

مطالعه زمین لرزه ۸ خرداد ماه ۱۳۸۳ فیروزآباد - کجور و پس لرزه‌های آن بر اساس تحلیل داده‌های ثبت شده در ایستگاههای لرزه‌نگاری محلی

نوشته: محمد تاتار* و امیر منصور فرهبود*

*پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

The 2004 May 28 Firoozabad-Kojour (Iran) Earthquake, Ms 6.3, and its Aftershocks Based on Recorded Data at Local Seismological Stations

By: M. Tatar* & A. M. Farahbod*

*International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۵/۰۶/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۳۸۵/۰۵/۰۶

چکیده

در ساعت ۱۷ و ۸ دقیقه روز جمعه هشتم خرداد ماه ۱۳۸۳، زمین لرزه‌ای با بزرگی $6/3$ در مقیاس امواج سطحی، ناحیه گسترده‌ای از شمال ایران و بخشهای مرکزی البرز را به لرزه درآورد که منجر به وارد آمدن خسارات فراوان و کشته شدن ۳۵ نفر گردید. با به کارگیری همزمان لرزه نگاشتهای ثبت شده از این رویداد توسط ایستگاههای لرزه‌نگاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و شبکه لرزه‌نگاری تله‌متری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، کانون سطحی زمین لرزه به مختصات $36/30^\circ$ عرض شمالی و $51/60^\circ$ طول خاوری در شمال باختر بلده تعیین شد. تحلیل پس لرزه‌های ثبت شده در ایستگاههای شبکه لرزه‌نگاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و یک شبکه لرزه‌نگاری موقت نصب شده در منطقه نشان می‌دهد که زمین لرزه اصلی در نقطه‌ای در شمال باختر بلده مطابق مختصات ارائه شده به وقوع پیوسته است، ولی پس از چند ساعت ($46:00$ بامداد، ۹ خرداد) با رویداد پس لرزه نسبتاً بزرگی ($Ml=4/8$) به مختصات $36/36^\circ$ عرض شمالی و $51/45^\circ$ طول خاوری، عملاً فعالیت منطقه به سمت باختر مهاجرت کرده است. توزیع پس لرزه‌های ثبت شده توسط هر دو شبکه لرزه‌نگاری دائمی و موقت، گویای این نکته است که بخش باختری گسل مسبب زمین لرزه بسیار فعال تر بوده و غالب پس لرزه‌ها در این بخش و در مجاورت فیروزآباد و کجور قرار می‌گیرند. این امر می‌تواند به تخلیه ناگهانی انرژی در محل کانون اصلی و آزاد شدن تدریجی آن در بخشهای باختری تر نسبت داده شود. تحلیل ۱۴۰ پس لرزه انتخابی ثبت شده در دست کم ۶ ایستگاه لرزه‌نگاری، که با دقت بهتر از ۲ کیلومتر تعیین محل شده‌اند، نشان می‌دهد که گسل مسبب زمین لرزه دارای ۳۰ کیلومتر طول بوده است. توزیع ژرفای کانونی پس لرزه‌ها اساساً به ژرفای ۱۰ تا ۲۸ کیلومتر محدود بوده و ضمن تأیید وجود یک گسلش ژرف، بر شیب حدود ۴۰ درجه گسل مسبب به سمت جنوب باختر دلالت دارند. سازوکار کانونی محاسبه شده برای پس لرزه‌های بزرگ‌تر، اساساً گسلش معکوس به موازات روند کلی منطقه را نشان می‌دهند. توزیع کانون سطحی پس لرزه‌های ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری موقت، چگونگی توزیع آنها بر روی مقطع عرضی و سازوکار کانونی محاسبه شده بر فعالیت احتمالی گسلهای شمال البرز و یا خزر به عنوان گسل مسبب زمین لرزه ۸ خرداد ۱۳۸۳ فیروزآباد - کجور دلالت دارند. وجود صفحات با شیب ملایم ۳۵-۲۵ درجه به سمت جنوب باختر که در برخی از سازوکارهای حل شده برای پس لرزه‌ها مشاهده می‌شود، امکان نسبت دادن زمین لرزه اخیر و پس لرزه‌های آن به گسل خزر را محتمل تر می‌سازند. قرار گرفتن کانون ژرفی زمین لرزه‌ها تا ژرفای حدود ۲۸ کیلومتر حکایت از وجود یک پوسته بلورین زیرین شکننده در این بخش از البرز مرکزی دارد.

کلید واژه‌ها: لرزه‌نگاشت، سازوکار کانونی، گسل شمال البرز، پس لرزه، ساختار سرعتی پوسته، برگردان یک بعدی

Abstract

A moderate earthquake ($M_s=6.3$) struck the coastal region of north of Iran and the central Alborz on 28 May, 2004 was responsible of several damages and about 35 casualties. The mainshock was followed by a large number of aftershocks, the largest one reaching $M_l=4.8$, based on the analysis of local waveforms. We study the mainshock, first major aftershock, and about 240 aftershocks



recorded by Iranian National Seismic Network (INSN), Tehran Telemetry Seismic Network (Institute of Geophysics, Tehran University), and our temporary local seismological stations, which were installed on 30 May, around the epicentral area of this earthquake. Using waveforms of all permanent stations, the coordinates of the mainshock was determined as 36.30° N for latitude and 51.60° E for longitude. The analysis of aftershocks indicates that the seismic activity migrate from east where the mainshock occurred toward west close to the location of the largest aftershock (36.36° N, 51.45° E). 140 selected aftershocks recorded at a minimum of 6 stations, having rms less than 0.15 sec and uncertainties less than 2 km, were used to infer a precise geometry of the fault region. The aftershocks distribution has 30 km long and trends NW-SE parallel to the North Alborz and Khazar faults. The focal depths comprised between 10 and 28 km, unusually deep for Iran. Distribution of aftershocks cluster on cross-section defines a fault plane which dips at 40-50 degree south-westward. Its upward continuation can be related to either North Alborz or Khazar faults. Most of the focal mechanisms are consistent with reverse faulting on NW-SE trending faults, parallel to the main active structures of the region. Well constraint focal mechanisms which dip gently at a rate of 25-40° indicate the activity of the second mentioned faults during the Firozabad-Kojour earthquake. Existence of focal depths up to 28 km indicates an unusual brittle lower crystalline crust in this part of central Alborz.

Keywords: Waveform, Focal mechanism, North Alborz Fault, Aftershock, Crustal Velocity structure, 1-D Inversion.

مقدمه

باختند. هدف از تحقیق حاضر، بررسی زمین لرزه فوق و پس لرزه‌های ناشی از آن بر اساس نگاشتهای ثبت شده در ایستگاههای لرزه‌نگاری دائمی و موقت نصب شده در منطقه است.

سیمای کلی از ساختار زمین‌ساختی منطقه

البرز مجموعه‌ای از صفحات راندگی با ۱۰۰ کیلومتر پهنا و ۶۰۰ کیلومتر درازاست که در نتیجه دگرشکلی فشاری و به هنگام برخورد قطعه‌ای از گندوانا با صفحه اوراسیا در تریاس پسین تشکیل یافته است (Alavi, 1996; Sengor et al., 1988). البرز از شمال به حوضه خزر جنوبی و از جنوب به مناطق شمالی ایران مرکزی محدود می‌شود. مرز البرز با حاشیه جنوبی دریای خزر به عنوان باقیمانده‌ای از پوسته اقیانوسی در نظر گرفته می‌شود که به سرعت غوطه‌ور شده و توسط رسوباتی به سبزی ۲۰ کیلومتر پوشانده شده است (Brunet et al., 2003).

روند چین و راندگیهای اصلی از امتداد ENE در خاور به WNW در باختر تغییر می‌یابد. راندگیها در بخش شمالی شیبی در جهت جنوب و در بخش جنوبی شیبی به سمت شمال دارند. بیشترین جابه‌جایی قائم معمولاً در البرز جنوبی به وقوع پیوسته است، جایی که لایه‌های پرکامبرین بر روی لایه‌های متعلق به دوره ترشیری رانده شده‌اند. گسلهای امتداد لغز چپگرد بارزی در طول البرز و به موازات چین و راندگیها در هر منطقه دیده می‌شود (Alavi, 1996). امتداد ساختارها در هر دو انتهای البرز به سمت چین خوردگیهای مناطق مجاور یعنی تالش در باختر و کپه داغ در خاور تغییر می‌یابد.

کوتاه‌شدگی کلی البرز از زمان پلیوسن پیشین حدود ۳۰ کیلومتر در طول جغرافیایی که از تهران عبور می‌کند برآورد شده است

در ساعت ۱۲ و ۳۸ دقیقه روز ۲۸ ماه مه سال ۲۰۰۴ به وقت جهانی، برابر با ساعت ۱۷ و ۴۸ دقیقه روز جمعه ۸ خرداد ۱۳۸۳، زمین لرزه‌ای با بزرگای ۶/۳ در مقیاس امواج سطحی ناحیه گسترده‌ای از شمال ایران را به لرزه درآورد. با به کارگیری همزمان رکوردهای ثبت شده از این رویداد توسط ایستگاههای لرزه‌نگاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و شبکه لرزه‌نگاری تله‌متری تهران وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، محل وقوع این زمین لرزه نقطه‌ای به مختصات $36/30^{\circ}$ عرض شمالی و $51/60^{\circ}$ طول خاوری در ۲۰ کیلومتری شمال باختر بلده تعیین شد. ژرفای این رویداد در گزارشهای اولیه مرکز ملی لرزه‌شناسی آمریکا (NEIC) با به کارگیری فاز ژرفی pP در ۳۳ ایستگاه لرزه‌نگاری در سراسر جهان، حدود ۲۹ کیلومتر تعیین شد که از این نظر یکی از ژرف‌ترین زمین لرزه‌هایی است که تاکنون در فلات ایران به وقوع پیوسته است. در گزارش نهایی این مرکز، ژرفای کانونی این زمین لرزه ۱۷ کیلومتر گزارش شده است. در کاتالوگ EHB (Engdahl et al., 1998) که در حال حاضر معتبرترین و دقیق‌ترین منبع حاوی اطلاعات مربوط به پارامترهای زمین لرزه‌هاست، ژرفای این رویداد ۲۷ کیلومتر گزارش شده است. به جز زون مکران به عنوان یک ناحیه فروانش فعال واقع در جنوب خاور ایران، که ژرفای کانونی زمین لرزه‌ها در آن به بیش از ۴۰ کیلومتر می‌رسد (Maggi et al., 2000) بیشتر زمین لرزه‌های ایران در ۲۰ کیلومتر بالایی و اساساً در پوسته بلورین بالایی روی می‌دهند (Tatar et al., 2004; Jackson et al., 2000; Priestley et al., 1994). به دلیل عدم تخریب شدید روستای بلده در این زمین لرزه و مشاهده بیشترین شدت و ویرانی در روستای فیروزآباد بخش کجور از شهرستان نوشهر، نام فیروزآباد-کجور به این زمین لرزه اطلاق شد. مجموع تلفات این زمین لرزه براساس گزارشهای رسمی ۳۵ نفر است که از این تعداد ۱۸ نفر در اثر ریزش سنگ در مسیر جاده کرج-چالوس جان

(Allen et al., 2003). بر اساس جدیدترین مطالعات انجام شده به کمک اندازه گیریهای ژئودزی (Vernant et al., 2004) میزان کوتاه شدگی البرز در راستای شمالی- جنوبی، معادل 2 ± 5 میلی متر در سال برآورد شده است. این مطالعات همچنین بر وجود حرکات برشی چپگرد به میزان 2 ± 4 میلی متر در سال در این کمربند دلالت دارند که با حرکات زمین شناسی مشاهده شده در امتداد خاوری- باختری گسلهای امتداد لغز فعال در این زون سازگاری دارند.

گسلهای فعال متعددی (شکل ۱) زون البرز مرکزی را متأثر می سازند (Berberian, 1983; Berberian et al., 1992; Trifonov et al., 1996). بیشتر گسلهای فوق موازی روند اصلی رشته کوه البرز بوده و تعدیل کننده نیروی حاصل از همگرایی مایل بلوکهای ایران مرکزی و صفحه اوراسیا هستند.

در حاشیه شمالی البرز ساختارهای اصلی شامل گسلهای شمال البرز و خزر هستند. گسل خزر در خاوری ترین بخش خود به صورت راندگی با شیبی به سمت جنوب رخنمون سطحی دارد، به گونه ای که شیبتهای گرگان رادرمقابل لایه های کواترنری قرار داده است (Allen et al., 2003). شیب بسیار کم این گسل به سمت جنوب کاملاً آشکار است. دست کم دوسازو کار کانونی (حل CMT) برای دوزمین لرزه روی داده در بخش باختری گسل خزر، در محدوده طول جغرافیایی ۵۱-۵۰ درجه خاوری وجود دارد که می تواند به فعالیت این گسل نسبت داده شود (Allen et al., 2003). Berberian et al. (2002) نیز به وجود چهار زمین لرزه تاریخی که می تواند به بخش باختری گسل خزر نسبت داده شوند، اشاره کرده اند. گسل شمال البرز به عنوان یک راندگی با شیب به سمت جنوب در نقشه های زمین شناسی مشخص می شود (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، 1991 a). امتداد این گسل در طول جغرافیایی ۵۳ درجه از خاور- شمال خاور به باختر- شمال باختر تغییر می یابد. شواهدی مبنی بر وجود حرکات امتداد لغز در بخشهایی از این گسل وجود دارد (Nazari, 2006). آثار خطی با شیب نزدیک به قائم دست کم در یک بخش از گسل شمال البرز در کنار عدم وجود برآمدگی بین لایه های واقع در شمال و جنوب این گسل و وجود دست کم یک زمین لرزه بین گسلهای شمال البرز و بلده که سازو کار معکوس با شیب زیاد همراه با کمی مؤلفه امتداد لغز چپگرد از خود نشان می دهد (Priestley et al., 1994) همگی دلالت بر وجود حرکات امتداد لغز در بخشهایی از گسل شمال البرز دارند.

در بخش جنوبی، راندگیهای با شیب زیاد به سمت شمال و گسلهای امتداد لغز چپگرد، سنگهای متعلق به ائوسن را در البرز جنوبی از سنگهای با سن بیشتر در شمال جدا می سازد. از مهم ترین گسلهای این بخش می توان گسل مشا در شمال تهران و طالقان را نام برد. گستره مهلهزه ای زمین لرزه فیروزآباد- کجور در بلندبهای البرز مرکزی قرار گرفته است، جایی که گسلهای مهمی همانند

گسل خزر، شمال البرز، بلده، کجور و کندوان واقع می شوند (شکل ۱).

سابقه لرزه خیزی منطقه

در طول سالیان گذشته، زون البرز مرکزی شاهد زمین لرزه های متعددی بوده است. نگاهی به زمین لرزه های تاریخی نشان می دهد که اگرچه در طول تاریخ بارها شاهد وقوع زمین لرزه های مخرب در زون البرز بوده ایم، اما هیچ گونه رویداد تاریخی مهمی در منطقه مهلهزه ای زمین لرزه فیروزآباد- کجور گزارش نشده است (Ambraseys & Melville, 1982; Berberian & Yeats, 2001). از نظر زمین لرزه های دستگاهی، مهم ترین رویدادی که در این زون رخ داده، زمین لرزه رودبار- منجیل (۱۹۹۰، $M_s=7/3$) است که منجر به خسارات مالی و جانی بسیار گردید (Berberian et al., 1992). از دیگر زمین لرزه های مهم در این منطقه می توان به زمین لرزه کسوت مازندران در ۱۱ آوریل ۱۹۳۵ با بزرگای $6/8$ و بیش از ۴۸۰ کشته و زمین لرزه سنگچال (بند پی مازندران) در ۲ ژوئیه ۱۹۵۷ با بزرگای $7/1$ و بیش از ۱۵۰۰ کشته اشاره کرد. وضعیت زمین لرزه های دستگاهی صد سال اخیر در گستره مورد مطالعه (شکل ۲) دلالت بر فعالیت بالای لرزه خیزی کل زون البرز مرکزی دارد. در این شکل، صرف نظر از دو منطقه واقع در شمال باختر و جنوب باختر البرز با فعالیت لرزه خیزی قابل توجه که به ترتیب مربوط به زمین لرزه های رودبار- منجیل (۱۹۹۰، $M_s=7/3$) و بوئین زهرا (۱۹۶۲، $M_s=7/2$) و پس لرزه های آنها هستند، چنین به نظر می رسد که مناطق خاوری از فعالیت لرزه خیزی بالاتری برخوردار باشند. این فعالیت، بویژه در شمال خاور تهران، جنوب باختری ساری، جنوب آمل و منطقه مهلهزه ای زمین لرزه اخیر بیشتر مشهود است. وقوع چندین زمین لرزه با بزرگای بیشتر از ۵ در جنوب خاور کلاردشت و چالوس حکایت از سابقه لرزه خیزی بالای این گستره دارد.

گرچه در رسم شکل ۲ از دقیق ترین زمین لرزه های دستگاهی موجود تا سال ۲۰۰۴ بنا بر کاتالوگ Engdahl et al. (1998) استفاده شده است، اما خطای موجود در تعیین محلها، که می تواند متجاوز از ۲۰ کیلومتر باشد، موجب گردیده تا نتوان به راحتی زمین لرزه های روی داده را به گسلهای فعال منطقه نسبت داد. با این حال و همان طور که در این شکل نیز مشاهده می شود، احتمال فعالیت گسلهایی چون مشا، شمال البرز و خزر در مقایسه با دیگر گسلهای منطقه بیشتر است.

نگاهی به نقشه زمین لرزه های محلی ثبت شده در شبکه لرزه نگاری تله متری تهران وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک بین سالهای ۱۹۹۶ الی ۲۰۰۱ (شکل ۳) ضمن تأیید مطالب فوق، به وضوح بر فعالیت لرزه خیزی بسیار بالای گستره زمین لرزه ۸ خرداد ماه فیروزآباد- کجور و مناطق همجوار دلالت دارد.



تلفیق لرزه نگاشت شبکه ملی لرزه نگاری باند پهن پژوهشگاه با لرزه نگاشت‌های ایستگاه‌های لرزه نگاری شبکه تله متری تهران وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک موجب بهبود موقعیت تعیین شده برای این زمین لرزه گردید و مختصات نهایی برابر $51/61$ درجه طول خاوری و $36/30$ درجه عرض شمالی به دست آمد (شکل ۵). سازو کار کانونی زمین لرزه ۸ خرداد ماه فیروزآباد- کجور بر اساس تحلیل مرکز زمین لرزه شناسی وابسته به دانشگاه هاروارد (حل CMT) دلالت بر گسلش از نوع معکوس دارد (شکل ۵) که دو صفحه آن با پارامترهای زیر مشخص می‌شوند: صفحه اول با راستای 119 درجه، شیب: 24 درجه و لغزش 72 درجه و صفحه دوم با راستای 319 درجه، شیب: 67 درجه و لغزش 98 درجه. مدل سازی شکل موج امواج دور لرزه ای حاصل از زمین لرزه فوق، ثبت شده در 122 ایستگاه لرزه نگاری شبکه GDSN (Ghitanchi, 2005) بر گسلش از نوع معکوس با پارامترهای مشابه حل ارائه شده توسط دانشگاه هاروارد دلالت دارد.

پس لرزه‌های زمین لرزه ۸ خرداد ماه ۱۳۸۳ فیروزآباد- کجور

زمین لرزه ۸ خرداد فیروزآباد- کجور با پس لرزه‌های متعددی همراه بود که بزرگ‌ترین آنها با بزرگای $MI=4/8$ در ساعت $17:00$ به وقت محلی روز $83/3/9$ به وقوع پیوست. این پس لرزه در فاصله حدود 20 کیلومتری شمال باختری زمین لرزه اصلی قرار می‌گیرد و مختصات آن $51/45$ درجه طول خاوری، $36/37$ درجه عرض شمالی تعیین شد (شکل ۵). پس لرزه مزبور با بزرگای $4/8$ در مقیاس امواج محلی خود با پس لرزه‌های متعدد دیگری همراه بود که منجر به مهاجرت فعالیت لرزه خیزی به سمت شمال باختر رویداد اصلی گردید. وجود ایستگاه‌های شبکه ملی لرزه نگاری باند پهن پژوهشگاه زلزله شناسی و شبکه لرزه نگاری تله متری تهران وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران موجب شد تا علاوه بر زمین لرزه اصلی ($Mw=6/3$) همه پس لرزه‌های با بزرگی بیشتر از 2 (در مقیاس محلی) نیز ثبت شوند. بدین گونه اطلاعات با ارزشی در خصوص روند مهاجرت پس لرزه‌ها و چگونه توزیع مکانی و زمانی آنها به دست آمد. زمین لرزه فیروزآباد- کجور جزو معدود زمین لرزه‌های ایران است که چنین اطلاعات دستگامی دقیق از رویداد اصلی و پس لرزه‌های آن موجود است.

بررسی‌های به عمل آمده بر روی پس لرزه‌های ثبت شده در شبکه‌های لرزه نگاری نشان می‌دهد که اولین پس لرزه‌ها در اطراف کانون زمین لرزه اصلی به مختصات $51/61$ درجه طول خاوری و $36/30$ درجه عرض شمالی به وقوع پیوسته‌اند. ولی پس از حدود 7 ساعت و بلافاصله پس از وقوع پس لرزه نسبتاً بزرگی ($MI=4/8$) در فاصله حدود 20 کیلومتری شمال باختر رویداد اصلی، فعالیت لرزه‌ای به منطقه اطراف پس لرزه فوق مهاجرت

بنابراین وقوع این زمین لرزه در چنین منطقه‌ای با سابقه لرزه خیزی بالا، چندان هم دور از انتظار نیست. بر پایه زمین لرزه‌های محلی یاد شده نیز، گسلهایی چون گسل مشا، شمال البرز و خزر در مقایسه با دیگر گسلهای منطقه، فعالیت بیشتری از خود نشان می‌دهند.

بررسی سازو کارهای کانونی زمین لرزه‌های روی داده در گستره مورد مطالعه و مناطق همجوار (شکل ۴) نشان می‌دهد که به رغم سامانه فشاری حاکم بر منطقه، ناشی از همگرایی صفحات عربی و اوراسیا، دو نوع سازو کار امتداد لغز و فشاری در سازو کارهای کانونی زمین لرزه‌های منطقه مشاهده می‌شود که برخی آن را به مسئله تجزیه نیروی حاصل از همگرایی مایل صفحه عربی نسبت به اوراسیا نسبت می‌دهند (Berberian et al., 1992). در هر حال، بیشتر سازو کارها بر گسلش معکوس دلالت دارند. سازو کارهای امتداد لغز چپگرد اساساً به فعالیت گسلهای مشا و گسل مسبب زمین لرزه سال 1990 رودبار- منجیل نسبت داده می‌شوند. مطالعات زمین شناسی اخیر به عمل آمده بر روی گسل مشا و بررسی‌های لرزه شناختی انجام گرفته در منطقه رودبار (Tatar, 2001) مؤید وجود حرکات امتداد لغز چپگرد در این مناطق است.

زمین لرزه ۸ خرداد ماه ۱۳۸۳ فیروزآباد- کجور

زمین لرزه فیروزآباد- کجور در ساعت $17:08:46$ به وقت محلی ($46:38:12$ به وقت GMT) روز $1383/3/8$ در ناحیه شمال البرز مرکزی به وقوع پیوست که در بیشتر نواحی شمال کشور به خوبی احساس شد و منجر به تلفات جانی و مالی قابل توجهی در روستاهای فیروزآباد، کجور و کلاردشت گردید. ریزش سنگ و زمین لغزش در جاده چالوس عامل اصلی تلفات انسانی ناشی از زمین لرزه بود.

مختصات اولیه زمین لرزه فیروزآباد- کجور توسط مرکز ملی زمین لرزه شناسی (NEIC) وابسته به سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) $51/58$ درجه طول خاوری و $36/55$ درجه عرض شمالی و بزرگی آن $Ms=6/4$ ، $mb=6/2$ و $Mw=6/3$ گزارش شد. اگرچه ژرفای اولیه این زمین لرزه توسط مراکز مختلف بیش از 27 کیلومتر اعلام شد، اما در گزارشهای بعدی ژرفای 17 کیلومتر برای آن محاسبه شد. در هر حال، خطای موجود در برآورد ژرفای زمین لرزه‌ها در کاتالوگ NEIC میتواند فراتر از 20 کیلومتر باشد. مختصات رویداد این زمین لرزه بر اساس تحلیل لرزه نگاشت‌های ثبت شده در ایستگاه‌های شبکه ملی لرزه نگاری باند پهن پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله برابر $51/61$ درجه طول جغرافیایی، $36/29$ درجه عرض جغرافیایی و بزرگی آن بر اساس تحلیل امواج سطحی ثبت شده در ایستگاه زاهدان در فاصله کانونی 1300 کیلومتری از کانون زمین لرزه، معادل $Ms=6/3$ برآورد شد.

نموده‌اند (شکل ۵). نکته حائز اهمیت وقوع بیشتر پس لرزه‌های بعدی در منطقه کانونی پس لرزه مزبور است.

به طور کلی در مدت یک ماه اول پس از وقوع زمین لرزه ۸ خرداد ماه ۱۳۸۳ فیروزآباد-کجور بیش از ۲۵۰ پس لرزه با بزرگای بیشتر از ۲ (در مقیاس بزرگی محلی) توسط ایستگاههای دائمی شبکه‌های لرزه‌نگاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و مؤسسه ژئوفیزیک ثبت شد که توزیع آن در شکل ۵ نشان داده شده است. صرف نظر از مسئله مهاجرت کانون پس لرزه‌ها به سمت شمال باختر که عنوان گردید، توزیع این پس لرزه‌ها بیشتر به صورت پراکنده بوده و ارتباط دادن آن به فعالیت گسلی خاص، کمی دشوار به نظر می‌رسد.

این پراکندگی زیاد، ناشی از خطای موجود در تعیین محل رویدادهای مزبور است. در واقع، قرار گرفتن همه ایستگاههای لرزه‌نگاری در یک طرف کانون پس لرزه‌ها و نبود یک مدل سرعتی دقیق از پوسته منطقه، منجر به خطای سیستماتیک قابل توجهی در کانونهای سطحی و ژرفی محاسبه شده می‌گردد. لذا به رغم وجود تعداد قابل توجهی از ایستگاههای لرزه‌نگاری در مجاورت زمین لرزه فوق و تعداد بالای پس لرزه‌های ثبت شده توسط آنها، نسبت دادن زمین لرزه و پس لرزه‌های آن را به یکی از گسلهای فعال منطقه چون گسل کندوان، گسل خزر و گسل شمال البرز امری دشوار و تا حدودی ناممکن می‌سازد.

لذا به منظور بررسی دقیق تر پس لرزه‌های زمین لرزه فیروزآباد-کجور و به منظور تعیین هندسه و سازوکار گسل مسبب این زمین لرزه، یک شبکه لرزه‌نگاری محلی متشکل از ۸ دستگاه سه مؤلفه‌ای در منطقه کانونی زمین لرزه اصلی نصب گردید. این ایستگاههای لرزه‌نگاری تقریباً از ۲ روز پس از وقوع زمین لرزه، در منطقه نصب شدند.

هر ۸ ایستگاه لرزه‌نگاری موقت از لرزه‌سنجهای کوتاه دوره (۵۰-۰/۱ هرتز) CMG-6TD متصل به دیجیتایزرهای ۲۴ بیتی CMG-DM24 تشکیل یافته‌اند و برای کالیبره کردن زمان به یک عدد گیرنده GPS متصل می‌باشند. آهنگ نمونه‌گیری در دستگاهها ۱۰۰ نمونه در ثانیه انتخاب شد.

در مجموع در مدت ۲۰ روز، بیش از ۴۰۰ پس لرزه توسط شبکه لرزه‌نگاری موقت نصب شده ثبت گردید. توزیع مکانی ۱۴۰ پس لرزه دارای میانگین rms زمان باقیمانده کمتر از ۰/۱۵ ثانیه، گپ آزیموتی کمتر از ۱۸۰ درجه و خطای تعیین محل کمتر از ۲ کیلومتر که توسط دست کم ۶ ایستگاه لرزه‌نگاری ثبت شده‌اند در شکل ۶ نشان داده شده است.

توزیع خوب ایستگاههای لرزه‌نگاری در منطقه کانونی زمین لرزه فیروزآباد-کجور و پوشش مناسب دستگاهی در محل تجمع پس لرزه‌ها، موجب شد تا بتوان با دقت بالا، پس لرزه‌های ثبت شده را تعیین محل کرد. از آنجا که هیچ گونه

اطلاعات دقیقی از ساختار سرعتی پوسته منطقه مورد مطالعه موجود نبود، ابتدا تلاش شد با استفاده از پس لرزه‌های ثبت شده در ۸ ایستگاه لرزه‌نگاری، ساختار سرعتی پوسته منطقه به روش برگردان یک بعدی (Kissling, 1988) بررسی شود. با توجه به امکان وابستگی مدل نهایی حاصل از برگردان به مدل اولیه داده شده، سعی شد میزان همگرایی ۵۰ مدل اولیه که به صورت تصادفی با اعمال تغییرات سرعتی در هر لایه به میزان $\pm 0/5$ کیلومتر در ثانیه محاسبه شده‌اند، مورد بررسی قرار گیرد (شکل ۷).

با توجه به اهمیت مدل سرعتی در تعیین محل زمین لرزه‌ها، تعیین ساختار سرعتی منطقه با دقت خاص و در دو مرحله صورت گرفت. ابتدا یک مدل فرضی متشکل از ۹ لایه هر یک به ستبرای ۲ کیلومتر تا ژرفای ۱۸ کیلومتری در نظر گرفته شد. حاصل برگردان ۵۰ مدل اولیه با لایه‌بندی فوق اما سرعتهای متفاوت، نشان داد که بیشتر مدلها بر وجود یک مدل ساده تر متشکل از ۳ لایه دلالت دارند. در مرحله دوم و با استفاده از نتایج به دست آمده در مرحله اول، سعی شد همگرایی ۵۰ مدل اولیه ساده شده متشکل از سه لایه مورد بررسی قرار گیرد. در واقع مدل ساده شده فوق حاصل جمع لایه‌های هم سرعت با توجه به نتایج مرحله اول است. در این مرحله نیز با اعمال تغییر سرعت در هر لایه از مدل اولیه (به صورت تصادفی و به میزان $\pm 0/5$ کیلومتر بر ثانیه)، ۵۰ مدل اولیه تولید شد.

همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، ۵۰ مدل فوق به خوبی بر مدل ساده سه لایه متشکل از دو لایه به ستبراهای ۱۲ و ۲ کیلومتر و سرعتهای ۵/۶ و ۵/۸ کیلومتر بر ثانیه که بر روی یک نیم فضا با سرعت ۶/۴ کیلومتر بر ثانیه قرار گرفته‌اند، دلالت دارند.

نتیجه نهایی به دست آمده (شکل ۷) که به عنوان ساده‌ترین مدل، بهترین سازگاری با رویدادها را داشته و کمترین RMS (میانگین مجذور مربعها) زمان باقیمانده را دارد، در جدول ۱ ارائه شده است. برای جستجوی مدل ساختاری فوق از نسبت $Vp/Vs = 1/78 (\pm 0/1)$ استفاده شد که خود بر اساس قرائت ۷۳۸ فاز از ۷۴ پس لرزه انتخابی (با دقت بهتر از ۱ کیلومتر) محاسبه شده است.

توزیع پس لرزه‌های ثبت شده توسط شبکه لرزه‌نگاری موقت بر به خط شدگی واضحی از زمین لرزه‌ها در راستای خاوری-باختری و تا حدودی شمال باختر-جنوب خاور با یک طول حدود ۳۰ کیلومتر اشاره دارد. بررسیهای به عمل آمده و رسم مقاطع عرضی متفاوت، بر این واقعیت دلالت دارند که ژرفای کانونی پس لرزه‌ها از جنوب خاور به سمت شمال باختر افزایش می‌یابد (شکل ۸) که این خود در کنار شیب به سمت جنوب باختر صفحه گسلی، عامل اصلی جدایش کانون سطحی پس لرزه‌ها در بخش باختری از اثر گسلهای شمال البرز و خزر بر روی سطح می‌باشد.

توزیع ژرفی پس لرزه‌های ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری موقت، بر روی مقطع



برای شناسایی سازوکار گسلش مسبب زمین‌لرزه، تلاش شد تا سازوکار کانونی برای تعدادی از پس‌لرزه‌ها به کمک قرانت فاز و قطبیت اولین موج دریافتی در لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده محاسبه شود (Reasenberg & Oppenheimer, 1985). سازوکارهای محاسبه شده برحسب کیفیت به سه گروه تقسیم شدند (جدول ۲): گروه A شامل سازوکارهایی است که در آنها هر چهار قسمت نمونه برداری شده‌اند و صفحات ترسیمی در نهایت ۲۰ درجه بیشتر تغییر نمی‌کنند. گروه B شامل سازوکارهایی است که در آنها فقط سه قسمت نمونه برداری شده‌اند ولی در هر حال، هر دو صفحه به خوبی انتخاب شده و بیشتر از ۲۰ درجه تغییر نمی‌کنند. گروه C آن دسته از سازوکارهایی را شامل می‌شود که فقط دو قسمت در آنها نمونه برداری شده و امکان تغییر نوع سازوکار در آنها وجود دارد.

بررسی سازوکارهای محاسبه شده برای پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه فیروزآباد-کجور (شکل ۱۰) بر دو نوع سازوکار متفاوت دلالت دارد، سازوکار فشاری در امتداد شمال باختر- جنوب خاور که بیشتر در بخش خاوری منطقه مورد مطالعه واقع می‌شوند، و سازوکار امتداد لغز که بیشتر محدود به زمین‌لرزه‌های واقع در بخش باختری می‌شوند. البته وجود یک مؤلفه فشاری قابل توجه در بیشتر سازوکارهای محاسبه شده، صرف نظر از نوع آن مشهود است که باتوجه به سامانه زمین‌ساختی حاکم بر منطقه دور از انتظار نیست. به طور کلی پس‌لرزه‌هایی که از خود سازوکار فشاری یا معکوس نشان می‌دهند، از نظر تعداد و کیفیت در اولویت هستند و به طور عموم مشابه سازوکار کانونی زمین‌لرزه اصلی (حل CMT) می‌باشند. باتوجه به توزیع ژرفای کانونی پس‌لرزه‌ها بر روی مقطع عرضی که شبیه به سمت جنوب باختر را نشان می‌دهد، بنابراین، صفحه گسلی که به سمت جنوب یا جنوب باختر متمایل است، در سازوکارهای محاسبه شده به عنوان صفحه اصلی در نظر گرفته می‌شود. شیب صفحه متمایل به جنوب سازوکارهای راندگی با کیفیت A (شماره‌های ۱۸۰، ۲۰۳، ۲۰۷، ۲۴۰، ۲۴۲، ۲۵۴) بین ۳۵-۲۵ درجه است. این خود می‌تواند در کنار نتایج حاصل از توزیع ژرفای کانونی پس‌لرزه‌ها بر روی مقطع عرضی عمود بر گسل‌های شمال البرز و خزر (شکل ۹)، تأییدی بر جنبایی گسل خزر در ایجاد زمین‌لرزه فیروزآباد-کجور باشد. وجود یک شیب حدود ۶۰ درجه مشابه آنچه که در شکل ۹ برای ارتباط به خط شدگی کانون ژرفی پس‌لرزه‌ها و گسل شمال البرز رسم شده است، با شیب کم صفحات گسلی متمایل به سمت جنوب (۳۵-۲۵ درجه) سازگاری ندارد.

سازوکار ارائه شده برای زمین‌لرزه اصلی توسط سازمانهای مختلف، چون سازمان زمین‌شناسی آمریکا و مرکز تحقیقات زلزله‌شناسی دانشگاه هاروارد، و حل به دست آمده بر اساس مدل‌سازی امواج پیکری (Ghitanchi, 2005)

عرضی رسم شده به موازات گسل‌های شمال البرز و خزر به عنوان مهم‌ترین ساختارهای فعال منطقه، به خوبی نشان می‌دهد که ژرفای پس‌لرزه‌ها از ۱۰ الی ۲۰ کیلومتر در قسمت جنوب خاوری تا ۱۰ الی ۳۰ کیلومتر در شمال باختری منطقه متفاوت است. از نظر ژرفی، زمین‌لرزه اخیر و پس‌لرزه‌های آن در منطقه فیروزآباد-کجور، یکی از ژرف‌ترین زمین‌لرزه‌هایی است که در فلات ایران زمین اتفاق افتاده است. به جز منطقه فورانشی مکران که ژرفای زمین‌لرزه‌ها در آن به ۴۵ کیلومتر هم می‌رسد (Maggi et al., 2000)، بیشتر زمین‌لرزه‌های ایران در ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر اول پوسته رخ می‌دهند. وقوع پس‌لرزه‌ها در ژرفای بیش از ۲۵ کیلومتر و تا ژرفای ۳۰ کیلومتر، حکایت از شکننده بودن پوسته بلورین زیرین در این بخش از ایران دارند که برای مناطق با پوسته قاره‌ای کمی دور از انتظار است.

مقطع عرضی رسم شده عمود بر امتداد گسل‌های شمال البرز و خزر به خوبی نشان می‌دهد که پس‌لرزه‌ها بر روی صفحه‌ای با شیب حدود ۵۰-۴۰ درجه به سمت جنوب باختر واقع می‌شوند و به خط شدگی خوبی را در راستای عنوان شده از خود نشان می‌دهند (شکل ۹). برای رسم شکل فوق از ۱۴۰ پس‌لرزه که با دقت بهتر از ۲ کیلومتر تعیین محل شده‌اند، استفاده شد. موقعیت گسل‌های مهم منطقه چون شمال البرز، خزر و کندوان در طول مقطع عرضی نیز در شکل نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۹ مشهود است، به خط شدگی کانون ژرفی پس‌لرزه‌ها به گونه‌ای است که اگر خطی از آنها عبور داده شود، در صورت امتداد به سمت بالا، می‌تواند به اثر سطحی گسل شمال البرز و یا گسل خزر ارتباط داده شود. در هر حال عبور خطی با شیب ۳۹ درجه که سازگاری بیشتری با توزیع ژرفاهای کانونی دارد، پس‌لرزه‌های فوق را به گسل خزر مرتبط می‌سازد. این درحالی است که جهت ارتباط به خط شدگی پس‌لرزه‌ها با اثر گسل شمال البرز در سطح، نیاز به رسم خطی با شیب حدود ۵۹ درجه است (شکل ۹). همخوانی کمتر این خط با توزیع زمین‌لرزه‌ها نسبت به خطی که برای ارتباط پس‌لرزه‌ها به گسل خزر رسم شده است، در شکل کاملاً مشهود است. باتوجه به اینکه گسل خزر بر اساس مطالعات زمین‌شناسی به عمل آمده و نقشه‌های حاضر (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۹۹۱) شیب کمی به سمت جنوب باختر دارد، به نظر می‌رسد که وقوع زمین‌لرزه اخیر در منطقه فیروزآباد-کجور در رابطه تنگاتنگ با فعالیت گسل مزبور باشد. در واقع، در میان گسل‌های موجود منطقه، احتمال فعالیت گسل خزر به عنوان یکی از بارزترین ساختارهای فعال گستره مورد مطالعه (Allen et al., 2003) در ایجاد زمین‌لرزه فوق از همه بیشتر است. توزیع کانون سطحی و ژرفی پس‌لرزه‌ها همخوانی بسیار خوبی با هندسه این گسل دارد.

پس لرزه‌ها به سمت شمال باختر رویداد اصلی است. نتایج به دست آمده بر اساس مدل سازی شکل موج امواج دور لرزه‌ای (Ghitanchi, 2005) نیز به خوبی بر گسترش شکستگی به صورت یکطرفه به سمت باختر اشاره دارد. گسترش سطحی پس لرزه‌های ثبت شده، بر احتمال فعالیت طولی حدود ۳۰ کیلومتر از گسل شمال البرز و یا گسل خزر طی زمین لرزه فیروزآباد-کجور دلالت دارند. اما توزیع ژرفای کانونی پس لرزه‌ها در کنار سازوکار ژرفی فشاری محاسبه شده برای آنها، و بویژه سازگاری بسیار خوب میان شیب صفحه متمایل به سمت جنوب سازوکارهای فوق با به خط‌شدگی کانون ژرفی پس لرزه‌ها بر روی مقطع عرضی، همگی با گسل خزر همخوانی بیشتری داشته و لذا بر جنبایی این گسل در ایجاد زمین لرزه هشتم خرداد ماه ۸۳ فیروزآباد-کجور دلالت دارند. کانون پس لرزه‌های ثبت شده توسط شبکه لرزه‌نگاری موقت که با دقت بهتر از دو کیلومتر تعیین محل شده‌اند، در محدوده ژرفی ۱۰ تا ۲۸ کیلومتر قرار می‌گیرند که از این لحاظ یکی از ژرف‌ترین زمین لرزه‌های سده اخیر ایران به شمار می‌آیند.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای دکتر آشتیانی ریاست محترم پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و آقای دکتر جعفری معاونت محترم پژوهشی و فناوری پژوهشگاه که امکان استفاده از دستگاههای لرزه‌نگاری این پژوهشگاه را میسر ساختند و از گروه الکترونیک پژوهشگاه بویژه آقای مهندس حمیدرضا حیدری مقدر که زحمت نصب ایستگاههای لرزه‌نگاری موقت و جمع‌آوری داده‌ها را به عهده داشتند، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

از داوران محترم به خاطر نظرات ارزنده‌شان که موجب بهبود کیفیت مقاله حاضر گردید، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. از آقای دکتر نوربخش میرزایی رئیس سابق شبکه لرزه‌نگاری تله‌متری تهران، آقای دکتر رضاپور رئیس شبکه لرزه‌نگاری کشوری و جناب آقای دکتر بیدهندی رئیس محترم مؤسسه ژئوفیزیک که داده‌ها و لرزه‌نگاشت‌های شبکه فوق را در اختیار گذاشتند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

همگی شیبی حدود ۲۰ تا ۴۰ درجه را برای صفحه گسل متمایل به سمت جنوب باختر نشان می‌دهند که نه تنها با نتایج حاصل از سازوکارهای محاسبه شده برای پس لرزه‌ها همخوانی دارد، بلکه تأیید دیگری بر احتمال بیشتر جنبایی گسل خزر به عنوان گسل مسبب زمین لرزه فیروزآباد-کجور است. با در نظر گرفتن صفحه با شیب به سمت جنوب به عنوان صفحه اصلی گسلش، وجود کمی مؤلفه امتدادلغز چپگرد در غالب سازوکارهای فشاری محاسبه شده، مشابه با سازوکار زمین لرزه اصلی (حل CMT)، مشهود است (سازوکارهای شماره ۲۴۰، ۲۰۳، ۲۰۷، ۹۶).

سازوکارهای کانونی امتدادلغز (شماره‌های ۱۶۸، ۱۷۰، ۱۷۹، ۱۸۸، ۲۰۱، ۲۱۸ و ۲۲۲) غالباً به پس لرزه‌های واقع در بخش باختری گستره مه‌لرزه‌ای زمین لرزه فیروزآباد-کجور محدود می‌شوند. اینکه سازوکارهای فوق از نوع امتدادلغز چپگرد بر روی صفحه‌ای شمال-جنوبی می‌باشند و یا بیشتر بر حرکات امتدادلغز راستگرد بر روی صفحه موازی با ساختارهای اصلی منطقه چون گسل شمال البرز و گسل خزر دلالت دارند، نیازمند بررسیهای دقیق‌تر به کمک نصب یک شبکه لرزه‌نگاری متراکم با تعداد ایستگاه بیشتر می‌باشد. نکته مهم در مورد سازوکارهای اخیر نسبت به سازوکارهای فشاری مشاهده شده در بخش خاوری منطقه، کیفیت پایین‌تر حلهای به دست آمده است. بیشتر سازوکارهای امتدادلغز در گروه B با کیفیت متوسط قرار می‌گیرند.

نتیجه‌گیری

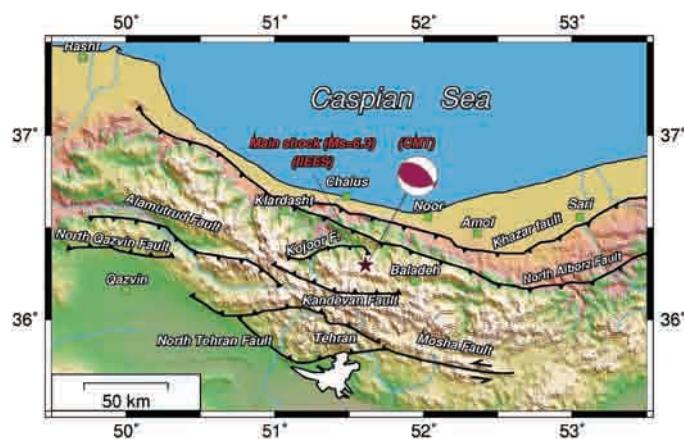
زمین لرزه ۸ خرداد ماه ۱۳۸۳ فیروزآباد-کجور یکی از بزرگ‌ترین زمین لرزه‌هایی است که پس از زمین لرزه ۱۹۹۰ رودبار-منجیل بخش وسیعی از شمال کشورمان را به لرزه درآورد. تحلیل لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده از این زمین لرزه و پس لرزه‌های آن توسط ایستگاههای لرزه‌نگاری دائمی و موقت نشان می‌دهد که منطقه مه‌لرزه‌ای این رویداد در اطراف روستای فیروزآباد از بخش کجور استان مازندران قرار می‌گیرد که با نتایج حاصل از بازدیدهای به عمل آمده از مناطق با بیشترین شدت مشاهده شده نیز همخوانی دارد. نکته حائز اهمیت در مورد این زمین لرزه، مهاجرت فعالیت لرزه‌خیزی و به عبارتی

جدول ۱- ساختار سرعتی پوسته به دست آمده برای منطقه فیروزآباد-کجور در شمال زون البرز مرکزی.

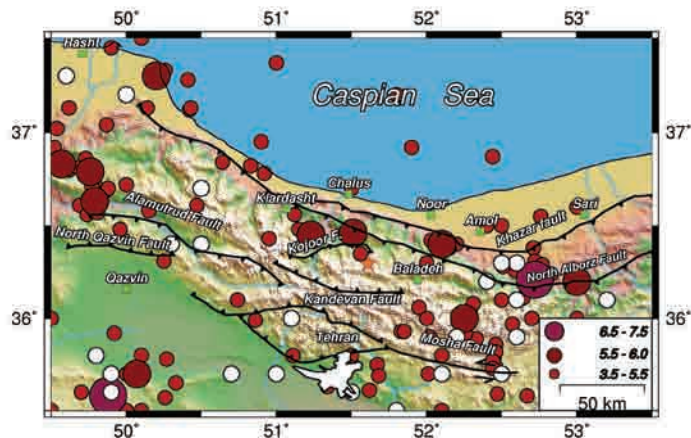
ژرفای لایه (کیلومتر)	سرعت موج P (کیلومتر بر ثانیه)
۰	۵/۶
۱۲	۵/۸
۱۴	۶/۴

جدول ۲- پارامترهای مربوط به سازوکار کانونی پس لرزه های انتخابی زمین لرزه فیروزآباد- کجور. Lon, Lat و Depth مختصات زمین لرزه هستند. P12, Az2, del, pl1, Az1 به ترتیب آزیموت، شیب و لغزش صفحه گسلی ۱ و ۲ هستند. Azp, dep و Azt, det زاویه میل محورهای P و T می باشند. Im برابر ۱ برای گسلهای معکوس و برابر ۱- برای گسلهای عادی می باشد. A, B, C ضریب معرف کیفیت سازوکار حل شده هستند.

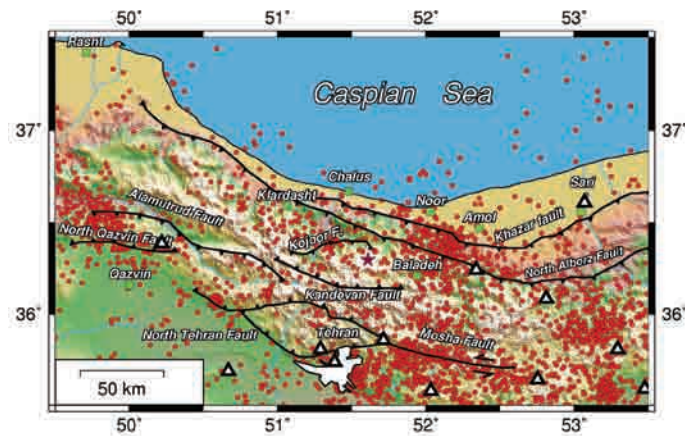
Nb	Date	Time	Lat	Lon	Depth	Az1	pl1	de1	Az2	pl2	de2	Azp	dep	Azt	det	Im	Q
168	0605 4	0:10	36.417	51.374	16.87	-74	80	158.1	20	68.4	10.8	334.5	7.9	241.2	22.5	1	A
170	0605 4	1:58	36.393	51.28	14.02	120	65	112.8	255.2	33.3	50.3	193.4	17	66.8	62.8	1	A
173	0605 4	20:58	36.406	51.379	24.34	125	65	-120	-1.2	38.3	-43	352.2	58.6	236.5	14.8	-1	B
175	0605 4	22:12	36.418	51.478	22.39	30	45	9.9	293	83.1	134.6	350	24.5	240.7	35.8	1	B
177	0606 4	2:20	36.376	51.578	17.26	75	55	60	-59.8	44.8	125.5	185.8	5.5	287.8	65.1	1	B
179	0606 4	6:08	36.425	51.393	14.82	-85	80	160.1	8.6	70.4	10.6	323	6.6	230.4	21.1	1	B
180	0606 4	17:20	36.42	51.604	17.77	150	30	110	-52.8	62	78.8	45.4	16.3	192.5	70.8	1	A
188	0607 4	4:01	36.431	51.481	18	50	40	30	-63.9	71.2	126	0.1	18.3	246.7	50.3	1	B
189	0607 4	6:33	36.433	51.473	14.86	205	75	-49.9	-47.9	42.3	-157.4	155	44.9	266.1	19.9	-1	B
196	0608 4	0:54	36.367	51.493	20.77	75	70	73.6	-64.3	25.6	127.8	177.5	23.3	320.2	61.6	1	B
197	0608 4	1:13	36.408	51.367	14.88	-75	82	147.8	20	58.2	9.4	336.5	15.9	237.7	28.1	1	C
198	0608 4	1:58	36.405	51.326	15.77	-58	70	-143.9	198	56.4	-24.2	164.4	39.3	67.3	8.6	-1	B
199	0608 4	2:24	36.408	51.324	15.05	175	43	-43.9	-59.9	61.8	-123.9	161.3	58.4	53.8	10.5	-1	B
200	0608 4	9:06	36.321	51.489	24.35	330	80	91.7	140.3	10.1	80.4	58.5	35	242.1	55	1	A
201	0608 4	10:46	36.429	51.46	16.97	25	70	10.1	-68.5	80.5	159.7	339.6	7.2	246.8	21	1	A
203	0608 4	19:59	36.366	51.532	18	90	35	60	-54.8	60.2	109.3	21.3	13.2	254.8	68.5	1	A
204	0608 4	22:41	36.355	51.539	21.87	50	50	20	-53.2	74.8	138.2	3.6	15.6	260.2	39.8	1	B
205	0609 4	0:51	36.415	51.358	14.79	160	50	-70	-49.5	44	-112.2	134.6	74.5	236	3.1	-1	B
207	0609 4	2:30	36.387	51.516	18	110	38	61.8	-35.8	57.1	110.2	39.8	10	280.5	70.2	1	A
218	0610 4	22:01	36.405	51.362	15.83	175	75	-20.1	-89.6	70.6	-164.1	132	24.7	223.3	2.9	-1	B
220	0611 4	12:18	36.358	51.545	21.13	50	50	20	-53.2	74.8	138.2	3.6	15.6	260.2	39.8	1	B
222	0611 4	18:18	36.445	51.455	16.67	10	75	30	-88.5	61.1	162.8	138.3	9.1	234	31.6	1	B
228	0612 4	6:43	36.442	51.512	13.32	80	20	40	-48.3	77.3	105.6	29	30.6	241.1	55.1	1	B
230	0612 4	17:12	36.361	51.546	20.86	50	50	20	-53.2	74.8	138.2	3.6	15.6	260.2	39.8	1	B
240	0612 4	21:31	36.439	51.558	18	90	25	50	-47.2	71.1	106.7	29.9	24.3	247.1	60.4	1	A
242	0612 4	21:49	36.438	51.554	17.27	125	20	120	-86.6	72.8	79.7	11.6	27.1	168.3	60.9	1	A
247	0614 4	0:13	36.377	51.629	25.45	100	25	71.7	-60	66.3	98.3	23.7	20.9	225.6	67.6	1	B
254	0615 4	20:31	36.42	51.603	16.28	152	25	113.6	-53.7	67.2	79.4	44.3	21.5	197.6	66.2	1	A



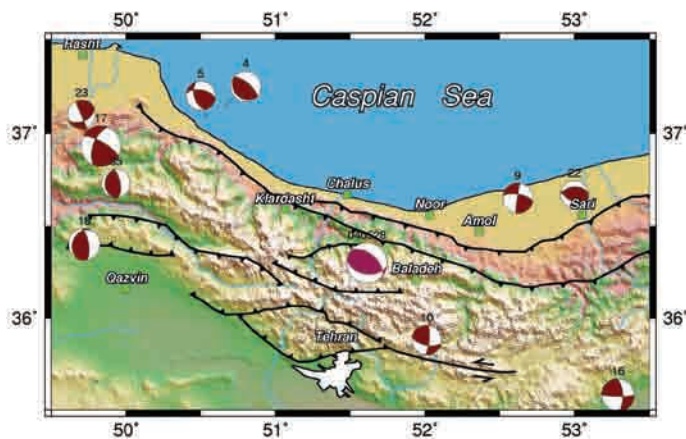
شکل ۱- گستره مهلززه ای زمین لرزه فیروز آباد کجور واقع در زون البرز مرکزی. گسلها از روی نقشه گسلهای Allen et al.(2003) و Hessami & Jamali (2006) اقتباس شده اند.



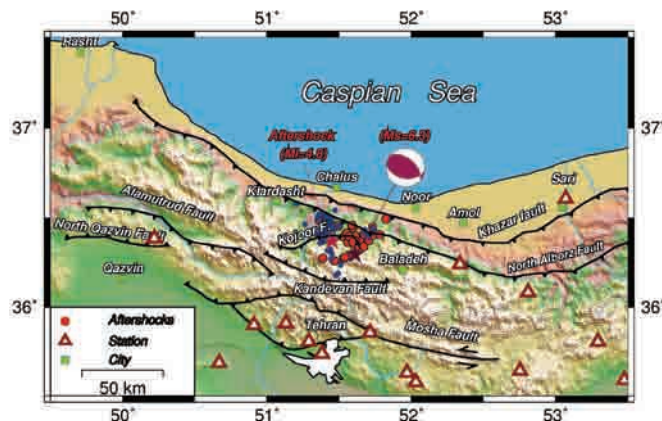
شکل ۲- توزیع زمین‌لرزه‌های دستگاهی صد سال اخیر براساس کاتالوگ زمین‌لرزه‌های جهانی (Engdahl et al., 1998). زمین‌لرزه‌های تاریخی (Ambraseys & Melville, 1982) در شکل مزبور با دایره‌های سفید نشان داده شده‌اند.



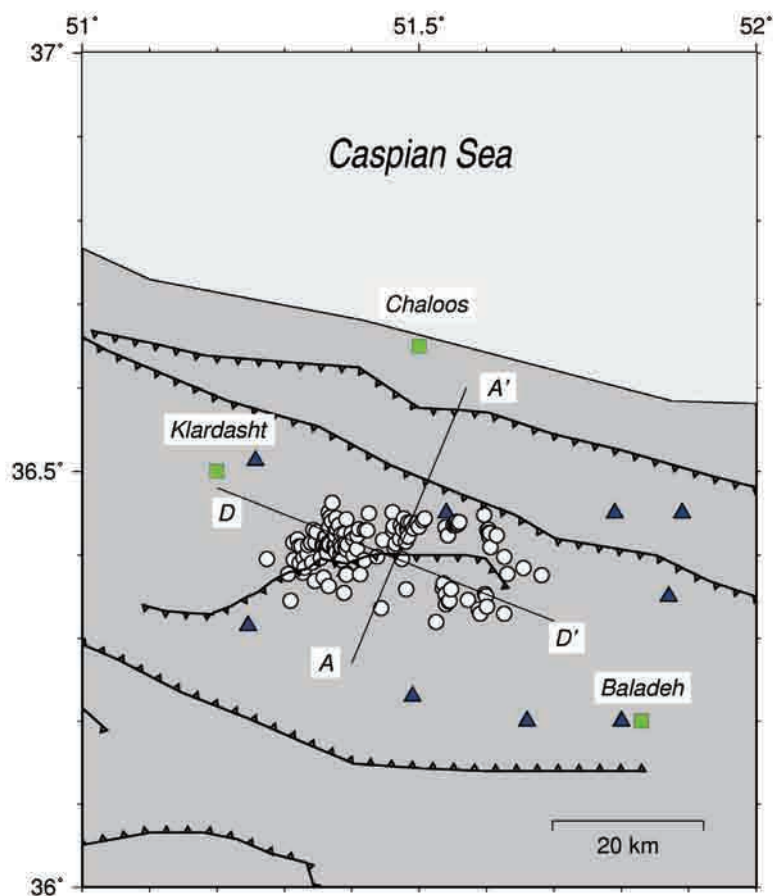
شکل ۳- توزیع زمین‌لرزه‌های محلی ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری تله‌متری تهران وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک در محدوده زمانی ۱۹۹۶ لغایت ۲۰۰۱. موقعیت ایستگاههای لرزه‌نگاری شبکه فوق با مثلث و زمین لرزه فیروزآباد- کجور با ستاره نشان داده شده‌اند.



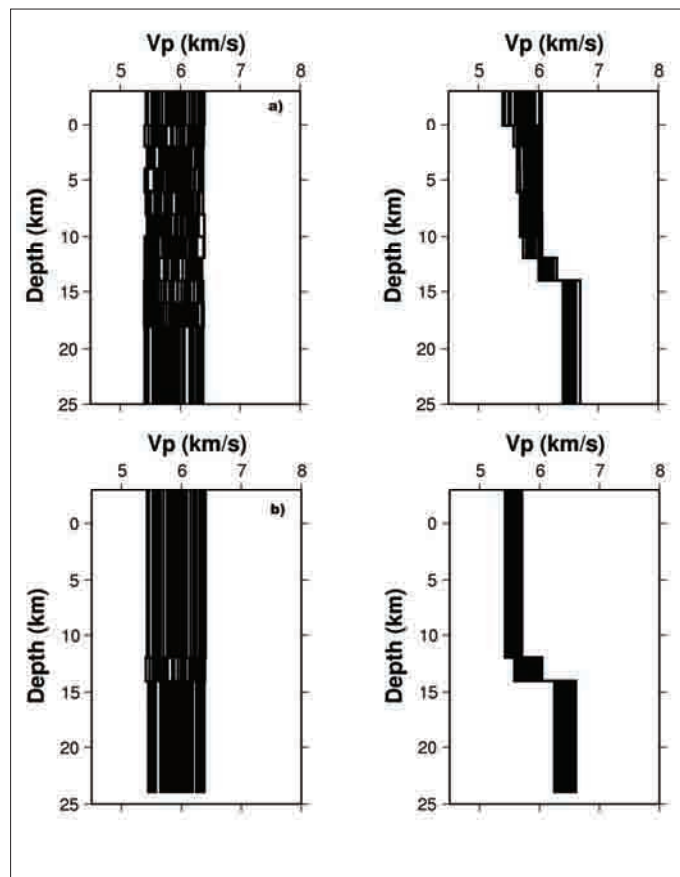
شکل ۴- سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های گستره البرز مرکزی بر اساس گزارش مرکز زمین‌لرزه‌شناسی دانشگاه هاروارد (حل CMT).



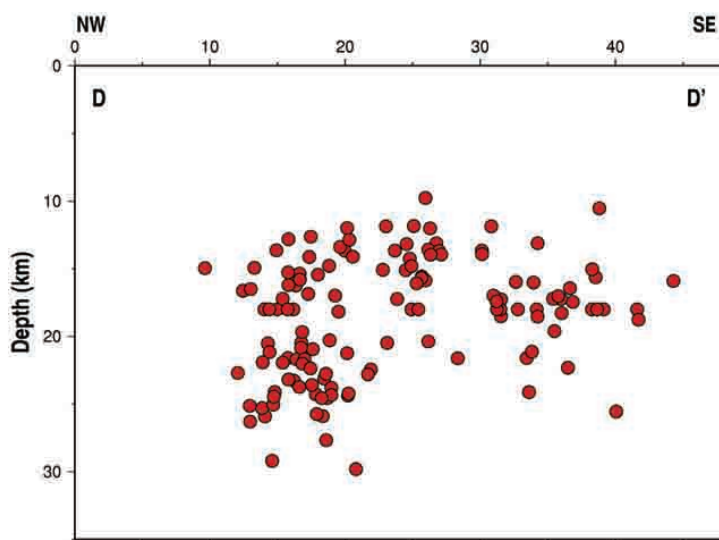
شکل ۵- موقعیت رویداد اصلی، بزرگ‌ترین پس‌لرزه و دیگر پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه فیروزآباد- کجور. سازوکار کانونی زمین‌لرزه اصلی بر اساس گزارش مرکز هاروارد در شکل نشان داده شده است. پس‌لرزه‌های ۷ ساعت اول پس از زمین‌لرزه اصلی با رنگ سرخ و پس‌لرزه‌های دنبال‌کننده بزرگ‌ترین پس‌لرزه ($M_1=4/8$) با رنگ آبی نشان داده شده‌اند. موقعیت ایستگاههای لرزه‌نگاری دائمی متعلق به پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران با مثلث مشخص شده‌اند.



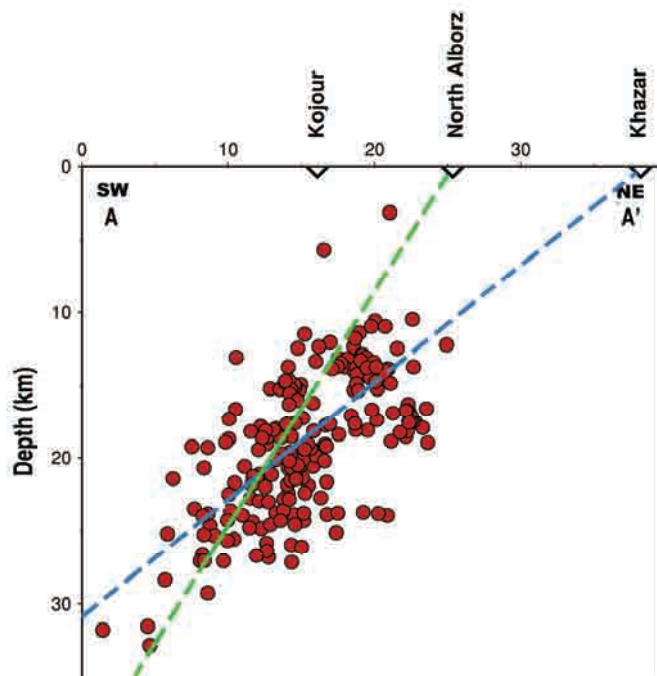
شکل ۶- توزیع مکانی و مرکز پس‌لرزه‌های انتخابی ($nb > 6$, $erz < 2km$, $erh < 2km$, $gap < 180^\circ$, $rms > 0.15sec$) زمین‌لرزه فیروزآباد- کجور که توسط شبکه لرزه‌نگاری موقت ثبت شده‌اند. موقعیت ایستگاههای شبکه و دو مقطع عرضی به موازات و عمود بر گسل شمال البرز (شکل ۱) نیز نشان داده شده‌اند.



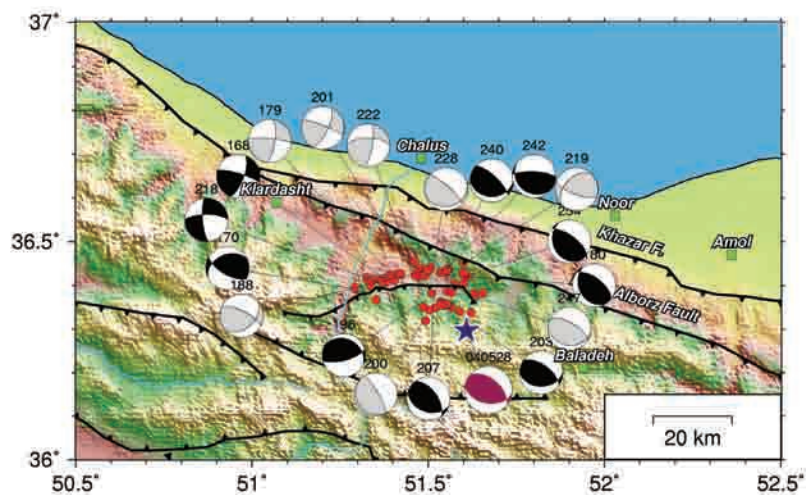
شکل ۷- ساختار سرعتی یک بعدی محاسبه شده بر اساس برگردان زمانهای رسید پس لرزه‌های ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری موقت. الف) برگردان ۵۰ مدل چند لایه‌ای (هر کدام به سبب ۲ کیلومتر) با سرعت‌های متفاوت. ب) برگردان ۵۰ مدل اولیه سه لایه‌ای بر اساس نتایج حاصل از برگردان مرحله الف.



شکل ۸- توزیع کانون ژرفی پس لرزه‌های ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری موقت بر روی مقطع عرضی رسم شده به موازات گسل‌های شمال البرز و خزر.



شکل ۹- توزیع کانونی پس‌لرزه‌های ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری موقت بر روی مقطع عرضی که عمود بر گسل‌های شمال البرز و خزر انتخاب و رسم شده‌اند.



شکل ۱۰- سازوکارهای انتخابی محاسبه شده برای تعدادی از پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۸ خرداد ماه فیروزآباد-کجور. سازوکارهای با کیفیت A با رنگ مشکی و کیفیت B با رنگ خاکستری روشن نشان داده شده‌اند.

References

- Alavi, M., 1996- Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran. *J. Geodyn.* **21**, 1 – 33.
- Allen, M. B., Jones, S., Ismail-Zadeh, A., Simmons, M. D. & Anderson, L., 2002- Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian Basin, *Geology*, **30**, 775 – 778.
- Allen, M.B., Ghassemi, M.R., Sharabi, M. & Qoraishi, M., 2003- Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *J. Struct. Geol.*, **25**, 659– 672.
- Ambraseys, N. N. & Melville, C. P., 1982- A history of Persian Earthquakes, Cambridge Earth Science Series, *Cambridge University Press*, London.
- Ashtari, M., Hatzfeld, D. & Kamalian, N., 2005- Microseismicity in the region of Tehran, *Tectonophysics*, **395**, 193-208.
- Berberian, M., 1983- The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust. *Can. J. Earth Sci.*, **20**, 163– 183.
- Berberian, M., Qorashi, M., Jackson, J.A., Priestley, K. & Wallace, T., 1992- The Rudbar–Tarom earthquake of 20 June 1990 in NW Persia: preliminary field and seismological observations, and its tectonic significance, *Bull. seism. Soc. Am.*, **82**, 1726–1755.
- Berberian, M. & Yeats, R.S., 2001- Contribution of archaeological data to studies of earthquake history in the Iranian plateau. *J. Struct. Geol.* **23**, 563– 584.
- Berberian, M., Ghorashi, M., Shoja-Taheri, J., Talebian, M., 1996- Seismotectonic and earthquake-fault hazard investigations in the Semna region. Geological Survey of Iran, Publication no. 63.
- Brunet, M.-F., Korotaev, M.V., Ershov, A., Nikishin, A.M., 2003- The south Caspian basin: a review of its evolution form subsidence modelling. *Sediment. Geol.* **156**, 119– 148.
- Engdahl, E. R., Van Der Hilst, R. & Buland, R., 1998- Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 722-743.
- Geological Survey of Iran, 1991- Amol. Geological Survey of Iran, Tehran, scale 1:250,000.
- Geological Survey of Iran, 1991- Gorgan. Geological Survey of Iran, Tehran, scale 1:250,000.
- Geological Survey of Iran, 1991- Sari. Geological Survey of Iran, Tehran, scale 1:250,000.
- Ghitanchi, M.R., 2005- Source characteristics of the 28th May 2004 Baladeh-Kojour destructive Earthquake in Central Alborz, revealed from far-field waveform data. *Geosciences*, GSI, **55**, 154-163.
- Harvard University, Department of Geological Sciences, 2006- Centroid Moment Tensor catalogue, available online at: <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>.
- Hessami, K. & Jamali, F., 2006- Explanatory Notes to the Map of Major Active Faults of Iran, *J. of Seismology and Earthquake Engineering*, **8**, No. 1.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. & Berberian, M., 2000- Active tectonics of the south Caspian basin. *Geophys. J. Int.* **148**, 214– 245.
- Kissling, E., 1988- Geotomography with local earthquake data, *Rev. Of Geophys.*, **26**, 659-698.
- Maggi, A., Jackson, J.A., Priestley, K. & Baker, C., 2000b- A re-assessment of focal depth distributions in southern Iran, the Tien Shan and northern India: do earthquakes really occur in the continental mantle?, *Geophys. J. Int.*, **143**, 629–661.

- Nazari, H., 2006- Analyse de la tectonique récente et active dans l'Alborz Central et la région de Téhéran : Approche morphotectonique et paléoseismologique, Ph.D. thesis, Université Montpellier II.
- Priestley, K., Baker, C. & Jackson, J., 1994- Implications of earthquake focal mechanism data for the active tectonics of the south Caspian basin and surrounding regions. *Geophys. J. Int.* **118**, 111– 141.
- Reasenber, P.A. & Oppenheimer, D., 1985- FPFIT, FPLOT and FPPAGE, Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, *USGS Open-File Report*, no 85–739.
- Sengör, A.M.C., Altiner, D., Cin, A., Ustaomer, T. & Hsu, K.J., 1988- Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana Land. Gondwana and Tethys. In: Audley-Charles, M.G., Hallam, A. (Eds.), *Geological Society Special Publication*, **37**, 119–181.
- Tatar, M., 2001- Etude Seismotectonique de deux zones de collision continentale: le Zagros Central et l'Alborz (Iran). PhD thesis, University de Joseph Fourier.
- Tatar, M., Hatzfeld, D. & Ghafory-Ashtiany, M., 2004- Tectonics of the Central Zagros (Iran) deduced from microearthquake seismicity, *Geophys. J. Int.*, **156**, 255–266.
- Trifonov, V.G., Hessami, K.T. & Jamali, F., 1996- West-Trending Oblique Sinitral–Reverse Fault system in Northern Iran. *IIEES Special Pub.*, vol. **75**. Tehran, Iran.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbasi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiany, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Chéry, J., 2004a- 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.
- Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Chery, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, J.F., Sedighi, M. & Tavakoli, F., 2004b- Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data, *Earth and Planetary Science Letters*, **223**, 177– 185.