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

مهسا افرا^۱، على مرادى^{**} و مهرداد پاكزاد^۲

^ادانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران آستادیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

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

چکیدہ

شناخت جهتهای اصلی تنش که تجمع آن عامل اصلی رویداد زمین لرزه محسوب می شود، سبب درک بهتر از نحوه حرکت گسل ها و سازو کارهای کانونی محتمل می شود. سازو کارهای کانونی زمین لرزهها متأثر از هندسه گسل و جهتهای تنش می باشند. لذا سازو کار-های کانونی زمین لرزهها 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 زمین لرزه در شمال غرب ایران که غالب آنها پسلرزههای رخداده در منطقه اهر-ورزقان بعد از زمین لرزههای سال ۱۳۹۱ بودند، تعیین شد. سپس، به منظور بررسی وضعیت تنش در این ناحیه، از پارامترهای چشمه زمین لرزههای اصلی تعیین شده در این مطالعه و نیز رویدادهای اصلی برگرفته از کاتالوگ تانسور گشتاور مرکزوار جهانی استفاده کرده و با به کارگیری روش وارون سازی چندگانه، جهتهای اصلی تنش محاسبه شد. در شمال غرب ایران در ناحیه بین دریاچه ارومیه تا تالش، آزیموت متوسط تنش های اصلی آ σ و σ_0 به ترتیب ۱۹۱ و ۲/۵۰ درجه با نسبت تنش ۶/۰ محاسبه شد. برای منطقه اهر-ورزقان، با استفاده از سازوکارهای کانونی تعیین شده پسلرزههای این منطقه، آزیموت تنش های اصلی آ σ_0 به منطقه اهر-ورزقان ما استفاده از سازوکارهای کانونی تعین شده پسلرزههای این منطقه، آزیموت تنش های اصلی آ σ_0 به ترتیب گا70 و باشد که به هم نزدیک است و نشان می دهد جهتهای اصلی تنش به دستآمده حاصل از پسلرزهها تفاوت زیادی با جهتهای اصلی باشد که به هم نزدیک است و نشان می دهد جهتهای اصلی تنش به دستآمده حاصل از پسلرزههای معوی یا در وارو پسلرزههای اهر ورزقان در مقابل غالب بودن مؤلفههای اصلی تنش به دستآمده حاصل از پسلرزههای معکوس در سازو کار پسلرزههای اهر ورزقان در مقابل غالب بودن مؤلفههای اصلی تنش به داست به می اصلی می موله در می وکره ای می ای وارو ای پسلرزههای اهر اور در مقابل غالب بودن مؤلفههای امی به مرفی است با جهت تنش به دستآمده کاملاً توجیه پذیر ای پسلرزههای راست گرد که جهت آنها شرقی – غربی یا شمال غربی جنوب شرقی است با جهت تنش به دستآمده کاملاً توجیه پذیر است.

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

۱ مقدمه

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 آهنگ بیش از ۲۲ میلیمتر در سال صورت می گیرد، سبب بهوجود آمدن

سامانههای پیچیدهای از گسلهای معکوس و امتدادلغز شده است. این امر بهصورت کمّی نیز با استفاده از داده-های 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

جمعیتی منطقه، بررسی پارامترهای چشمه این دو زمینلرزه حائز اهمیت خواهد بود. با دانستن سازوکار کانونی که از مهمترین پارامترهای چشمه زمینلرزه است میتوان 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 ژئو تکنیک و زمین شناسی مهندسی دارد. همچنین بررسی تنش که تجمع آن عامل اصلي رخداد زمينلرزه است در تحقيقات پيش نشانگري و پیشبینی زمینلرزه نیز دارای اهمیت خاص است. بررسی و برآورد تنش زمینساختی در یک منطقه میتواند با روشهای مختلفی انجام گیرد. رایج ترین روشها در تعیین جهتهای اصلی تنش، روشهایی هستند که از داده شکست گمانهها در اعماق سطحی (مک گار و گری، ۱۹۷۸) و یا داده سطح صیقلی استفاده می کنند. استفاده از دادههای پیشمغزه گیری، درزهداری هیدرولیکی و الگوی دهانههای آتشفشانی و تودههای نفوذی، از دیگر روش-های بررسی تنش زمین ساختی در یک منطقه است. از آن-جا که در بیشتر موارد زمینلرزهها با گسیختگیهای سطحي همراه نخواهند بود، سابقه لرزهخیزي و پسلرزههاي یک زمینلرزه بزرگ، تنها ابزار در مطالعه و بررسی وضعيت تنش در نواحي عميق است.

بنابراین، اغلب از سازو کارهای کانونی در تخمین ماهیت تانسور تنش در نواحی لرزهزا استفاده می شده است. تانسور تنش پوسته ای را نمی توان با استفاده از سازو کار کانونی یک زمین لرزه با اطمینان به دست آورد (مکنزی، ۱۹۶۹)، زیرا ممکن است سازو کار 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 فر آیند وارون سازی نیاز است تا بتوان با استفاده از تعداد زیادی زمین لرزه، تانسور تنش را به دست آورد.

لرزهای و اندازه گیریهای GPS بر آورد 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 کلاسکی و همکاران، ۲۰۰۰؛ مِیسِن و همکاران، ۲۰۰۵) و بیشتر این کوتاهشدگی در شمال این ناحیه در قفقاز (مک کلاسکی و همکاران، ۲۰۰۰؛ ریلینگر و همکاران، ۱۹۹۷) و در جنوب آن دررشته کوههای زاگرس روی میدهد. در ناحیه شمال غرب ایران گسل راستگرد شمال تبریز که بیشترین لرزهخیزی در حوالی آن متمرکز میباشد، نمود بارزی دارد. این ناحیه از ایران شاهد زمینلرزههای تاریخی و دستگاهی زیادی بوده است و دو زمینلرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ منطقه اهر – ورزقان با بزرگی بیش از ۶ که در فاصله زمانی بسیار کوتاه از یکدیگر رخ دادند، نمونهای از این زمین لرزهها می باشند. شکل ۱، توزیع زمین لرزههای تاریخی و دستگاهی با بزرگای بیش از ۴ این منطقه و گسل های ناحیه را نشان میدهد. دایره نارنجی رنگ مکان زمینلرزه و پسلرزههای اهر–ورزقان را نشان میدهد. همانطور که در شکل ۱ دیده می شود، لرزهخیزی در شمال گسل شمال تبریز بسیار کم است و فعالیتهای لرزهای 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 لرزههای تاریخی و دستگاهی ثبت شده در شبکههای جهانی و محلی، هیچ گونه فعالیت لرزهای خاصی در حوالی رومرکز این دو رویداد مشاهده نشده بود. تا این اواخر، ایستگاههای لرزهای نواریهن محدودی در شمال غرب کشور فعالیت داشته، بنابراین تعیین دقیق پارامترهای چشمه مربوط به زمین لرزههای محلی ممکن نبوده و داده معتبر کافی جهت ارزیابی کامل فعالیتهای لرزهای این ناحیه وجود نداشت. از طرف دیگر، اولین گام در تحلیل خطر لرزهای، بررسی دقیق چشمه میباشد. 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 قرمزرنگ نشان داده شدهاند. زمین-لرزههای دستگاهی (۲۰۱٤– ۱۹۰۰) با دایرههای توپر مشخص شدهاند. دایره نارنجیرنگ مکان زمینلرزه و پسلرزههای اهر– ورزقان را نشان میدهد.

مسئله وارونسازی شامل تعیین تانسور تنش مجموعهای از گسلها با جهتهای مختلف است که جهت لغزش بر روی آنها مشخص میباشد. این مسئله را اولینبار کری و برونیر (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 به کارگیری شرایطی خاص بر روی دادههای سازوکار کانونی زمینلرزهها نیز اعمال شد (آنژولیه، ۱۹۸۴؛ گفارت و فورسیت، ۱۹۸۴؛ آنژولیه،

نتایج وارونسازی تنش، به یک تانسور تنش کاهیده متشکل از چهار متغیر (محورهای اصلی تنش σ₁ م σ₃ و نسبت تنش) محدود می شود. هدف از انجام مطالعه حاضر، تعیین پارامترهای چشمه زمین لرزههای اصلی و برخی از پس لرزههای بزرگ اهر – ورزقان و تحلیل تنش لرزهای در این ناحیه است. وارون سازی تانسور گشتاور لرزهای روشی است که برای تعیین پارامترهای چشمه به-کار گرفته شد. به منظور وارون سازی خطی تانسور گشتاور در حوزه زمان، برنامه ایزولا (سوکوس و زاهرادنیک، در مورد استفاده قرار گرفت. پس از تعیین پارامترهای

چشمه زمین لرزه های این ناحیه شامل امتداد، شیب و زاویه لغزش، بررسی وضعیت تنش ممکن می شود. برای این منظور، با استفاده از روش وارون سازی چندگانه، جهت-های اصلی تنش را در شمال غرب ایران محاسبه می کنیم.

۲ روش تحقیق

۲-۱ دادهها و منطقه مورد بررسی

در این تحقیق از تعدادی از دادههای سه مؤلفهای ایستگاه-های نواریهن مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC)، ایستگاههای نواریهن شبکه لرزهنگاری پژوهشگاه بین-المللی 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 زمین لرزه در این محدوده که بین سال های 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 كاتالوگ IRSC است. بەمنظور وارونسازى خطى تانسور گشتاور در حوزه زمان، برنامه ایزولا مورد استفاده قرار می گیرد. 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 زاهرادنیک 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 می گیرد، بنابراین نیازی به

تفکیک فازها نیست. برنامه ایزولا بر اساس همین روش عمل می کند. در برنامه ایزولا رکوردهای سرعت مورد استفاده قرار می گیرند که پس از اعمال تصحیح دستگاهی بر روی آنها، با یک صافی میان گذر پالایش میشوند. پس از تبدیل رکوردهای سرعت به جابهجایی، وارونسازی خطی بر روی این جابهجاییها انجام میگیرد و جابه-جاییهای مصنوعی محاسبه میشوند. مدل پوسته به کار-رفته در این مطالعه، مدل مورد استفاده در مرکز لرزه-نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران است که برای کل ایران به صورت میانگین محاسبه شده است. این مدل شامل ۵ لایه است که مشخصه های 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 ايران 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.

مجله ژئوفيزيک ايران، جلد ١٠، شماره١، ١٣٩٥

به منظور محاسبه هر یک از سازو کارهای آورده شده در جدول ۳، وارونسازی تانسور گشتاور لرزهای برای چشمه ها در عمق ها و بازه های بسامدی مختلف انجام و پارامترهای چشمه این زمین لرزه ها محاسبه شد. بهترین بازه بسامدی با درنظر گرفتن بهترین مقدار کاهش واریانس که همان نزدیک ترین مقدار به عدد یک است، انتخاب شد. به عبارت دیگر، وارونسازی تانسور گشتاور لرزهای در بازه های بسامدی مختلف، بارها برای یک زمین لرزه انجام و جواب بهینه انتخاب شد. تقریباً در همه این بازه های بسامدی، سازو کارهای کانونی پایدار بودند. حذف یک یا دو ایستگاه و بررسی مجدد نتایج از دیگر روش های

Station	Lat (N °)	Long (E °)	Seismic Network				
B74	34 4606	47 8605	IRSC				
DZA	54.4090	47.8003	(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 ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاههای مورد استفاده در این مطالعه.

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 بهدست آمده از وارونسازی تانسور گشتاور لرزهای با استفاده از برنامه ایزولا. رنگ سازوکارهای کانونی با توجه به درصد دو زوجنیرو در بازه-های دهتایی تغییر میکند. برای نمونه، درصد دو زوجنیروی ۹۰ الی ۱۰۰ با رنگ قرمز مشخص شده است. در سه ستون انتهای جدول، نتایج بهدستآمده از تانسور گشتاور مرکزوار جهانی مربوط به رویدادهای مشترک با این مطالعه آورده شده است. مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه و نتایج بهدستآمده از تانسور مرکزوار جهانی نشاندهنده انطباق بهنسبت خوبی در سازوکارهای تعیین شده است.

افرا و همکاران

	Origin Time & Location Parameters						DC	%	1% anism	Nodal Planes (this study)			Nodal Planes		
NO	Dete	T :	ıde	tude	_	MW	%	iance	mech	study)		_	(GCM	1)	
	Date	1 ime	(N)	°E)	Depth Km)	IVI VV		Vari redi	Focal	strike (°)	dip (°)	rake (°)	strike (°)	dip (°)	rake (°)
1	20120811	12.22.15	29.42	46.91	6	6.4	67.0	80		84	90	138	84	84	170
1	20120811	12.23.13	36.43	40.81	0	0.4	07.0	80	\bigcirc	174	48	0	175	81	6
2	20120811	12:34:33	38.46	46.84	16	6.3	65.7	80	$\left(\begin{array}{c} \\ \end{array} \right)$	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	6/	69			
										255	31	130	245	50	1
5	20120811	22:24:02	38.43	46.75	10	5.3	77.7	60		352	04 02	9	345	39	1
									<u> </u>	238	02	-	234	69	149
6	20120813	1:56:10	38.47	46.66	10	4.7	91.3	60		266	90	175			
										170	00	174			
7	20120819	1:58:30	38.41	46.65	10	4.3	61.7	60	\bigcirc	02 172	00 84	2			
										83	71	- 166			
8	20121027	3:56:41	38.39	46.64	8	4.3	61.4	50	()	178	77	20			
										170		-			4.50
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	20121222	6.29.57	20.40	44.02	14	5.0	01.0	70		76	82	174	79	71	141
11	20121223	0:38:57	38.48	44.93	14	5.2	91.0	70		167	84	8	184	54	24
10	20121222	7 10 01	20.41	44.04	20	4.1	(1.2	00		83	61	147			
12	20121223	7:12:31	38.41	44.84	20	4.1	64.3	80	\bigcirc	190	62	34			
12	20120706	17.07.40	27.62	10.00	10	4.0		60		97	90	-			
13	20130706	17:07:49	37.63	48.96	10	4.0	//./		$\overline{}$	7	85	0			
										75	59	107			
14	20130927	10:02:43	37.33	44.94	18	4.4	65.8	70	\bigcirc	224	35	64			
<u> </u>									$\tilde{\mathbf{O}}$	21	67	-10		<u> </u>	1
15	20131108	10:12:34	37.8	47.17	6	4.4	96.0	70		115	81	- 157			

نتایج بهدست آمده از تانسور گشتاور مرکزوار جهانی مربوط به رویدادهای مشترک با این مطالعه آورده شده است. مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه و نتایج بهدست- کاهش واریانس و درصد دو زوجنیروی بالا و عدم قطعیتهای انجام شده نیز بهمنزله معیاری در پایداری جوابها درنظر گرفته شد. در سه ستون انتهای جدول ۳،

همبستگی، مطابق با جواب بهینه است. هر جواب یذیرفتنی با استفاده از زاویه کیگن با جواب بهینه مقایسه می شود (کیگن، ۱۹۹۱). شاخص تغییریذیری سازوکار کانونی (Focal-Mechanism Variability Index) بهصورت متوسط زاویه کیگن همه جوابهای پذیرفتنی تعریف می شود. شاخص تغییریذیری زمانی- مکانی (STVAR) اندازه ناحیه زمان- مکان را مطابق با آستانه همبستگی مشخص و مستقل از تغییر سازوکار کانونی اندازه می گیرد. 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 تغييريذيري زماني-مكاني، مكمل شاخص تغییریذیری سازوكار كانونی است. با این ترتيب، جوابهايي مناسبترند كه 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 بهصورت مجزا در جدول ۴ مشخص شدهاند. برای نمونه، مقادیر FMVAR و STVAR برای زمین لرزه شماره ۹ به تر تیب ۴ ± ۶ و ۰/۲۱ است. علاوه براین، شاخص عدد وضعیت برای این زمین لرزه برابر با ۲/۴ است. همان طور که پیش از این بیان شد، پایین بودن این شاخصها، نشاندهنده جوابهای بهینه تر است. شاخص FMVAR برای زمین لرزه های ۱، ۴، ۸ و ۱۲ نسبت به سایر زمین لرزهها مقدار بالاتری دارد. زاویه کیگن نیز که کمینه چرخش بین دو سازوکار را بیان می کند، برای زمین لرزه شماره ۱ بالاترین مقدار را به خود اختصاص داده است. با مقایسه عدم قطعیتهای آورده شده در جدول ۴، می توان بیان کرد که برای زمین لرزه شماره ۶ بهترین سازوکار کانونی بهدست آمده است، زیرا سه شاخص STVAR ،FMVAR و عدد وضعیت برای آن مقدار کمتری دارد. آمده از تانسور گشتاور مرکزوار جهانی نشاندهنده انطباق بهنسبت خوبی در سازوکارهای تعیین شده است.

۲-۲ کیفیت سازو کارهای تعیین شده

بسیاری از کاربران برنامه ایزولا، کیفیت جوابهایشان را تنها با استفاده از انطباق شکل موجها بررسی می کنند. اگر از تعداد اندکی شکل موج استفاده شود، انطباق آنها خوب خواهد بود، در صورتی که سازو کارهای کانونی ممکن است كاملاً نادرست باشند. بهمنظور بررسی قطعیت جوابها، انطباق شکل موجها (کاهش واریانس)، عدد وضعیت (Condition number) و نیز تغییریذیری مکانی- زمانی جوابها با هم ترکیب میشوند. کاهش واریانس و عدد وضعیت معیارهای مکمل کیفیت جوابها هستند. عدد وضعیت از ماتریس توابع گرین، G، بهدست می آید که شکل موجهای مشاهدهای (داده U) و پارامتر -های مدل، m، را به هم ارتباط میدهد. این پارامتر، قطعیت جواب ها را از نظر چیدمان چشمه- ایستگاه، محدوده بسامدی و مدل پوسته به کار رفته بررسی می کند و به داده خاص به کار رفته در هر وارونسازی وابسته نيست. اين امر بدين معنا است كه عدد وضعيت بدون استفاده از شکل موجهای واقعی قابل محاسبه است (زاهرادنیک و کوستودیو، ۲۰۱۲). مقادیر بسیار بزرگ و بسيار كوچك عدد وضعيت بهترتيب نشاندهنده مسئله-های بدوضع و خوشوضع -ill- and well) conditioned problems) هستند. یکی دیگر از معیار-های مفید در بررسی کیفیت جوابها، با کمّیسازی تغییر-پذیری جواب سازوکار کانونی در مجاورت بهترین مکان و زمان چشمه منطبقشده حاصل می شود. در برنامه ایزولا، با استفاده از نمودار همبستگی، بر روی تغییرپذیری سازوكار كانوني پيرامون جواب بهينه تمركز بيشتري انجام میشود. جوابهای پذیرفتنی همبستگی بین ۰/۹ و مقدار آستانه ×corr دارند که corr بزرگ ترین مقدار

جدول ٤. عدم قطعیت پارامترهای چشمه زمینارزههای بررسی شده در این مطالعه. زاویه کیگن، کمینه چرخش بین دو سازوکار را بیان میکند. عدد وضعیت از ماتریس توابع گرین بهدست می آید 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 می شود. شاخص تغییرپذیری زمانی- مکانی (STVAR) اندازه ناحیه زمان- مکان را مطابق با آستانه همبستگی مشخص و مستقل از تغییر سازوکار کانونی اندازه می گیرد. 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 جستجوشده بهنجار شده است.

افرا و همکاران

No.	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Kagan angle, Mean (°)	CN	FMVAR	STVAR	
1	84 ± 12	90 ± 22	138 ± 8	10.1650	2.2	10 5	0.20	
1	174 ± 16	47 ± 14	0 ± 35	12.1659	2.3	12 ± 7	0.29	
2	81 ± 12	87 ± 5	-175 ± 14	6 0227	2.1	0 . 0	0.26	
2	350 ± 10	85 ± 5	-3 ± 18	6.0337	2.1	8 ± 8	0.36	
2	86 ± 5	84 ± 5	-176 ± 14	5 (172	2.2	8 . 2	0.1	
3	355 ± 5	86 ± 5	-6 ± 15	5.0475	2.2	8 ± 3	0.1	
4	31 ± 12	67 ± 9 69 ± 12 7 7005	2	12 + 6	0.21			
4	255 ± 18	30 ± 8	130 ± 23	1.1235	2	12 ± 6	0.31	
F	352 ± 8	64 ± 5	9 ± 11	5 1215	17	6.2	0.07	
5	258 ± 8	81 ± 7	153 ± 10	5.1315	1./	6 ± 3	0.27	
6	266 ± 12	90 ± 5	-175 ± 14	6 6959	2.7	2 ± 1	0.14	
0	176 ± 11	85 ± 5	0 ± 12	0.0858			0.14	
7	82 ± 11	88 ± 6	174 ± 16	7 7529	3.6	7 ± 6	0.21	
/	172 ± 13	84 ± 7	2 ± 17	1./558			0.31	
0	83 ± 10	71 ± 9	166 ± 20	9.9068	2.9	12 ± 6	0.08	
8	177 ± 14	76 ± 11	19 ± 20				0.08	
0	271 ± 10	82 ± 7	-174 ± 13	0.0225	2.4	6 + 1	0.21	
9	180 ± 10	84 ± 10	-8 ± 18	9.0525	2.4	0 ± 4	0.21	
10	280 ± 8	81 ± 9	-169 ± 8	6 8606	2.6	5 ± 2	0.12	
10	188 ± 7	79 ± 7	-9 ±10	0.8000			0.12	
11	76 ± 10	82 ± 5	174 ± 14	6 2694	27	4 + 2	0.26	
11	166 ± 14	84 ± 6	8 ± 13	0.3084	5.7	4 ± 3	0.20	
10	83 ± 13	61 ± 10	147 ± 16	0.0221	3.3	11 ± 9	0.20	
12	190 ± 11	61 ± 10	33 ± 13	9.9221			0.29	
12	97 ± 9	90 ± 3	-175 ± 16	5 292	1.9	5 ± 4	0.26	
15	7 ± 8	85 ± 3	0 ± 13	5.582			0.26	
14	75 ± 13	59 ± 8	107 ± 16	7.0271	2	9 ± 5	0.28	
14	224 ± 15	34 ± 4	64 ± 19	/.02/1			0.30	
15	21 ± 13	67 ± 11	-10 ± 20	0.0324	2.4	0 ± 4	0.1	
15	114 ± 13	80 ± 9	-156 ± 19	9.9324	2.4	9±4	0.1	

(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 قرمزرنگ و نارنجیرنگ مشخص شده با اعداد ۱ الی ۱۵، مطابق با جدول ۳) و نیز سازوکار-های کانونی برگرفته از کاتالوگ مرکزوار جهانی مشخص برای تفکیک تنش ها از داده های ناهمگن لغزش گسل رد نظر ما است و از وارون سازی کلاسیک تانسور تنش بهره می-اصلی در گیرد که مجموع زوایای عدم برازش بین جهت های لغزش محاسبه ای و مشاهده ای را کمینه می کند. این زاویه ها، برای اطمینان از نتایج وارون سازی تانسور تنش مهم هستند. مشکل استفاده از داده های سازو کار در وارون-وارون- سازی تانسور تنش این است که تعیین صفحه اصلی گسل ن را در از دو صفحه ممکن، آسان نیست. بدین منظور ابتدا فرض ی (d و ه می شود هر دو صفحه کمکی مانند صفحه گسل عمل

کرده، سپس صفحهای که گسلخوردگی روی آن

محتمل تر است برای هر سازوکار تعیین می شود.

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.

۲-۳ محاسبه جهتهای اصلی تنش

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

		Origin Time & Location Parameters							Nodal Planes		
NO.	ш	Date	Time	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (Km)	MW	strike (°)	dip (°)	rake (°)	
1		10070220	10.57.04	28.2	48.00	15	6.1	184	57	-15	
1	A	19970228	12:57:24	38.3	48.06	15	0.1	283	77	-146	
2	Б	10070202	19.20.44	27.96	17 97	15	5.2	200	41	2	
2	Б	19970302	16:29:44	37.80	47.87	15	5.5	108	89	131	
2	0	20050026	10 57 11	27.26	47.77	10.0	5.2	194	43	55	
3	C	20050926	18:57:11	37.36	47.77	19.8		57	56	118	
4	D	20080002	20.00.54	28 (0	45 70	15 4	5.0	113	80	-179	
4		20080902	20:00:54	38.09	45.79	15.4	5.0	23	89	-10	
5	F	20120816	17.14.17	29.25	46.91	25.2	4.9	263	78	172	
5	E	20120816	1/:14:1/	38.33	40.81	25.2	4.8	355	82	12	
(Б	20120126	15,10,52	29.27	46.97	21.6	4.9	269	66	163	
0	Г	20130126	15:10:52	38.37	46.87	21.6	4.8	6	74	25	
7		20120410	10 20 41	29.29	45.20	20.4	1.0	114	61	155	
/	G	20130418	10:39:41	38.38	45.39	20.4	4.9	217	68	32	

جدول ٥. اطلاعات زمین لرزه های رویداده در منطقه مورد مطالعه برگرفته از کاتالوگ تانسور گشتاور مرکزوار جهانی.

افرا و همکاران



شکل ۲. سازوکارهای کانونی محاسبه شده در این مطالعه (سازوکارهای کانونی قرمزرنگ 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 شده با حروف A الی G، مطابق با جدول مورد نظر ما دور بودند در محاسبه جهت تنش اصلی در منطقه بهکار نرفتهاند. مستطیل سبزرنگ مرکز شهر تبریز را نشان می دهد. پیکان قرمزرنگ جهت تنش اصلی بیشینه در منطقه اهر – ورزقان را که با استفاده از ۳ الی ۵۰، E و F) تعیین شده، نشان می دهد. پیکان طوسی رنگ جهت تنش اصلی غرب ایران را که با استفاده از زمین لرزههای اصلی (۲، ۱۵، ۵۰ و D) تعیین شده، نشان می دهد. پیکان طوسی رنگ جهت تنش اصلی محاسبه شده در مطالعه ظریفی و همکاران (۲۰۱۶) را نشان می دهد. پیکان های مشکی رنگ جهت تنش اصلی محاسبه شده در

برابر با ۰/۶ محاسبه شد که حاکی از حرکات امتدادلغز در این ناحیه است. علاوه بر این، زاویه عدم برازش بین مدل تنش بهدستآمده و دادههای مورد استفاده، ۱۶ درجه تعیین شد. جهت تنش اصلی بیشینه، σ_1 ، در شکل ۲ با پیکان طوسیرنگ نشان داده شده است.

حال با استفاده از سری زمین لرزه های اهر – ورزقان به بررسی وضعیت تنش در منطقه اهر – ورزقان که در بخش شمالی گسل شمال تبریز قرار گرفته است، می پردازیم. این کار با استفاده از سازو کارهای کانونی تعیین شده پسلرزه -های این منطقه که در شکل ۲ با اعداد ۳ الی ۱۰مشخص شدهاند و نیز سازو کارهای کانونی بر گرفته از کاتالو گ مرکزوار جهانی که با حروف E و F (برای این دو پسلرزه امکان به دست آوردن سازو کار 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 رخداده قبل از زمین لرزههای 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– مجا درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۴۰– ۳۷ درجه شمالی) پرداختیم. نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۳ – الف دیده می شود آزیموت تنش اصلی مرد ایش، ۱۴۱ درجه و آزیموت تنش اصلی مربر درجه بهدست آمد. پارامتر نشان دهنده نسبت تنش ها، φ، درجه بهدست آمد. پارامتر نشان دهنده نسبت تنش ها، φ،

بالا و عدم پایداری با استفاده از دادههای دردسترس محلی وجود نداشت) نشان داده شدهاند، انجام می گیرد. همان-طور که در شکل ۳–ب دیده می شود آزیموت تنش اصلی مر در منطقه اهر– ورزقان ۱۳۲/۵ با زاویه میل ۱/۹ درجه

و آزیموت تنش اصلی σ_3 ، ۴۲/۴ با زاویه میل ۳/۷ درجه بهدست آمد. پارامتر φ نیز در این منطقه ۲/۳ و زاویه عدم برازش بین مدل تنش بهدست آمده و دادههای مورد استفاده، ۸ درجه محاسبه شد.



شکل ۳. (الف)، جهتهای اصلی تنش در شمال غرب ایران بهدستآمده از زمین لرزههای اصلی که آزیموت σ₁ تا با زاویه میل ٥/١ درجه و آزیموت $σ_3$ ، ٥/٢ با زاویه میل ٩/٤ درجه است. (ب)، جهتهای اصلی تنش در منطقه اهر – ورزقان بهدستآمده از پسلرزهها که آزیموت $σ_1$ ، ۱/۵ با زاویه میل ۱/۹ درجه و آزیموت $σ_3$ ، ۲/٤ با زاویه میل ۳/۷ درجه است. حالتهای تنش به صورت خوشههایی بر روی استریوگرامها نشان داده شدهاند. هر کدام از علامتهای قورباغهای شکل که بر روی استریوگرامها دیده می شود، یک حالت تنش را نمایش می دهند و بیان کننده تنش ها با جهتهای اصلی و نسبت تنش هستد. در استریوگرام سمت چپ، موقعیت سر هر کدام از این علامت ها جهت ₁ و دم آن آزیموت و پلانژ جهت $σ_3$ را مشخص می کند. طول هر دم متناسب با تفاضل ۹۰ درجه و پلانژ محور $σ_3$ است. نقش سر و دم هر کدام از علامتها بر روی استریوگرام سمت راست جابهجا می شود. مقادیر φ با بازه های رنگی ۱/۰ نشان داده شدهاند.

جهت تنش اصلی بیشینه σ_1 بهدست آمده از پسلرزهها، در شکل ۲ با پیکان قرمزرنگ نشان داده شده است. مقایسه بین جهتهای اصلی تنش، σ_1 و σ_0 ، نسبت تنشها و زاویه عدم برازش 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. همان-طور که مشخص است، اختلاف بین جهتهای اصلی تنش در منطقه اهر– ورزقان در دو روش حدود ۸ درجه می-باشد که به هم نزدیک است. این امر نشان می دهد که جهتهای اصلی تنش به دست آمده حاصل از پسلرزهها تفاوت زیادی با جهتهای متوسط اصلی تنش در منطقه محدوده خطای عدم برازش قرار دارد. این اختلاف کم نشاندهنده این است که می توان از پسلرزهها نیز در محلوده خطای عدم برازش قرار دارد. این اختلاف کم

نتایج بهدست آمده با سایر کارهای انجام شده در این منطقه همخوانی مناسبی در جهت های اصلی تنش و نسبت تنش ها نشان می دهد. زمانی قره چمنی (۱۳۹۲ب) به بررسی وضعیت تنش در محدوده پهنه گسلی سیاه چشمه – خوی (۴۵ – ۴۴ درجه طول شرقی و ۴۰ – ۳۸ درجه عرض شمالی) که در انتهایی ترین بخش غربی ناحیه مورد بررسی در این مطالعه قرار گرفته است پرداخت و با استفاده از داده های لرزهای گرد آوری شده، تحلیل وارون داده های حل کانونی زمین لرزه های آن ناحیه را انجام داد. متوسط رژیم تنش به دست آمده، دلالت بر چیره بودن رژیم تنش زمین ساختی امتدادلغز دارد (زمانی قره چمنی، ۱۳۹۲ الف).

برابر با ۴۱/۰ برای تانسور تنش متوسط ناحیهای بهدست-آورده است. این نتایج با نظر مکنزی (۱۹۷۲) مبنی بر وجود دو سری گسل.های راندگی 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 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 پیکان های مشکی مشخص شده است.

مجله ژئوفيزيک ايران، جلد ١٠، شماره١، ١٣٩٥

۳ نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی وضعیت تنش در شمال غرب ایران در منطقه اهر – ورزقان با استفاده از زمین لرزههای اصلی و نیز پسلرزهها پرداختیم. بدین منظور ابتدا، با استفاده از وارون سازی تانسور گشتاور لرزهای در حوزه زمان، سازو کار کانونی ۱۵ رویداد واقع در طول جغرافیایی ۴۹ ۴۴ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۴۰ – ۳۷ درجه شمالی و رخداده بین سالهای ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ را محاسبه کردیم. سپس به منظور بررسی وضعیت تنش در این ناحیه، از

جدول ٦. 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 یسلرزهها را نشان می دهد.

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 می گردد.

منابع

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

زمانی قره چمنی، ب.، ۱۳۹۲ب، 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 faill'es: l'utilit'e d'une confrontation entre les m'ethodes dynamiques et cin'ematiques: 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 th'eorique et num'erique d'un mod'ele m'ecanique 'el'ementaire appliqu'e `a

یارامترهای چشمه زمینلرزههای اصلی تعیین شده در این مطالعه و نیز رویدادهای بر گرفته از GCMT استفاده کرده و با به کارگیری روش وارونسازی چندگانه، جهتهای اصلی تنش را تعیین کردیم. در شمال غرب ایران، در ناحیهای بین دریاچه ارومیه و تالش، آزیموت محور تنش درجه و آزیموت محور تنش σ_3 ، ۱۴۱ درجه و آزیموت محور تنش σ_1 بهدست آمده است. علاوه بر این، یارامتر φ که نشان-دهنده نسبت تنشرها است، ۰/۶ بهدست آمد. این مقدار نسبت تنش ها حاکی از غالب بودن حرکات امتدادلغز در این ناحیه است. از سازوکارهای کانونی تعیینشده پسلرزههای اهر – ورزقان نیز برای بررسی وضعیت تنش به -صورت جداگانه استفاده کردیم. با استفاده از این پسلرزه-ها، آزیموت تنش اصلی $\sigma_{
m l}$ در منطقه اهر – ورزقان ۱۳۲/۵ درجه و آزیموت تنش اصلی σ٫، ۴۲/۴ درجه به-دست آمد. پارامتر arphi نیز در این منطقه ۰/۳ تعیین شد. نتایج حاصل نشاندهنده آن است که جهتهای اصلی تنش بهدست آمده حاصل از يسلرزهها تفاوت زيادي با جهتهای اصلی حاصل از زمینلرزههای اصلی ندارد. تفاوت در نسبت تنشرها نشاندهنده این است که بیشتر يسلرزههاي اهر – ورزقان داراي مؤلفه بيشتري از حركات معکوس نسبت به زمین لرزههای اصلی ثبت شده در مناطق همجوار هستند. جهت حرکت امتدادلغز گسل های راست-گرد که جهت آنها شرقی- غربی یا شمال غربی- جنوب شرقی است با جهت تنش بهدست آمده کاملاً توجیه پذیر است. نتایج این مطالعه در خصوص جهتهای اصلی تنش و نسبت تنش ها همانند سایر بررسی های انجام شده حاکی از غالب بودن حركات امتدادلغز در این ناحیه از كشورمان دار د.

تش**کر و قدردانی** این مقاله مستخرج از طرح شماره ۲۶۹۷۳/۱/۰۱ میباشد. بدینوسیله 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 Reseach 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 Geoseiences, **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 appliqu'e 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.