

چکیده

امروزه کاربردهای بسیاری برای اطلاعات میدان تنش وجود دارد. شناسایی و مدیریت مخزن، پایداری معادن، تونل، گمانه‌ها و مکان‌های دفن زباله، کالیبراسیون مدل‌های ژئومکانیکی - عددی، شبیه‌سازی‌های چهاربعدی هیدروترمو مکانیکی و ارزیابی خطر زلزله با استفاده از لغزش گسلی و تجزیه و تحلیل پتانسیل شکست مثال‌هایی از این کاربردها هستند. با توجه به پروژه‌های جاری در زمینه ارزیابی تحلیل خطر زلزله در منطقه مورد مطالعه با رهیافت مطالعات نرخ لغزش و دگرشکلی توزیع شده، بر اهمیت استفاده از پایگاه داده اطلاعات تنش به صورت به روز شده و جامع، افزوده است. در این مطالعه کوشش شده است که اطلاعات موجود درباره میدان تنش در منطقه مکران شامل داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها و وارون‌سازی آنها به پایگاه داده موجود که در پروژه جهانی تنش دسترس قرار گرفته است، اضافه شود. به این ترتیب پایگاه داده‌های تنش در منطقه مورد نظر تا حد ممکن تکمیل شده و زمینه برای بهبود مطالعات مربوطه فراهم آمده است. در آخر نتایج به دست آمده با مطالعات انجام شده در منطقه به روش وارون‌سازی تنش مقایسه شده و همخوانی مناسبی بین نتایج مشاهده شده است.

واژگان کلیدی: تنش تکنونیک، تنش تکنونیک، زمین‌لرزه، سازوکار کانونی، مکران، نقشه‌ی جهانی تنش.

تکمیل پایگاه داده‌ی تنش در مکران با نگرشی بر سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌های منطقه

شاهرخ پوربیرانوند

استادیار، پژوهشکده زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و

مهندسی زلزله، تهران، ایران،

beyranvand@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

واقع می‌شود. این پروژه، کاری مشترک بین صنعت و دانشگاه است که هدف آن توصیف الگوی تنش پوسته‌ای و درک چشمه‌های تنش است. WSM در سال ۱۹۸۶ به عنوان پروژه برنامه بین‌المللی لیتوسفر (ILP) تحت رهبری ماری لو زوباک آغاز شد. از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۸ این پروژه متعلق به آکادمی علوم و علوم انسانی هایدلبرگ به سرپرستی کارل فوج و فریدمن ونزل بود. از سال ۲۰۱۲ WSM عضو سیستم جهانی داده ICSU است [۱].

تمام اطلاعات تنش در قالب استاندارد و با کیفیت رتبه‌بندی شده برای قابلیت اعتمادپذیری و مقایسه در مقیاس جهانی، تجزیه و تحلیل شده است. نسخه جدید پایگاه داده‌ی WSM در سال ۲۰۱۶ شامل ۴۲۸۷۰ رکورد در ۴۰ کیلومتر فوقانی پوسته زمین است که تقریباً دو برابر نسخه قبلی پایگاه داده‌ی WSM در سال ۲۰۰۸ است. به‌ویژه رکوردهای جدیدی از داده از تقریباً

با توجه به کاربردهای بسیاری که امروزه برای اطلاعات میدان تنش وجود داشته و نیز پروژه‌های جاری در زمینه‌های مرتبط که ارتباط تنگاتنگی با موضوع تنش پوسته‌ای تکنونیک دارد استفاده از پایگاه به‌روزرسانی شده‌ای از اطلاعات تنش اهمیت روزافزونی پیدا کرده است. در این مطالعه کوشش شده است که پایگاه داده‌های تنش در منطقه مورد نظر تا حد ممکن با استفاده از منابع گوناگون داده، تکمیل شود. یکی از منابعی که اطلاعات گسترده‌ای را در این زمینه به صورت رایگان در اختیار قرار می‌دهد پروژه‌ی نقشه جهانی تنش است.

نقشه جهانی تنش (WSM) یک مجموعه جهانی از اطلاعات مربوط به تنش حال حاضر پوسته‌ای است که از سال ۲۰۰۹ در مرکز هلمولتر GFZ (مرکز تحقیقات علوم زمین آلمان) در پوستانم در بخش مخاطرات لرزه‌ای و میدان تنش مورد راهبری

دارد که بر اساس معیارهای رتبه‌بندی کیفیت در این پروژه (جدول‌های ۱-۴) به‌جز یکی که درجه B را دارد (داده چاه) بقیه دارای رتبه C یا پایین‌تر هستند [۴].

WSM اطلاعات مربوط به تنش پوسته زمان حاضر را از طیف گسترده‌ای از شاخص‌های تنش گردآوری می‌کند. اساس تدوین، برنامه رتبه‌بندی کیفیت WSM برای تضمین مقایسه شاخص‌های مختلف تنش است که منعکس‌کننده‌ی وضعیت تنش توده‌های سنگی بسیار متفاوت است. شاخص‌های تنش به چهار دسته طبقه‌بندی می‌شوند [۵]:

- سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه؛
- برون‌شکست چاه^۲ و شکستگی ناشی از حفاری^۳؛
- اندازه‌گیری تنش برجا^۴: بیش‌مغزه‌گیری^۵، شکست هیدرولیکی^۶، شکاف گمانه^۷؛
- داده‌های زمین‌شناسی جوان از تجزیه و تحلیل لغزش و به‌خط‌شدگی در یخچه‌های آتشفشانی.

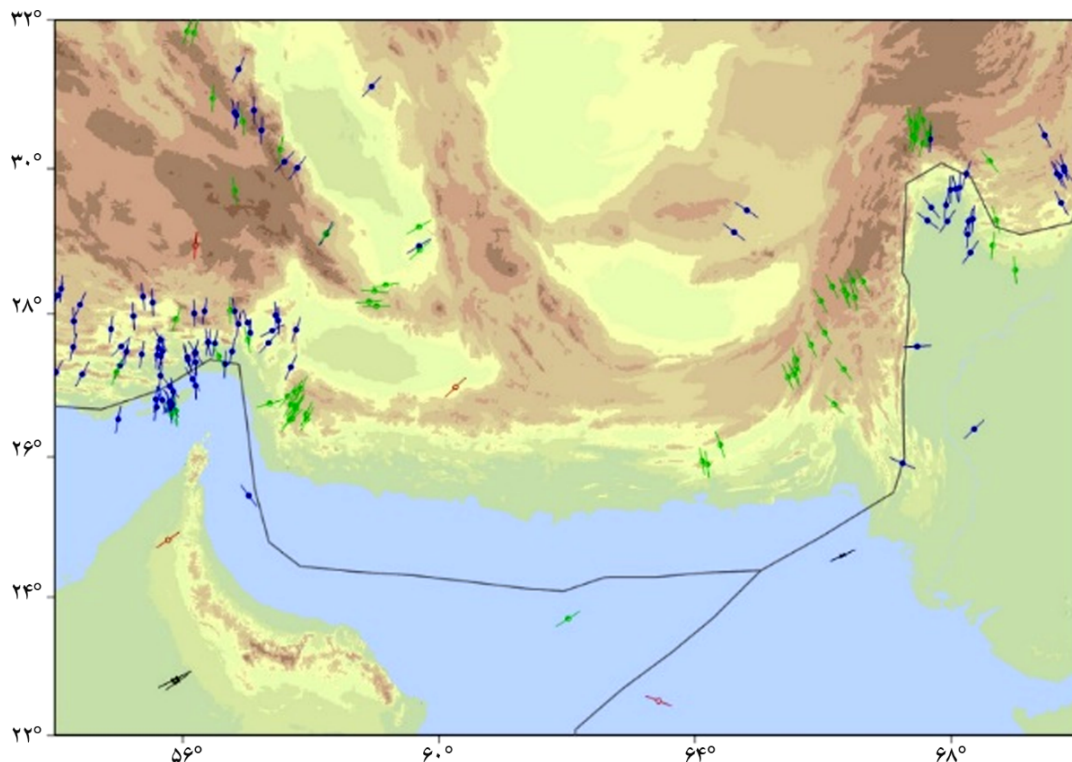
توضیحات مفصل از شاخص‌های مختلف تنش در زمینه پروژه WSM را می‌توان در مراجع مربوطه [۶-۹] یافت.

۴۰۰۰ گمانه اضافه شده است [۲].

WSM یک پایگاه داده عمومی با دسترسی آزاد است و توسط مؤسسات مختلف علمی و صنعتی که در طیف گسترده‌ای از رشته‌های علوم زمین مانند ژئودینامیک، تحلیل خطر، بهره‌برداری از هیدروکربن و مهندسی کار می‌کنند استفاده می‌شود. حیطه‌های عملیاتی اصلی عبارتند از:

- توصیف و مدیریت مخزن؛
- پایداری معادن، تونل‌ها، گمانه‌ها و محل‌های دفع زباله؛
- کالیبراسیون مدل‌های هندسی - عددی؛
- شبیه‌سازی‌های چهار بعدی ترموهیدرو مکانیکی (THM)؛
- تحلیل خطر به‌عنوان مثال با استفاده از زمینه لغزش گسل و تجزیه و تحلیل پتانسیل شکست.

در شکل (۱) راستاهای تنش بیشینه افقی (SHmax) موجود در این پایگاه داده‌ها با استفاده از CASMO که ابزار برخط نمایش اطلاعات نقشه جهانی تنش می‌باشد به تصویر کشیده شده است [۳]. در منطقه مکران (طول جغرافیایی ۵۴-۷۰ و عرض جغرافیایی ۲۲-۳۲) تعداد ۱۷۶ رکورد در پایگاه داده نقشه جهانی تنش وجود



شکل (۱): نقشه جهانی تنش ویرایش ۲۰۱۶.

جدول (۱): معیارهای رتبه‌بندی کیفیت نقشه جهانی تنش برای سازوکارهای کانونی تکی (M بزرگای محلی) [۱].

کیفیت A	کیفیت B	کیفیت C	کیفیت D	کیفیت E
		حل تک‌رویداد به‌خوبی مقید شده ($M \geq 2/5$)	حل تک‌رویداد به‌خوبی مقید شده ($2/5 > M$)	سازوکارهایی با محورهای P، B، T با شیب ۲۵-۴۰ درجه
		به‌عنوان مثال حل CMT		سازوکارهایی با محورهای P، B، T با شیب ۴۰-۵۰ درجه

جدول (۲): معیارهای رتبه‌بندی کیفیت نقشه جهانی تنش برای سازوکار کانونی مرکب و میانگین مرکزی و مرکزی FMA [۱].

کیفیت A	کیفیت B	کیفیت C	کیفیت D	کیفیت E
			میانگین محور P	سازوکارهایی با محورهای P، B، T با شیب ۲۵-۴۰ درجه
			راه‌حل‌های ترکیبی	سازوکارهایی با محورهای P، B، T با شیب ۴۰-۵۰ درجه

جدول (۳): معیارهای رتبه‌بندی کیفیت نقشه جهانی تنش برای وارون‌سازی تنش رسمی (s.d.: انحراف معیار) [۱].

کیفیت A	کیفیت B	کیفیت C	کیفیت D	کیفیت E
وارون‌سازی تفصیلی بیش از ۱۵ حل تک‌رویداد در مجاورت جغرافیایی نزدیک و انحراف معیار یا عدم تطابق زاویه کمتر از ۱۲ درجه	وارون‌سازی تفصیلی بیش از هشت حل تک‌رویداد در مجاورت جغرافیایی نزدیک و انحراف معیار یا عدم تطابق زاویه کمتر از ۲۰ درجه			

جدول (۴): جمع‌بندی معیارهای رتبه‌بندی کیفیت نقشه جهانی تنش برای سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها [۱].

شاخص تنش	SH در محدوده ± 15 درجه	SH در محدوده $15-20 \pm$ درجه	SH در محدوده $20-25 \pm$ درجه	جهت‌گیری مشکوک SH (۲۵-۴۰ درجه)	اطلاعات قابل اعتمادی وجود ندارد ($< 40 \pm$ درجه)
سازوکار کانونی (FEM)	وارون‌سازی تفصیلی بیش از ۱۵ حل تک‌رویداد در مجاورت جغرافیایی نزدیک و انحراف معیار یا عدم تطابق زاویه کمتر از ۱۲ درجه	وارون‌سازی تفصیلی بیش از ۸ حل تک‌رویداد در مجاورت جغرافیایی نزدیک و انحراف معیار یا عدم تطابق زاویه کمتر از ۲۰ درجه	-	-	-
	-	حل تک‌رویداد به‌خوبی مقید شده ($M \geq 2/5$)	حل تک‌رویداد به‌خوبی مقید شده ($2/5 > M$)	-	سازوکارهایی با محورهای P، B و T با شیب ۲۵-۴۰ درجه
	-	-	میانگین روندهای محور P یا آمار دایره‌ای از روندهای محور P راه‌حل‌های ترکیبی	-	سازوکارهایی با محورهای P، B و T با شیب ۴۰-۵۰ درجه

۲- داده‌ها: گمارش کیفیت رکوردهای داده تنش تکی از طریق:

داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها در منطقه مورد مطالعه از منابع مختلف به دست آمده‌اند. به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود پایگاه داده‌های WSM در مکران، خصوصاً قسمت‌های مرکزی، اطلاعات زیادی در بر ندارد و اطلاعات موجود نیز از کیفیت

(۱) طرح رتبه‌بندی کیفیت WSM برای هر شاخص تنش طبق استانداردهای بین‌المللی و (۲) گمارش رژیم استاندارد WSM تضمین می‌شود. برای اطلاعات فنی بیشتر، می‌توان به فهرست مراجع موجود در سایت نقشه جهانی تنش مراجعه نمود.

استفاده شده است. این داده‌ها با عبارت PP به معنای مقالات منتشر شده مشخص شدند [۱۲]. در شکل (۲) سازوکارهای کانونی زمین لرزه‌های منطقه مستخرج از منابع مختلف شامل WSM، ISC، IRSC و سایر منابع (PP) نشان داده شده‌اند. زمین لرزه ۱۹۸۳ سراوان که باعث سونامی شد و تلفات زیادی به بار آورد ضمن ذکر تاریخ متمایز گردیده است.

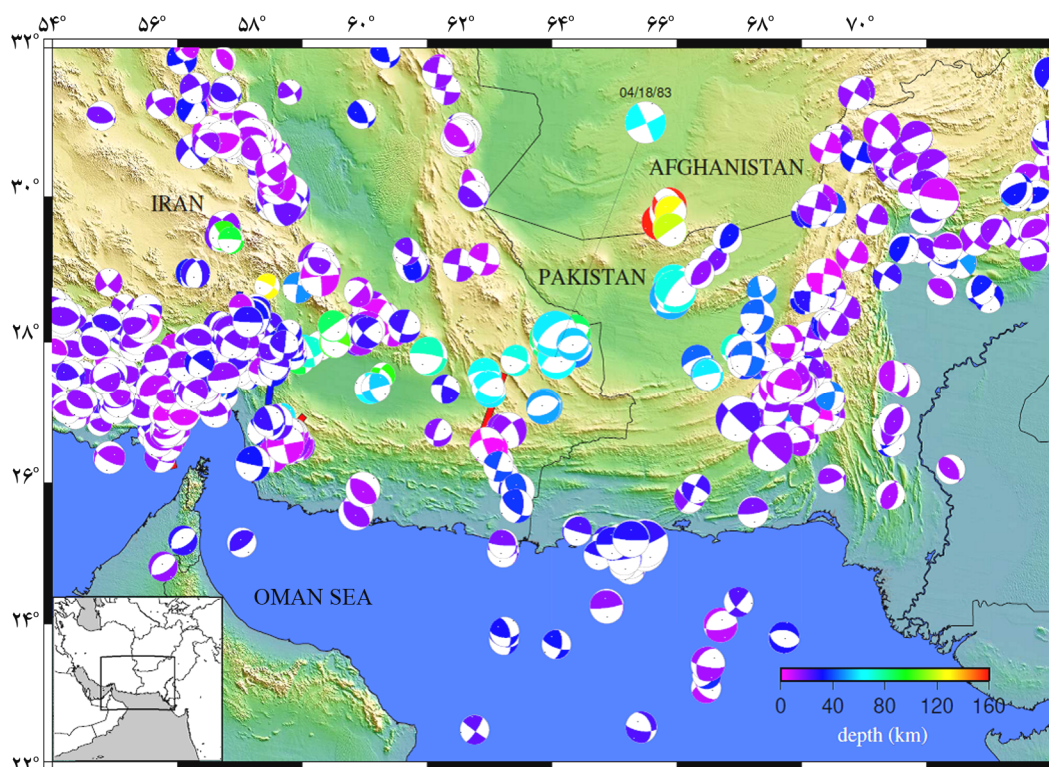
جدول (۵): مراکز تحقیقاتی مورد استفاده در پایگاه داده این مطالعه.

ردیف	نام مرکز
۱	CSEM
۲	GCMT
۳	HRVD
۴	IPGP
۵	ISC
۶	MOS
۷	NEIC
۸	NEIS
۹	PPT
۱۰	ZUR_RMT

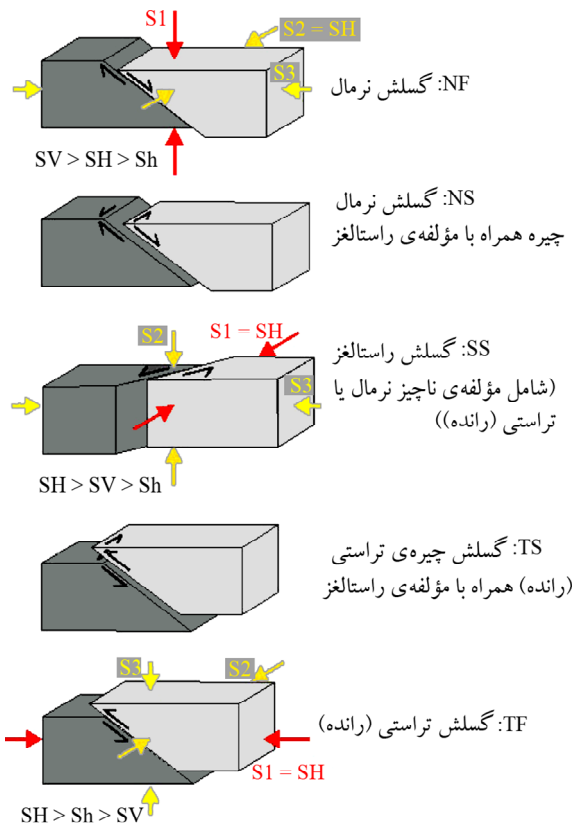
بالایی برخوردار نیستند. از آنجا که بیشترین تعداد رکوردهای پایگاه داده نقشه جهانی تنش از سازوکارهای کانونی تکی زمین لرزه‌ها تشکیل شده است، سازوکارهای کانونی قابل استخراج از مراکز تحقیقاتی بین‌المللی قابل اضافه کردن به این پایگاه داده هستند.

سایت ISC علاوه بر سازوکارهای کانونی که خود محاسبه می‌کند، اطلاعات منتشر شده توسط مراکز تحقیقاتی مختلفی را نیز در نتایج جستجوی خود نشان می‌دهد. این مراکز تحقیقاتی که از نتایج منتشر شده مطالعات آنها برای منطقه مکران استفاده شده است به شرح جدول (۵) است [۱۰]:

همچنین از سازوکارهای کانونی محاسبه شده در مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC) نیز استفاده شد [۱۱]. علاوه بر این، به منظور تکمیل هرچه بیشتر پایگاه داده‌ها، از سایر منابع اطلاعات تنش مانند سازوکارهای گزارش شده در مقالات معتبر حاصل از مطالعات بر روی داده‌های شبکه‌های محلی، سازوکارهای محاسبه شده به طریق مدل‌سازی شکل موج، نتایج وارون‌سازی تنش، داده‌های چاه و غیره نیز



شکل (۲): سازوکارهای کانونی زمین لرزه‌های منطقه.



شکل (۳): رابطه‌ی راستاهای اصلی تنش با نوع گسلش. نمایشی از پنج رژیم زمین‌شناسی عمومی و جهت‌گیری‌های محور تنش اصلی [۱۳].

در شکل (۴) مشاهده می‌شود که در صورت انتخاب شرایط جدول (۶) برای هر دسته از سازوکارهای کانونی، این داده‌ها بر روی مثلث کاگان به دسته‌های فوق قابل تقسیم‌بندی هستند. به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود رنگ اختصاص یافته به هر یک از سازوکارهای کانونی که به‌صورت یک نقطه یا دایره توپر در دیگرگرام مثلثی کاگان نمایش داده شده‌اند، به گونه‌ای تعریف شده است که بیانگر نزدیکی یا دوری موقعیت آن به هر یک از سازوکارهای نرمال (سبز)، امتدادلغز (آبی) یا معکوس (قرمز) کامل باشد.

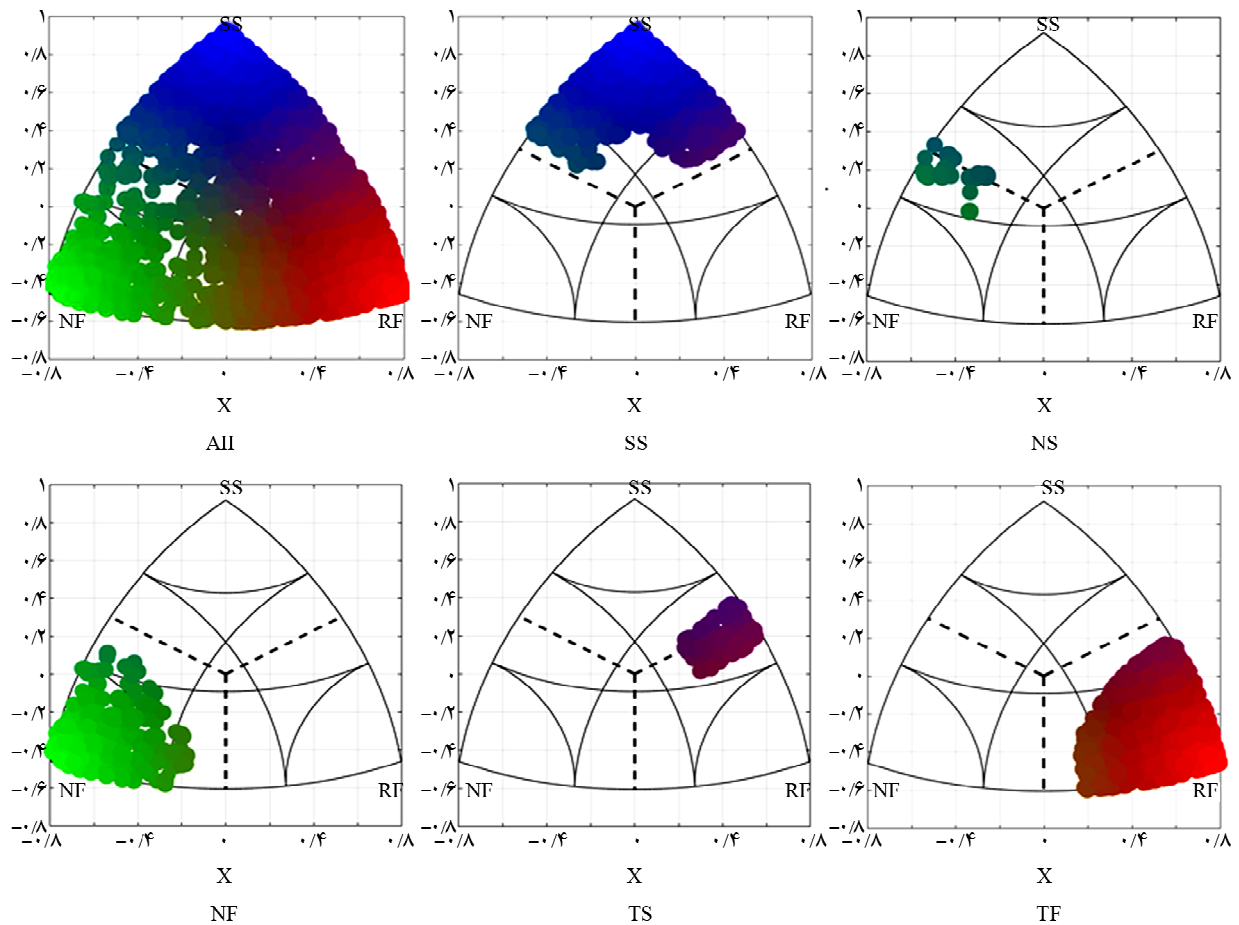
جدول (۶): نحوه تعیین راستای تنش افقی بیشینه با توجه به رژیم تکنونیک.

محور P/S1	محور B/S2	محور T/S3	رژیم تنش	آزموت تنش افقی
$p1 > 52$		$p1 < 35$	NF	آزموت محور B
$40 < p1 < 52$		$p1 < 20$	NS	آزموت محور T +۹۰ درجه
$p1 < 40$	$p1 > 45$	$p1 < 20$	SS	آزموت محور T -۹۰ درجه
$p1 < 20$	$p1 > 45$	$p1 < 40$	SS	آزموت محور P
$p1 < 20$		$40 < p1 < 52$	TS	آزموت محور P
$p1 < 35$		$p1 > 52$	TF	آزموت محور P

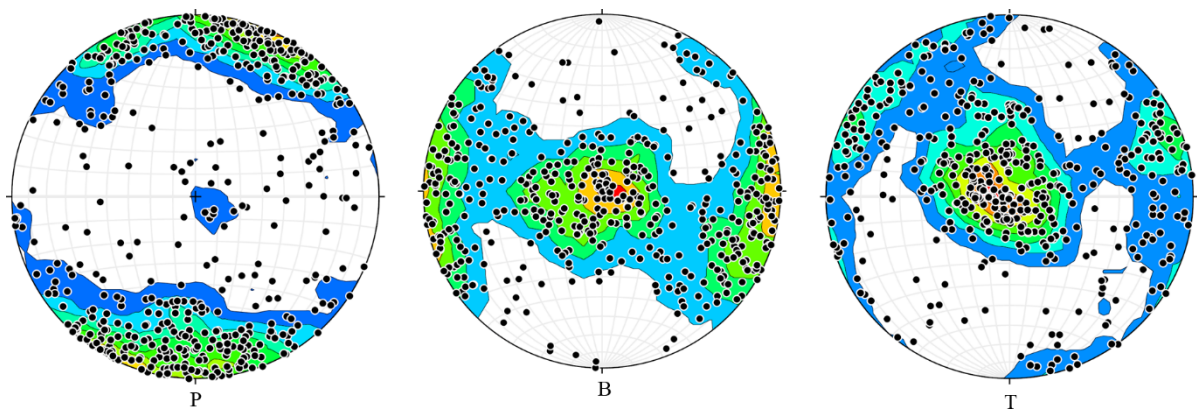
اگرچه عمق زمین‌لرزه‌ها به علت پوشش ضعیف شبکه‌های جهانی و حتی محلی در مناطق مختلف مکران قابل اعتماد نیست اما به‌طور کلی می‌توان مشاهده نمود که زمین‌لرزه‌های عمیق‌تر در مکران مرکزی قرار دارند. حال آنکه با رفتن به سمت مکران غربی و شرقی که محل تصادم صفحات زمین‌ساختی عربستان و هند با صفحه اوراسیا است، زمین‌لرزه‌ها در عمق‌های کمتری رخ می‌دهند. این همگرایی اثرات خود را در توپوگرافی نیز نشان می‌دهد. از سوی دیگر گوناگونی سازوکارهای کانونی از حیث سازوکار گسلش نشان‌دهنده‌ی تنوع تکنونیک منطقه و پیچیدگی فرایندهای تکنونیک در حال وقوع در آن است که بر ضرورت انجام مطالعات تنش در این منطقه می‌افزاید. همچنین کمبود رخدادهای لرزه‌ای در مناطقی از مکران ممکن است نشان‌دهنده‌ی قفل‌شدگی و در نتیجه احتمال رخداد زمین‌لرزه‌ای بزرگ باشد که به‌نوبه خود خطر وقوع سونامی را تشدید می‌نماید [۱۱]. در این خصوص در قسمت بحث، مطالب بیشتری عنوان خواهد شد.

۳- روش و نتایج

در محاسبه راستای تنش از سازوکار کانونی تکی باید به رابطه بین نوع سازوکار کانونی و محور هم‌ارز با راستای تنش اصلی بیشینه توجه نمود. همان‌طور که می‌دانیم راستاهای اصلی تنش برای سازوکارهای مختلف گسلش متفاوت هستند. در شکل (۳) رابطه راستاهای اصلی تنش با نوع گسلش نشان داده شده است. لذا برای هر نوع از سازوکارهای کانونی نحوه محاسبه SH_{max} متفاوت است. روش محاسبه راستای تنش بیشینه افقی برای هر نوع سازوکار کانونی در جدول (۶) ذکر شده است.



شکل (۴): سازوکارهای کانونی و تقسیم آنها به دسته‌های مختلف بر اساس جدول (۶).



شکل (۵): محورهای P، B و T سازوکارهای کانونی مورد استفاده به ترتیب از چپ به راست.

پراکنندگی نسبتاً زیادی دارد و می‌توان به‌طور تقریبی نقاط نشان‌دهنده‌ی محور را در دو خوشه دسته‌بندی کرد. با توجه به اینکه بیشتر زمین‌لرزه‌ها رانده یا امتدادلغز و از نوعی بوده‌اند که محور P آنها با راستای تنش یکی است، این امر ناشی از چرخش جهت‌های اصلی تنش در منطقه است.

در شکل (۵) محورهای P، B و T سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در این مطالعه بر روی استریونت نمایش داده شده و پربند^۸ نشان‌دهنده‌ی چگالی نقاط بر سطح استریونت ترسیم گردیده است. به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود محور P بر روی استریونت

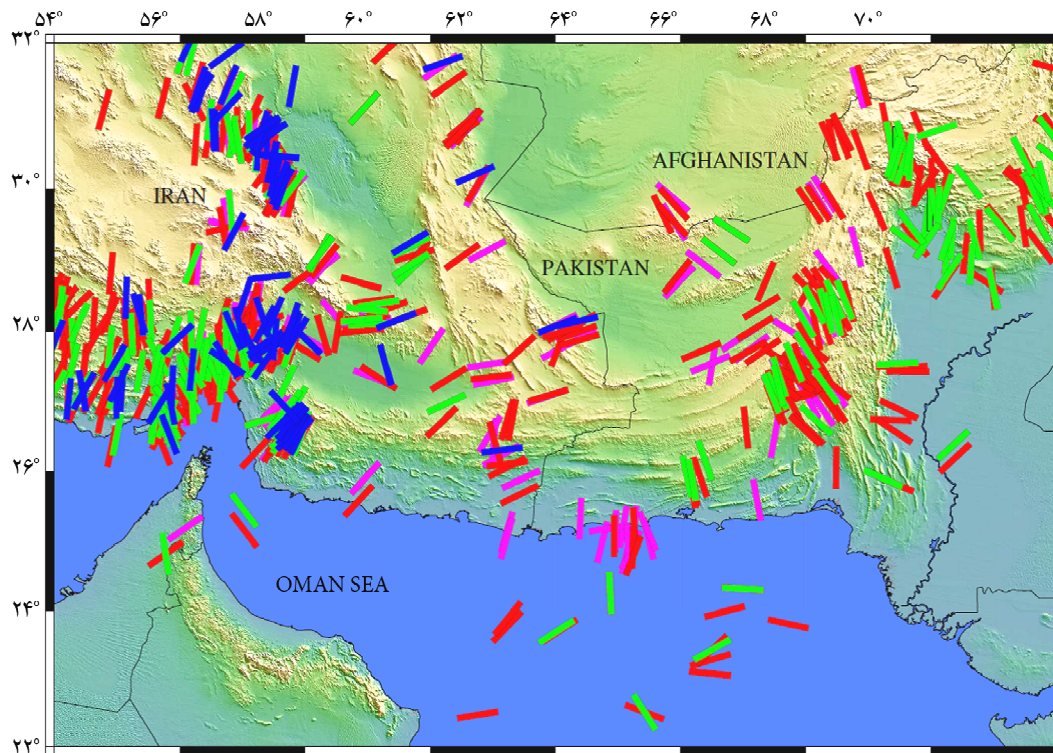
صفحه گسل و نحوه لغزش بر روی آن است. برای فرموله کردن این فرآیند باید از زمین‌شناسی ساختمانی و مطالعات بر روی گسل‌ها کمک گرفت.

۴- بحث

در شکل (۶) داده‌های مورد استفاده از منابع مختلف بارنگ‌های متفاوت نشان داده شده‌اند. داده‌های پروژه جهانی تنش WSM با میله‌های آبی، داده‌های ISC با میله‌های قرمز، داده‌های مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک IRSC با میله‌های سبز و سایر داده‌ها با میله‌های ارغوانی نشان داده شده‌اند. در این شکل گسترش مکانی داده‌های مورد استفاده از هر یک از این منابع به چشم می‌خورد. طبیعی است که سازوکارهای کانونی محاسبه شده توسط IRSC بیشتر به محدوده قلمرو کشور ایران محدود می‌شود.

به طوری که در شکل (۶) مشخص است در بسیاری از مواقع جهت‌گیری‌های تنش به دست آمده از سازوکارهای کانونی موجود در ISC با راستاهای WSM و همین‌طور نتایج وارون‌سازی سازوکارهای کانونی مطابقت خوبی نشان می‌دهند.

در مطالعه حاضر اطلاعات به دست آمده از سازوکارهای کانونی تکی با نتایج وارون‌سازی تنش مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. به عنوان توضیحی مختصر در مورد وارون‌سازی تنش سازوکارهای کانونی باید اشاره نمود که تانسور تنش پوسته‌ای را نمی‌توان با استفاده از سازوکار کانونی یک زمین‌لرزه با اطمینان به دست آورد [۱۴-۱۵]، زیرا ممکن است سازوکار کانونی زمین‌لرزه مورد نظر دارای خطای بزرگی بوده یا اساساً از نظر راستای نیروهای وارده با راستای منطقه‌ای تنش‌ها تفاوت داشته باشد؛ بلکه یک فرآیند وارون‌سازی مورد نیاز است که به ما اجازه دهد تانسور تنش را از تعداد زیادی زمین‌لرزه به دست آوریم. سازوکارهای کانونی مورد استفاده بایستی متعلق به زمین‌لرزه‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه باشند. گستره داده‌های مورد استفاده بیانگر وسعت محدوده‌ای است که تانسور تنش در آن یکسان و یکنواخت فرض می‌شود و چنانچه تعداد گسل‌های زیادی در منطقه وجود داشته باشند هر یک از این گسل‌ها سهم جداگانه‌ای در میدان تنش به دست آمده خواهند داشت. هر سازوکار کانونی در واقع معرف خصوصیات یک



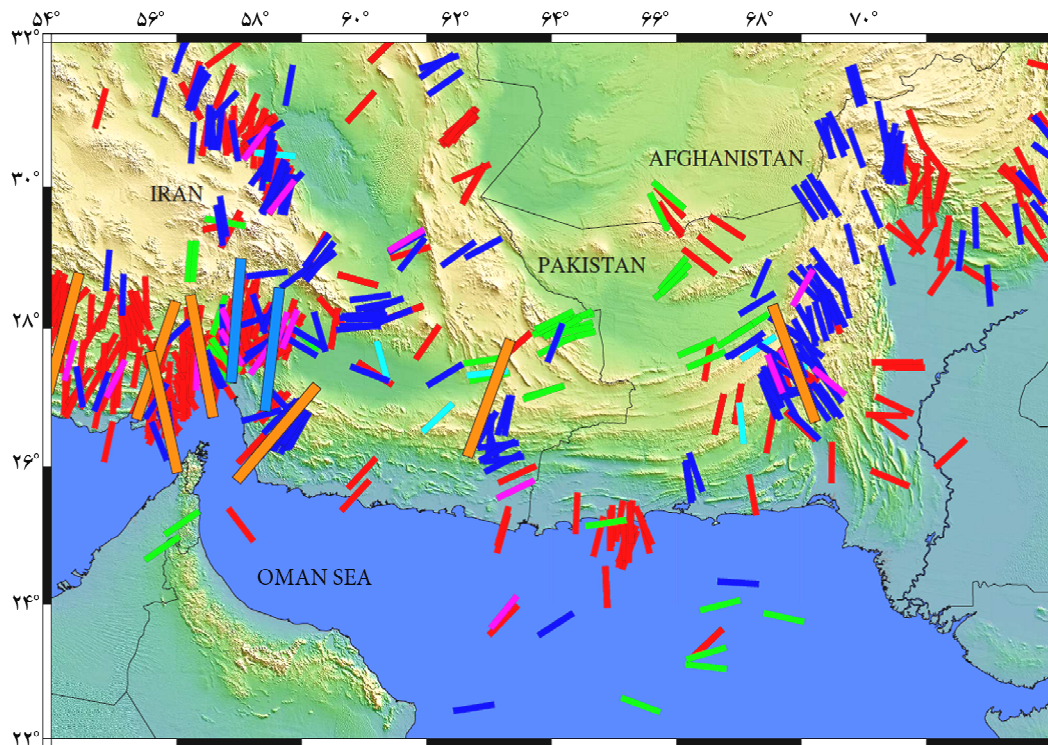
شکل (۶): منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده (شرح رنگ‌ها در متن).

آخر سازوکارهای ترکیبی تراکششی (NS) و ترفشارشی (TS) به ترتیب با رنگ‌های فیروزه‌ای و ارغوانی نشان داده شده‌اند. در این شکل همچنین نتایج مطالعات پیشین در مناطق البرز و زاگرس با میله‌های بزرگ‌تر به رنگ‌های نارنجی (رژیم تنشی فشارشی) و آبی آسمانی (رژیم تنشی راستالغز) که به روش وارون‌سازی تنش به‌دست آمده، به تصویر کشیده شده‌اند.

در شکل (۷) همچنین نتایج وارون‌سازی تنش سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها که با استفاده از روش وارون‌سازی خطی انجام شده نمایش داده شده است [۱۲]. با توجه به شکل مذکور، تشابه نسبی بین جهت‌های تنش اصلی به‌دست آمده از سازوکارهای کانونی تکی و جهت‌های به‌دست آمده از وارون‌سازی قابل مشاهده است. یادآوری می‌گردد که با توجه به بالاتر بودن کیفیت اطلاعات تنش حاصل از وارون‌سازی سازوکارهای کانونی (کیفیت A) نسبت به سازوکارهای کانونی تکی (کیفیت C) قطعاً داده‌های حاصل از وارون‌سازی قابلیت اعتماد بالاتری دارند؛ اما به دلیل محدودیت در داده‌ها و عدم امکان تشکیل خوشه‌هایی با تعداد کافی رخداد لرزه‌ای برای وارون‌سازی، استفاده از این

اما در بعضی موارد این راستاها با یکدیگر همخوانی نداشته، متقاطع هستند. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد دلیل این ناهمخوانی‌ها کیفیت پایین داده‌ها می‌باشد که ناشی از عدم قطعیت بالای سازوکارهای کانونی تکی مورد استفاده در تعیین جهت تنش است. از آنجا که کیفیت اطلاعات تنش حاصل از سازوکارهای کانونی تکی پایین است، اظهار نظر در مورد اینکه کدام دسته از داده‌ها نتایجی نزدیک‌تر به واقعیت را در اختیار می‌گذارند غیرممکن یا دشوار است. لذا در صورت لزوم در مواقعی که راستاهای تنش حاصل از سازوکارهای کانونی موجود در ISC با داده‌های WSM همخوانی نداشته باشند، به دلیل قابلیت ارجاع مطمئن‌تر به پایگاه نقشه تنش جهانی (WSM) که مخصوص اطلاعات تنش است، بایستی داده‌های WSM حفظ شده و داده‌های ISC حذف شوند.

در شکل (۷) مجموعه سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌های حاضر با توجه به سازوکار گسلسی دسته‌بندی شده و هر دسته با رنگ متفاوتی نشان داده شده‌اند. سازوکارهای رانندگی (TF) با رنگ قرمز، راستالغز (SS) با رنگ آبی، نرمال با رنگ سبز و در



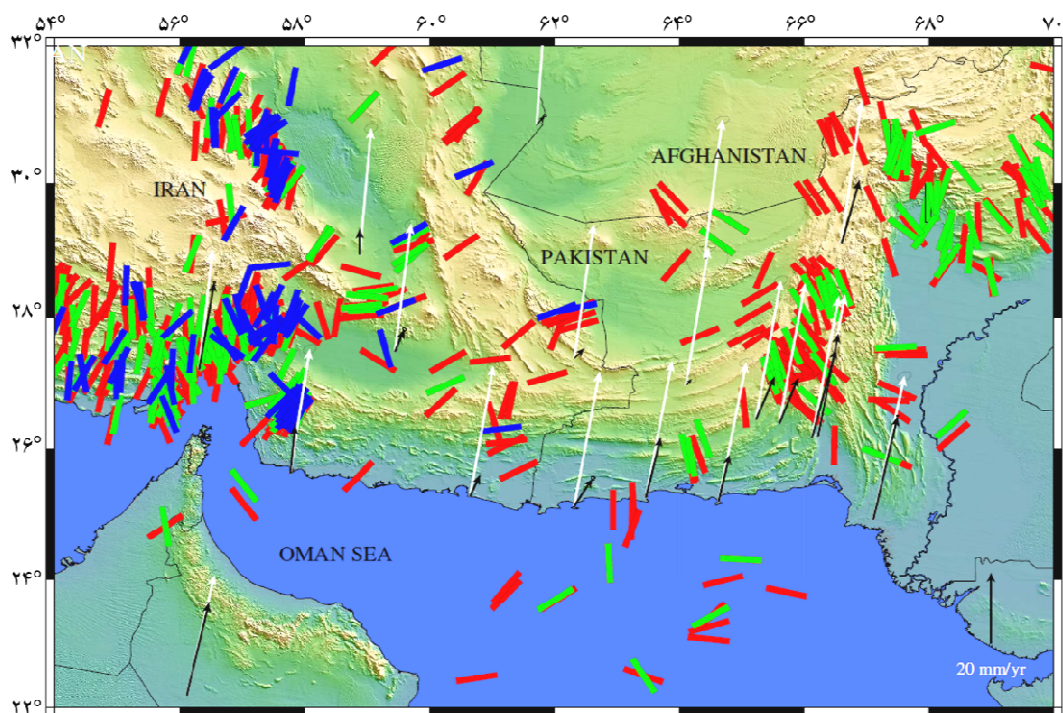
شکل (۷): مقایسه جهت‌های تنش به‌دست آمده از سازوکارهای کانونی تکی با نتایج وارون‌سازی تنش (شرح رنگ‌ها در متن).

بردارهای سرعت دارای اندازه‌های کوچک‌تری می‌شوند و همچنین راستای آنها با راستای بردارهای سرعت صفحات تکتونیکی تفاوت پیدا می‌کند. این امر با رفتن از سواحل مکران مرکزی به سمت شمال نیز قابل مشاهده است و بردارهای سرعت در قسمت‌های شمالی‌تر مکران مرکزی نسبت به سواحل مکران کوتاه‌تر هستند و بعضاً انحراف بیشتری از جهت سرعت حرکت صفحات تکتونیکی نشان می‌دهند. با نگاه به شکل (۲) مشاهده می‌شود که زمین‌لرزه‌های بسیار عمیق‌تری نسبت به مناطق دیگر در مناطق بالادست سواحل مکران، همان‌جا که بردارهای سرعت GPS به کمترین مقدار خود می‌رسند رخ داده است. در درجه اول وجود اختلاف بزرگ بین بردارهای سرعت GPS و بردارهای سرعت حرکت صفحات تکتونیکی می‌تواند مبین قفل‌شدگی در مکران مرکزی باشد. مسئله را می‌توان به این صورت تفسیر نمود که این قفل‌شدگی که در سطح یعنی پوسته بالایی یا پوشش رسوبی اتفاق افتاده است باعث شده که بردارهای سرعت GPS که داده مشاهده‌ای هستند نسبت به پیش‌بینی صورت گرفته از سرعت حرکت صفحات تکتونیکی که داده محاسبه‌ای می‌باشند از بزرگای بسیار کمتری برخوردار باشند.

روش همیشه و در تمام مناطق میسر نیست. لذا مقایسه و امکان‌سنجی استفاده از سازوکارهای کانونی تکی به‌منظور استخراج اطلاعات تنش به شکلی که در این مطالعه انجام گردید حائز اهمیت است.

در شکل (۸) راستاهای تنش حاصل از سازوکارهای کانونی تکی با بردارهای سرعت GPS که در منطقه مکران به‌دست آمده [۱۶] مقایسه شده است (بردارهای سیاه). در محل ایستگاه‌های GPS بردارهای سرعت صفحات تکتونیکی از مدل NUVEL-1A به دست آمده و ترسیم شده‌اند (بردارهای سفید).

به‌طوری‌که از شکل (۸) مشخص است بردارهای سفید که سرعت حرکت صفحات تکتونیکی را نشان می‌دهد تقریباً در تمام منطقه بزرگ و راستای مشابهی دارند که با توجه به جهانی بودن این مدل و پایین بودن رزولوشن در چنین مدل‌هایی طبیعی است؛ اما با نگاه به بردارهای سرعت GPS مطلب مهمی به چشم می‌خورد که حائز اهمیت ویژه است. در دو سوی مکران، یعنی مکران خاوری و باختری بردارهای سرعت GPS کم‌وبیش راستا بزرگایی مشابه با بردارهای سرعت صفحات تکتونیکی را دارا هستند؛ اما هر چه به سمت مکران مرکزی نزدیک می‌شویم



شکل (۸): منطقه مورد مطالعه و داده‌های اصلی پروژه تنش جهانی (میل‌های آبی) و داده‌های اضافه شده به این پایگاه داده (میل‌های قرمز).

داده‌اند ناچیز و قابل صرف نظر کردن است. لذا می‌توان گفت که داده‌های تنش محاسبه شده در این مطالعه بیشتر بیانگر چگونگی توزیع میدان تنش در اعماق کمتر از ۴۰ کیلومتر است که شامل منطقه لرزه‌زا و به‌عبارت‌دیگر پوسته و گوشته بالایی می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج مطالعات حاضر، میدان تنش در منطقه مکران دارای تغییرات مکانی قابل توجهی است که نشان‌دهنده‌ی راستاهای مخالف تنش در مکران شرقی، غربی و مرکزی می‌باشد. در این مطالعه نشان داده شد که داده‌های سازوکار کانونی تکی به‌دست آمده از پایگاه ISC و ... منبع مناسبی برای اضافه کردن داده‌های تنش به نقشه جهانی تنش به شمار می‌آید. همچنین مقایسه نتایج وارون‌سازی تنش با استفاده از سازوکار کانونی زمین لرزه‌ها در منطقه مورد مطالعه با نتایج مطالعه حاضر نشان داد که داده‌های سازوکار کانونی تکی زمین لرزه‌ها به‌طور کلی از مطابقت نسبتاً مناسبی با راستاهای واقعی تنش در منطقه برخوردار هستند و قابلیت استفاده به‌عنوان برآورد اولیه‌ای از این راستاها را دارند. همین‌طور در این مطالعه با استفاده از بردارهای سرعت GPS و بردارهای سرعت حرکت صفحات تکتونیکی قفل‌شدگی سطحی در مکران مرکزی مشاهده شد. این در حالی است که بنا بر شواهد موجود در قسمت‌های شمالی مکران مرکزی دگرشکلی در اعماق زیاد به‌طور بی‌لرز و لرزه‌ای ادامه دارد. همچنین مقایسه نتایج با ساختارهای زمین‌شناسی موجود در منطقه مطابقت خوبی از خود نشان داد. تفکیک عمقی سازوکار کانونی زمین لرزه‌ها نشان داد که داده‌های تنش محاسبه شده در این مطالعه بیشتر مربوط به ۴۰ کیلومتر بالایی یعنی پوسته و گوشته فوقانی است.

سپاسگزاری

از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برای حمایت از این مطالعه تحت پروژه‌ی پژوهشی با کد ۷۴۰ سپاسگزاری می‌شود. همچنین از آقای دکتر زعفرانی به جهت راهنمایی‌های ارزنده در روند اجرای طرح تقدیر و تشکر می‌گردد.

از سوی دیگر رخداد زمین لرزه‌های عمیق در مناطق مرکزی مکران، با فاصله از خط ساحلی به سمت شمال نشان می‌دهد که علی‌رغم قفل‌شدگی در سطح، دگرشکلی احتمالاً در هر دو صورت بی‌لرز و لرزه‌ای در حال وقوع است که حالت لرزه‌ای آن منجر به رخداد زمین لرزه‌هایی چنین عمیق می‌گردد.

اگرچه عمق زمین لرزه‌ها در منطقه مکران به علت کم بودن تعداد ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در هر دو طرف ایرانی و پاکستانی دارای عدم قطعیت بسیار بالایی است، اما به‌رحال حتی با در نظر گرفتن این خطا، تفاوت فاحش اعماق محاسبه شده برای زمین لرزه‌های مکران مرکزی و کرانه‌های خاوری و باختری مکران نشان از پدیده فرورانش دارد که با توجه به مطالب عنوان شده در بالا، دگرشکلی لرزه‌ای ناشی از این فرورانش در قسمت مکران مرکزی قابل مشاهده است و عمیق‌ترین زمین لرزه‌های منطقه را می‌توان در شمال خط ساحلی مکران مرکزی جستجو کرد.

همان‌طور که در شکل (۸) پیداست راستاهای تنش به‌دست آمده مطابقت خوبی با ساختارهای زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهند. راستای تنش در قسمت‌های غربی و شرقی مکران با روندهای شمال شمال شرقی - جنوب جنوب غربی و شمال شمال غربی - جنوب شرقی به ترتیب همگرایی بین صفحات تکتونیکی عربی و هندی را با صفحه اوراسیا تأیید می‌کنند. در قسمت مرکزی مکران راستای تنش بیشینه افقی شمال شرقی - جنوب غربی است. این نتایج با مطالعات قبلی انجام شده در منطقه همخوانی دارد [۱۳-۱۴].

در انتها با توجه به اهمیت بالای تنش محاسبه شده در اعماق کمتر از ۴۰ کیلومتر در تعیین پارامترهای مورد نیاز در تحلیل خطر زمین لرزه و سایر کاربردهای مربوطه، به تفکیک سازوکارهای زمین لرزه‌ها نسبت به این عمق اقدام گردید. به این ترتیب پایگاه داده مورد استفاده به دو بخش تقسیم شد که در یکی سازوکارهای کانونی زمین لرزه‌هایی با عمق کمتر از ۴۰ کیلومتر و در دیگری سازوکارهای کانونی زمین لرزه‌هایی با عمق بیش از ۴۰ کیلومتر دسته‌بندی گردیدند. تعداد زمین لرزه‌هایی که در عمق بیشتر از ۴۰ کیلومتر واقع شده‌اند تنها ۳۴ زمین لرزه است که در مقایسه با تعداد زمین لرزه‌هایی که در عمق کمتر از ۴۰ کیلومتر رخ

- by D.B. Slemmons, E.R. Engdahl, M.D. Zoback and D.D. Blackwell, 339-366, Geological Society of America, Boulder, Colorado (PDF).
10. Focal mechanism search (n.d.) Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/finechanism>.
 11. Focal mechanism, Iranian Seismological Center, Institute of Geophysics, University of Tehran: <http://irsc.ut.ac.ir/focal.php>.
 12. Penney, C., Tavakoli, F., Saadat, A., Nankali, H.R., Sedighi, M., Khorrami, F., and Priestley, K. (2017) Megathrust and accretionary wedge properties and behavior in the Makran subduction zone. *Geophysical Journal International*, **209**(3), 1800-1830, doi: 10.1093/gji/ggx126.
 13. Zoback, M.L. (1992) First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map project. *J. Geophys. Res.*, **97**(B8), 11,703-11,728.
 14. Pourbeyranvand, Sh. and Tatar, M. (2015) Tectonic stress variations in the Zagros using inversion of earthquake focal mechanisms. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, **24**(94), 1-8.
 15. Pourbeyranvand, Sh. and Shomali, Z.H. (2013) Determination of stress tensor based on inversion of earthquake focal mechanisms and implementation in Makran region. *Iranian Journal of Geophysics*, **6**(2), 1-19.
 16. Frohling, E. and Szeliga, W. (2016) GPS constraints on interplate locking within the Makran subduction zone. *Geophysical Journal International*, **205**, 10.1093/gji/ggw001.

واژه‌نامه

World Stress Map (WSM)	۱- نقشه جهانی تنش
Borehole Breakouts	۲- برون شکست چاه
Drilling Induced Fractures	۳- شکستگی ناشی از حفاری
In-Situ Stress Measurements	۴- اندازه‌گیری تنش برجا
Overcoring	۵- بیش مغزه‌گیری
Hydraulic Fracturing	۶- شکست هیدرولیکی
Borehole Slotter	۷- شکاف گمانه
Contour	۸- پربند

مراجع

1. The World Stress Map Project - A Service for Science and Earth System Management (n.d.). Retrieved from <http://www.world-stress-map.org/>.
2. Heidbach, O., Rajabi, M., Reiter, K., Ziegler, M., and the WSM Team (2016) *World Stress Map Database Release 2016*, GFZ Data Services, <http://doi.org/10.5880/WSM.2016.001>.
3. Heidbach, O., Rajabi, M., Reiter, K., and Ziegler, M. (2016) *World Stress Map 2016*, GFZ Data Services, <http://doi.org/10.5880/WSM.2016.002>.
4. Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., and Müller, B. (2010) Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008, *Tectonophysics*, **482**, 3-15, <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.07.023> (PDF).
5. Heidbach, O., Reinecker, J., Tingay, M., Müller, B., Sperner, B., Fuchs, K., and Wenzel, F. (2007) Plate boundary forces are not enough: Second- and third-order stress patterns highlighted in the World Stress Map database. *Tectonics*, **26**, <http://doi.org/10.1029/2007TC002133> (PDF).
6. Sperner, B., Müller, B., Heidbach, O., Delvaux, D., Reinecker, J., and Fuchs, K. (2003) 'Tectonic stress in the Earth's crust: advances in the World Stress Map project'. In: *New Insights in Structural Interpretation and Modelling*, edited by D.A. Nieuwland, Special Publication 212, 101-116, Geol. Soc. Spec. Pub., London, <http://doi.org/10.1144/gsl.sp.2003.212.01.07> (PDF).
7. Zoback, M.L. and Zoback, M. (1980) State of stress in the conterminous united states. *J. Geophys. Res.*, **85**(B11), 6113-6156, <http://doi.org/10.1029/JB085iB11p06113>.
8. Zoback, M.L., Zoback, M., Adams, J., Assumpção, M., Bell, S., Bergman, E.A., Blümling, P., Brereton, N.R., Denham, D., Ding, J., Fuchs, K., Gay, N., Gregersen, S., Gupta, H. K., Gvishiani, A., Jacob, K., Klein, R., Knoll, P., Magee, M., Mercier, J.L., Müller, B.C., Paquin, C., Rajendran, K., Stephansson, O., Suarez, G., Suter, M., Udías, A., Xu, Z.H., and Zhizhin, M. (1989) Global patterns of tectonic stress. *Nature*, **341**, 291-298, <http://doi.org/10.1038/341291a0>.
9. Zoback, M. and Zoback, M.L. (1991) 'Tectonic stress field of North America and relative plate motions'. In: *Neotectonics of North America*, edited

Completion of the Stress Database in Makran with an Insight into the Focal Mechanisms of Earthquakes in the Region

Shahrokh Pourbeyranvand

Assistant Professor, Seismological Research Center, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IIEES), Tehran, Iran, beyranvand@iiees.ac.ir

There are many applications for stress field information today. Reservoir identification and management, the stability of mines, tunnels, boreholes and landfills, calibration of geomechanical-numerical models, four-dimensional hydrothermomechanical simulations and seismic hazard assessment using fault slip and failure potential analysis are examples of these applications. Considering the current projects in earthquake risk analysis in the study area with the approach of landslide rate and distributed deformation studies, the importance of using the stress database in an improved and comprehensive manner has been increased. Due to the many applications that exist today for stress field information, as well as current projects in related fields that are closely related to the subject of tectonic crustal stress, the use of an updated database of stress information has become increasingly important. This study has attempted to complete the study area's stress databases as much as possible using various data sources. One of the sources that provide extensive information in this field for free is the World Stress Map Project. In this study, an attempt has been made to add the existing knowledge about the stress field in the Makran region, including data on the focal mechanism of earthquakes and their inversion, etc., to the current database available in the World Stress Map Project. Data on the focal mechanism of earthquakes in the study area have been obtained from various sources. It can be seen that WSM databases in Makran, especially in the central parts, do not contain much information and the available information is not of high quality. Since most World Stress Map database records consist of single focal mechanisms of earthquakes, focal mechanisms extracted from international research centers can be added to this database. In calculating the stress direction of a single focal mechanism, the relationship between the type of focal mechanism and the axis corresponding to the maximum stress direction must be considered. As we know, the principal stress directions are different for various fault mechanisms. In the present study, the information obtained from single focal mechanisms has been compared with the stress inversion results. The current stress database is the most complete one in the area regarding the available data and the ground for improving the relevant studies is provided. According to the present study results, the stress field in the Makran region has significant spatial changes. These changes indicate opposite stress directions in Eastern, Central and Western Makran. In this study, it was shown that single focal mechanism data obtained from the ISC database and other sources are suitable for adding data to the World Stress Map. Also, comparing the results of stress inversion using the focal mechanism of earthquakes in the study area with the results of the present study showed that the individual focal mechanism data of earthquakes generally have a relatively good agreement with the actual directions of stress in the region and can be used as a preliminary estimate of these directions. In this study, using GPS velocity vectors and tectonic plate motion vectors, surface locking was observed in central Makran. However, according to the evidence in the northern parts of central Makran, the deformation continues at great depths aseismically. Also, comparing the results with the geological structures in the area showed good agreement. Depth separation of the focal mechanism of earthquakes showed that the stress data calculated in this study are mainly related to the upper 40 km. Further investigations in this area by installing and operating temporary seismic networks and enhancing permanent facilities are encouraged.

Keywords: Tectonic Stress, Focal Mechanism, Earthquake, World Stress Map, Makran.