

تعیین محل مجدد زمین‌لرزه‌های منطقه قوچان به روش نسبی اختلاف زمانی دوگانه با استفاده از مدل سرعتی سه‌بعدی

امین رشیدی^{۱*}، اسماعیل بایرام نژاد^۲ و محمدرضا قیطانچی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۲. استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۳. استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۳/۶/۲۲، پذیرش نهایی: ۹۴/۱۱/۱۱)

چکیده

در این مطالعه در بهبود تعیین مکان زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه قوچان به وسیله روش نسبی اختلاف زمانی دوگانه و الگوریتم *hypoDD* با استفاده از مدل سرعتی سه‌بعدی کوشش شده است. ابتدا به منظور بررسی توانایی کارکرد روش اختلاف زمانی دوگانه با آرایه موجود از آزمون مصنوعی توسط سه خوشه منطبق بر گسل‌های بینالود، کشف‌رود و قوچان استفاده شد. نتایج، کاهش چشمگیر خطاها و برتری روش نسبی در مقابل روش تک‌حادثه‌ای را نشان داد. سپس با اعمال محدودیت‌هایی روی داده‌های اولیه، ۲۵۱۶ زمین‌لرزه ثبت شده توسط شبکه‌های لرزه‌نگاری قوچان و مشهد بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۲ برای مکان‌یابی مجدد توسط آخرین نسخه الگوریتم *hypoDD* با استفاده از مدل سرعتی سه‌بعدی مهربان (۱۳۹۰) انتخاب شدند. با توجه به مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها، وجود فعالیت‌های لرزه‌ای در شمال گسل سنگ‌بست-شان‌دیز و غرب گسل بینالود و همچنین در جنوب گسل باغان-گرماب به چشم می‌خورد که می‌تواند نشان‌دهنده فعالیت گسل‌های پنهان باشد. در این مطالعه میانگین RMS از ۰/۲۷ ثانیه در مکان‌یابی تک‌حادثه‌ای به ۰/۰۹ ثانیه در مکان‌یابی مجدد با استفاده از مدل سه‌بعدی رسید. میانگین عدم قطعیت‌های نسبی افقی و قائم نیز در مکان‌یابی مجدد به ترتیب ۶۸۶ متر و ۷۲۱ متر به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آزمون مصنوعی، تعیین محل مجدد، روش اختلاف زمانی دوگانه، روش نسبی، قوچان.

۱. مقدمه

می‌توان مسیر موج پیموده شده برای دو زمین‌لرزه به یک ایستگاه را شبیه به هم دانست (کاستلنوس و ون‌دریان، ۲۰۱۳). در نتیجه با این فرض، اختلاف زمان سیر مشاهده شده بین دو زمین‌لرزه، از ناهمگنی سرعتی تأثیری نمی‌پذیرد و آن را می‌توان به اختلاف مکانی آن‌ها نسبت داد که این امر سبب می‌شود مکان زمین‌لرزه‌ها با دقت زیادی تعیین شود. یکی از روش‌های مکان‌یابی نسبی که امروزه کاربرد بسیار زیادی دارد، روش اختلاف زمانی دوگانه (*Double-Difference*) است که توسط والد‌هاوسر و الزورث (۲۰۰۰) به منظور مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها ارائه شده است. این روش در غالب الگوریتم *hypoDD* (والد‌هاوسر، ۲۰۰۱) که برنامه‌ای به زبان فورترن است، زمان سیر امواج را با استفاده از یک مدل سرعتی برای تمام جفت زمین‌لرزه‌ها در یک دسته محاسبه می‌کند و با حذف تأثیرات ناشی از ساختار سرعتی، موجب افزایش دقت در امر مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها

مکان‌یابی زمین‌لرزه و یافتن زمان وقوع از طریق زمان رسید امواج لرزه‌ای در ایستگاه‌های مختلف، یک مسئله کلاسیک وارون است. با رخداد زمین‌لرزه در داخل زمین مکان چشمه‌ها باید به‌طور غیرمستقیم از مشاهدات دور و نزدیک به دست آیند. تعیین محل دقیق زمین‌لرزه‌ها به منظور مطالعات زلزله‌شناختی نظیر مطالعات الگوهای کلی لرزه‌خیزی، محاسبه توزیع تغییرات تنش و واتنش در اطراف زمین‌لرزه، برآورد خطر لرزه‌ای، مطالعات چشمه و غیره، امری ضروری است. روش‌های تعیین مکان نسبی زمین‌لرزه‌ها که در چند دهه گذشته به کار گرفته شده‌اند، در مقایسه با روش‌های مطلق و تک‌حادثه‌ای، به علت کاهش تأثیر خطاهای ناشی از مدل پوسته‌ای با دقت بسیار بیشتری زمین‌لرزه‌ها را مکان‌یابی می‌کنند (والد‌هاوسر و الزورث، ۲۰۰۰). در روش‌های مکان‌یابی نسبی فرض بر این است که اگر اختلاف مکانی کانون دو زمین‌لرزه در مقایسه با فاصله چشمه تا ایستگاه خیلی کوچک باشد،

۳. روش اختلاف زمانی دوگانه

روش اختلاف زمانی دوگانه تکنیکی بسیار مؤثر برای تعیین مکان نسبی زمین‌لرزه با حذف تأثیرات ساختار سرعتی و در حقیقت نسخه اصلاح‌شده الگوریتم گات و همکاران (۱۹۹۴) است. این الگوریتم موقعیت جفت زمین‌لرزه‌ها را نسبت به یک ایستگاه مشخص می‌سجد و بنابراین به تصحیحات ایستگاهی نیازی نداریم. معادلات الگوریتم اختلاف زمانی دوگانه براساس معادله گایگر (۱۹۱۰) بنا نهاده شده است که از یک سیستم از معادلات خطی برای بیان رابطه بین اختلاف زمانی مشاهده‌شده و محاسباتی برای هر جفت زلزله استفاده می‌شود. زمان رسید (T) برای یک زمین‌لرزه (i) در یک ایستگاه (k) با استفاده از تئوری پرتو به صورت انتگرال مسیر در امتداد پرتو بیان شده است:

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k ds \quad (1)$$

t^i زمان وقوع رویداد i ام است، u بردار کندی و ds یک المان از طول مسیر موج است. به علت وجود رابطه غیرخطی بین زمان سیر و مکان زمین‌لرزه، بسط سری تیلور (گایگر، ۱۹۱۰) به‌طور کلی برای بیان رابطه (۱) به صورت خطی استفاده می‌شود. بنابراین باقیمانده زمان سیر برای زمین‌لرزه i و هر بار مشاهده k را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i = r_k^i \quad (2)$$

که در آن، $r_k^i = (t_k^{obs} - t_k^{cal})^i$ اختلاف بین زمان سیر مشاهده‌شده (t_k^{obs}) و محاسباتی (t_k^{cal}) و $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta t^i)$ بردار تغییرات چهار پارامتر کانونی زمین‌لرزه است. فرچت (۱۹۸۵) معادله‌ای برای تعیین پارامترهای نسبی کانونی بین دو زمین‌لرزه i و j با فرض وجود یک بردار کندی ثابت برای دو زمین‌لرزه به دست آورد:

$$\frac{\partial t_k^{ij}}{\partial m} \Delta m^{ij} = dr_k^{ij} \quad (3)$$

که $\Delta m^{ij} = (\Delta dx^{ij}, \Delta dy^{ij}, \Delta dz^{ij}, \Delta dt^{ij})$ بردار تغییرات نسبی پارامترهای کانونی (مکانی و زمانی) بین دو زمین‌لرزه

است. معادله اختلاف دوگانه به صورت اختلاف بین باقیمانده‌های زمان سیرهای مشاهده‌ای و محاسباتی برای دو زمین‌لرزه i و j و هر مشاهده k تعریف می‌شود:

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (4)$$

معادلات اختلاف دوگانه برای تمام جفت زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده در همه ایستگاه‌ها، در یک سیستم از معادلات خطی ترکیب می‌شوند. تمامی معادلات یک سیستم ماتریسی تشکیل می‌دهند و الگوریتم اختلاف زمانی دوگانه با حل این سیستم، اختلاف باقیمانده‌های زمان سیر مشاهده‌ای و محاسباتی مربوط به فازهای P و S را برای هر جفت زمین‌لرزه در هر ایستگاه به حداقل می‌رساند. در الگوریتم اختلاف زمانی دوگانه از روش کمترین مربعات (LSQR) و همچنین روش تجزیه مقادیر تکی (SVD) برای حل این سیستم استفاده می‌شود (متقی و همکاران، ۲۰۱۰).

۴. تعیین مکان مجدد زمین‌لرزه‌ها

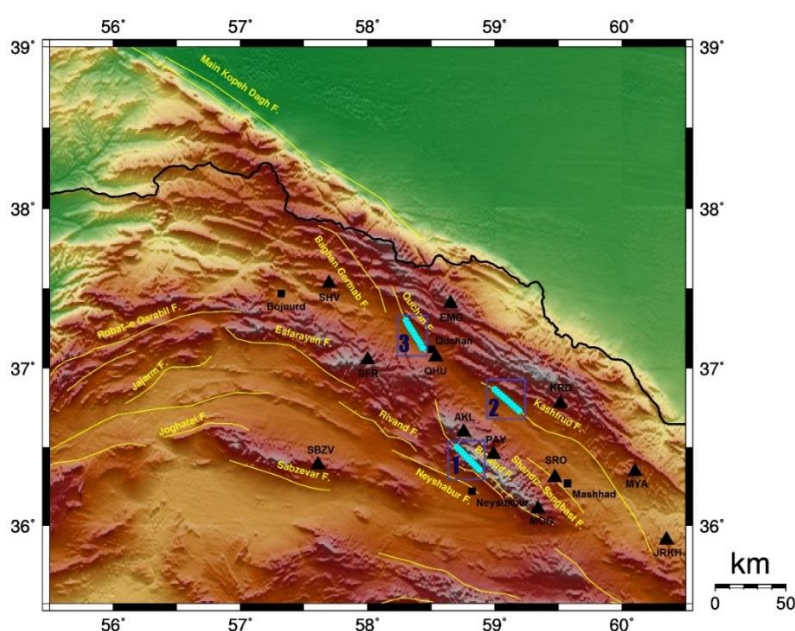
به منظور مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌های منطقه قوچان از اطلاعات ثبت‌شده بین سال‌های ۱۹۹۶ میلادی تا ۲۰۱۲ میلادی توسط ایستگاه‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری قوچان و مشهد وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران استفاده شد که در بانک اطلاعاتی مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC) موجود است. شکل ۲ موقعیت ایستگاه‌ها را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. مدل سرعتی به کاررفته در این مطالعه، نتایج توموگرافی سه بعدی پسته در منطقه کپه‌داغ توسط مهربان (۱۳۹۰) است. این مدل دارای طول ۳۸۴ کیلومتر، عرض ۲۷۶ کیلومتر و عمق ۵۲ کیلومتر است که جدایش گره‌های سرعتی در این مدل ۳ کیلومتر در نظر گرفته شده است (شکل ۳).

۴.۱. آزمون مصنوعی

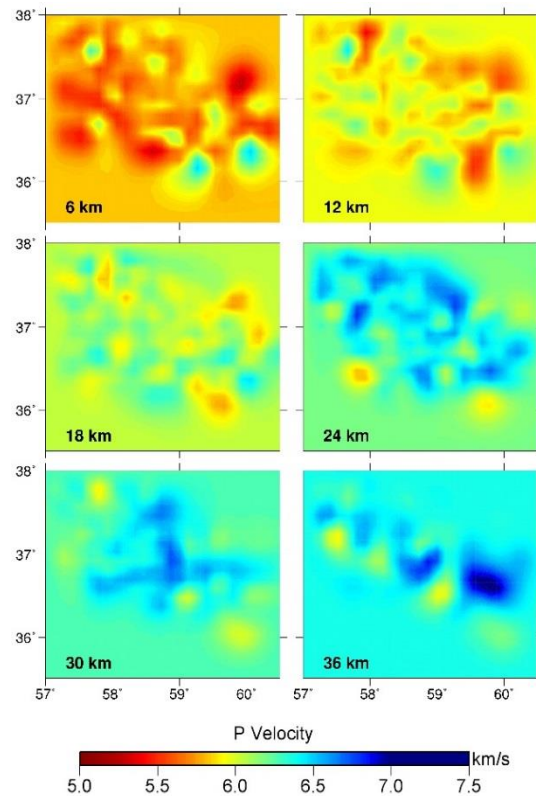
در این مطالعه از آزمون مصنوعی به منظور ارزیابی توانایی کارکرد الگوریتم *hypoDD* با آرایش ایستگاه‌ها و چشمه‌های موجود استفاده شد؛ بنابراین سه خوشه مختلف

به منظور ایجاد شرایط یکسان و مشاهده عدم تأثیر بسزای ساختار سرعتی در مکان‌یابی مجدد به وسیله روش اختلاف زمانی دو گانه، مکان‌یابی مجدد یک بار به وسیله مدل سرعتی دولایه‌ای که در مکان‌یابی اولیه استفاده شد و یک بار به وسیله مدل سرعتی مهربان (۱۳۹۰) انجام گرفت. نتایج اختلاف ناچیزی را در مکان‌یابی مجدد به وسیله هر دو ساختار سرعتی نشان دادند که چشم‌پوشی‌پذیر است. با توجه به تعداد کم زلزله‌های هر خوشه در آزمون مصنوعی و همچنین ارزیابی صحیح‌تر خطاها ما از روش تجزیه مقدار تکین (SVD) برای حل ماتریس مشتقات جزئی استفاده کردیم. در حل با این روش، وزن‌دهی فاصله که تنها بر اساس اعمال میرایی در روش کم‌ترین مربعات میرا استفاده می‌شود، صورت نم‌پذیرد (ولف، ۲۰۰۲).

هرکدام شامل ۱۰ زمین لرزه به ترتیب در طول گسل‌های بینالود، کشف‌رود و قوچان با در نظر گرفتن شیب فرضی، برای ارزیابی فوق در نظر گرفته شد (شکل ۲). ابتدا بر اساس مطالعهٔ مهربان (۱۳۹۰) با استفاده از یک مدل پوستهٔ دولايةٔ یک‌بعدي هرکدام به ضخامت ۲۰ کیلومتر با سرعت $V_p=5.85$ برای لایهٔ اول، سرعت $V_p=6.33$ برای لایهٔ دوم و سرعت $V_{pn}=8.1$ با نسبت سرعتی $V_p/V_s=1.73$ ، زمان رسید امواج P و S محاسبه شدند. سپس خطای ۱۰۰ میلی‌ثانیه به‌طور تصادفی به‌عنوان خطای قرأت به‌طور یکسان به داده‌ها اضافه شد و با استفاده از الگوریتم *hypo71* (لی و لاهر، ۱۹۷۲) مکان‌یابی اولیهٔ زمین‌لرزه‌های مصنوعی صورت پذیرفت. مکان‌یابی اولیه به کمک *hypo71* با در نظر گرفتن عمق قراردادی (*trial depth*) ۱۵ کیلومتر و وزن‌دهی ایستگاه‌ها (وزن ۱) تا فاصلهٔ رومرکزی ۱۵۰ کیلومتر از زمین‌لرزه (*XNEAR*) انجام گرفت که پس از این فاصله، وزن‌دهی به‌طور خطی تا فاصلهٔ ۴۰۰ کیلومتر، جایی که وزن برابر صفر می‌شود (*XFAR*)، کاهش می‌یابد. نتایج به‌عنوان مکان‌یابی اولیهٔ تک‌حادثه‌ای با استفاده از روش مطلق و تک‌حادثه‌ای تلقی شد و درنهایت با استفاده از الگوریتم *hypoDD* زمین‌لرزه‌ها مکان‌یابی مجدد شدند؛ نتایج مکان‌یابی



شکل ۲. موقعیت خوشه‌های مصنوعی در منطقه مورد مطالعه. مثلث‌ها نشان‌دهنده ایستگاه‌ها و مربع‌ها نشان‌دهنده شهرها هستند.



شکل ۳. تغییرات سرعت موج P به دست آمده توسط مهربان (۱۳۹۰) در عمق‌های ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۰ و ۳۶ کیلومتری

شدند. جدول ۱ نتایج آزمون مصنوعی و شکل ۴ موقعیت رومرکز و سطح مقطع زمین‌لرزه‌های مکان‌یابی شده توسط الگوریتم‌های $hypo71$ و $hypoDD$ را نسبت به فرض اصلی نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده کاهش چشمگیر خطاها در مکان‌یابی مجدد توسط الگوریتم $hypoDD$ و برتری شایان ملاحظه روش نسبی در مقابل روش تک‌حادثه‌ای است.

در این آزمون به منظور شبیه‌سازی قرائت فازهای P و S ، برای هر زمین‌لرزه پیک‌های فاز P را با احتمال ۱ (همه ایستگاه‌ها) و پیک‌های فاز S را با احتمال ۰/۳ (یک سوم ایستگاه‌ها) ایجاد کردیم. بدین صورت که زمین‌لرزه‌های مصنوعی به وسیله یک دسته از ایستگاه‌ها (۱۲ ایستگاه) با ۱۲ پیک P و ۴ پیک S به ازای هر زمین‌لرزه مکان‌یابی اولیه

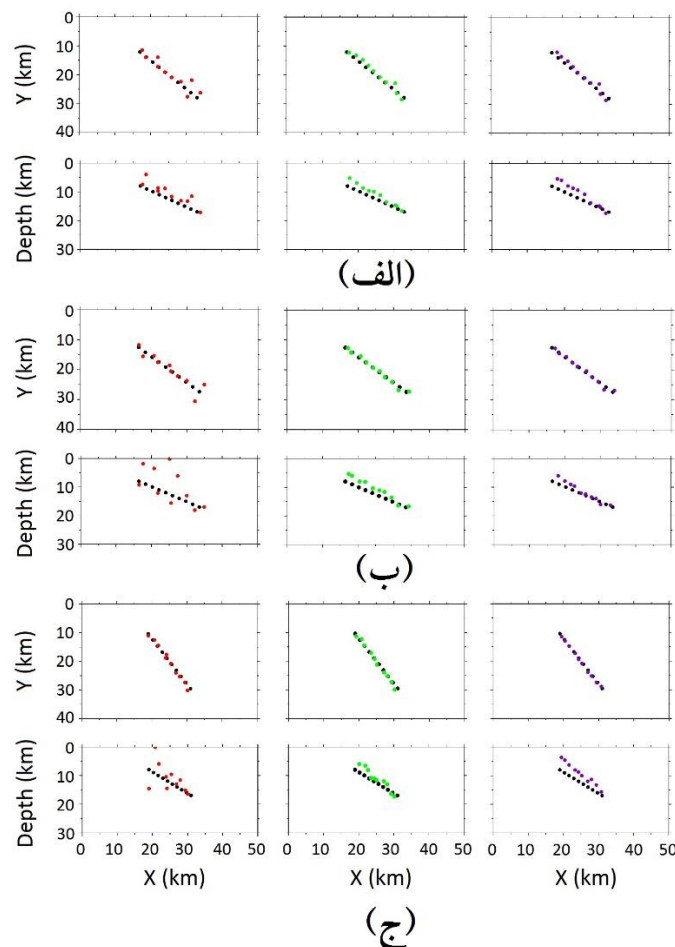
جدول ۱. مقایسه خطاهای مطلق و نسبی و RMS باقیمانده زمان سیر در آزمون مصنوعی با خطای تصادفی ۱۰۰ میلی ثانیه

Swarm	Method	Absolute Error (km)			Relative Error (km)			RMS residuals (s)
		E-W	N-S	Vertical	E-W	N-S	Vertical	
Binalud F.	Single event ^a	۰/۷۵	۰/۸۶	۱/۹۹	۰/۸۱	۰/۸۰	۱/۶۳	۰/۲۴
	DD (1) ^b	۰/۶۱	۰/۵۳	۱/۳۴	۰/۴۳	۰/۶۹	۱/۴۲	۰/۱۶
	DD (2) ^c	۰/۷۰	۰/۴۲	۱/۷۴	۰/۴۶	۰/۶۹	۱/۴۲	۰/۱۶
Kashafrud F.	Single event	۰/۵۸	۱/۱۳	۴/۲۳	۰/۸۷	۰/۷۶	۸/۳۳	۰/۴۵
	DD (1)	۰/۳۵	۰/۲۳	۰/۹۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۸۵	۰/۲۲
	DD (2)	۰/۳۷	۰/۳۱	۰/۸۲	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۷۱	۰/۲۰
Quchan F.	Single event	۰/۴۳	۰/۴۳	۳/۳۴	۰/۳۹	۰/۶۱	۴/۴۱	۰/۱۷
	DD (1)	۰/۳۷	۰/۳۵	۲/۹۵	۰/۰۹	۰/۲۰	۰/۷۷	۰/۰۴
	DD (2)	۰/۲۳	۰/۴۲	۲/۹۴	۰/۱۴	۰/۲۰	۰/۷۸	۰/۰۴

a. منظور از Single event مکان‌یابی به روش تک‌حادثه‌ای با استفاده از $hypo71$ است.

b. منظور از DD (1) مکان‌یابی به روش اختلاف زمانی دوگانه با استفاده از مدل سرعتی دولایه است.

c. منظور از DD (2) مکان‌یابی به روش اختلاف زمانی دوگانه با استفاده از مدل سرعتی مهربان (۱۳۹۰) است.

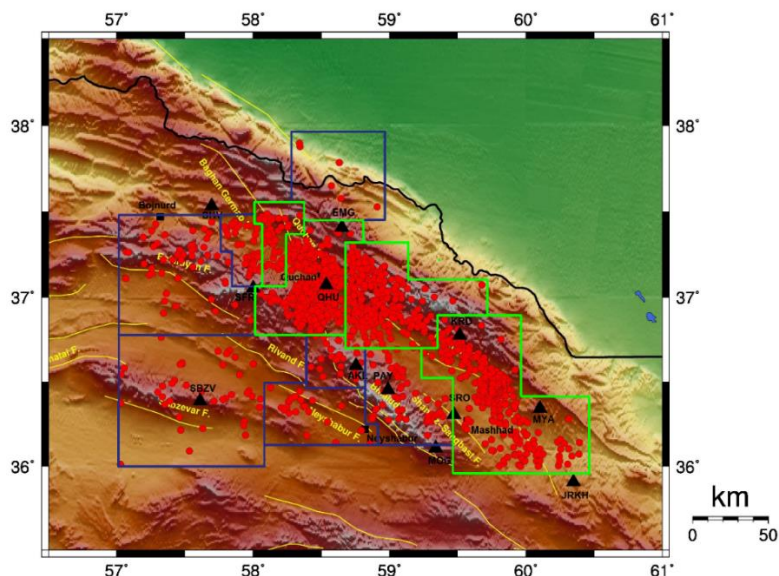


شکل ۴. از سمت چپ، به ترتیب: رومرکز و سطح مقطع زمین‌لرزه‌های مکان‌یابی‌شده توسط الگوریتم *hypo71* مکان‌یابی مجدد با استفاده از الگوریتم *hypoDD* و مدل سرعتی دولایه، مکان‌یابی مجدد با استفاده از الگوریتم *hypoDD* و مدل سرعتی مهربان (۱۳۹۰) برای خوشه اول (بر روی گسل بینالود) (الف)، خوشه دوم (بر روی گسل کشف‌رود) (ب) و خوشه سوم (بر روی گسل قوچان) و (ج) مطابق شکل ۳. دایره‌های سیاه فرض اصلی ما و دایره‌های رنگی زمین‌لرزه‌های مکان‌یابی‌شده هستند.

۲.۴. آماده‌کردن داده‌های اصلی

پس از کسب اطمینان از توانایی کارکرد الگوریتم اختلاف زمانی دوگانه در مرحله بعد محل زمین‌لرزه‌ها در منطقه مورد مطالعه تعیین مجدد شد. در این مطالعه به منظور مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌های منطقه مورد مطالعه، ابتدا داده‌های مورد نیاز در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۲ فراهم شد. با توجه به پوشش ایستگاهی ضعیف در منطقه مورد مطالعه، کیفیت داده‌ها چندان مطلوب نیست؛ بنابراین ابتدا نیاز است که با اعمال محدودیت‌هایی روی داده‌ها از ورود داده‌های نامناسب در امر مکان‌یابی مجدد جلوگیری شود. گپ آزمون‌های کمتر از ۱۸۰ درجه، تعداد ایستگاه‌های رکوردکننده حداقل برابر ۴ ایستگاه، مقدار *RMS* باقیمانده زمان سیرها کمتر از ۱

ثانیه، محدودیت عمقی بین ۳ تا ۴۷ کیلومتر (عمق موهو) و بزرگی بین ۱ و ۷، محدودیت‌های اعمال‌شده در فرایند حذف داده‌های غیرمطمئن انتخاب شدند. پس از اعمال محدودیت‌های فوق در نهایت تعداد ۲۵۱۶ زمین‌لرزه برای تعیین محل مجدد انتخاب شدند. به منظور ارزیابی صحیح زمین‌لرزه‌های وابسته به گسل‌های منطقه با توجه به تجمع زمین‌لرزه‌ها در اطراف هر گسل، زمین‌لرزه‌ها به صورت چشمی خوشه‌بندی و در نهایت تعیین مکان مجدد شدند. شکل ۵ خوشه‌بندی داده‌های اولیه را نشان می‌دهد که از بین ۱۱ خوشه تعیین مکان شده، ۴ خوشه به عنوان خوشه‌های اصلی به دلیل تعداد و تجمع زمین‌لرزه‌های آن‌ها انتخاب شدند که در شکل با مرزهای سبزرنگ مشخص هستند.

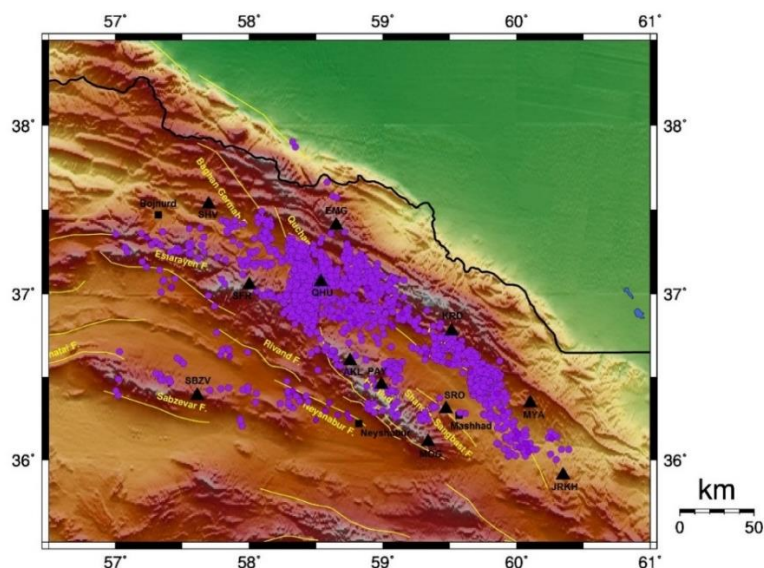


شکل ۵. رومرکز زمین‌لرزه‌های مکان‌یابی شده توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC) از ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۲

۳.۴. تعیین مکان مجدد زمین‌لرزه‌های منطقه قوچان

پس از خوشه‌بندی تمامی زلزله‌ها، هر خوشه جداگانه تعیین محل مجدد شد که در نهایت از مجموع ۲۵۱۶ زمین‌لرزه انتخابی، ۲۳۷۱ زمین‌لرزه به‌طور موفق با روش *hypoDD* تعیین محل مجدد شدند. شکل‌های ۵ و ۶ توزیع رومرکزی این ۲۳۷۱ زمین‌لرزه را نشان می‌دهند که به ترتیب ابتدا توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری و سپس دوباره در این مطالعه توسط الگوریتم *hypoDD* و مدل سرعتی سه‌بعدی مهربان (۱۳۹۰) مکان‌یابی شده‌اند. در ابتدا با استفاده از

داده‌های موجود زمان‌سیرهای فازهای اولیه مربوط به هر زمین‌لرزه تا ایستگاه‌های مختلف تعیین شد. وزن مربوط به قرائت فازی موج P برابر ۱ و وزن مربوط به قرائت فازی موج S برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد. علت این وزن‌دهی، کیفیت کم قرائت فاز S در شبکه‌های لرزه‌نگاری است. نسبت سرعتی میانگین برای زمین‌لرزه‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از برنامه *Wadati* در نرم‌افزار *Seisan* برابر Vp/Vs 1.727 ± 0.014 به دست آمد.

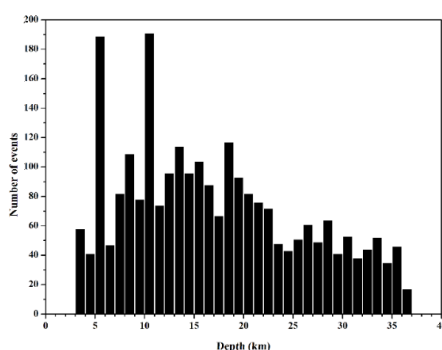


شکل ۶. رومرکز زمین‌لرزه‌های مکان‌یابی مجددشده در این مطالعه با استفاده از مدل سرعتی سه‌بعدی

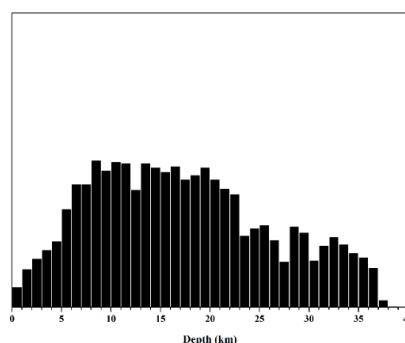
مربوط به مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها، به علت شیفت زمین‌لرزه‌های اطراف از مقطع مربوط به مکان‌یابی اولیه بیشتر است. مقطع (B-B') در قسمت میانی گسل کشف‌رود نشان‌دهنده تجمع بیشتر زمین‌لرزه‌ها به خصوص در عمق‌های ۵ تا ۲۰ کیلومتری در مکان‌یابی مجدد آن‌ها در مقایسه با مکان‌یابی اولیه است؛ هرچند لرزه‌خیزی تا عمق حدود ۳۵ کیلومتری ادامه یافته است، بهبود توزیع عمقی زمین‌لرزه‌ها سبب شده است که مقطع موردنظر پس از مکان‌یابی مجدد، نشان‌دهنده توزیع کلی زمین‌لرزه‌ها با شیب شمال‌شرقی باشد. با توجه به مکان‌یابی دوباره زمین‌لرزه‌ها عدم تجمع زمین‌لرزه‌ها در قسمت‌های میانی گسل کشف‌رود می‌تواند ناشی از فعالیت شاخه‌های فرعی گسلی به نام گسل امروودک باشد که در مطالعات حقی‌پور (۱۳۸۵) و زمردیان و برومند (۱۳۹۱) آمده است. با توجه به شکل ۶ و مقطع (C-C') در شکل ۸، خطی‌شدگی زمین‌لرزه‌ها در جنوب گسل باغان-گرماب می‌تواند نشان‌دهنده ادامه فعالیت لرزه‌ای این گسل باشد؛ هرچند که در نقشه‌ها اثر سطحی این فعالیت مشخص نیست، اما مطالعات نشان داده است امکان حضور یک گسل انشعابی دیگر در ادامه گسل باغان به سوی جنوب وجود دارد (آفانباتی، ۱۳۸۳) که می‌تواند به صورت یک راندگی پنهان باشد. مقطع (D-D') عمود بر گسل قوچان نیز بهبود عمقی مکان زمین‌لرزه را در مکان‌یابی مجدد آن‌ها توسط الگوریتم *hypoDD* نشان می‌دهد که با توجه به روند زمین‌لرزه‌ها می‌توان گفت این گسل دارای شیب شمال شرقی است.

شکل ۷ هیستوگرام‌های فراوانی توزیع عمقی زمین‌لرزه‌ها را قبل از مکان‌یابی مجدد و پس از مکان‌یابی مجدد به روش اختلاف زمانی دوگانه با استفاده از مدل سرعتی سه‌بعدی نشان می‌دهد. مکان‌یابی مجدد با استفاده از مدل سه‌بعدی، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، توزیع عمقی زمین‌لرزه‌ها را بهبود بخشیده و تمرکز لرزه‌خیزی را به خوبی بین عمق‌های ۵ تا ۳۰ کیلومتری نشان می‌دهد.

مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها نشان داد که بیشتر لرزه‌خیزی، در قسمت شرقی منطقه کپه‌داغ و در نزدیکی گسل کشف‌رود و در اطراف زون گسلی بخاردن-قوچان، گسل باغان-گرماب و گسل بینالود تمرکز دارد. برای بررسی بهبود توزیع عمقی زمین‌لرزه‌ها پس از مکان‌یابی مجدد از مقاطع عرضی بر روی داده‌های اولیه و دوباره مکان‌یابی شده استفاده شد. شکل ۸ مقاطع عرضی (A-A') تا (D-D') در نظر گرفته شده با پهنای ۱۵ کیلومتر را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به مقطع (A-A') در شمال گسل سنگ بست-شاندیز و در غرب گسل بینالود وجود یک فعالیت در محل این تجمع مشخص به چشم می‌خورد که گسل مرتبط با آن در نقشه‌ها موجود نیست و می‌تواند نشان‌دهنده وجود یک گسل پنهان در این ناحیه باشد که با توجه به توزیع رومرکز و مقطع موردنظر دارای روند تقریبی شمال شرقی-جنوب غربی و شیب شمال غربی است که البته به علت وجود شکستگی‌های متقاطع در این ناحیه وجود این فعالیت‌ها دور از انتظار نیست (کیم و همکاران، ۲۰۰۴؛ زراعتکار و رحیمی، ۱۳۹۱). تعداد زمین‌لرزه‌ها در مقاطع



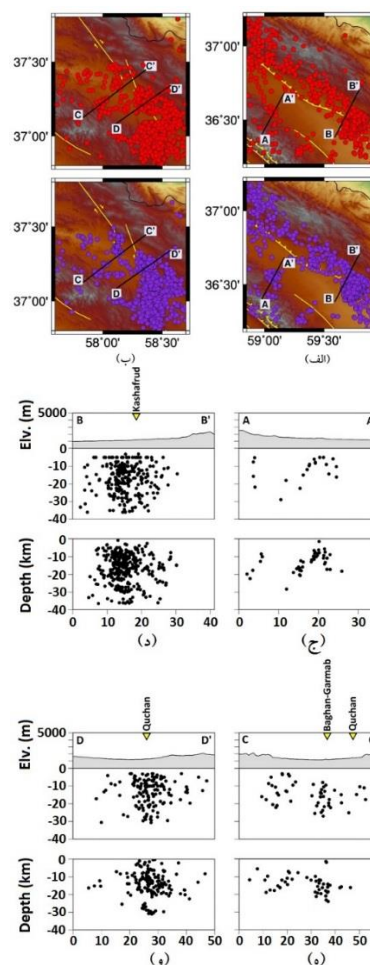
(ب)



(الف)

شکل ۷. (ب) هیستوگرام‌های فراوانی توزیع عمقی زمین‌لرزه‌ها در منطقه مورد مطالعه قبل از مکان‌یابی مجدد و (الف) پس از مکان‌یابی مجدد در این مطالعه

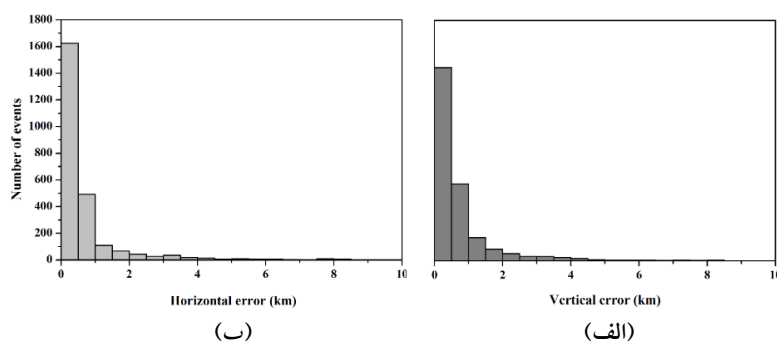
روش‌های مکان‌یابی و به‌طور کلی هر مسئله وارون محسوب می‌شود. در تعیین محل مجدد زمین‌لرزه‌های خوشه‌های اصلی در منطقه مورد مطالعه از روش کمترین مربعات استفاده شد و پس از تعیین محل مجدد زمین‌لرزه‌ها، خطاهای مکانی و زمانی محاسبه شدند. شکل ۹ توزیع خطاهای نسبی عمقی و رومرکزی زمین‌لرزه‌ها را که اشاره به خطا در تعیین فاصله بین کانون زمین‌لرزه‌های نزدیک در یک خوشه دارند، پس از مکان‌یابی مجدد نشان می‌دهد. میانگین عدم قطعیت‌های نسبی افقی و قائم نیز به ترتیب ۶۸۶ متر و ۷۲۱ متر به دست آمد. شکل ۱۰ هیستوگرام‌های *RMS* باقیمانده زمان سیرهای مربوط به مکان‌یابی اولیه و بعد از مکان‌یابی مجدد را نشان می‌دهد. میانگین *RMS* از ۰/۲۷ ثانیه در مکان‌یابی اولیه به ۰/۰۹ ثانیه در مکان‌یابی مجدد کاهش یافت. شکل ۱۱ نمودار درصد تجمعی برای خطاهای نسبی افقی و قائم حاصل از مکان‌یابی مجدد و همچنین برای خطای *RMS* باقیمانده زمان سیرهای مربوط به مکان‌یابی اولیه و بعد از مکان‌یابی مجدد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۱-ب، ۹۰ درصد خطاهای نسبی افقی و قائم کمتر از ۱/۲۵ کیلومتر هستند که نشان‌دهنده مقدار معقول و پذیرفتنی برای این خطاهاست (هاکسون و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین با توجه به شکل ۱۱-الف، ۹۰ درصد داده‌های اولیه دارای *RMS* کمتر از ۰/۴۷ ثانیه بوده‌اند که در مکان‌یابی مجدد به ۰/۲۳ ثانیه کاهش یافته است و نشان‌دهنده بهبود خطا در مکان‌یابی مجدد است.



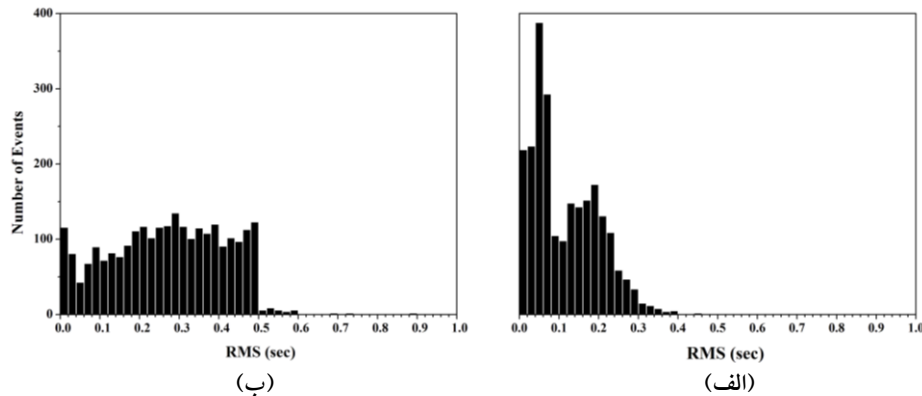
شکل ۸. (الف) و (ب): مکان مقاطع عرضی در این مطالعه بر روی نقشه؛ در هر مورد، نقشه‌های بالایی و پایینی به ترتیب رومرکز زمین‌لرزه‌ها قبل از مکان‌یابی مجدد و بعد از مکان‌یابی مجدد را نشان می‌دهند. (ج تا و): به ترتیب، مقاطع عرضی $A-A'$ تا $D-D'$ در هر مورد، مقاطع بالایی و پایینی به ترتیب کانون زمین‌لرزه‌ها را قبل و بعد از مکان‌یابی مجدد نشان می‌دهند. پهنای مقطع عرضی ۱۵ کیلومتر است و مثلث‌های معکوس محل تلاقی مقاطع با گسل‌ها را نشان می‌دهند.

۱.۳.۴. خطاها

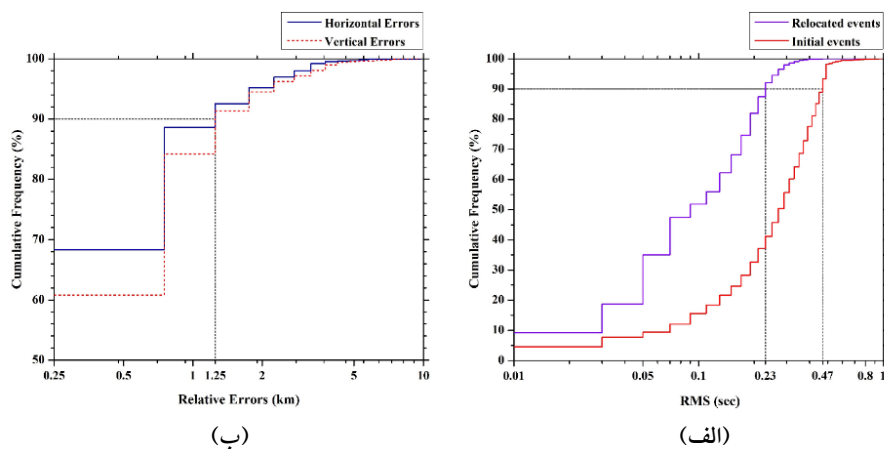
تعیین خطاها یکی از مهم‌ترین ابزارهای بررسی کارایی



شکل ۹. توزیع عدم قطعیت‌های نسبی مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها پس از تعیین محل مجدد توسط الگوریتم *hypoDD* با استفاده از مدل سرعتی سه‌بعدی. (الف): توزیع خطاهای عمقی و (ب): توزیع خطاهای افقی



شکل ۱۰. هیستوگرام‌های RMS زمان سیرها (ب) قبل از مکان‌یابی مجدد و (الف) پس از مکان‌یابی مجدد با استفاده از الگوریتم *hypoDD*



شکل ۱۱. (ب) درصد تجمعی خطاهای نسبی افقی و قائم بعد از مکان‌یابی مجدد و (الف) درصد تجمعی RMS زمان سیرها قبل و بعد از مکان‌یابی مجدد

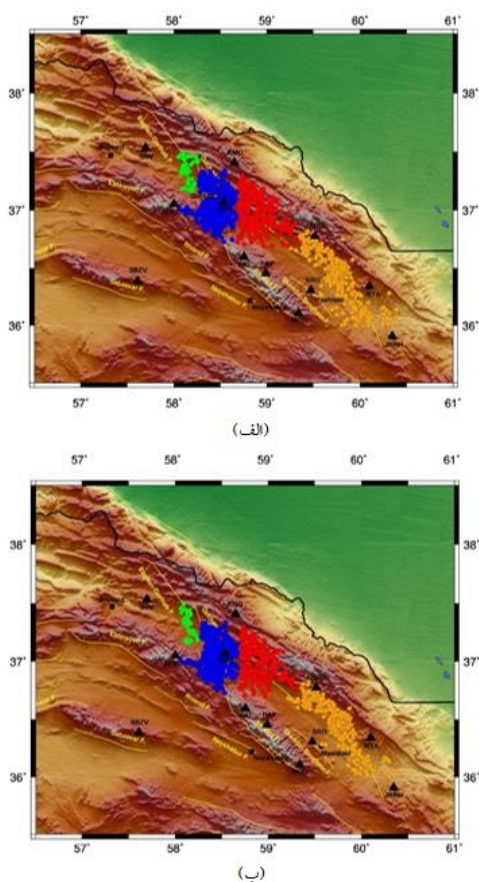
بیشتری را شامل می‌شوند، در کاهش خطای RMS بهتر عمل کرده است؛ چراکه به سبب تراکم بالای زمین‌لرزه‌های خوشه اول و سوم درصد جفت‌زمین‌لرزه‌هایی که با یکدیگر ارتباط قوی پیدا کرده‌اند به ترتیب ۷۵ درصد و ۸۲ درصد برای این دو خوشه است که از خوشه‌های دیگر بیشتر است. هرچه این درصد بیشتر باشد، معادلات به علت وجود تعداد اختلاف دوگانه‌های بیشتر با کیفیت بهتری حل می‌شوند و نتیجه مناسب‌تری به دست می‌آید. شکل ۱۳ تغییرات RMS را از مقدار اولیه به مقادیر به‌دست‌آمده توسط الگوریتم *hypoDD* برحسب تعداد تکرار الگوریتم برای مکان‌یابی مجدد با استفاده از مدل سه‌بعدی نشان می‌دهد. تعداد تکرار بهینه برای خوشه چهارم که تعداد زمین‌لرزه کمتری را شامل می‌شود، برابر ۸ و برای سایر خوشه‌ها برابر ۱۰ است.

طرف چپ شکل ۱۴ هیستوگرام‌های باقیمانده زمان سیرهای امواج رسیده به ایستگاه‌ها را برای زلزله‌های مربوط

۴.۳.۲. خوشه‌های اصلی

در مطالعه حاضر زلزله‌ها به‌طور چشمی به ۱۱ خوشه مختلف تقسیم شد (شکل ۵) که جدول ۲ نتایج حاصل از مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها برای چهار خوشه اصلی و شکل ۱۲ موقعیت خوشه‌های انتخابی را قبل و بعد از مکان‌یابی مجدد نشان می‌دهد. خوشه‌بندی زمین‌لرزه‌ها همان‌طور که گفته شد به‌صورت چشمی انجام گرفت و مبنای آن تجمع زمین‌لرزه‌ها و گسل‌های نزدیک است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، روش اختلاف زمانی دوگانه خطای RMS زمان سیرها را در مکان‌یابی مجدد در تمامی خوشه‌های اصلی کاهش داده است؛ به‌طوری که برای این خوشه‌ها متوسط RMS از ۰/۳۵ ثانیه در مکان‌یابی اولیه به ۰/۱ ثانیه در مکان‌یابی مجدد رسیده است. روش اختلاف زمانی دوگانه در مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌های خوشه‌های اول و سوم که در مقایسه با خوشه‌های دیگر تعداد زمین‌لرزه

این مسئله انتظار می‌رود. خوشه چهارم در خارج از بازه -۴۰۰ تا $+۴۰۰$ میلی‌ثانیه دنباله‌ای غیر گاوسی نشان می‌دهد که علت آن وجود داده‌های پرت و نامناسب در میان داده‌هاست. در صورت وجود یک پوشش ایستگاهی مناسب تعداد داده‌های باکیفیت افزایش می‌یابد و با کاهش داده‌های پرت دیگر شاهد دنباله‌های غیر گاوسی نخواهیم بود.

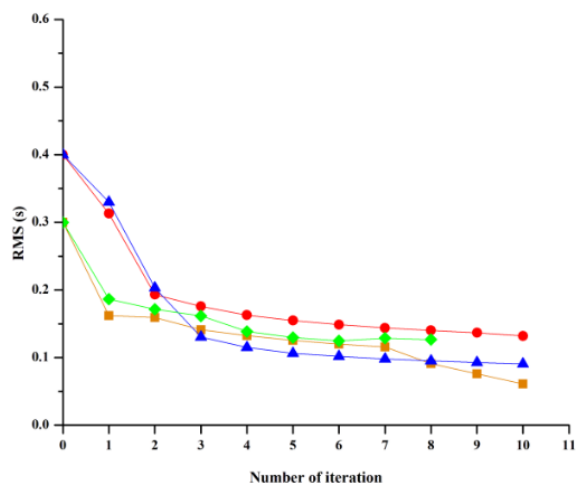


شکل ۱۲. موقعیت چهار خوشه اصلی؛ (الف): قبل از مکان‌یابی مجدد، (ب): بعد از مکان‌یابی مجدد توسط الگوریتم *hypoDD* با استفاده از مدل سه‌بعدی

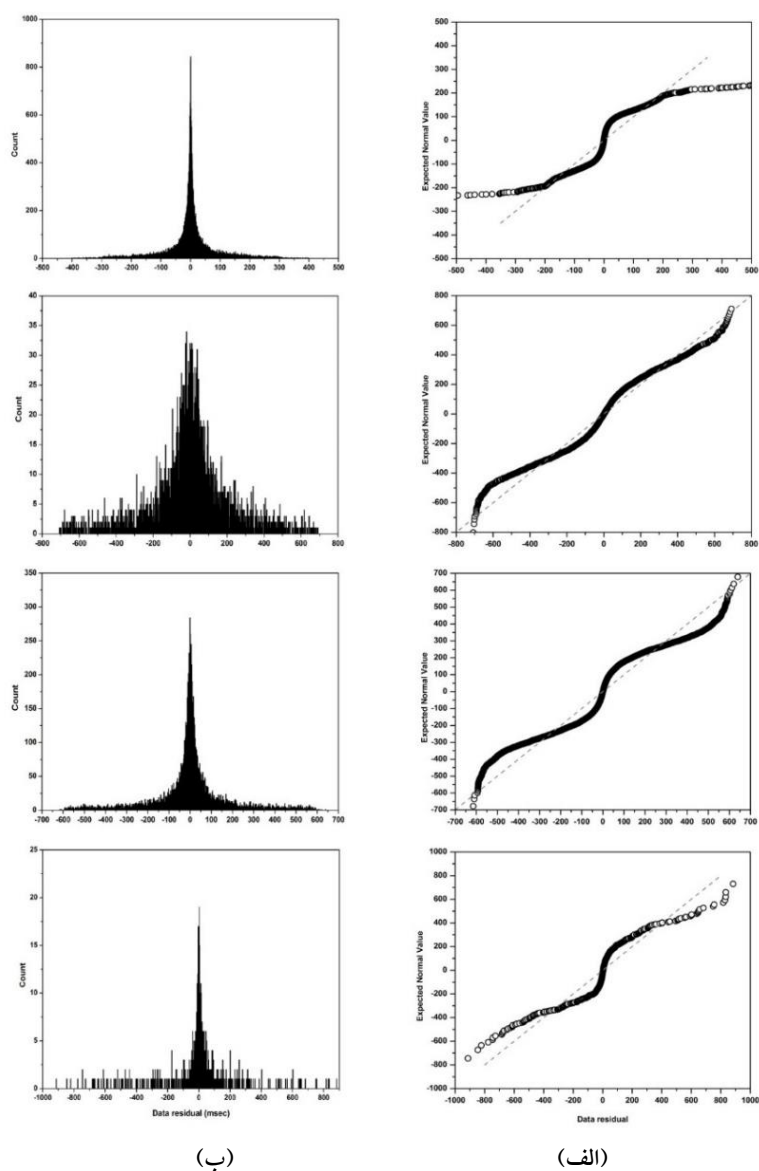
به هر خوشه بعد از مکان‌یابی مجدد با استفاده از مدل سه‌بعدی نشان می‌دهد. محور افقی این هیستوگرام‌ها مقدار باقیمانده زمان سیرها برحسب میلی‌ثانیه و محور عمودی تعداد زمان سیرهای امواج رسیده به ایستگاه‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، توزیع خطاها در خوشه‌ها تقریباً به صورت نرمال یا گاوسی است اما برای نمایش چگونگی نرمال‌بودن خطاها و انحراف داده‌های پرت از توزیع نرمال، می‌توان از نمودارهای چارک - چارک کمک گرفت که در طرف راست شکل ۱۴ مشخص هستند. محور افقی این نمودارها باقیمانده‌های محاسباتی و محور عمودی مقادیر مورد انتظار برای باقیمانده‌ها در صورت وجود یک توزیع کاملاً نرمال را نشان می‌دهد، به طوری که روند نرمال داده‌ها به وسیله یک خط چین مستقیم نشان داده شده است. مقادیر محاسباتی ما به وسیله دایره‌های توخالی در شکل ۱۴ مشخص شده‌اند که انحراف آن‌ها از خط چین، مقدار انحراف آن‌ها از توزیع نرمال را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۴ باقیمانده داده‌های خوشه دوم و سوم در مقایسه با دو خوشه دیگر انحراف کمتری از خط چین مستقیم دارند و بنابراین نرمال‌بودن توزیع خطاها در این خوشه از سایر خوشه‌ها بیشتر است. خوشه اول که شامل تعداد زیادی زمین‌لرزه است، در بازه -۳۰۰ تا $+۳۰۰$ میلی‌ثانیه توزیع نرمال مناسبی را از خود نشان می‌دهد، اما در خارج از این بازه دنباله غیر گاوسی نشان می‌دهد. این دنباله غیر گاوسی به زمان سیرهای ایستگاه‌های دورتر به خصوص برای زمین‌لرزه‌های قسمت جنوبی گسل کشف‌رود مربوط است که در مقایسه با قسمت میانی و شمالی توزیع پراکنده‌تری دارند؛ البته با توجه به تعداد زیاد زمین‌لرزه‌های این خوشه،

جدول ۲. نتایج مکان‌یابی مجدد چهار خوشه انتخابی در منطقه مورد مطالعه

Cluster	Number		Centroid			MAX DIST	MAX SEP	MAX NGH	MIN LNK	RMS (s)		Uncertainties (km)		
	initial	DD	Lat	Lon	Depth					initial	DD	E-W	N-S	Vertical
1	1297	1236	36.5	59.63	19.49	400	8	8	6	0.3	0.06	0.2	0.24	0.33
2	273	247	36.99	58.99	15.11	400	10	6	6	0.4	0.13	0.5	0.51	0.73
3	665	628	37.03	58.82	15.78	400	8	6	4	0.4	0.09	0.33	0.35	0.55
4	55	48	37.33	58.16	15.24	400	10	50	4	0.3	0.13	0.32	0.44	1.04



شکل ۱۳. تغییرات RMS طی تکرار الگوریتم $hypoDD$; تغییرات RMS خوشه‌های اول تا چهارم به ترتیب با مربع، دایره، مثلث و لوزی نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۴. (الف) نمودارهای چارک-چارک بر اساس توزیع نرمال برای خوشه‌های اول تا چهارم به ترتیب از بالا به پایین و (ب) هیستوگرام‌های باقیمانده زمان سیرهای امواج رسیده به ایستگاه‌ها

۵. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر از داده‌های سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۲ به منظور مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌های منطقه قوچان استفاده شد. در ابتدا از آزمون مصنوعی به منظور ارزیابی کارکرد الگوریتم اختلاف زمانی دوگانه با آرایش ایستگاه‌ها و چشمه‌های موجود استفاده شد؛ بنابراین چهار خوشه مختلف هرکدام شامل ۱۰ زمین‌لرزه به صورت شیب‌دار به ترتیب منطبق بر گسل‌های بینالود، کشف‌رود، قوچان و رباط قره‌بیل در نظر گرفته شد. ابتدا به روش مطلق مکان‌یابی اولیه از طریق برنامه *hypo71* و سپس به روش نسبی از طریق برنامه *hypoDD* مکان‌یابی مجدد صورت گرفت و نتایج حاکی از برتری چشمگیر روش نسبی در مقابل روش تک‌حادثه‌ای در کاهش خطاها و حفظ ساختار اصلی خوشه‌هاست. با استفاده از آزمون مصنوعی توانایی روش اختلاف زمانی دوگانه در مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها مشخص شد اما وجود داده‌های با کیفیت مناسب در مکان‌یابی زمین‌لرزه‌های یک منطقه کاملاً ضروری است؛ بنابراین با اعمال محدودیت‌های لازم روی داده‌های اولیه در نهایت ۲۵۱۶ زمین‌لرزه ثبت شده بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۲ در منطقه قوچان برای مکان‌یابی مجدد توسط برنامه *hypoDD* و به روش اختلاف زمانی دوگانه، انتخاب و خوشه‌بندی شدند. مکان‌یابی مجدد با استفاده از مدل سه‌بعدی توزیع عمقی زمین‌لرزه‌ها را بهبود بخشید، به طوری که تمرکز لرزه‌خیزی را به خوبی بین عمق‌های ۵ تا ۳۰ کیلومتری نشان می‌دهد. میانگین *RMS* باقیمانده زمان‌سیر از ۰/۲۷ ثانیه در مکان‌یابی اولیه به ۰/۰۹ ثانیه در مکان‌یابی مجدد با استفاده از مدل سه‌بعدی کاهش یافت. میانگین خطاهای نسبی افقی و قائم پس از مکان‌یابی مجدد به ترتیب ۶۸۶ متر و ۷۲۱ متر به دست آمد. با توجه به نتایج، ۹۰ درصد خطاهای نسبی افقی و قائم محاسبه شده مقداری کمتر از ۱/۲۵ کیلومتر دارند. همچنین ۹۰ درصد داده‌های اولیه

دارای *RMS* کمتر از ۰/۴۷ ثانیه بوده‌اند که در مکان‌یابی مجدد به ۰/۲۳ ثانیه کاهش یافته است و نشان‌دهنده بهبود خطا در مکان‌یابی مجدد است. مقاطع عرضی در نظر گرفته شده، نشان‌دهنده بهبود عمق محاسبه شده در این مطالعه توسط روش اختلاف زمانی دوگانه است. با توجه به مقطع (A-A') وجود یک فعالیت لرزه‌ای در شمال گسل سنگ‌بست-شاندیز و در غرب گسل بینالود به چشم می‌خورد که می‌تواند نشان‌دهنده یک گسل پنهان در این ناحیه باشد. همچنین خطی‌شدگی زمین‌لرزه‌ها در جنوب گسل باغان-گرما (خوشه سبز رنگ در شکل ۱۲) می‌تواند نشان‌دهنده ادامه فعالیت لرزه‌ای این گسل باشد؛ هرچند که در نقشه‌ها اثر سطحی این فعالیت مشخص نیست.

مراجع

آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران، ۵۸۶، انتشارات سازمان زمین‌شناسی ایران، تهران، ایران.
حقی‌پور، ن.، ۱۳۸۵، بررسی ریخت‌زمین‌ساختی گستره کپه داغ - بینالود بر پایه شاخص‌های گرادیان شیب‌رود و هیپسومتری، م. علوم زمین، ۶۴، ۷۴-۸۷.
زراعتکار، ع. و رحیمی، ب.، ۱۳۹۱، بررسی توسعه زون گسل سنگ‌بست-شاندیز و پیامدهای ژئومورفولوژیکی آن، م. جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۱۹، ۱۹۵-۲۱۴.
زمردیان، م. ج. و برومند، ر.، ۱۳۹۱، تجزیه و تحلیل مورفوزن و تفاوت‌های کمی و کیفی مخروط افکنه‌های رشته کوه بینالود با رویکرد هیدرومورفوتکتونیک، م. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲، ۵۳-۷۲.
مهربان، ی.، ۱۳۹۰، توموگرافی سه‌بعدی پوسته در منطقه کپه‌داغ با استفاده از زمین‌لرزه‌های محلی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

Ambraseys, N. N. and Melville, C. P., 1982, A History of Persian Earthquakes, Cambridge University Press, London2, 19 pp.

Berberian, M., 1976, Contribution to the seismotectonics of Iran (Part II), Geological Survey of Iran, Report No. 39, 141p.

- Berberian, M., 1981, Active faulting and tectonics of Iran, in H.K. Gupta, F.M.D., ed., *Zagros-Hindu Kush-Himalaya Geodynamic Evolution*, Washington D.C., American Geophysical Union, 3, 33-69.
- Castellanos, F. and Van der Baan M., 2013, Microseismic event locations using the double-difference algorithm, *CSEG Recorder*, 38(3), 26-37.
- Fréchet, J., 1985, *Sismogenese et doublets sismiques*, Ph.D. Thesis, University of Grenoble.
- Geiger, L., 1910, *Herbstimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten*, K. Gessell. Will. Goett, 4, 331-349.
- Got, J.-L., Fréchet, J. and Klein, F. W., 1994, Deep fault plane geometry inferred from multiplet relative relocation beneath the south flank of Kilauea, *J. Geophys. Res.*, 99, 15375-15386.
- Hauksson, E., Yang, W. and Shearer, P. M., 2012, *Waveform relocated earthquake catalog for Southern California (1981 to June 2011)*, California. Bull. Seismol. Soc. Amer., 102, 2239-2244.
- Hessami, K., Jamali, F., and Tabassi, H., 2003, *Major active faults of Iran edition, 2003*, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 1 sheet.
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., Gheitanchi, M. R. and Bolourchi, M. J., 2006, Strike-slip faulting rotation and along-strike elongation in the Kopeh Dagh Mountains, NE Iran, *Geophys. J. Int.*, 1161-1177.
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R. and Nazari, H., 2008, Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since 10 Ma: *Geology*, 36(10), 763-766, doi: 10.1130/166G25008A.1.
- Kim, Y. S., Peacock, D. C. P. and Sanderson, D. J., 2004, Fault damage zones, *Journal of Structural Geology*, 26, 503-517.
- Lee, W. H. K. and Lahr, J. C., 1972, HYP071: A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, Open File Report, U. S. Geological Survey, 100 pp.
- Lin, G. and Shearer, P., 2005, Tests of relative earthquake location techniques using synthetic data, *Journal of Geophysical Research*, 110 (B04304), doi: 10.1029/2004JB003380.
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D. and Tealeb, A., 2003, GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions, *Geophysical Journal International*, 155(1), 126-138.
- Mottaghi, A. A., Rezapour, M. and Yaminifard, F., 2010, Doubledifference relocation of earthquake hypocenters along the southern flank of the Central Alborz, Iran, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5A), 2,014-2,023, doi: 10.1785/0120090147.
- Nabavi, M. H., 1983, Introduction. in: *geodynamic project (geotraversc) in Iran*, Geo. Surv. Iran. Rep., 51, I-10.
- Stoecklin, J., 1968, Structural history and tectonics of Iran; a review. *AAPG Bulletin*, 52(7), 1229-1258.
- Tchalenko, J. S., 1975, Seismicity and structure of the Kopeh Dagh (Iran, USSR) *Landon, A.G.B.DA*, 278(1275), 1-28.
- Tchalenko, J. S. and Berberian, M., 1975, Dasht-e-Bayaz fault, Iran: earthquake and earlier related structures in bedrock, *Geol. Surv. Am. Bull.*, 86, 703-709.
- Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, MR., Vigny, C., Masson, F. and Bayer, R., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, *Geophysical Journal International*, 157(1), 381-398.
- Waldhauser, F., 2001, HypoDD: a program to compute double-difference hypocenter locations (hypoDD version 1.0, 03/2001), U.S. Geol. Surv. Open- File Rep., 01-113.
- Waldhauser, F., 2012, HypoDD: a program to compute double-difference hypocenter locations (hypoDD version 2.1b, 06/2012), U.S. Geol. Surv. Open-File Rep., 01-113.
- Waldhauser, F. and Ellsworth, W. L., 2000, A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 90, 1353-1368.
- Wolfe, C. J., 2002, On the mathematics of using difference operators to relocate earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 2879-2892.
- Yang, Z. X., Waldhauser, F., Chen, Y. T. and Richards, P. G., 2005, Doubledifference relocation of earthquakes in central-western China, 1992-1999, *J. Seismol.*, 9, 241-264.