می کنند. استفاده از داده های پیش مغزه گیری، درزه داری هیدرولیکی و الگوی دهانه های آتش فشانی و توده های نفوذی، از دیگر روش های بررسی تنش زمین ساختی در یک منطقه است. از آن جا که در بیشتر موارد زمین لرزه ها با گسیختگی های سطحی همراه نخواهند بود، سابقه لرزه خیزی و پس لرزه های یک زمین لرزه بزرگ، تنها ابزار در مطالعه و بررسی وضعیت تنش در نواحی عمیق است.

بنابراین، اغلب از سازوکارهای کانونی در تخمین ماهیت تانسور تنش در نواحی لرزه زا استفاده می شده است. تانسور تنش پوسته ای را نمی توان با استفاده از سازوکار کانونی یک زمین لرزه با اطمینان به دست آورد (مکنزی، ۱۹۶۹)، زیرا ممکن است سازوکار کانونی زمین لرزه مورد نظر دارای خطای بالایی باشد و یا اساساً از نظر راستای نیروهای وارده با راستای تنش ها متفاوت باشد. لذا یک فرآیند وارون سازی نیاز است تا بتوان با استفاده از تعداد زیادی زمین لرزه، تانسور تنش را به دست آورد.

لرزه ای و اندازه گیری های GPS برآورد می شود، نشان دهنده مقدار کمی کوتاه شدگی در شمال غرب ایران که بخشی از این محیط زمین ساختی بسیار پیچیده است، می باشد (جکسون و همکاران، ۱۹۹۵؛ مک کلاسی و همکاران، ۲۰۰۰؛ میسن و همکاران، ۲۰۰۵) و بیشتر این کوتاه شدگی در شمال این ناحیه در قفقاز (مک کلاسی و همکاران، ۲۰۰۰؛ ریلینگر و همکاران، ۱۹۹۷) و در جنوب آن در رشته کوه های زاگرس روی می دهد. در ناحیه شمال غرب ایران گسل راستگرد شمال تبریز که بیشترین لرزه خیزی در حوالی آن متمرکز می باشد، نمود بارزی دارد. این ناحیه از ایران شاهد زمین لرزه های تاریخی و دستگاهی زیادی بوده است و دو زمین لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ منطقه اهر-ورزقان با بزرگی بیش از ۶ که در فاصله زمانی بسیار کوتاه از یکدیگر رخ دادند، نمونه ای از این زمین لرزه ها می باشند. شکل ۱، توزیع زمین لرزه های تاریخی و دستگاهی با بزرگای بیش از ۴ این منطقه و گسل های ناحیه را نشان می دهد. دایره نارنجی رنگ مکان زمین لرزه و پس لرزه های اهر-ورزقان را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۱ دیده می شود، لرزه خیزی در شمال گسل شمال تبریز بسیار کم است و فعالیت های لرزه ای در انتهای شرقی گسل اهر همگی مربوط به فعالیت بعد از ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ بوده و پیش از دو زمین لرزه اهر-ورزقان بر اساس توزیع زمین لرزه های تاریخی و دستگاهی ثبت شده در شبکه های جهانی و محلی، هیچ گونه فعالیت لرزه ای خاصی در حوالی رومرکز این دو رویداد مشاهده نشده بود. تا این اواخر، ایستگاه های لرزه ای نواریهن محدودی در شمال غرب کشور فعالیت داشته، بنابراین تعیین دقیق پارامترهای چشمه مربوط به زمین لرزه های محلی ممکن نبوده و داده معتبر کافی جهت ارزیابی کامل فعالیت های لرزه ای این ناحیه وجود نداشت. از طرف دیگر، اولین گام در تحلیل خطر لرزه ای، بررسی دقیق چشمه می باشد. با توجه به این مسائل و نیز تراکم بالای



شکل ۱. زمین‌لرزه‌های شمال غرب ایران. زمین‌لرزه‌های تاریخی برگرفته از کتاب آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲) با شش ضلعی‌های قرمز رنگ نشان داده شده‌اند. زمین‌لرزه‌های دستگاهی (۲۰۱۴-۱۹۰۰) با دایره‌های توپر مشخص شده‌اند. دایره نارنجی رنگ مکان زمین‌لرزه و پس‌لرزه‌های اهر-ورزقان را نشان می‌دهد.

نتایج وارون‌سازی تنش، به یک تانسور تنش کاهیده متشکل از چهار متغیر (محورهای اصلی تنش σ_1 ، σ_2 و σ_3 و نسبت تنش) محدود می‌شود. هدف از انجام مطالعه حاضر، تعیین پارامترهای چشمه زمین‌لرزه‌های اصلی و برخی از پس‌لرزه‌های بزرگ اهر-ورزقان و تحلیل تنش لرزه‌ای در این ناحیه است. وارون‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای روشی است که برای تعیین پارامترهای چشمه به‌کار گرفته شد. به‌منظور وارون‌سازی خطی تانسور گشتاور در حوزه زمان، برنامه ایزولا (سوکوس و زاهرادنیچک، ۲۰۰۸) مورد استفاده قرار گرفت. پس از تعیین پارامترهای

مسئله وارون‌سازی شامل تعیین تانسور تنش مجموعه‌ای از گسل‌ها با جهت‌های مختلف است که جهت لغزش بر روی آنها مشخص می‌باشد. این مسئله را اولین بار کری و برونی (۱۹۷۴) بررسی کردند و پس از آنها، آنژولیه (۱۹۷۵)، کری (۱۹۷۶) آرمیجو و سیسترناس (۱۹۷۸)، آنژولیه (۱۹۸۴) و مایکل (۱۹۸۷) به توسعه روش‌های حل پرداختند. این روش‌ها با به‌کارگیری شرایطی خاص بر روی داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها نیز اعمال شد (آنژولیه، ۱۹۸۴؛ گفارت و فورسیت، ۱۹۸۴؛ آنژولیه، ۱۹۹۰؛ آنژولیه، ۲۰۰۲).

چشمه زمین لرزه‌های این ناحیه شامل امتداد، شیب و زاویه لغزش، بررسی وضعیت تنش ممکن می‌شود. برای این منظور، با استفاده از روش وارون‌سازی چندگانه، جهت‌های اصلی تنش را در شمال غرب ایران محاسبه می‌کنیم.

۲ روش تحقیق

۱-۲ داده‌ها و منطقه مورد بررسی

در این تحقیق از تعدادی از داده‌های سه مؤلفه‌ای ایستگاه‌های نوارپهن مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC)، ایستگاه‌های نوارپهن شبکه لرزه‌نگاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (INSN) و نیز ایستگاه‌های کشورهای هم‌مرز با ایران در شمال غرب، استفاده شده است. موقعیت جغرافیایی این ایستگاه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. منطقه مورد بررسی در شمال غرب ایران و در طول جغرافیایی ۴۹-۴۴ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۴۰-۳۷ درجه شمالی واقع شده است. ابتدا با استفاده از وارون‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای برای ۱۵ زمین‌لرزه در این محدوده که بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ رخ داده‌اند، سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها و دیگر پارامترهای چشمه آنها مورد بررسی قرار گرفت. محل کانون این زمین‌لرزه‌ها و زمان وقوع آنها برگرفته از کاتالوگ IRSC است. به‌منظور وارون‌سازی خطی تانسور گشتاور در حوزه زمان، برنامه ایزولا مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس این برنامه، برپایه واهمامیخت تکراری کیکوچی و کاناموری (۱۹۹۱) است که به‌منظور تعیین پارامترهای چشمه زمین‌لرزه در فواصل دورلرز مورد استفاده قرار گرفت. این روش را زاهدانیک و همکاران (۲۰۰۵) برای فواصل محلی و منطقه‌ای گسترش دادند. در این روش توابع گرین با استفاده از روش عدد موج گسسته بوشون (۱۹۸۱) محاسبه می‌شوند و در وارون‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای در حوزه زمان، شکل موج کامل داده‌های منطقه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین نیازی به

تفکیک فازها نیست. برنامه ایزولا بر اساس همین روش عمل می‌کند. در برنامه ایزولا رکوردهای سرعت مورد استفاده قرار می‌گیرند که پس از اعمال تصحیح دستگاهی بر روی آنها، با یک صافی میان‌گذر پالایش می‌شوند. پس از تبدیل رکوردهای سرعت به جابه‌جایی، وارون‌سازی خطی بر روی این جابه‌جایی‌ها انجام می‌گیرد و جابه‌جایی‌های مصنوعی محاسبه می‌شوند. مدل پوسته به‌کاررفته در این مطالعه، مدل مورد استفاده در مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران است که برای کل ایران به‌صورت میانگین محاسبه شده است. این مدل شامل ۵ لایه است که مشخصه‌های آنها در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است در تعیین سازوکارها در این مطالعه از مدل مرادی و همکاران (۲۰۱۱) نیز استفاده شد. با توجه به اینکه بخشی از داده‌های استفاده شده در این مطالعه مربوط به خارج از محدوده شمال غرب ایران بود، مدل ناحیه‌ای مرادی و همکاران (۲۰۱۱) تطابق کمتری نسبت به مدل پوسته کلی و متوسط مرکز لرزه‌نگاری نشان داد، لذا در تعیین سازوکارهای کانونی در این مطالعه، از مدل مرکز لرزه‌نگاری استفاده شد. نتایج به‌دست آمده از وارون‌سازی شکل موج در جدول ۳ نشان داده شده است. به‌منظور محاسبه هر یک از سازوکارهای آورده شده در جدول ۳، وارون‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای برای چشمه‌ها در عمق‌ها و بازه‌های بسامدی مختلف انجام و پارامترهای چشمه این زمین‌لرزه‌ها محاسبه شد. بهترین بازه بسامدی با در نظر گرفتن بهترین مقدار کاهش واریانس که همان نزدیک‌ترین مقدار به عدد یک است، انتخاب شد. به عبارت دیگر، وارون‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای در بازه‌های بسامدی مختلف، بارها برای یک زمین‌لرزه انجام و جواب بهینه انتخاب شد. تقریباً در همه این بازه‌های بسامدی، سازوکارهای کانونی پایدار بودند. حذف یک یا دو ایستگاه و بررسی مجدد نتایج از دیگر روش‌های

حصول اطمینان از پایداری سازوکارهای کانونی است که در این مطالعه انجام شد.

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد استفاده در این مطالعه.

Station	Lat (N °)	Long (E °)	Seismic Network
BZA	34.4696	47.8605	IRSC (Iranian Seismological Center)
DOB	33.78744	48.17747	IRSC
HAGD	34.822	49.139037	IRSC
HSRG	35.2418	48.2787	IRSC
KCHF	34.275	47.0404	IRSC
KFM	33.52444	47.84694	IRSC
KMR	33.5178	48.3803	IRSC
KOM	34.1761	47.5144	IRSC
QABG	35.70846	49.58238	IRSC
QALM	36.4321	50.64646	IRSC
MAHB	36.7666	45.7054	IRSC
TABZ	38.0568	46.3266	IRSC
TAHR	38.49	47.051	IRSC
TVRZ	38.504	46.668	IRSC
ZNGN	32.1174	50.8542	IRSC
ASAO	34.548	50.025	INSN (Iranian National Broadband Seismic Network)
CHTH	35.908	51.126	INSN
GHVR	34.48	51.295	INSN
GRMI	38.81	47.894	INSN
KHMZ	33.739	49.959	INSN
MAKU	39.355	44.683	INSN
SNGE	35.093	47.347	INSN
THKV	35.916	50.879	INSN
ZNJK	36.67	48.685	INSN
AGRB	39.5755	42.992	ISK (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute)
GNI	40.149	44.7414	NSSP (National Survey for Seismic Protection)
KARS	40.6276	43.0788	ISK
SIRT	37.5011	42.4392	ISK
VANB	38.595	43.389	ISK

جدول ۲. مدل پوسته ایران، تهیه شده توسط مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

Depth of layer top (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Density (g/Cm ³)	Qp	Qs
0.0	5.38	3.057	2.776	600	300
7.0	5.95	3.381	2.890	600	300
12.0	6.15	3.494	2.930	600	300
20.0	6.42	3.648	2.984	600	300
47.0	8.06	4.580	3.312	600	300

جدول ۳. نتایج به دست آمده از وارون سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای با استفاده از برنامه ایزولا. رنگ سازوکارهای کانونی با توجه به درصد دو زوج نیرو در بازه‌های ده‌تایی تغییر می‌کند. برای نمونه، درصد دو زوج نیروی ۹۰ الی ۱۰۰ با رنگ قرمز مشخص شده است. در سه ستون انتهایی جدول، نتایج به دست آمده از تانسور گشتاور مرکزوار جهانی مربوط به رویدادهای مشترک با این مطالعه آورده شده است. مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه و نتایج به دست آمده از تانسور گشتاور مرکزوار جهانی نشان‌دهنده انطباق به نسبت خوبی در سازوکارهای تعیین شده است.

NO.	Origin Time & Location Parameters						DC %	Variance reduction %	Focal mechanism	Nodal Planes (this study)			Nodal Planes (GCMT)		
	Date	Time	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (Km)	MW				strike (°)	dip (°)	rake (°)	strike (°)	dip (°)	rake (°)
										1	20120811	12:23:15	38.43	46.81	6
										174	48	0	175	81	6
2	20120811	12:34:33	38.46	46.84	16	6.3	65.7	80		81	87	-175	10	50	36
										351	85	-3	255	63	134
3	20120811	15:21:14	38.42	46.8	6	4.8	82.9	50		86	84	-176			
										355	86	-6			
4	20120811	15:43:19	38.46	46.73	10	4.8	85.4	50		31	67	69			
										255	31	130			
5	20120811	22:24:02	38.43	46.75	10	5.3	77.7	60		352	64	9	345	59	1
										258	82	154	254	89	149
6	20120813	1:56:10	38.47	46.66	10	4.7	91.3	60		266	90	-175			
										176	85	0			
7	20120819	1:58:30	38.41	46.65	10	4.3	61.7	60		82	88	174			
										172	84	2			
8	20121027	3:56:41	38.39	46.64	8	4.3	61.4	50		83	71	166			
										178	77	20			
9	20121107	6:26:31	38.46	46.75	10	5.8	75.1	80		271	82	-174	92	83	173
										180	84	-8	183	83	7
10	20121116	3:58:28	38.49	46.66	6	4.9	95.7	50		280	81	-169	109	81	179
										188	79	-9	199	89	9
11	20121223	6:38:57	38.48	44.93	14	5.2	91.6	70		76	82	174	79	71	141
										167	84	8	184	54	24
12	20121223	7:12:31	38.41	44.84	20	4.1	64.3	80		83	61	147			
										190	62	34			
13	20130706	17:07:49	37.63	48.96	10	4.0	77.7	60		97	90	-175			
										7	85	0			
14	20130927	10:02:43	37.33	44.94	18	4.4	65.8	70		75	59	107			
										224	35	64			
15	20131108	10:12:34	37.8	47.17	6	4.4	96.0	70		21	67	-10			
										115	81	-157			

نتایج به دست آمده از تانسور گشتاور مرکزوار جهانی مربوط به رویدادهای مشترک با این مطالعه آورده شده است. مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه و نتایج به دست-

کاهش واریانس و درصد دو زوج نیروی بالا و عدم قطعیت‌های انجام شده نیز به منزله معیاری در پایداری جواب‌ها در نظر گرفته شد. در سه ستون انتهایی جدول ۳،

همبستگی، مطابق با جواب بهینه است. هر جواب پذیرفتنی با استفاده از زاویه کیگن با جواب بهینه مقایسه می‌شود (کیگن، ۱۹۹۱). شاخص تغییرپذیری سازوکار کانونی (Focal-Mechanism Variability Index) به صورت متوسط زاویه کیگن همه جواب‌های پذیرفتنی تعریف می‌شود. شاخص تغییرپذیری زمانی- مکانی (STVAR) اندازه ناحیه زمان- مکان را مطابق با آستانه همبستگی مشخص و مستقل از تغییر سازوکار کانونی اندازه می‌گیرد. این شاخص سطح ناحیه‌ای در نمودار زمان- مکان است که در یک آستانه همبستگی مشخص، با جواب‌ها اشغال شده است و با سطح کل ناحیه زمان- مکان جستجو شده، بهنجار شده است. شاخص تغییرپذیری زمانی- مکانی، مکمل شاخص تغییرپذیری سازوکار کانونی است. با این ترتیب، جواب‌هایی مناسب‌ترند که هر دو شاخص فوق برای آنها کوچک است و عدد وضعیت مقدار پایینی دارد (سوکوس و زاهرادنیک، ۲۰۱۳). عدم قطعیت‌های ۱۵ رویداد بررسی شده در این مطالعه نیز به صورت مجزا در جدول ۴ مشخص شده‌اند. برای نمونه، مقادیر FMVAR و STVAR برای زمین‌لرزه شماره ۹ به ترتیب 4 ± 6 و 0.21 است. علاوه بر این، شاخص عدد وضعیت برای این زمین‌لرزه برابر با $2/4$ است. همان‌طور که پیش از این بیان شد، پایین بودن این شاخص‌ها، نشان‌دهنده جواب‌های بهینه‌تر است. شاخص FMVAR برای زمین‌لرزه‌های ۱، ۴، ۸ و ۱۲ نسبت به سایر زمین‌لرزه‌ها مقدار بالاتری دارد. زاویه کیگن نیز که کمینه چرخش بین دو سازوکار را بیان می‌کند، برای زمین‌لرزه شماره ۱ بالاترین مقدار را به خود اختصاص داده است. با مقایسه عدم قطعیت‌های آورده شده در جدول ۴، می‌توان بیان کرد که برای زمین‌لرزه شماره ۶ بهترین سازوکار کانونی به دست آمده است، زیرا سه شاخص STVAR، FMVAR و عدد وضعیت برای آن مقدار کمتری دارد.

آمده از تانسور گشتاور مرکزوار جهانی نشان‌دهنده انطباق به نسبت خوبی در سازوکارهای تعیین شده است.

۲-۲ کیفیت سازوکارهای تعیین شده

بسیاری از کاربران برنامه ایزولا، کیفیت جواب‌هایشان را تنها با استفاده از انطباق شکل موج‌ها بررسی می‌کنند. اگر از تعداد اندکی شکل موج استفاده شود، انطباق آنها خوب خواهد بود، در صورتی که سازوکارهای کانونی ممکن است کاملاً نادرست باشند. به منظور بررسی قطعیت جواب‌ها، انطباق شکل موج‌ها (کاهش واریانس)، عدد وضعیت (Condition number) و نیز تغییرپذیری مکانی- زمانی جواب‌ها با هم ترکیب می‌شوند. کاهش واریانس و عدد وضعیت معیارهای مکمل کیفیت جواب‌ها هستند. عدد وضعیت از ماتریس توابع گرین، G ، به دست می‌آید که شکل موج‌های مشاهده‌ای (داده U) و پارامتر- های مدل، m ، را به هم ارتباط می‌دهد. این پارامتر، قطعیت جواب‌ها را از نظر چیدمان چشمه- ایستگاه، محدوده بسامدی و مدل پوسته به کار رفته بررسی می‌کند و به داده خاص به کار رفته در هر وارون‌سازی وابسته نیست. این امر بدین معنا است که عدد وضعیت بدون استفاده از شکل موج‌های واقعی قابل محاسبه است (زاهرادنیک و کوستودیو، ۲۰۱۲). مقادیر بسیار بزرگ و بسیار کوچک عدد وضعیت به ترتیب نشان‌دهنده مسئله- های بدوضع و خوش‌وضع (ill- and well- conditioned problems) هستند. یکی دیگر از معیار- های مفید در بررسی کیفیت جواب‌ها، با کمی‌سازی تغییر- پذیری جواب سازوکار کانونی در مجاورت بهترین مکان و زمان چشمه منطبق شده حاصل می‌شود. در برنامه ایزولا، با استفاده از نمودار همبستگی، بر روی تغییرپذیری سازوکار کانونی پیرامون جواب بهینه تمرکز بیشتری انجام می‌شود. جواب‌های پذیرفتنی همبستگی بین 0.9 و مقدار آستانه $0.9 \times \text{corr}_{\text{opt}}$ دارند که corr_{opt} بزرگ‌ترین مقدار

جدول ۴. عدم قطعیت پارامترهای چشمه زمین لرزه‌های بررسی شده در این مطالعه. زاویه کیگن، کمینه چرخش بین دو سازوکار را بیان می‌کند. عدد وضعیت از ماتریس توابع گرین به دست می‌آید که شکل موج‌های مشاهده‌ای و پارامترهای مدل را به هم ارتباط می‌دهد. شاخص تغییرپذیری سازوکار کانونی (FMVAR) به صورت متوسط زاویه کیگن همه جواب‌های پذیرفتنی تعریف می‌شود. شاخص تغییرپذیری زمانی- مکانی (STVAR) اندازه ناحیه زمان- مکان را مطابق با آستانه همبستگی مشخص و مستقل از تغییر سازوکار کانونی اندازه می‌گیرد. این شاخص سطح ناحیه‌ای در نمودار زمان- مکان است که در یک آستانه همبستگی مشخص، با جواب‌ها اشغال شده است و با سطح کل ناحیه زمان- مکان جستجو شده بهنجار شده است.

No.	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Kagan angle, Mean (°)	CN	FMVAR	STVAR
1	84 ± 12	90 ± 22	138 ± 8	12.1659	2.3	12 ± 7	0.29
	174 ± 16	47 ± 14	0 ± 35				
2	81 ± 12	87 ± 5	-175 ± 14	6.0337	2.1	8 ± 8	0.36
	350 ± 10	85 ± 5	-3 ± 18				
3	86 ± 5	84 ± 5	-176 ± 14	5.6473	2.2	8 ± 3	0.1
	355 ± 5	86 ± 5	-6 ± 15				
4	31 ± 12	67 ± 9	69 ± 12	7.7235	2	12 ± 6	0.31
	255 ± 18	30 ± 8	130 ± 23				
5	352 ± 8	64 ± 5	9 ± 11	5.1315	1.7	6 ± 3	0.27
	258 ± 8	81 ± 7	153 ± 10				
6	266 ± 12	90 ± 5	-175 ± 14	6.6858	2.7	2 ± 1	0.14
	176 ± 11	85 ± 5	0 ± 12				
7	82 ± 11	88 ± 6	174 ± 16	7.7538	3.6	7 ± 6	0.31
	172 ± 13	84 ± 7	2 ± 17				
8	83 ± 10	71 ± 9	166 ± 20	9.9068	2.9	12 ± 6	0.08
	177 ± 14	76 ± 11	19 ± 20				
9	271 ± 10	82 ± 7	-174 ± 13	9.0325	2.4	6 ± 4	0.21
	180 ± 10	84 ± 10	-8 ± 18				
10	280 ± 8	81 ± 9	-169 ± 8	6.8606	2.6	5 ± 2	0.12
	188 ± 7	79 ± 7	-9 ± 10				
11	76 ± 10	82 ± 5	174 ± 14	6.3684	3.7	4 ± 3	0.26
	166 ± 14	84 ± 6	8 ± 13				
12	83 ± 13	61 ± 10	147 ± 16	9.9221	3.3	11 ± 9	0.29
	190 ± 11	61 ± 10	33 ± 13				
13	97 ± 9	90 ± 3	-175 ± 16	5.382	1.9	5 ± 4	0.26
	7 ± 8	85 ± 3	0 ± 13				
14	75 ± 13	59 ± 8	107 ± 16	7.0271	2	9 ± 5	0.38
	224 ± 15	34 ± 4	64 ± 19				
15	21 ± 13	67 ± 11	-10 ± 20	9.9324	2.4	9 ± 4	0.1
	114 ± 13	80 ± 9	-156 ± 19				

(سازوکارهای کانونی مشکی‌رنگ و نارنجی‌رنگ مشخص شده با حروف A الی G، مطابق با جدول ۵) در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. در محاسبه تنش در منطقه از سازوکارهای قرمز و مشکی استفاده شده است و

سازوکارهای کانونی محاسبه شده در این مطالعه (سازوکارهای کانونی قرمز رنگ و نارنجی رنگ مشخص شده با اعداد ۱ الی ۱۵، مطابق با جدول ۳) و نیز سازوکارهای کانونی برگرفته از کاتالوگ مرکزوار جهانی

برای تفکیک تنش‌ها از داده‌های ناهمگن لغزش گسل است و از وارون‌سازی کلاسیک تانسور تنش بهره می‌گیرد که مجموع زوایای عدم برآزش بین جهت‌های لغزش محاسبه‌ای و مشاهده‌ای را کمینه می‌کند. این زاویه‌ها، برای اطمینان از نتایج وارون‌سازی تانسور تنش مهم هستند. مشکل استفاده از داده‌های سازوکار در وارون‌سازی تانسور تنش این است که تعیین صفحه اصلی گسل از دو صفحه ممکن، آسان نیست. بدین منظور ابتدا فرض می‌شود هر دو صفحه کمکی مانند صفحه گسل عمل کرده، سپس صفحه‌ای که گسل‌خوردگی روی آن محتمل‌تر است برای هر سازوکار تعیین می‌شود.

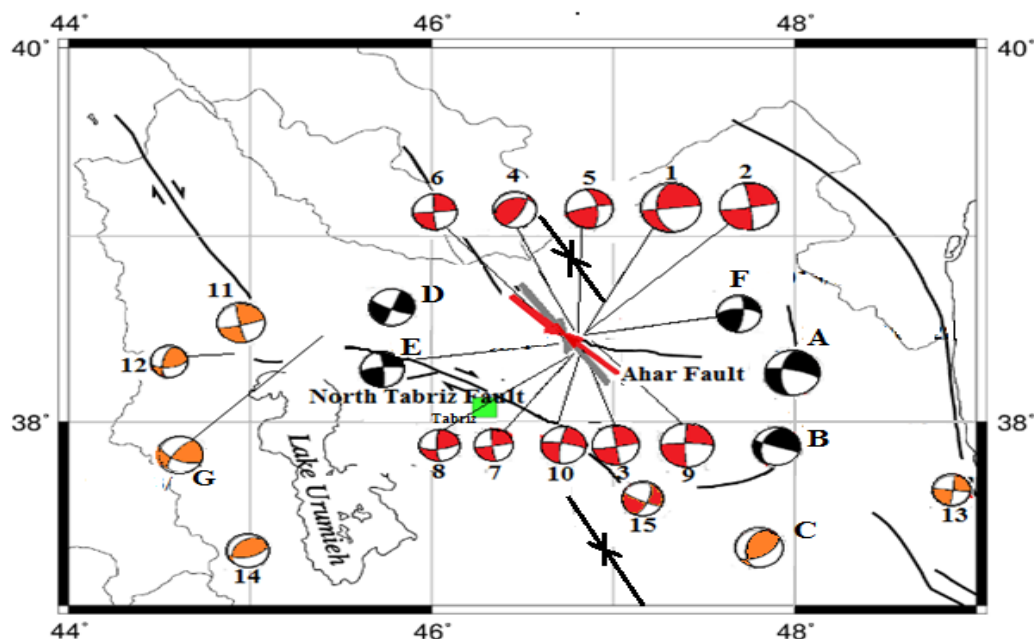
سازوکارهایی که در شکل ۲ با رنگ نارنجی مشخص شده‌اند با توجه به اینکه به‌طور کامل در منطقه مورد نظر ما و یا حاشیه آن قرار ندارند در محاسبه جهت تنش اصلی در منطقه به کار نرفته‌اند.

۳-۲ محاسبه جهت‌های اصلی تنش

به‌منظور محاسبه جهت‌های اصلی تنش، از روش وارون‌سازی چندگانه استفاده می‌کنیم. اساس این روش را در سال ۲۰۰۰ یاماچی ارائه داد و سپس ساتو و یاماچی (a و b) (۲۰۰۶)، اوتسوبو و یاماچی (۲۰۰۶)، یاماچی و ساتو (۲۰۰۶) و اوتسوبو و همکاران (۲۰۰۸) به توسعه آن پرداختند. روش وارون‌سازی چندگانه یک روش عددی

جدول ۵. اطلاعات زمین‌لرزه‌های رویداده در منطقه مورد مطالعه برگرفته از کاتالوگ تانسور گشتاور مرکزوار جهانی.

NO.	ID	Origin Time & Location Parameters						Nodal Planes		
		Date	Time	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (Km)	MW	strike (°)	dip (°)	rake (°)
1	A	19970228	12:57:24	38.3	48.06	15	6.1	184	57	-15
								283	77	-146
2	B	19970302	18:29:44	37.86	47.87	15	5.3	200	41	2
								108	89	131
3	C	20050926	18:57:11	37.36	47.77	19.8	5.2	194	43	55
								57	56	118
4	D	20080902	20:00:54	38.69	45.79	15.4	5.0	113	80	-179
								23	89	-10
5	E	20120816	17:14:17	38.35	46.81	25.2	4.8	263	78	172
								355	82	12
6	F	20130126	15:10:52	38.37	46.87	21.6	4.8	269	66	163
								6	74	25
7	G	20130418	10:39:41	38.38	45.39	20.4	4.9	114	61	155
								217	68	32



شکل ۲. سازوکارهای کانونی محاسبه شده در این مطالعه (سازوکارهای کانونی قرمز رنگ و نارنجی رنگ مشخص شده با اعداد ۱ الی ۱۵، مطابق با جدول ۳) و نیز سازوکارهای کانونی برگرفته از کاتالوگ مرکزوار جهانی (سازوکارهای کانونی مشکی رنگ و نارنجی رنگ مشخص شده با حروف A الی G، مطابق با جدول ۵). در محاسبه تنش در منطقه از سازوکارهای قرمز و مشکی استفاده شده است و سازوکارهایی که با رنگ نارنجی مشخص شده‌اند با توجه به این که از منطقه مورد نظر ما دور بودند در محاسبه جهت تنش اصلی در منطقه به کار نرفته‌اند. مستطیل سبز رنگ مرکز شهر تبریز را نشان می‌دهد. پیکان قرمز رنگ جهت تنش اصلی بیشینه در منطقه اهر-ورزقان را که با استفاده از پس‌لرزه‌ها (۳ الی ۱۰، E و F) تعیین شده، نشان می‌دهد. پیکان طوسی رنگ جهت تنش اصلی بیشینه در شمال غرب ایران را که با استفاده از زمین‌لرزه‌های اصلی (۱، ۲، ۱۵، A، B و D) تعیین شده، نشان می‌دهد. پیکان‌های مشکی رنگ جهت تنش اصلی محاسبه شده در مطالعه ظریفی و همکاران (۲۰۱۴) را نشان می‌دهند.

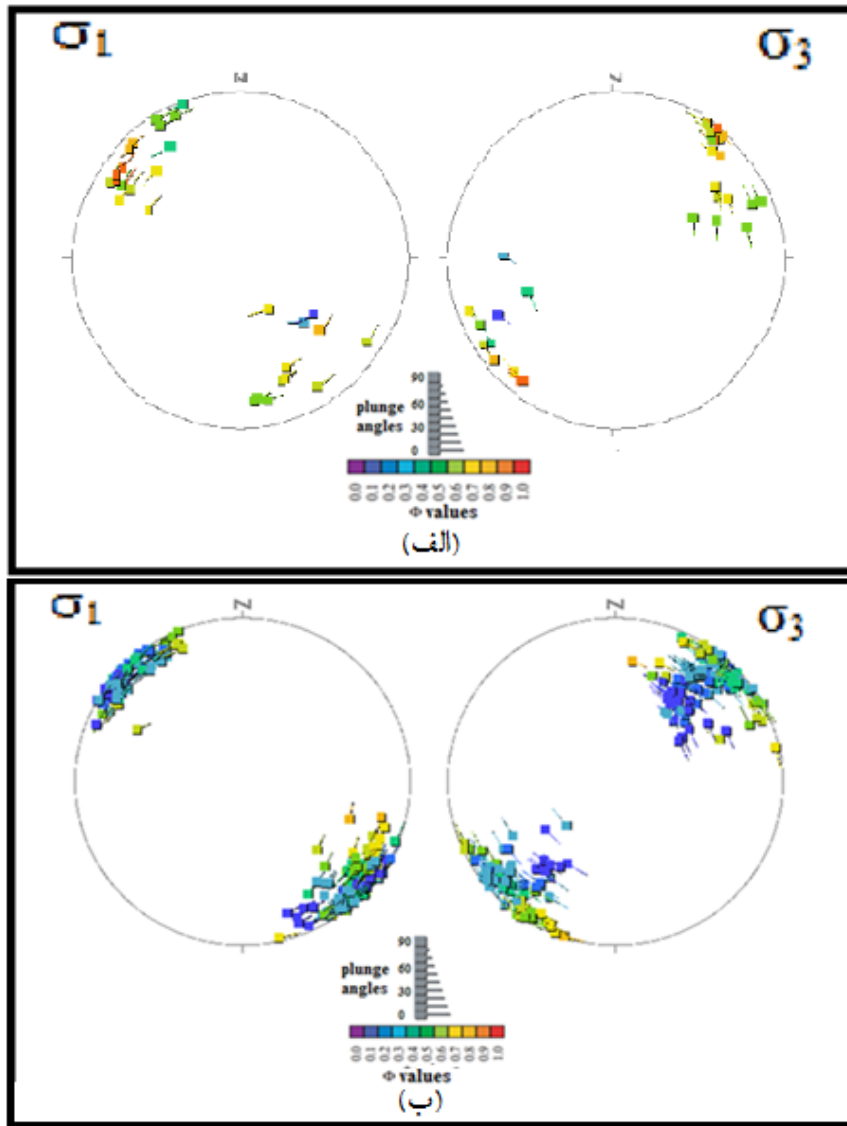
برابر با σ_1 محاسبه شد که حاکی از حرکات امتداد لغز در این ناحیه است. علاوه بر این، زاویه عدم برآزش بین مدل تنش به دست آمده و داده‌های مورد استفاده، ۱۶ درجه تعیین شد. جهت تنش اصلی بیشینه، σ_1 ، در شکل ۲ با پیکان طوسی رنگ نشان داده شده است.

حال با استفاده از سری زمین‌لرزه‌های اهر-ورزقان به بررسی وضعیت تنش در منطقه اهر-ورزقان که در بخش شمالی گسل شمال تبریز قرار گرفته است، می‌پردازیم. این کار با استفاده از سازوکارهای کانونی تعیین شده پس‌لرزه-های این منطقه که در شکل ۲ با اعداد ۳ الی ۱۰ مشخص شده‌اند و نیز سازوکارهای کانونی برگرفته از کاتالوگ مرکزوار جهانی که با حروف E و F (برای این دو پس‌لرزه امکان به دست آوردن سازوکار مناسب با توجه به خطای

ابتدا با استفاده از سازوکارهای کانونی سه رویداد اصلی محاسبه شده در این مطالعه، که در شکل ۲ با اعداد ۱ و ۲ و ۱۵ مشخص شده، و نیز سه رویداد اصلی برگرفته از کاتالوگ مرکزوار جهانی که مربوط به رویدادهای رخ داده قبل از زمین‌لرزه‌های اهر-ورزقان هستند و در شکل ۲ با حروف A، B و D نشان داده شده‌اند، به بررسی وضعیت تنش در شمال غرب ایران (طول جغرافیایی ۴۴-۴۹ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷-۴۰ درجه شمالی) پرداختیم. نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳-الف دیده می‌شود آزمون تنش اصلی σ_1 در شمال غرب ایران در ناحیه‌ای بین دریاچه ارومیه تا تالش، ۱۴۱ درجه و آزمون تنش اصلی σ_3 ، $50/2$ درجه به دست آمد. پارامتر نشان‌دهنده نسبت تنش‌ها، ϕ

و آزمون تنش اصلی σ_3 ، $42/4$ با زاویه میل $3/7$ درجه به‌دست آمد. پارامتر ϕ نیز در این منطقه $0/3$ و زاویه عدم برآزش بین مدل تنش به‌دست‌آمده و داده‌های مورد استفاده، 8 درجه محاسبه شد.

بالا و عدم پایداری با استفاده از داده‌های در دسترس محلی وجود نداشت) نشان داده شده‌اند، انجام می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۳-ب دیده می‌شود آزمون تنش اصلی σ_1 در منطقه اهر-ورزقان $132/5$ با زاویه میل $1/9$ درجه



شکل ۳. الف)، جهت‌های اصلی تنش در شمال غرب ایران به‌دست‌آمده از زمین‌لرزه‌های اصلی که آزمون σ_1 ، 141 با زاویه میل $0/1$ درجه و آزمون σ_3 ، $50/2$ با زاویه میل $9/4$ درجه است. ب)، جهت‌های اصلی تنش در منطقه اهر-ورزقان به‌دست‌آمده از پس‌لرزه‌ها که آزمون σ_1 ، $132/5$ با زاویه میل $1/9$ درجه و آزمون σ_3 ، $42/4$ با زاویه میل $3/7$ درجه است. حالت‌های تنش به‌صورت خوشه‌هایی بر روی استریوگرام‌ها نشان داده شده‌اند. هر کدام از علامت‌های قورباغه‌ای شکل که بر روی استریوگرام‌ها دیده می‌شود، یک حالت تنش را نمایش می‌دهند و بیان‌کننده تنش‌ها با جهت‌های اصلی و نسبت تنش هستند. در استریوگرام سمت چپ، موقعیت سر هر کدام از این علامت‌ها جهت σ_1 و دم آن آزمون و پلانژ جهت σ_3 را مشخص می‌کند. طول هر دم متناسب با تفاضل 90 درجه و پلانژ محور σ_3 است. نقش سر و دم هر کدام از علامت‌ها بر روی استریوگرام سمت راست جابه‌جا می‌شود. مقادیر ϕ با بازه‌های رنگی $0/1$ نشان داده شده‌اند.

برابر با ۰/۴۱ برای تانسور تنش متوسط ناحیه‌ای به‌دست-آورده است. این نتایج با نظر مکنزی (۱۹۷۲) مبنی بر وجود دو سری گسل‌های رانندگی و امتدادلغز مزدوج در خاور ترکیه و قفقاز، هم‌خوان است. علاوه بر این، ظریفی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌هایی با عمق کمتر از ۴۰ کیلومتر در محدوده زمانی ۲۰۱۲-۱۹۰۹ و نیز داده سرعت‌های GPS در محدوده زمانی ۲۰۱۱-۱۹۹۹، بزرگی و جهت‌های تنش و کرنش اصلی بیشینه را تخمین زدند. ظریفی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از وارون‌سازی تنش با بهره‌بردن از سازوکارهای کانونی، نسبت تنش در بخش شرقی محدوده مورد بررسی در آن مطالعه را به ترتیب ۰/۴۲ و ۰/۴۵ و آزیموت آن را به ترتیب ۱۴۸/۳ و ۱۴۳/۸ محاسبه کردند که با نتایج این بررسی هم‌خوانی دارد. جهت اصلی تنش بیشینه محاسبه شده در مطالعه ظریفی و همکاران (۲۰۱۴) در شکل ۲ با پیکان‌های مشکمی مشخص شده است.

۳ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی وضعیت تنش در شمال غرب ایران در منطقه اهر-ورزقان با استفاده از زمین‌لرزه‌های اصلی و نیز پس‌لرزه‌ها پرداختیم. بدین منظور ابتدا، با استفاده از وارون‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای در حوزه زمان، سازوکار کانونی ۱۵ رویداد واقع در طول جغرافیایی ۴۹-۴۴ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۴۰-۳۷ درجه شمالی و رخ داده بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ را محاسبه کردیم. سپس به‌منظور بررسی وضعیت تنش در این ناحیه، از

جهت تنش اصلی بیشینه σ_1 به‌دست‌آمده از پس‌لرزه‌ها، در شکل ۲ با پیکان قرمزرننگ نشان داده شده است. مقایسه بین جهت‌های اصلی تنش، σ_1 و σ_3 ، نسبت تنش‌ها و زاویه عدم برآزش حاصل از بررسی تنش در بخشی از شمال غرب ایران بین دریاچه ارومیه و تالش و منطقه اهر-ورزقان در دو روش در جدول ۶ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، اختلاف بین جهت‌های اصلی تنش در منطقه اهر-ورزقان در دو روش حدود ۸ درجه می‌باشد که به هم نزدیک است. این امر نشان می‌دهد که جهت‌های اصلی تنش به‌دست‌آمده حاصل از پس‌لرزه‌ها تفاوت زیادی با جهت‌های متوسط اصلی تنش در منطقه حاصل از زمین‌لرزه‌های اصلی ندارد و میزان تفاوت در محدوده خطای عدم برآزش قرار دارد. این اختلاف کم نشان‌دهنده این است که می‌توان از پس‌لرزه‌ها نیز در محاسبه جهت‌های اصلی تنش در منطقه استفاده کرد.

نتایج به‌دست‌آمده با سایر کارهای انجام شده در این منطقه هم‌خوانی مناسبی در جهت‌های اصلی تنش و نسبت تنش‌ها نشان می‌دهد. زمانی قره‌چمنی (۱۳۹۲ب) به بررسی وضعیت تنش در محدوده پهنه گسلی سیاه‌چشمه-خوی (۴۵-۴۴ درجه طول شرقی و ۴۰-۳۸ درجه عرض شمالی) که در انتهای‌ترین بخش غربی ناحیه مورد بررسی در این مطالعه قرار گرفته است پرداخت و با استفاده از داده‌های لرزه‌ای گردآوری‌شده، تحلیل وارون داده‌های حل کانونی زمین‌لرزه‌های آن ناحیه را انجام داد. متوسط رژیم تنش به‌دست‌آمده، دلالت بر چیره بودن رژیم تنش زمین‌ساختی امتدادلغز دارد (زمانی قره‌چمنی، ۱۳۹۲الف). نتیجه تحلیل تنش در این پژوهش، مقدار نسبت تنش را

جدول ۶. نتایج حاصل از بررسی وضعیت تنش در شمال غرب ایران و در منطقه اهر-ورزقان. ردیف اول وضعیت تنش در شمال غرب ایران به‌دست‌آمده از زمین‌لرزه‌های اصلی و ردیف دوم وضعیت تنش در منطقه اهر-ورزقان به‌دست‌آمده از پس‌لرزه‌ها را نشان می‌دهد.

No.	Azimuth of σ_1	Azimuth of σ_3	stress ratio	misfit angle
1	141	50.2	0.6	16
2	132.5	42.4	0.3	8

مرکز لرزه‌نگاری کشوری برای در اختیار قرار دادن داده‌ها تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

زمانی قره‌چمنی، ب.، ۱۳۹۲ الف، مدل زمین‌ساخت فلات آذربایجان (شمال گسل تبریز و جنوب ارس): مجله علوم زمین، ۲۲(۸۷)، ۴۱-۵۰.

زمانی قره‌چمنی، ب.، ۱۳۹۲ ب، بررسی وضعیت تنش در محدوده پهنه گسلی سیاه چشمه-خوی (شمال باختر ایران) و استفاده از روش تحلیل جدایش تنش‌ها در جدایش تنش‌های نوزمین‌ساخت از تنش‌های دیرین: فصلنامه علوم زمین، ۲۳(۸۹)، ۷۵-۸۸.

Angelier, J., 1975, Sur l'analyse de mesures recueillies dans des sites faillés: l'utilité d'une confrontation entre les méthodes dynamiques et cinématiques: C. R. Acad. Sci. Paris, D, **281**, 1805-1808. (Erratum: 1976. C.R. Acad. Sci. Paris, D, **283**, 466).

Angelier J., 1984, Tectonic analysis of fault slip data sets: J. Geophys. Res., **89**, 5835-5848.

Angelier J., 1990, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress—III. A new rapid direct inversion method by analytical means: Geophys. J. Int., **103**, 363-376.

Angelier J., 2002, Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress IV—A new method free of choice among nodal planes: Geophys. J. Int., **150**, 588-609.

Armijo, R., and Cisternas, A., 1978, Unprobleme inverse en microtectonique cassante: C. R. Acad. Sci. Paris, D, **287**, 595-598.

Bouchon M., 1981, A simple method to calculate Green's function for elastic layered media: Bulletin of the Seismological Society of America, **71**, 959-971.

Carey, E., and Brunier, B., 1974, Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliquée à

پارامترهای چشمه زمین‌لرزه‌های اصلی تعیین شده در این مطالعه و نیز رویدادهای برگرفته از GCMT استفاده کرده و با به‌کارگیری روش وارون‌سازی چندگانه، جهت‌های اصلی تنش را تعیین کردیم. در شمال غرب ایران، در ناحیه‌ای بین دریاچه ارومیه و تالش، آزیموت محور تنش σ_1 ، 141° درجه و آزیموت محور تنش σ_3 ، $50/2^\circ$ درجه به‌دست آمده است. علاوه بر این، پارامتر ϕ که نشان‌دهنده نسبت تنش‌ها است، $0/6$ به‌دست آمد. این مقدار نسبت تنش‌ها حاکی از غالب بودن حرکات امتدادلغز در این ناحیه است. از سازوکارهای کانونی تعیین شده پس‌لرزه‌های اهر-ورزقان نیز برای بررسی وضعیت تنش به‌صورت جداگانه استفاده کردیم. با استفاده از این پس‌لرزه‌ها، آزیموت تنش اصلی σ_1 در منطقه اهر-ورزقان $132/5^\circ$ درجه و آزیموت تنش اصلی σ_3 ، $42/4^\circ$ درجه به‌دست آمد. پارامتر ϕ نیز در این منطقه $0/3$ تعیین شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده آن است که جهت‌های اصلی تنش به‌دست‌آمده حاصل از پس‌لرزه‌ها تفاوت زیادی با جهت‌های اصلی حاصل از زمین‌لرزه‌های اصلی ندارد. تفاوت در نسبت تنش‌ها نشان‌دهنده این است که بیشتر پس‌لرزه‌های اهر-ورزقان دارای مؤلفه بیشتری از حرکات معکوس نسبت به زمین‌لرزه‌های اصلی ثبت شده در مناطق هم‌جوار هستند. جهت حرکت امتدادلغز گسل‌های راست-گرد که جهت آنها شرقی-غربی یا شمال غربی-جنوب شرقی است با جهت تنش به‌دست‌آمده کاملاً توجیه‌پذیر است. نتایج این مطالعه در خصوص جهت‌های اصلی تنش و نسبت تنش‌ها همانند سایر بررسی‌های انجام شده حاکی از غالب بودن حرکات امتدادلغز در این ناحیه از کشورمان دارد.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح شماره ۲۶۹۷۳/۱/۰۱ می‌باشد. بدین وسیله از موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و همچنین

- Michael A. J., 1987, Use of focal mechanisms to determine stress: A control study: *J. Geophys. Res.*, **92**(B1), 357–368.
- Moradi, A., Hatzfeld, D., and Tatar, M., 2011, Microseismicity and seismotectonics of the North Tabriz fault (Iran): *Tectonophysics*, **506**(1-4), 22–30.
- Otsubo M., Sato, K., and Yamaji, A., 2006, Computerized identification of stress tensors determined from heterogeneous fault-slip data by combining the multiple inverse method and k-means: *J. Structural Geology*, **28**, 991–997.
- Otsubo M., Yamaji, A., and Kubo, A., 2008, Determination of stresses from heterogeneous focal mechanism data: An adaptation of the multiple inverse method: *Tectonophysics*, **457**, 150–160.
- Reilinger, R. E., McClusky, S. C., and Souter, B. J., 1997, Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements: *Geophysical Research Letters*, **24**(14), 1815–1818.
- Sokos E., Zahradnic, J., 2008, ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data: *Computers and Geosciences*, **34**, 967–977.
- Sokos E., Zahradník, J., 2013, Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software: *Seismological Research Letters*, **84**(4), 656–665.
- Vernant Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Chery, J., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman: *Geophys. J. Int.*, **157**, 381–398.
- Yamaji A., Sato, K., 2006, Distances for the solutions of stress tensor inversion in relation to misfit angles that accompany the solutions: *Geophys. J. Int.*, **167**, 913–942.
- l'étude d'une population de failles: *C.R. Acad. Sci. Paris*, D, **279**, 891–894.
- Carey, E., 1976, Analyse numerique d'un modele m'ecanique el'ementaire applique a l'etude d'une population de failles: Calcul d'un tenseur moyen de contraintes 'a partir des stries de glissement: Thesis, Universit'e de Paris Sud, 138 pp.
- Gephart J. W., and Forsyth, D. W., 1984, An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence: *J. Geophys. Res.*, **89**, 9305–9320.
- Jackson J., Haines, J., and Holt, W., 1995, The accommodation of Arabia–Eurasia plate convergence in Iran: *J. Geophys. Res.*, **100**(15), 205–219.
- Kagan, Y. Y., 1991, 3-D rotation of double couple earthquake sources: *Geophys. J. Int.*, **106**(3), 709–716.
- Kikuchi M., and Kanamori, H., 1991, Inversion of complex body waves—III: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **81**, 2335–2350.
- Masson F., Chery, J., Hatzfeld, D., Martinod, J., Vernant, P., Tavakoli, F., and Ghafory-Ashtiani, M., 2005, Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from earthquakes and geodetic data: *Geophys. J. Int.*, **160**, 217–226.
- McClusky, S., et al., 2000, Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus: *J. Geophys. Res.*, **105**, 5695–5719.
- McGarr, A., and Gay, N. C., 1987, State of the stress in the earth's crust: *Annual Review of Earth and Planetary Science*, **6**, 405–436.
- McKenzie D. P., 1969, The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **59**, 591–601.
- McKenzie D. P., 1972, Active tectonics of the Mediterranean region: *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **30**, 109–185.

- Zahradník, J., and S. Custódio, 2012, Moment tensor resolvability: Application to southwest Iberia: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**(3), 1235–1254.
- Zarifi, Z., Nilfouroushan, F., and Raeesi, M., 2014, Crustal stress map of Iran: Insight from seismic and geodetic computations: *Pure Appl. Geophys.*, **171**, 1219–1236.
- Yamaji A., Sato, K., Otsubo, M., 2011, Multiple Inverse Method Software Package, User's Guide.
- Zahradnik, J., Serpetsidaki, A., Sokos, E., Tselentis, G. A., 2005, Iterative deconvolution of regional waveforms and a double event interpretation of the 2003 Lefkada earthquake, Greece: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95** (1), 159–172.