

بررسی روش‌های مختلف برآورد کرنش و تنش لرزه‌ای و برآورد نرخ کوتاه‌شدگی پوسته زمین در ایران با به‌کارگیری سازوکار زمین‌لرزه‌ها

مجید نعمتی

بخش زمین‌شناسی دانشکده علوم و مرکز پژوهشی زلزله دانشگاه شهید باهنر کرمان

نویسنده مسئول: nematimajid_1974@uk.ac.ir*

دریافت: ۹۶/۴/۱۳ پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۲

چکیده

در این پژوهش، تنش، کرنش و نرخ کوتاه‌شدگی پوسته زمین در ایران با روش‌های کاسترف و مولنار برآورد شده و هم‌چنین نقش منطقه‌بندی در برآوردها نیز بررسی شده است. در این راستا، شمار ۶۳۷ زمین‌لرزه با بزرگای گشتاوری بزرگ‌تر از ۵/۵ در بازه زمانی سال‌های ۱۹۰۹ تا ۲۰۱۶ به‌کار برده شده است. راستای فشار، کشش و کرنش لرزه‌ای با دو روش (بلوک‌بندی و هر زمین‌لرزه جداگانه) و هم‌چنین کوتاه‌شدگی افقی و تغییرات قائم پوسته زمین برآورد شده‌اند. راستای فشار و کشش و اندازه کرنش لرزه‌ای به‌دست آمده از سازوکار زمین‌لرزه‌ها به سه صورت برآورد شد: هر زمین‌لرزه جداگانه، منطقه‌بندی $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ و منطقه‌بندی زمین‌ساختی. داده‌پردازی نشان می‌دهد که راستای فشار و کشش و اندازه کرنش لرزه‌ای شدیداً به نوع منطقه‌بندی وابسته است. هم‌چنین، برآورد اندازه کرنش لرزه‌ای با دو روش کاستروف و مولنار با یکدیگر تفاوت آشکاری نشان می‌دهند. با این حال می‌توان گفت، بیش‌ترین دگرشکلی در ایران در گستره دشت‌بیاض و قائن در خاور ایران روی می‌دهد. برآورد سرعت قائم پوسته زمین در زاگرس فراخاسته، ستبرشدگی و در فروافتادگی پیش‌بوم زاگرس، نازک‌شدگی پوسته را به‌دنبال داشته، که هم‌خوانی خوبی با زمین‌ساخت گستره دارد. اگرچه، در البرز خاوری این برآورد فراخاست بوده، در البرز باختری فرونشست به‌دست آمده که با زمین‌ساخت البرز که یک گستره برخوردی فشاری و مایل است هم‌خوانی ندارد.

واژه‌های کلیدی: کرنش، تنش، پوسته زمین، زمین‌لرزه، سازوکار، ایران

مقدمه

و کاتالوگ دانشگاه هاروارد آمریکا^۱ را برای برآورد تنش و کرنش لرزه‌ای به‌کار برده‌اند. ذوالفقاری (۲۰۰۹) نرخ کرنش لرزه‌ای و ژئودتیک را در البرز با به‌کارگیری زمین‌لرزه‌های تاریخی با بزرگای بیش‌تر از ۶/۱ برآورد نموده است. بازه زمانی داده‌های ظریفی و همکاران (۲۰۱۳) نیز برای این برآوردها تا سال ۲۰۱۳ بوده است. تازه‌ترین کار در این‌باره کار رئیسی و همکاران (۲۰۱۶) است. در ایران به‌دلیل ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی در هر گستره، برآورد اندازه و راستای تنش، کرنش و سرعت جابه‌جایی پوسته زمین از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش، راستای فشار و کشش و نرخ کرنش لرزه‌ای با دو روش کاسترف و مولنار و هم‌چنین اندازه سرعت افقی و قائم جابه‌جایی پوسته زمین با به‌کارگیری شمار ۶۳۷ زمین‌لرزه با بزرگای گشتاوری بزرگ‌تر از ۵/۵ در بازه زمانی سال‌های ۱۹۰۹ تا ۲۰۱۶ با بلوک‌بندی‌های

تنش، کرنش و نرخ کوتاه‌شدگی پوسته زمین با روش‌های گوناگونی قابل برآورد می‌باشد؛ با روش لرزه‌ای که در آن از سازوکار زمین‌لرزه‌ها بهره برده می‌شود و هم‌چنین روش GPS که از پردازش جابه‌جایی و سرعت پوسته زمین کمک می‌گیرند. در سال ۱۹۷۴ کاستروف فرمولی را پیش‌نهاد نمود که با آن امکان برآورد اندازه و راستای کرنش لرزه‌ای وجود دارد. پژوهش‌گران در دنیا و هم‌چنین در ایران تنش و کرنش لرزه‌ای را با این روش برآورد نموده‌اند. تزارو و همکاران (۲۰۰۶) کرنش لرزه‌ای و ژئودتیک را در بلوک‌های $0/5^{\circ} \times 0/5^{\circ}$ در مرکز اروپا برآورد نمودند. در ایران پژوهش‌گرانی مانند ماسون و همکاران (۲۰۰۵)؛ ذوالفقاری (۲۰۰۹)؛ ظریفی و همکاران (۲۰۱۳) و انصاری و زمانی (۲۰۱۴) به برآورد اندازه و راستای تنش و کرنش پرداخته‌اند. ماسون و همکاران (۲۰۰۵) دو کاتالوگ لرزه‌ای جکسون و همکاران (۱۹۹۵)

^۱ CMT catalog

در حالی است که بلوک‌بندی‌های زمین‌ساختی انصاری و زمانی (۲۰۱۴) دارای اندازه‌های بسیار بزرگی بوده و از راستای گسل‌ها به‌خوبی پیروی نکرده و بلوک‌بندی ظریفی و همکاران (۲۰۱۳) نیز $2^0 \times 2^0$ بوده و برای این برآورد بزرگ است. در این پژوهش هردو ایده انجام شده و با یکدیگر مقایسه شده است.

در این پژوهش برای برآورد کرنش با روش کاستروف، همه زمین‌لرزه‌های بزرگ $M > 5.5$ و کم‌ترها با $h < 25$ km به‌کار برده شده‌اند. برای سازوکار زمین‌لرزه‌ها دو کاتالوگ جکسون و همکاران (۱۹۹۵) با ۸۶ زمین‌لرزه و کاتالوگ دانشگاه هاروارد آمریکا با ۵۵۱ زمین‌لرزه، به‌ترتیب برای زمین‌لرزه‌های ۱۹۰۹-۱۹۷۵ ($6.0 < M_s < 7.4$) و ۱۹۷۶-۲۰۱۶ ($4.3 < M_s < 7.7$) به‌کار برده شده‌اند.

با توجه به شمار کم زمین‌لرزه‌هایی با ژرفای بیش‌تر از ۳۰ کیلومتر در ایران پردازش‌ها برای برآورد تنش، کرنش و سرعت جابه‌جایی پوسته زمین در این پژوهش تنها برای پوسته کم‌ژرفا (کم‌تر از ۲۵ کیلومتر) انجام شده است. بنابراین زمین‌لرزه‌هایی مانند زمین‌لرزه ۲۰۱۳ سراوان سیستان ($M_w 7.7$; $h 70-95$ km) (کاتالوگ دانشگاه هاروارد) از روند داده‌پردازی حذف شدند. ویژگی زمین‌لرزه سراوان سازوکاری کششی با ژرفای زیاد بوده که این ژرفا به دلیل کشش روی صفحه مکران، جایی که زاویه فرورانش در زیر پوسته زیاد می‌شود، بود. ژرفای لایه لرزه‌زا در ایران با استناد به داده‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری محلی و مدل‌سازی شکل موج، بیشینه ۲۰ کیلومتر در نظر گرفته شد (نعمتی و همکاران، ۲۰۱۱ در البرز؛ هتسفلد و همکاران، ۲۰۰۳ در زاگرس و بربریان و همکاران، ۱۹۹۹ در خاور ایران). داده‌های زمین‌لرزه‌های هر کدام از ۳۳۶ بلوک به‌کمک یک برنامه به زبان Fortran در محیط Linux از یکدیگر جدا شده و داده‌پردازی روی داده‌های هر بلوک به‌گونه جداگانه انجام شد. پردازش‌ها و برآزش‌ها به‌ترتیب، با نرم‌افزارهای Excel و Origin انجام شده و همه نقشه‌های این پژوهش نیز با نرم‌افزار GMT رسم شدند (شکل ۱).

ماسون و همکاران (۲۰۰۵) به دگرشکلی بیش‌تر البرز در سنجش با زاگرس اشاره نموده‌اند. در مجموع، با نگاهی به زاگرس، البرز و خاور ایران در نقشه ۱ ب، درمی‌یابیم که خاور ایران در گستره دشت‌بیاض و آبیض (بیشینه 1000 nstrain/yr) بیش‌تر از البرز و البرز بیش‌تر از

متفاوت برآورد شده و با برآوردهای دیگران که داده‌ها و بلوک‌بندی‌های دیگری به‌کار برده‌اند، مقایسه گردیده است.

مواد و روش‌ها

کرنش لرزه‌ای به روش کاستروف

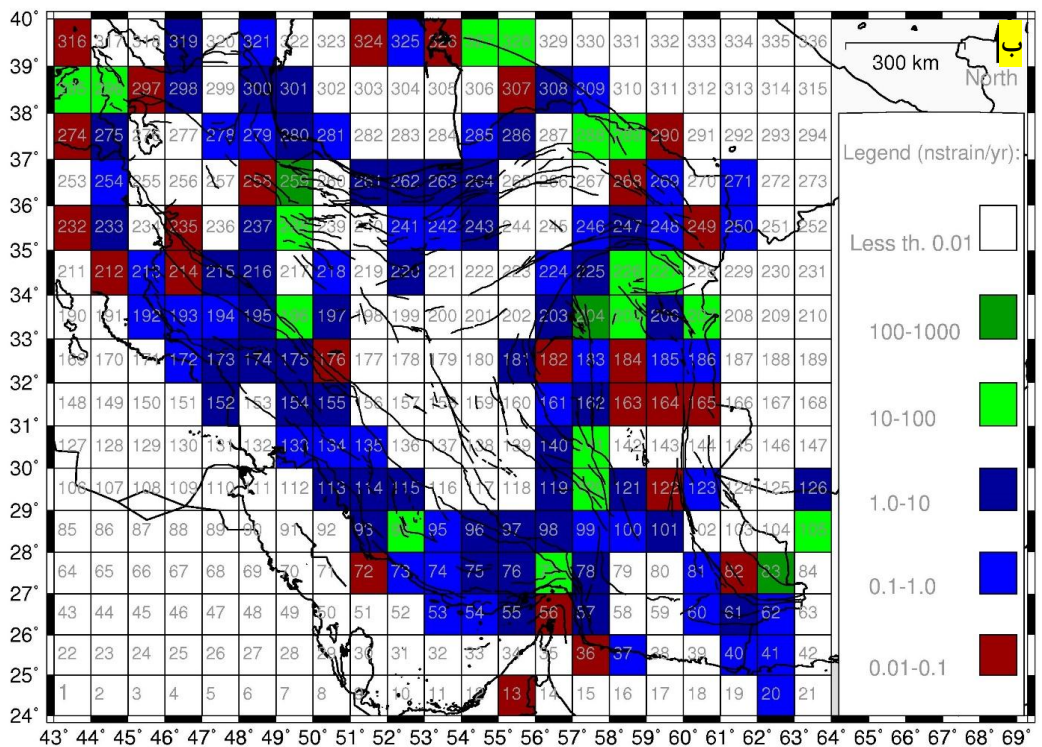
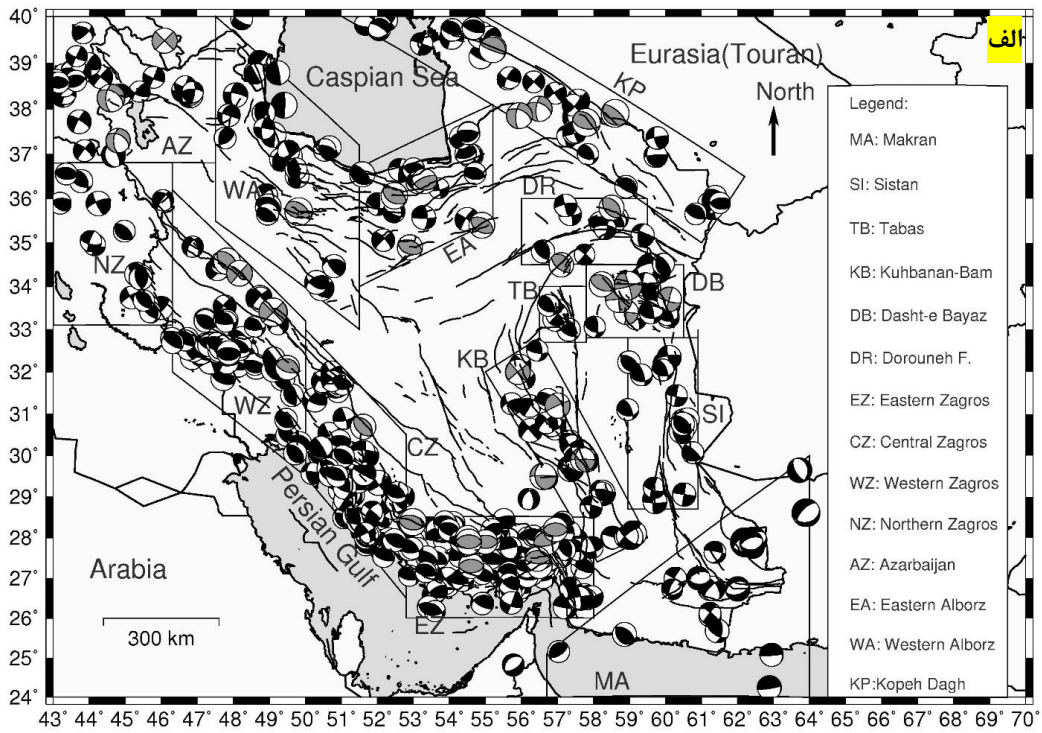
روش کاستروف (۱۹۷۴) (فرمول ۱) نخستین روش برای برآورد نرخ میانگین کرنش لرزه‌ای ϵ_{ij} (برحسب نانواسترین در سال) برای N زمین‌لرزه در این پژوهش می‌باشد.

$$\epsilon_{ij}^n M_0^n M_{ij} = (1/2\mu T v) \sum_{n=1, N} \epsilon \quad (1)$$

در این فرمول، μ میانگین ضریب برشی (N/m^2) در پوسته قاره‌ای زمین بوده (استین و وایسشن، ۲۰۰۳)، v حجم فضایی از پوسته که دچار تنش و کرنش می‌شود، T بازه زمانی داده‌ها و M تانسور گشتاور لرزه‌ای زمین‌لرزه‌ها است. M_0^n بخش نرده‌ای این تانسور و M_{ij}^n بخش برداری و تانسور یک n امین زمین‌لرزه می‌باشد. حجم v از ضرب مساحت بلوک انتخابی در ستبرای لایه لرزه‌زا در هر گستره برآورد می‌گردد. برای برآورد اندازه نرخ کرنش لرزه‌ای، داشتن بخش نرده‌ای تانسور کافی است. بنابر ایده برخی از پژوهش‌گران مانند جکسون و همکاران (۱۹۹۵) بلوک‌های منتظم انتخابی بایستی به‌گونه‌ای باشد که ساده‌سازی و میانگین بودن فرمول کاستروف را در نظر بگیرد. بدین معنا که ابعاد بلوک‌های انتخابی بایستی درازای بیش‌تر گسل‌های گستره را در بر بگیرد. بلوک‌بندی‌های زمین‌ساختی نیز بایستی تا جای ممکن با زمین‌ساخت گستره هم‌خوانی داشته باشد (شکل ۱ الف). بلوک‌های سه‌گوش شاید کم‌تر با گستره‌های زمین‌ساختی و گسل‌ها هم‌خوانی داشته و پردازش داده‌ها نیز در آن‌ها در سنجش با بلوک‌های چهارگوش دشوارتر باشد. در ایران بیش‌ترین درازای گسل زمین‌لرزه‌ای (شکستگی حاصل از گسلش)، ۱۲۵ کیلومتر (بربریان و همکاران، ۱۹۹۹) بوده که مربوط به زمین‌لرزه ۱۹۹۷ زیرکوه قائن ($M_w 7.2$) بوده است. بنابراین، ایران و پیرامون آن در نقشه ۱ ب، به شمار ۳۳۶ بلوک با ابعاد $1^0 \times 1^0$ بخش‌بندی شد. از طرفی بنابر ایده برخی از پژوهش‌گران دیگر مانند جنی و همکاران (۲۰۰۴) ابعاد بلوک‌های انتخابی بایستی از دیدگاه زمین‌ساختی گستره یکنواختی را در بر بگیرد. این

خوگو بندرعباس (Ms 7.0) بربریان و پایاستاماتیو (۱۹۷۸) (سبز کم‌رنگ در شکل ۱ ب) محدود است.

زاگرس دچار دگرشکلی شده است. دگرشکلی‌های زاگرس تنها به گستره‌های روکانونی زمین‌لرزه ۱۹۷۲ قیر-کارزین (دوونی و گرتنس، ۱۹۷۳) و زمین‌لرزه ۱۹۷۷ (Ms 6.9)



شکل ۱. الف) سازوکار زمین‌لرزه‌های ایران که در این پژوهش به‌کار برده شده‌اند. ۱۴ منطقه زمین‌ساختی در این نقشه بر پایه ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی، راستای گسل‌ها و سازوکار آن‌ها جدا شده‌اند. ب) برآورد کرنش لرزه‌ای برپایه بلوک‌های ۱°×۱°. در شکل ب رنگ سفید نشان‌دهنده بلوک‌های بدون زمین‌لرزه یا گستره با کرنش کمتر از ۰/۱ (nstrain/yr) است. گسل‌ها از حسامی و همکاران (۲۰۰۳) برگرفته شده‌اند.

کرنش لرزه‌ای به روش مولنار

برای از دست ندادن زمین‌لرزه‌های کوچک ($M < 5.5$) روش مولنار (۱۹۷۹) به‌عنوان روش دوم، که از خردلرزه‌ها نیز بهره می‌گیرد، برای برآورد اندازه کرنش لرزه‌ای به‌کار برده شده است (فرمول‌های ۲ تا ۴).

$$M_0 = (A/1-B) M_{0max}^{(1-B)}, (A=10^{(a-bd/c)}), (B=-b/c)$$

$$\log_{10} N = a - bM$$

$$\log_{10} M_0 = cM_w + d \quad (c=1.5, d=-16.05)$$

در این فرمول‌ها a ، b ، c و d به‌ترتیب، ضرایب فرمول گوتنبرگ- ریشتر (۱۹۵۶) (فرمول ۳) می‌باشد. ضرایب فرمول هنگس و کاناموری (۱۹۷۹) که رابطه میان M_w و M_0 (فرمول ۴) است، $1/5$ و $16/05$ می‌باشند. M_{0max} در فرمول ۲ به بزرگ‌ترین گشتاور لرزه‌ای در میان زمین‌لرزه‌ها در یک بلوک انتخاب شده اشاره دارد.

برای روش مولنار بایستی یک کاتالوگ نسبتاً کامل شامل خردلرزه‌ها انتخاب شود. برای این کار کاتالوگ لرزه‌ای پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با ۲۳۳۳۱ زمین‌لرزه انتخاب شد. برای یکنواخت‌سازی

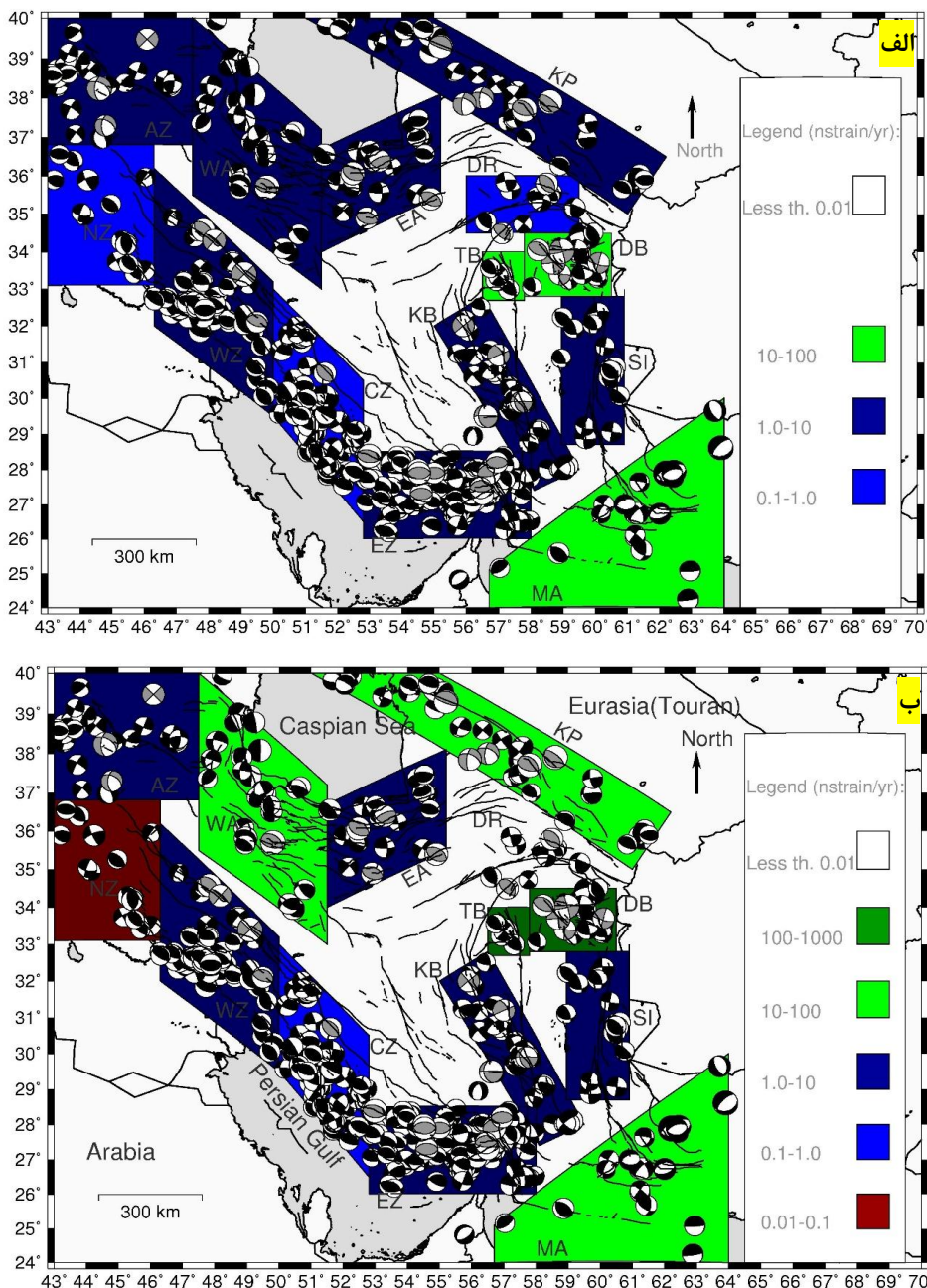
بزرگای زمین‌لرزه‌های این کاتالوگ که بیش‌تر M_s ، m_b و M_L می‌باشند، از فرمول‌های نعمتی و تاتار (۲۰۱۵) (فرمول ۵) به همراه فرمول ۴ بهره گرفته شد (شکل ۲).

$$\log_{10}(M_0) = 1.564m_b + 16.128 = 1.033M_s + 19.044 = 1.472M_L + 16.195$$

برای برآورد کرنش با روش مولنار نیاز به برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی داریم. جدول ۱ پارامترهای لرزه‌خیزی ۱۴ گستره زمین‌ساختی ایران (بر پایه نقشه ۱ الف) را نشان می‌دهد. در این جدول بزرگای کاملی داده‌های هر گستره آمده است. این بزرگا از نمودار گوتنبرگ- ریشتر (۱۹۵۶) به‌دست می‌آید. نخستین خمش در نمودار، بزرگای کاملی (M_c) داده‌ها می‌باشد (وسنر و وایمر، ۲۰۰۵). بر پایه شکل ۲ الف و ب بخش‌های آبی کم‌رنگ و پررنگ برآورد یکسانی از کرنش را با دو روش نشان می‌دهند. روش مولنار برای گستره دشت‌بیاض در خاور ایران اندازه کرنش بیش‌تری را برآورد نموده است. این روش برای گستره زاگرس شمالی شاید به این دلیل که این گستره نسبت به زمین‌لرزه‌های بزرگ خردلرزه کم‌تری دارد، کرنش کم‌تری برآورد نموده است.

جدول ۱. پارامترهای لرزه‌خیزی ۱۴ گستره زمین‌ساختی ایران برای برآورد کرنش با روش مولنار. ستون‌ها در این جدول به‌ترتیب، نام بلوک، شمار زمین‌لرزه، بزرگای کاملی که از نمودار گوتنبرگ- ریشتر (۱۹۵۶) به‌دست می‌آید، پارامترهای لرزه‌خیزی هر بلوک، انحراف استاندارد فرمول گوتنبرگ- ریشتر به‌دست آمده برای هر بلوک، خطای استاندارد رگرسیون (برآزش) فرمول، بیشینه بزرگای زمین‌لرزه‌های بلوک و بیشینه گشتاور نرده‌ای لرزه‌ای برای بزرگ‌ترین زمین‌لرزه می‌باشند.

$M_{max}^{(10^{25} Dyne.cm)}$	M_{max}	$R Sq$	$St. Dev$	b	a	Mc	$N Eq$	$Cell Name$
۷۹/۴۳	۷/۲	۰/۹۹۷	۰/۲۲۶	۰/۶۹۴	۵/۴۸	۲/۴	۱۴۳۶	AZ
۴۴۶/۷	۷/۷	۰/۹۸۷	۰/۱۷۹	۰/۶۹۳	۵/۵۵	۲/۴	۲۳۵۷	WA
۳۹/۸۱	۷	۰/۹۸۱	۰/۲۱۹	۰/۷۳۷	۵/۵۷	۲/۴	۱۸۸۹	EA
۱۵۸/۵	۷/۴	۰/۹۸۸	۰/۱۵۲	۰/۶۴۹	۵/۴۲	۲/۹	۱۳۰۳	KP
۵/۰۱	۶/۴	۰/۹۶۹	۰/۱۹۲	۰/۶۳۷	۴/۶۲	۲/۹	۲۱۲	DR
۱۵۸/۵	۷/۴	۰/۹۹۶	۰/۰۶۶	۰/۵۸۷	۴/۸	۳/۴	۳۶۱	DB
۱۵۸/۵	۷/۴	۰/۹۲۱	۰/۳۵۹	۰/۴۸۶	۳/۶۱	۲/۴	۱۹۵	TB
۱۹/۹۵	۶/۸	۰/۹۶۸	۰/۲۱۸	۰/۶۶۵	۴/۸۴	۲/۹	۲۷۰	SI
۱۴/۱۳	۶/۷	۰/۹۷۶	۰/۲۱۷	۰/۷۶۷	۵/۷۷	۲/۹	۱۲۷۶	KB
۱۹/۹۵	۶/۸	۰/۹۲۹	۰/۴۰۷	۰/۷۵۸	۶/۴۳	۲/۸	۴۱۹۰	EZ
۳/۵۴	۶/۳	۰/۹۶۹	۰/۲۴۸	۰/۸۵۵	۶/۶۲	۲/۹	۳۰۲۷	CZ
۱۵۸/۵	۷/۴	۰/۹۸۳	۰/۲۳۳	۰/۹۰۷	۶/۸۱	۲/۹	۳۹۱۷	WZ
۳/۵۴	۶/۳	۰/۹۶۲	۰/۲۵۱	۰/۸۹۶	۶/۲۶	۳/۴	۳۶۷	NZ
۴۴۶/۷	۷/۷	۰/۹۹۸	۰/۰۴۸	۰/۶۶۷	۵/۱۳	۳/۹	۱۸۶	MA



شکل ۲. الف) برآورد اندازه کرنش لرزه‌ای با روش کاستروف (۱۹۷۴) و ب) برآورد اندازه کرنش لرزه‌ای با روش مولنار در بلوک‌های زمین‌ساختی ایران با به‌کارگیری مولفه‌های مستقل تانسور گشتاور زمین‌لرزه‌ها

جداگانه برآورد گردیده و مقایسه شدند (فرمول‌های ۶ و ۷) (استین و وایسشن، ۲۰۰۳).

$$T = \{-\sin(D)\sin(S) + \cos(R)\cos(S) + \sin(R)\cos(D)\sin(S), \\ -\sin(D)\cos(S) - \cos(R)\sin(S) + \sin(R)\cos(D)\cos(S), \\ \cos(D) + \sin(R)\sin(D)\}$$

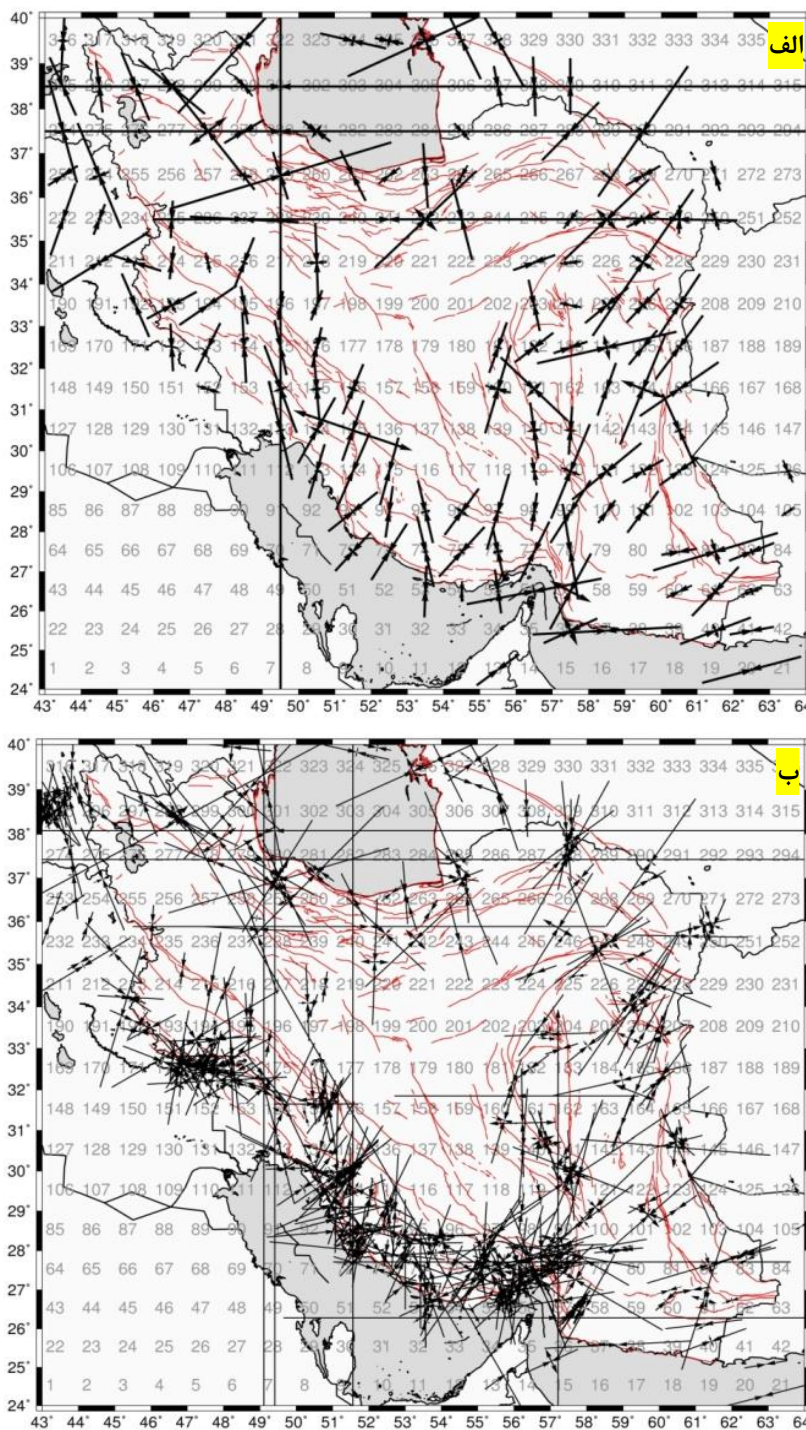
$$P = \{-\sin(D)\sin(S) - \cos(R)\cos(S) - \sin(R)\cos(D)\sin(S), \\ -\sin(D)\cos(S) + \cos(R)\sin(S) - \sin(R)\cos(D)\cos(S), \\ \cos(D) - \sin(R)\sin(D)\}$$

راستای تنش‌های فشاری و کششی

راستای تنش‌های فشاری و کششی وارد آمده بر پوسته زمین را در یک گستره لرزه‌خیز می‌توان بر پایه راستای بردارهای فشار P و کشش T زمین‌لرزه‌ها در آن گستره به‌دست آورد. برای این کار یک بار برآیند راستاهای تنش‌های فشاری و کششی زمین‌لرزه‌ها در هر بلوک‌هاگوش و یک‌بار این راستاها برای هر زمین‌لرزه

(شکل ۳ الف و ب). اگر نقشه بردارهای فشار و کشش را در ایران (شکل ۳ الف) که با بلوک بندی $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ رسم شده است با بردارهای کرنش ژئودتیک رئیسی و همکاران (۲۰۱۶) که آن‌هم با همین بلوک بندی ترسیم شده، مقایسه کنیم در می‌یابیم که به جز در مکران و البرز هم‌خوانی نسبتاً خوبی میان راستای بردارهای دو نقشه وجود دارد.

در این فرمول‌ها (S) راستا، (D) شیب و (R) جهت لغزش گسل زمین‌لرزه‌ای است. در بخش‌هایی از زاگرس و خاور ایران راستای بردارهای فشار در راستای هم‌گرایی میان دو پهنه عربی و اوراسیا می‌باشد. این هم‌گرایی برپایه کار ورنانت و همکاران (۲۰۰۴) نزدیک به 21 mm/yr در جنوب خاوری ایران است. راستای این هم‌گرایی شمال-شمال‌خاوری است



شکل ۳. الف) برآیند محوره‌های کشش و فشار زمین‌لرزه‌ها در هر بلوک چهارگوش و ب) محوره‌های کشش و فشار برای هر یک از زمین‌لرزه‌ها. در این نقشه گسل‌ها با رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند.

کوتاه‌شدگی پوسته

برای برآورد مولفه‌های مختلف سرعت جابه‌جایی پوسته زمین نیاز به داشتن مولفه‌های مختلف تانسور گشتاور لرزه‌ای زمین‌لرزه‌ها (M_{ij} در فرمول ۱) داریم. شش مولفه مستقل این تانسور با فرمول‌های ۸ تا ۱۳ (جکسون و همکاران، ۱۹۹۵) با به‌کارگیری سه زاویه راستا (S)، شیب (D) و جهت لغزش (R) گسل زمین‌لرزه‌ای قابل برآورد هستند. پارامترهای یاد شده از کار جکسون و همکاران (۱۹۹۵) و کاتالوگ دانشگاه هاروارد برگرفته شده‌اند.

$$M_{xx} = -\sin(D)\cos(R)\sin(2S) - \sin(2D)\sin(R)\sin^2(S)$$

$$M_{yy} = \sin(D)\cos(R)\sin(2S) - \sin(2D)\sin(R)\cos^2(S)$$

$$M_{zz} = -M_{xx} - M_{yy}$$

$$M_{xy} = \sin(D)\cos(R)\cos(2S) + (0.5)\sin(2D)\sin(R)\sin(2S)$$

$$M_{yz} = -\cos(D)\cos(R)\cos(S) + \cos(2D)\sin(R)\sin(S)$$

$$M_{xz} = -\cos(D)\cos(R)\sin(S) + \cos(2D)\sin(R)\cos(S)$$

از آنجایی که کرنش درونی پوسته زمین به صورت جابه‌جایی میان بلوک‌های پوسته نمود پیدا می‌کند، بنابراین می‌توان سرعت جابه‌جایی پوسته را در راستاهای مختلف با به‌کارگیری مولفه‌های تانسور کرنش که از تانسور گشتاور زمین‌لرزه‌ها به دست می‌آید، برآورد نمود (جکسون و مکنزی، ۱۹۸۸). جکسون و مکنزی (۱۹۸۸) فرمول‌هایی نیز میان سرعت جابه‌جایی پوسته در راستاهای مختلف و مولفه‌های تانسور کرنش و همچنین تانسور گشتاور زمین‌لرزه‌ها به دست آورده‌اند. پس از برآورد مولفه‌های مستقل تانسور گشتاور زمین‌لرزه‌ها با فرمول‌های بالا، با به‌کارگیری فرمول‌های ۱۴ و ۱۵ (پوندولی و همکاران، ۱۹۹۸) می‌توان اندازه سرعت جابه‌جایی پوسته را در راستاهای اصلی افقی و قائم برآورد نمود.

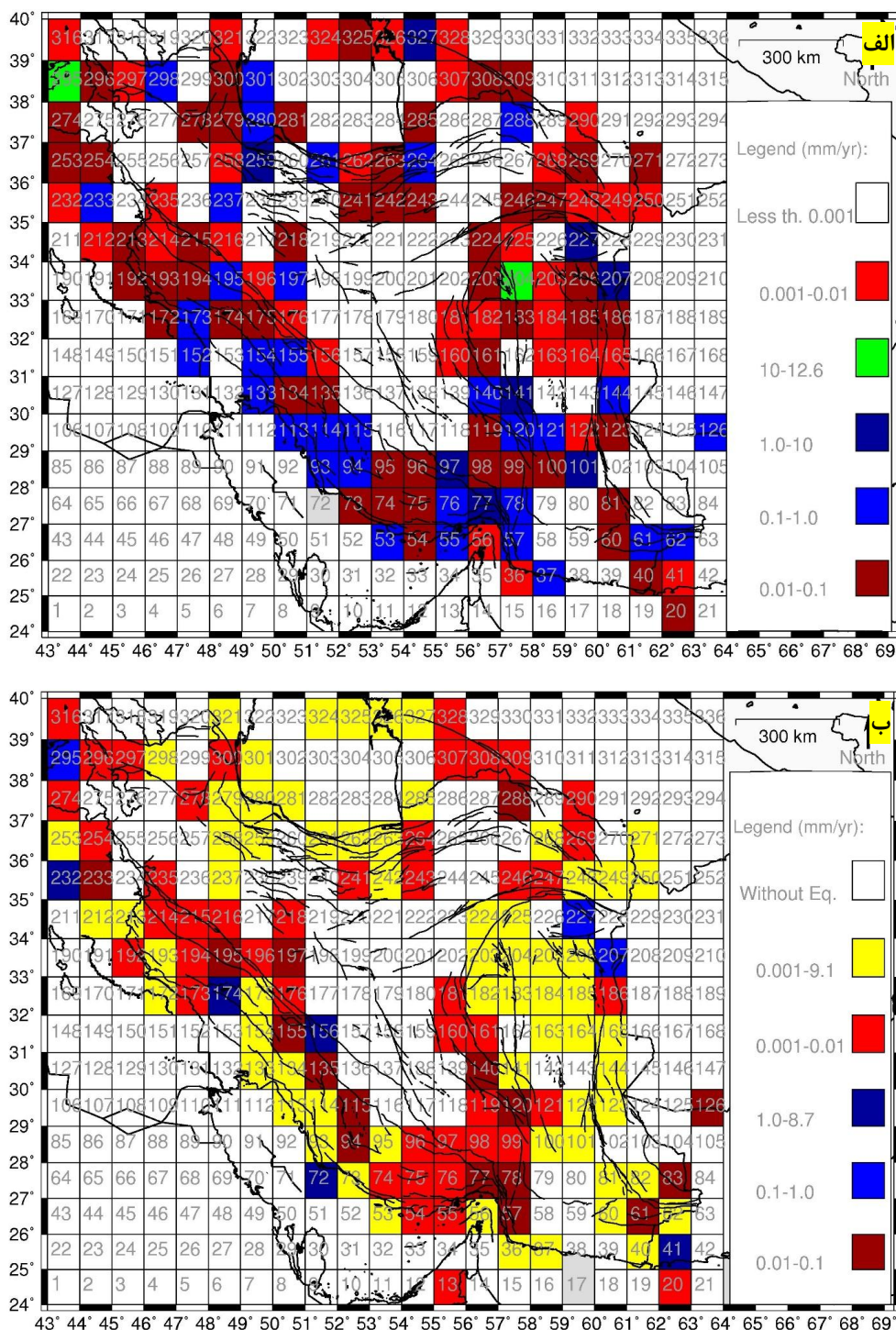
در این فرمول‌ها x ، y و z به ترتیب، درازا، پهنا (چون بلوک‌ها منتظم هستند، درازا و پهنا یکی هستند) و یک درجه می‌باشد و ستبرای بلوک انتخابی (ستبرای لایه لرزه‌زا) که سرعت برای آن برآورد شده، بوده و V_h و V_z نیز به ترتیب، سرعت افقی و قائم جابه‌جایی پوسته در بلوک انتخابی می‌باشند (شکل ۴). چون در نقشه ۴ الف و ب ابعاد بلوک‌ها در راستای شمال و خاور قرار دارد، بنابراین x راستای شمال، y راستای خاور و z راستای قائم را نشان می‌دهند.

نقشه‌های شکل ۴ نشان می‌دهند که بلوک‌های ۲۰۴ و ۲۹۵ دارای بیش‌ترین سرعت افقی جابه‌جایی هستند. در بلوک ۲۰۴ زمین‌لرزه بزرگ طیس گلشن ($M_s 7.4$)؛ بربریان، ۱۹۷۹) و پس‌لرزه‌های آن روی داده و در بلوک ۲۹۵ به دلیل فشردگی رو کانون زمین‌لرزه‌ها بیش‌ترین سرعت افقی جابه‌جایی دیده می‌شود (نقشه ۴ الف).

با توجه به نقشه ۴ ب می‌توان گفت که نتایج داده‌پردازی در این پژوهش نشان می‌دهد گستره زاگرس فراخاسته با فراخاست یا ستبرشدگی پوسته و فروافتادگی پیش‌بوم زاگرس با فرونشست یا نازک‌شدگی پوسته زمین همراه است که با زمین‌ساخت گستره‌های یادشده هم‌خوانی خوبی دارد.

بربریان (۱۹۹۵) زمین‌ساخت جنبا در زاگرس را نتیجه فعالیت در طول دو دسته گسل اصلی می‌داند. راندگی‌های اصلی طولی (مانند گسل‌های اردل، زاگرس مرتفع و گسل پیشانی کوهستان) و گسل‌های راستالغز عرضی (مانند گسل‌های کازرون و سبزپوشان). زاگرس مرتفع با فعالیت گسل زاگرس مرتفع (مانند زمین‌لرزه ۱۸ نوامبر ۱۲۲۶ میلادی با بزرگای $M_w=6.4$ و بیشینه شدت $I_0=VII$) ارتفاع گرفته است بربریان (۱۹۹۵) براساس موقعیت فعلی سنگ‌های پالئوزوئیک در امتداد کمربند زاگرس مرتفع در طول قطعات ناپیوسته گسل زاگرس مرتفع، اندازه جابه‌جایی شاقولی در راستای این گسل را بیش از ۶ کیلومتر تخمین زده است (بربریان، ۱۹۸۱). اگرچه، سازوکار زمین‌لرزه‌ها نازک‌شدگی پوسته زمین را در فروافتادگی پیش‌بوم زاگرس تایید نمی‌کند، بربریان (۱۹۸۱) به این نکته اشاره نموده است که هم‌زمان با فراخاست زاگرس مرتفع از زمان میوسن زیرین در امتداد گسل زاگرس، فرونشست نسبی حوضه فروافتاده زاگرس نیز آغاز شده است.

دیگر فرونشست‌ها نیز در ساحل باختری مکران، خاور جازموریان، لوت شمالی، سواحل جنوبی و فرورانش میانه دریای خزر نیز دیده می‌شود که با زمین‌ساخت گستره‌های یادشده هم‌خوانی دارد. نازک‌شدگی پوسته در گستره‌هایی از کپهداغ، البرز باختری و تالش که در آن گستره‌ها انتظار فراخاست و ستبرشدگی پوسته را داریم، با زمین‌ساخت آن گستره‌ها هم‌خوانی ندارد.



شکل ۴. برآورد سرعت جابه‌جایی پوسته در راستاهای اصلی افقی (الف) و قائم (ب) با به‌کارگیری مولفه‌های مستقل تانسور گشتاور زمین‌لرزه‌ها (نعمتی و همکاران، ۲۰۱۱)

شد، می‌توان تنها یک برآوردی از آنچه نام برده شد انجام داد. اگرچه، کاربرد بلوک‌های بزرگ برای برآورد تنش و کرنش از این بابت که می‌تواند با زمین‌ساخت گسترده هم‌خوانی بیشتری داشته باشد، سودمند بوده، خطای بیشتری نیز در برآوردها در پی خواهد داشت. زیرا، برای

بحث و نتیجه‌گیری

اگرچه، زمان فرآیندهای زمین‌ساختی از جمله نازک‌شدگی پوسته، فرونشست برخی از پهنه‌های زمین‌ساختی و یا بستر شدگی آن به درستی معلوم نیست، اکنون با روش‌هایی که در این پژوهش به کار برده

بالا نشان می‌دهد که به‌گمان، هرچه منطقه‌بندی بزرگ‌تر باشد، بیشینه کرنش کم‌تری برآورد می‌گردد. بنابراین، می‌توان گفت، ناهم‌خوانی میان نرخ کرنش برآورد شده این پژوهش با دیگر پژوهشگران در ایران به تفاوت بلوک‌بندی، تعداد زمین‌لرزه‌ها، روش محاسبه و بازه بزرگای داده‌های گزینش شده باز می‌گردد.

انتخاب گستره‌های زمین‌ساختی بر پایه دیدگاه‌های لرزه‌زمین‌ساختی مانند راستای گسل‌ها (البرز، زاگرس، خاور ایران و کپه‌داغ)، سازوکار چیره آن‌ها (زاگرس، آذربایجان، مکران و البرز)، تغییر راستای رشته‌کوه‌ها (البرز)، تکه‌بندی گسل‌ها (گسل اصلی عهد حاضر زاگرس و گسل اصلی معکوس زاگرس)، پراکندگی زمین‌لرزه‌ها (خاور ایران) انجام شده است. اگرچه، درباره تغییر راستای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی ایران می‌توان گفت که زاگرس تغییر راستا نداشته و تغییر راستای البرز و فرم سینوسی آن نیز در زمان‌های گوناگون پدید آمده و آشکار نیست این فرایند هنوز ادامه دارد یا نه. تفاوت گاهی زیاد، میان برآورد نرخ کرنش با منطقه‌بندی‌هایی برپایه دیدگاه‌های مختلف بیان می‌دارد که شاید یک منطقه‌بندی بینابینی بتواند راه‌گشا بوده و برآورد بهتری از نرخ کرنش ارائه دهد. اگرچه، برای این‌که بتوان فرمول‌های متعارفی را مانند فرمول کاستروف به‌کار برد، بایستی مساحت بلوک‌ها ثابت مانده و نیازی به منتظم بودن بلوک‌ها نیست. بایستی تا جایی که امکان دارد شکل منطقه‌بندی‌ها با زمین‌ساخت گستره هم‌خوانی داشته و مساحت آن‌ها نیز در ایران نزدیک به $10^9 \times 10^9$ شود، اگرچه، برای سرزمینی مانند ایران با ویژگی‌های زمین‌ساختی موجود، درازای بسیاری از گسل‌ها بیش‌تر از این مقدار تعیین شده است، این اندازه از بلوک‌های بزرگ‌ترین گسل‌های زمین‌لرزه‌ای (شکستگی حاصل از زمین‌لرزه) را در بر خواهد گرفت.

به‌کارگیری زمین‌لرزه‌های کوچک ($M < 5.0$) و گشتاور نرده‌ای آن‌ها در برآورد کرنش نشان می‌دهد که سهم آن‌ها گاهی با سهم زمین‌لرزه‌های بزرگ برابری می‌نماید. به شرطی که گستره‌های گزینش شده برای برآورد کرنش بسیار بزرگ نبوده و الگوی لرزه‌خیزی و گسلی یکنواختی داشته باشند (آمبراسیس و جکسون، ۱۹۹۸). بنابراین، در برآورد کرنش با رعایت شرط گفته شده، نمی‌بایست از زمین‌لرزه‌های کوچک صرف‌نظر نمود.

این برآوردها بایستی میانگین‌گیری انجام شود. این اندازه میانگین به نقطه به‌هم‌رسی میانه‌ها در بلوک‌های سه‌گوش، به نقطه به‌هم‌رسی قطرها در بلوک‌های چهارگوش و به مرکز ثقل بلوک‌های بی‌شکل نسبت داده می‌شود. در این‌گونه میانگین‌گیری همه نقاط یک بلوک از دیدگاه تنش، کرنش و سرعت یکنواخت فرض شده که این یک فرض کاملاً درست نیست. در کاربرد بلوک‌های کوچک، با چشم‌پوشی از زمین‌ساخت گستره، این برآوردها با کم‌ترین خطا در فرض یکنواختی بلوک‌ها همراه می‌باشند. یک برآورد خوب با گزینش بلوک‌هایی انجام می‌شود که تعادلی میان تاثیر زمین‌ساخت و خطای یکنواختی در یک گستره برقرار نماید.

ناهم‌خوانی میان نرخ کرنش برآورد شده این پژوهش ($0.01-411 \text{ nstrain/yr}$) با کار تزارو و همکاران ($3.0-6.4 \text{ nstrain/yr}$) (تزارو و همکاران، ۲۰۰۶) برای مناطق غربی اروپای میانی می‌تواند به تفاوت رژیم زمین‌ساختی میان گستره‌ها و هم‌چنین بازه بزرگای داده‌های گزینش‌شده تزارو و همکاران (M_w ۲۰۰۶) ($3.0-6.4$) و این پژوهش (M_s 4.4-7.7) برای این برآوردها باز گردد. این ناهم‌خوانی با تفاوت نرخ هم‌گرایی ایران-عربی که نزدیک به 21 mm/yr بوده (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴) با هم‌گرایی افریقا-اروپا که تنها 6 mm/yr است (دمتر و همکاران، ۱۹۹۴)، قابل توجیه است. هم‌چنین، دلیل تفاوت نتیجه به دست آمده در این نوشتار با نتیجه بدست آمده در اروپای میانی به فرآیندهای دگرشکلی بسیار متفاوت نیز باز می‌گردد.

انصاری و زمانی (۲۰۱۴)؛ ظریفی و همکاران (۲۰۱۳)، و رئیس‌ی و همکاران (۲۰۱۶)، به‌ترتیب، بازه کرنشی $0.1-12 \text{ nstrain/yr}$ ؛ $8-60 \text{ nstrain/yr}$ و $0.03-232 \text{ nstrain/yr}$ را با منطقه‌بندی‌های متفاوت برای ایران به‌دست آورده‌اند. انصاری و زمانی (۲۰۱۴)، منطقه‌بندی‌های بزرگ زمین‌ساختی، ظریفی و همکاران (۲۰۱۳)، منطقه‌بندی با ابعاد ۲ درجه و رئیس‌ی و همکاران (۲۰۱۶)، منطقه‌بندی با ابعاد ۱۰۰ کیلومتر را برای برآورد کرنش در ایران برگزیده‌اند. همگی پژوهشگران یاد شده با روش کاستروف و با به‌کارگیری زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از $5/5$ کرنش لرزه‌ای را برآورد نموده‌اند. مقایسه بازه کرنشی این پژوهش ($0.01-411 \text{ nstrain/yr}$) با منطقه‌بندی با ابعاد ۱ درجه با سه برآورد

- Ansari. Sh. And Zamani. Z (2014) Short-term seismic crustal deformation of Iran. ANNALS OF GEOPHYSICS, 57, 2, S0210, doi:10.4401/ag-6413.
- Berberian. M (1979) Earthquake faulting and bedding thrust associated with the Tabas-e Golshan Iran earthquake of September 16 1978. Bull. Seism. Soc. Am., 69(6): 1861-1887.
- Berberian. M. and Papastamatiou. D (1978) Khurgu (North Bandar Abbas, Iran) earthquake of March 21, 1977; a preliminary field report and a seismotectonic discussion. Bulletin of the Seismological Society of America, 68: 411-428.
- Berberian, M (1981) Active faulting and tectonics of Iran, in Zagros-Hindu Kush-Himalaya Geodynamic Evolution. Am. Geophys. Union, Geodyn. Series 3, 33-69.
- Berberian, M (1995) Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics, Tectonophysics 241, P. 193-224
- Berberian. M., Jackson. J.A., Qorashi. M., Khatib. M.M., Priestley. K., Talebian. M., Ghafuri-Ashtiani. M (1999) The 1997 May 10 Zirkuh (Qa'emat) earthquake (M 7.2): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran. Geophys J Int., 136: 671-694.
- Barnhart. W.D., Hayes. G.P., Samsonov. S.V., Fielding. E.J. and Seidman. L.E (2014) Breaking the oceanic lithosphere of a subducting slab: The 2013 Khash, Iran earthquake. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 41: 32-36.
- DeMets. C., Gordon. R.G., Argus. D.F., Stein. S (1994) Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. Geophys. Res. Lett., 21(20): 2191-2194.
- Deweny. J.W. and Grantz. A (1973) THE GHIR EARTHQUAKE OF APRIL 10, 1972 IN THE ZAGROS MOUNTAINS OF SOUTHERN IRAN: SEISMOTECTONIC ASPECTS AND SOME RESULTS OF A FIELD RECONNAISSANCE. Bulletin of the Seismological Society of America, 63(6): 2071-2090.
- Gutenberg. B. and Richter. C.F (1956) Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. Bull. Seism. Soc. Am., 46: 105-145.
- Hanks. T.C. and Kanamori. H (1979) A moment magnitude scale. Journal of Geophysical Research, 84(5): 2348-2350
- Harvard University, Department of Geological Sciences, Centroid Moment Tensor catalogue. available online at: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
- تاکنون در ایران با روش مولنار، که سهم زمین‌لرزه‌های کوچک را نیز در نظر می‌گیرد، کرنش لرزه‌ای برآورد نشده بود.
- روش متداول برآورد کوتاه‌شدگی پوسته زمین پردازش داده‌های GPS است. فراخاست‌ها و یا ستبرشدگی پوسته زمین در برخی گستره‌ها در ایران مانند البرز و زاگرس پیامد هم‌گرایی دو پهنه عربی و توران (بخشی از اوراسیا) می‌باشد. سرعت جابه‌جایی زمین که با داده‌های لرزه‌ای برآورد گردیده است، کاملاً با زمین‌ساخت ایران هم‌خوانی ندارد. علت عدم هم‌خوانی سازوکار زمین‌لرزه‌ها و فرونشست بویژه در فروافتادگی پیش‌بوم زاگرس شاید به وجود لایه‌های گچی و نمکی در پوشش رسوبی (بربریان، ۱۹۹۵) این گستره بازگردد. پژوهش طالبیان و جکسون (۲۰۰۴) که بر پایه مدل‌سازی شکل موج زمین‌لرزه‌های بزرگ در زاگرس و فروافتادگی پیش‌بوم زاگرس است، بیان می‌دارد که کانون بیش‌تر این زمین‌لرزه‌ها در این گستره به پوشش رسوبی محدود است. شاید وجود لایه‌های گچی و نمکی باعث مستهلک شدن جابه‌جایی قائم در این گستره شده و از نمود آن تا حدود زیادی جلوگیری کرده باشد.
- در مجموع از دیدگاه دگرشکلی، راستای کشش و فشار و سرعت جابه‌جایی پوسته زمین شاید بتوان گستره ایران را به ۷ بخش متفاوت دسته‌بندی نمود: ۱- نوار زاگرس شمال خاوری (زاگرس فرازیافته)، ۲- نوار زاگرس جنوب باختری (فروافتادگی پیش‌بوم زاگرس)، ۳- بخش شمالی خاور ایران (گستره دشت‌بیاض-آبیز)، ۴- بخش جنوب باختری خاور ایران (نوار کوه‌بنان تا بم)، ۵- خاور و شمال خاوری کپه‌داغ، ۶- البرز خاوری و میانی و ۷- تالش، البرز باختری و خاور آذربایجان.

سیاس‌گذاری

از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برای پایگاه برخط داده‌های لرزه‌ای آن نهاد سیاس‌گذاری می‌شود.

منابع

Ambraseys. N. and Jackson. J (1998) Faulting associated with historical and recent earthquakes in the eastern Mediterranean region. Geophys. J. Int., 133: 390-406.

- Talebian. M. and Jackson. J (2004) A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran, *Geophys. J. Int.*, 156, P. 506–526
- Hatzfeld, D., Tatar. M., Priestley. K. and Ghafory-Ashtiani. M (2003) Seismological constraints on the crustal structure beneath the Zagros Mountain belt (Iran). *Geophys. J. Int.*, 155, 403-410.
- Tesauro. M., Hollenstein. Ch., Egli. R., Geiger. A. and Kahle.H.G (2006) Analysis of central western Europe deformation using GPS and seismic data. *Journal of Geodynamics*, 42: 194-209.
- Vernant. P., Nilfouroushan. F., Hatzfeld. D., Abassi. M., Vigny. C., Masson. F., Nankali. H., Martinod. J., Ashtiani. A., Bayer. R., Tavakoli. F., Che´ry. J (2004) Contemporary crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International*, 157: 381-398.
- Woessner. J. and Wiemer. S (2005) Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2): 684-698.
- Zarifi. Z., Nilfouroushan. F. and Raeesi. M (2013) Crustal stress map of Iran: Insight from seismic and geodetic computations. *Pure Appl. Geophys.*, 171: 1219-1236.
- Zolfaghari. M.R (2009) Geodetic deformation vs. seismic strain deduced by historical earthquakes across the Alborz Mountains. *J Seismol.*, 13: 647-663.
- Hessami. K., Jamali. F., Tabassi. H (2003) Map of Major Active Faults of Iran, Tech. rep., International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Iran, <http://www.iiées.ir>.
- Jackson. J. and McKenzie. D (1988) The relationship between plate motions and seismic moment tensors and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 83, 45-73.
- Jackson. J.A., Haines. A.J. and Holt. W.E (1992) The horizontal velocity field in the deforming Aegean Sea region determined from the moment tensors of earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 97: 657-684.
- Jackson. J., Hains. J. and Holt. W (1995) The Accommodation of Arabia-Eurasia Plate Convergence in Iran. *J. Geophys. Res. Sol Ea*, 100(B8), 15205-15219.
- Jenny. S., Goes. S., Giardini. D., and Kahle, h.G (2004) Earthquake recurrence parameters from seismic and geodetic strain rate in the eastern Mediterranean. *Geoph. J. Int.*, 157, 1331-1347.
- Kostrov. V.V (1974) Seismic moment and energy of earthquakes and seismic flow of rock. *Izv. Acad. Sci. USSR Phys. Solid Earth*: 1, 23-44.
- Masson. F., Che´ry. J., Htzfeld. D., Martinoid. 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.
- Molnar. P (1979) Earthquake recurrence intervals and plate tectonics. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 69: 115-133.
- Nemati. M., Hatzfeld. D., Gheitanchi. M., Sadidkhoy. A., Mirzaei. N (2011) Microseismicity and seismotectonics of the Firouzkuh and Astaneh faults (east Alborz, Iran). *Tectonophysics*, 506: 11-21.
- Nemati. M. and Tatar. M (2015) Relations between source parameters for large Persian earthquakes. *Annals of Geophysics*, 2015 October, 58, 5, 2015, S0543; doi:10.4401/ag-6665.
- Pondrelli. S., Morelli. A. and Boschi. E (1995) Seismic deformation in the Mediterranean area estimated by moment tensor summation. *Geophys. J. Int.*, 122: 938-952.
- Raeesi. M. et al (2016) Quantitative Analysis of Seismicity in Iran. *Pure and Applied Geophysics*, DOI: 10.1007/s00024-016-1435-4.
- Stacey. F.D (1992) *Physics of the Earth*, 3rd ed. Brookfield Press, Brisbane.
- Stein. S. and Wysession. M (2003) *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. ISBN 0-86542-078-5.

Investigation of various stress and strain determination methods and crustal shortening in Iran using focal mechanism of the earthquakes

M. Nemati

Dept., of Geology, Faculty of Science and Earthquake Research Center of Shahid Bahonar University of Kerman

*nematimajid_1974@uk.ac.ir

Received: 2017/7/3 Accepted: 2018/3/3

Abstract

In this research, stress, strain and crustal shortening were calculated in Iran using Kastrov and Molnar methods and also role of gridding in the estimations has been investigated. In this view, numbers of 637 earthquakes with moment magnitude greater than 5.5 in time interval of 1909-2016 were applied. Pressure and tension directions, seismic strain resulted by two methods (gridding and every earthquake individually) and also horizontal and vertical crustal displacement velocity were estimated. Pressure and tension directions and seismic strain deduced by earthquake focal mechanisms, were calculated in three manners: every earthquake individually, $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ and tectonical grindings. Data processing shows that pressure and tension directions and seismic strain are intensely related to the kind of the gridding. Also, there is clear difference between estimation of the strain with the two methods of Kastrov and Molnar. Nevertheless, it could be concluded that maximum deformation is going on in Dasht-e Bayaz and Qaen area in the eastern Iran. Vertical velocity estimations in High Zagros and Zagros Foredeep are crustal thickening and thinning, respectively, which is in accordance well to tectonic of the area. Although, this estimation in eastern and western Alborz are uplift and subsidence, respectively, which the later one is not in accordance with Alborz tectonic with an oblique collision.

Keywords: *Strain, Stress, Earth crust, Earthquake, Mechanism, Iran*