بهار ۹۱، سال بیست و یکم، شماره ۸۳، صفحه ۹۷ تا ۱۰۲

تعیین نوسانات هم‌لرزهٔ پوسته زمین با بهره‌گیری از داده‌های آهنگ بالای GPS، مطالعهٔ موردی: زمین‌لرزهٔ سن سیمون ۲۲ دسامبر ۲۰۰۳ (کالیفرنیا– ایالات متحده)

سجاد طبیبی[۱]، مسعود مشهدی حسینعلی[۱] و یحیی جمور[۲]*

[۱] گروه مهندسی ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
[۲] آموزشکده نقشه‌برداری، سازمان نقشه برداری کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۳/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۷/۲۰

چکیده

شناخت پدیدهٔ زمین‌لرزه، مستلزم دستیابی هر چه دقیق‌تر به مدل‌های دینامیکی و سینماتیکی برای توضیح چگونگی گسیختگی در گسل است. تحلیل حرکات زمین به صورت دقیق و در گسترهٔ وسیعی از بسامدها و دامنه‌ها یکی از راهکارهای موجود در این زمینه به شمار می‌رود. سامانه تعیین موقعیت جهانی، امروزه به ابزار نیرومندی برای این منظور تبدیل شده است. تعداد روز افزونی از ایستگاه‌های دائمی که با هدف انجام مطالعات ژئوفیزیکی و لرزه‌شناسی نصب و راه‌اندازی شده‌اند، اکنون در بسامدهای لرزه‌ای مانند یک هرتز عمل می‌کنند. یک گیرندهٔ GPS می‌تواند به گونه‌ای دقیق حرکات زمین را در مقیاس‌های زمانی زمین‌شناسی (مثال: 1mm/yr) و لرزه‌ای (مثال: 500 mm/yr) اندازه‌گیری کند. در این پژوهش شکل‌موج‌های لرزه‌ای حاصل از ۱۳ ایستگاه GPS در فاصلهٔ کانونی ۳۶ تا ۷۴ کیلومتر از زمین‌لرزه سن‌سیمون ۲۰۰۳ واقع در ایالت کالیفرنیای جنوبی (ایالات متحده) تعیین شده است. در این مقاله قابلیت‌های روش نسبی تعیین موقعیت با بهره‌گیری از داده‌های با آهنگ بالا (۱ ثانیه) بررسی و جابه‌جایی‌های لرزه‌ای با جابه‌جایی‌های حاصل از انتگرال‌گیری رکوردهای لرزه‌نگاری مقایسه و درست آزمایی شده است.

کلیدواژه‌ها: GPS آهنگ بالا، لرزه‌شناسی، زمین‌لرزهٔ سن‌سیمون

***نویسنده مسئول:** یحیی جمور
E-mail: djamour@ncc.org.ir

۱– مقدمه

شناخت ما از چگونگی گسیختگی زمین در مدت زمین‌لرزه‌ها و دگرشکلی‌های حاصل از آن، به طور چشمگیری به محدودیت سامانه‌های اندازه‌گیری استفاده شده، بستگی دارد. در محدوده‌ای به بزرگی ابعاد گسیختگی یک گسل (طول گسلش)، الگوی دگرشکلی سطحی از میدان تغییر شکل دائمی که با جابه‌جایی‌های دائمی در سراسر گسل ایجاد شده، تشکیل می‌شود. این تغییر شکل دائمی در مدت زمانی کوتاه (چند یا چندین ثانیه) شکل گرفته و به میدان دگرشکلی زودگذری که با موج‌های لرزه‌ای ایجاد شده و ممکن است در زمین‌لرزه‌های بزرگ در سراسر جهان دیده شوند، اضافه می‌شود. جابه‌جایی‌های بزرگ در نزدیکی کانون یک زمین‌لرزه، پیش و هنگام رخداد آن، اطلاعات گران‌بهایی برای مطالعهٔ چشمهٔ زمین‌لرزه و چگونگی دگرشکلی‌های زمین در اختیار می‌گذارد.

پتانسیل لرزه‌نگاری با GPS، اولین بار توسط Hirahara et al. (1994)، Ge (1999) و Ge et al. (2000) در آزمایش‌های کنترل شده‌ای، بررسی شد. این پژوهشگران با متمرکزشدن روی طول‌های مبنای خیلی کوچک، اولین کسانی بودند که نشان دادند GPS قادر به اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های بزرگ روی فواصل زمانی کوتاه است. Ge et al. (2000) و Elosegui et al. (2006) حرکات زمینی ناشی از جابه‌جایی‌های لرزه‌ای را با نصب یک آنتن GPS روی یک میز متحرک شبیه‌سازی کرده و نشان دادند که گیرنده‌های (GPS) که از توانایی ثبت داده تا ۲۰ هرتز برخوردارند، از قابلیت کشف نوسانات، هم در بسامد و هم در دامنه برخوردارند. این آزمایش و آزمایش‌های دیگر، همبستگی خوبی را میان جابه‌جایی‌های حاصل از GPS و داده‌های لرزه‌ای انتگرال‌گیری شده که به طور همزمان با GPS ثبت شده‌اند، نشان داده است. به این ترتیب، مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده نشان می‌دهد که اگر آهنگ نمونه‌برداری یک گیرندهٔ GPS برای بازیابی اثر جا به‌جایی آنتن به قدر کافی بالا باشد، می‌توان از آن به عنوان یک لرزه‌سنج استفاده کرد.

مطالعات بعدی انجام‌شده در این زمینه، توانایی GPS آهنگ بالا را در تعیین جابه‌جایی‌های دینامیکی و استاتیکی ناشی از زمین‌لرزه‌ها، تأیید می‌کند. مطالعات انجام شده توسط Nikolaidis et al. (2001)، یکی از نخستین تحقیقات عملی در این زمینه است که در آن محاسبهٔ جابه‌جایی‌ها در فواصل مکانی تا چند صد کیلومتر از کانون زمین‌لرزه بررسی شده است. قدرت تفکیک سری‌های زمانی جابه‌جایی‌های محاسبه‌شده در این تحقیق، به آهنگ نمونه‌برداری ۳۰ ثانیه محدود شده است. در مطالعات بعدی، از داده‌های GPS آهنگ بالا برای دستیابی به جابه‌جایی‌های با دوره‌های کوتاه‌تر استفاده شده است (Bock et al., 2004; Langbein & Bock, 2004;Sohne & Schwahn, 2005).

پس از زمین‌لرزهٔ مربوط به گسل دنالی به بزرگای گشتاوری (Moment Magnitude) ۷/۹ در سال ۲۰۰۲، Larson et al. (2003) جابه‌جایی‌های GPS آهنگ بالای ناشی از امواج سطحی در ایستگاه‌هایی به فاصلهٔ چندین هزار کیلومتری از کانون این زمین‌لرزه را محاسبه کردند. پس از آن به کمک داده‌های شبکهٔ GPS متراکم موجود در کالیفرنیا زمین‌لرزه‌های سن‌سیمون در سال ۲۰۰۳، پارک فیلد در سال ۲۰۰۴ و سوماترا–آندامان در سال ۲۰۰۴ بررسی شد، جابه‌جایی‌های مربوط به آنها محاسبه شد(Ji et al., 2004; Kouba, 2005).

در بخش اول این مقاله، لرزه‌شناسی با GPS با دیگر روش‌های متداول مقایسه و مزایا و معایب هر یک از آنها مقایسه شده است. در ادامه، کارایی این روش در مطالعهٔ زمین‌لرزه‌های بزرگ مقیاس با استفاده از داده‌های بخشی از شبکهٔ دائم GPS کالیفرنیای جنوبی ارزیابی شده است. برای این منظور از تعیین موقعیت سینماتیک با استفاده از ماژول TRACK (Chen, 1998; Herring, 2010) در نرم‌افزار GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2009) و محصولات مداری دقیق شبکهٔ IGNSS (IGS, 2004) استفاده شده و سری‌های زمانی جابه‌جایی نسبی GPS آهنگ بالا تولید شده است، که در آنها موج‌های لاو به روشنی قابل مشاهده هستند. جابه‌جایی‌های لرزه‌ای حاصل از GPS با جابه‌جایی‌های حاصل از انتگرال‌گیری رکوردهای لرزه‌نگاری مقایسه و درست‌آزمایی شده است. افزون‌بر این، جابه‌جایی‌های لرزه‌ای نسبی و جابه‌جایی‌های لرزه‌ای مطلق به‌دست آمده توسط Ji et al. (2004) مقایسه شده‌اند.

Archive of SID
www.SID.ir

۲- لرزه‌شناسی با GPS

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری حرکات ناشی از یک زمین‌لرزه وجود دارد. هریک از این روش‌ها، توانایی‌ها و محدودیت‌های مخصوص خود را دارند. تعیین جابه‌جایی پوسته از داده‌های لرزه‌نگاری مستلزم انتگرال‌گیری اندازه‌گیری‌ها است. طبیعتاً این فرایند به افزایش سطح نوفه نتایج منتهی می‌شود (Larson, 2009). شتاب‌سنج‌ها جزئیات لرزش قوی زمین را در نزدیکی منبع زمین‌لرزه ثبت می‌کنند، اما تبدیل بدون ابهام اندازه‌گیری‌های شتاب به جابه‌جایی، دشوار است. لرزه‌سنج‌های پهن‌باند حساس‌تر هستند و دقتی بهتر از شتاب‌سنج‌ها دارند اما ممکن است حتی در فواصل زیادی از یک زلزلهٔ عظیم، دچار برش (Clipping) و یا اشباع (Saturation) شوند (Yusaku et al., 2006). مشاهدات تداخل‌سنجی راداری (Interfrometry Synthetic Aperture Radar (InSAR)) می‌توانند تصاویر خوب مکانی از بعضی از مؤلفه‌های جابه‌جایی سطحی اطراف یک گسیختگی تهیه کنند، اما InSAR در بعضی مناطق نقص‌پذیر بوده و دقت زمانی مناسبی برای تحلیل تغییرات دینامیکی کوتاه‌مدت در طول یک زمین‌لرزه ندارد (Larson et al., 2007).

تا پیش از ساخت گیرنده‌های با قابلیت ثبت اندازه‌گیری‌ها با آهنگ بالا، از GPS (Global Positioning System) برای بررسی دگرشکلی‌های درازمدت زمین مانند برهم کنش ورقه‌های زمین‌ساختی یا تغییرشکل ناشی از بازگشت پس از دوران یخبندان (Post Glacial Rebound) استفاده می‌شده است (Segall and Davis, 1997). برای این منظور از طریق اندازه‌گیری‌های موردی با فاصلهٔ زمانی یک تا چند سال بین هر دو دور متوالی، جابه‌جایی‌هایی به بزرگی سانتی‌متر تا متر اندازه‌گیری و تحلیل می‌شده است. آهنگ اندازه‌گیری در این موارد، معمولاً ۳۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در برخی موارد کاهش آهنگ اندازه‌گیری به فواصل زمانی ۵ دقیقه‌ای نیز می‌تواند به نتایج مشابهی منجرشود (Bock et al., 2004).

به دلیل ثبت اطلاعات در آهنگ‌های بالاتر از آهنگ ۳۰ ثانیه، اندازه‌گیری‌های موردی و روش‌های پردازش مربوطه برای بررسی حرکت‌هایی با دوره کوتاه مانند زمین‌لرزه‌ها مناسب نیست. در حالی که با دور شدن از کانون یک زمین‌لرزه، امواج لرزه‌ای و در نتیجه دگرشکلی‌های ناشی از آن، دوره‌هایی به بزرگی چند ثانیه تا کمتر از یک ثانیه دارند. بنابراین دستگاهی که این پدیده‌ها را اندازه‌گیری می‌کند باید بتواند جابه‌جایی‌ها را در آهنگی به بزرگی از چند ثانیه تا کمتر از ثانیه نمونه‌برداری و ثبت کند.

پیشرفت‌های اخیر در فناوری گیرنده‌های GPS و افزایش قابلیت ذخیره‌سازی و انتقال داده در حجم بالا، مشوقی برای بازبینی در کاربردهای GPS و استفاده از آن به عنوان یک لرزه‌سنج برای ثبت و ارزیابی زمین‌لرزه‌های بزرگ مقیاس شده است. فناوری امروز گیرنده‌ها، نمونه‌برداری و ثبت دائمی داده‌های GPS را در آهنگ‌های بالا ممکن ساخته است ، به گونه‌ای که گیرنده‌های GPS با آهنگ‌های نمونه‌برداری تا ۲۰ هرتز اکنون وجود دارد. چنین گیرنده‌هایی توان باز تولید سیگنال‌هایی با بسامد تا ۱۰ هرتز را دارند که توان رقابت با بعضی از شبکه‌های لرزه‌نگاری پهن‌باند با دامنهٔ دینامیکی وسیع مانند TERRAscope در آمریکا را دارند (Kanamori et al., 1991). شکل ۱ جایگاه موضوع این تحقیق را در حوزهٔ مطالعهٔ دگرشکلی‌های لرزه‌زمین‌ساختی پوسته زمین نشان می‌دهد.

یک لرزه‌سنج با به‌کارگیری یک پاندول، موج‌های لرزه‌ای را ثبت می‌کند، زیرا یک پاندول ایده‌آل، معمولاً صرف نظر از جنبش‌های لرزه‌سنج، در موقعیت اصلی‌اش ثابت می‌ماند. از آنجا که ماهواره‌های GPS تحت تأثیر زمین‌لرزه‌ها قرار نمی‌گیرند، آرایش ماهواره‌های GPS را می‌توان یک پاندول نرمال در نظر گرفت (Ge, 1999).

در استفاده از GPS برای لرزه‌نگاری و مطالعات زلزله، توجه به تفاوت‌های میان لرزه‌سنج‌ها و گیرنده‌های GPS نکته‌ای مهم و قابل توجه است. معمولاً مجموعه‌ای از لرزه‌سنج‌های اینرشیال شامل لرزه‌سنج‌های پهن‌باند و شتاب‌سنج‌های جنبش نیرومند (Strong motion)، برای مشاهدهٔ زمین‌لرزه‌ها استفاده می‌شوند. لرزه‌سنج اینرشیال هنگامی که تحت‌تأثیر حرکات زمین قرار می‌گیرد، سیگنال قابل اندازه‌گیری تولید می‌کند. این سیگنال یک سری از اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای شتاب یا سرعت است که مستقیماً توسط دستگاه احساس می‌شود (White, 1980). در مقابل، گیرنده‌های GPS اندازه‌گیری‌های فاصله تا ماهواره را ثبت کرده و موقعیت آنتن GPS در هر لحظه با توجه به این فاصله‌ها ارزیابی می‌شود. شتاب‌سنج‌ها و لرزه‌سنج‌ها، جنبش‌های سریع زمین را که در مقیاسی از ثانیه اتفاق می‌افتند، ثبت می‌کنند. این جابه‌جایی‌ها، جابه‌جایی‌های دینامیکی نام دارند. در مقابل، گیرنده‌های GPS افزون بر جابه‌جایی‌های دینامیکی، جابه‌جایی‌های آهستهٔ زمین را که طی روزها و گاه سال‌ها گسترش می‌یابند، نیز ثبت می‌کنند. این جابه‌جایی‌ها، جابه‌جایی‌های استاتیکی نامیده می‌شوند. برای مثال بالاآمدگی آهستهٔ یک مجموعهٔ آتشفشانی که در اثر نفوذ ماگما به وجود می‌آید یا حرکت ورقه‌های زمین‌ساختی که به مرور زمان روی می‌دهد را می‌توان با استفاده از شبکه‌های متراکم GPS اندازه‌گیری کرد.

موقعیت‌ها یا جابه‌جایی‌های GPS در یک چارچوب مرجع زمینی بین‌المللی (International Terrestrial Reference Frame) محاسبه می‌شوند، در صورتی که لرزه‌نگارها، اندازه‌گیری‌های مستقیم را در یک چارچوب مرجع اینرشیال (Inertial Reference Frame) در اختیار می‌گذارند. لرزه‌سنج‌ها نسبت به دریافت امواج لرزه‌ای بسیار حساسند و در فواصل بسیار دور (مثال: چندین هزار کیلومتر) از کانون زمین‌لرزه‌ها امواج آنها را دریافت می‌کنند (Bock et al., 2004; Bilich et al., 2008). این در حالی است که سطح نوفه اندازه‌گیری‌های GPS آهنگ بالا، حساسیت GPS را به رویدادهای بزرگ مقیاس یا نزدیک به کانون محدود می‌کند و بسته به بزرگا و ژرفا و سازوکار زمین‌لرزه با دورشدن از آن (بیشینه تا چند صد کیلومتر) امکان تشخیص جابه‌جایی‌های لرزه‌ای را ندارد (Bock et al., 2004; Bilich et al., 2008). با وجود این اختلافات، لرزه‌نگاری با GPS مزایایی دارد که این روش را به عنوان مکملی برای اندازه‌گیری‌های لرزه‌ای مرسوم با دستگاه‌های لرزه‌نگار معرفی می‌کند. برای مثال، در صورتی که تعیین جابه‌جایی‌های هم‌لرزه مورد نظر باشد، ارزیابی آن به کمک GPS مستقیماً امکان پذیر است، در حالی که برای رسیدن به جابه‌جایی از داده‌های لرزه‌ای (نتایج ثبت‌شده در شتاب‌سنج‌ها و لرزه‌نگارها)، باید از این داده‌ها انتگرال‌گیری کرد (یک بار برای اطلاعات ثبت‌شده سرعت و دوبار برای اطلاعات ثبت‌شدهٔ شتاب). در فرایند انتگرال‌گیری معمولاً خطاهای اندازه‌گیری به صورت تجمعی عمل می‌کنند. بنابراین، این فرایند می‌تواند با تقویت نوفه، نتایج نهایی را از سیگنال واقعی منحرف کند. به این ترتیب برای به دست آوردن جابه‌جایی‌ها، پس از انتگرال‌گیری از شتاب‌ها و یا سرعت‌ها دریفت‌های بزرگی در نتایج ظاهر می‌شود (شکل ۲).

افزون بر مواردی که در بالا به آنها اشاره شد، در اندازه‌گیری زمین‌لرزه‌های بزرگ دستگاه‌های لرزه‌نگار با مشکل اشباع‌شدگی و یا رخداد برش در داده‌های اندازه‌گیری مواجه هستند. در چنین مواردی ثبت دامنهٔ کامل سرعت یا شتاب ممکن نیست (Bilich et al., 2008). اگر حرکت زمینی به قدر کافی بزرگ باشد، جرم معلق، به بالا یا پایین بدنه دستگاه لرزه‌نگار ضربه خواهد زد یا این که تجهیزات ثبت‌کننده، اشباع خواهند شد زیرا ولتاژ مربوطه، آن قدر بزرگ است که نمی‌توان آن را با مبدل آنالوگ به دیجیتال ثبت کرد. در این حالت، بالای سیگنال ثبت شده (یا پایین سیگنال یا هم بالا و هم پایین آن) برش می‌یابد. هنگامی که سیگنال برش می‌یابد، بیشینه دامنه‌های ارتعاش زمین به درستی و با دقت ثبت نخواهند شد. به همین دلیل، سیگنال در فاصلهٔ زمانی که برش ایجاد می‌شود به طور نامنظم تغییر می‌کند. مشکل اشباع و برش، معمولاً برای حرکت زمینی خیلی بزرگ و یا خیلی کوچک، در داده‌های ثبت شدهٔ واقعی زمین‌لرزه‌ها توسط لرزه‌نگارها رخ می‌دهد و بدین طریق دستگاه، بزرگی

Archive of SID

www.SID.ir

کامل شتاب و یا سرعت را ثبت نمی‌کند (Larson, 2009). مشاهدات GPS اشباع نمی‌شوند، زیرا بر خلاف لرزه‌سنج‌ها، در رخدادهای بزرگ یا کوچک مقیاس هیچ عکس‌العمل دستگاهی، قابلیت مشاهداتی گیرنده را محدود نمی‌سازد. بنابراین GPS بسامد بالا محدودهٔ دینامیکی و پهنای باند بسامدی مشاهدات جنبش زمینی را افزایش داده، بدین طریق ابزار دیگری برای مطالعهٔ فرایند زمین‌لرزه فراهم می‌کند. در آخر، شبکه‌های لرزه‌نگاری و GPS همیشه همخوانی ندارند، ممکن است داده‌های GPS در منطقهٔ مورد نظر موجود باشند، اما داده‌های لرزه‌سنج‌ها موجود نباشند و یا برعکس. هنگامی که زمین‌لرزه‌ای باعث می‌شود لرزه‌سنج برش یابد، یا هنگامی که لرزه‌سنج در یک منطقه نیست، می‌توان از مشاهدات GPS آهنگ بالا به عنوان یک منبع دادهٔ مکمل استفاده کرد.

۳- شکل‌موج‌های لرزه‌ای زمین‌لرزهٔ سن‌سیمون

زمین‌لرزهٔ سن‌سیمون که از نوع زمین‌لرزه‌های راندگی حاصل از جنبش گسلی پنهان (Blind thrust) است، در ۲۲ دسامبر ۲۰۰۳ به بزرگای گشتاوری ۶/۵ در ساعت۱۹:۱۶:۰۶ جهانی و در ۵۰ کیلومتری باختر گسل سن آندریاس رخ داده است (Hardebeck et al., 2004). در این تحقیق، سری‌های زمانی جابه‌جایی نسبی آهنگ بالای GPS را که اختلاف میان جابه‌جایی‌های مطلق ایستگاه‌های استاتیک و سینماتیک است، در ۱۳ ایستگاه GPS شبکهٔ GPS جامع کالیفرنیای جنوبی (Southern California Integrated GPS Network) که بیشترین فاصلهٔ آنها تا کانون زمین‌لرزه ۷۴ کیلومتر است، بررسی می‌شود (شکل ۳). تجزیهٔ طیفی داده‌های این شبکه توسط Bock et al. (2004) نشان داده است که موقعیت‌های لحظه‌ای ۱ هرتزی مانند نتایج حاصل از پردازش استاتیک داده‌های ۲۴ ساعته، دارای ویژگی نوفه صورتی (Flicker Noise) است و بنابراین، می‌توان انتظار کشف جابه‌جایی‌های افقی در حدود ۶ میلی‌متر و جابه‌جایی‌های قائم در حدود ۴۰ میلی متر را در سطح اطمینان ۹۹ درصد داشت. این سری‌های زمانی با استفاده از TRACK تولید می‌شوند. TRACK مشاهدات تفاضلی دو گانه را برای ارزیابی موقعیت ایستگاه‌های سینماتیک استفاده می‌کند. ابهام فاز با استفاده از روش lewitt (1989) حل می‌شود. با توجه به کوتاه بودن طول رکورد اندازه‌گیری‌ها، کیفیت نتایج به چگونگی حل ابهام‌های فاز بستگی خواهد داشت.

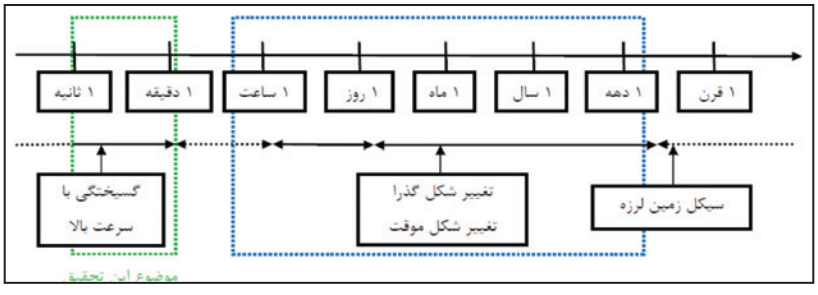
برای تعیین شکل‌موج‌های لرزه‌ای زمین‌لرزهٔ سن‌سیمون، سه ساعت از داده‌های GPS با آهنگ نمونه‌برداری یک هرتز در روز ۲۲ دسامبر (۱۷:۴۶:۰۶ تا ۲۰:۴۶:۰۶ در سامانه زمانی GPS) پردازش شده است. ایستگاه TRAK که در حدود ۳۸۷ کیلومتری از کانون زمین‌لرزه قرار دارد به عنوان ایستگاه استاتیک در نظر گرفته شده و موقعیت دیگر ایستگاه‌ها به عنوان ایستگاه سینماتیک نسبت به این ایستگاه محاسبه شده است (شکل ۳). اگر D ژرفای قفل‌شدگی گسل باشد، ۹۰ درصد جابه‌جایی‌های لرزه‌ای پس از آزاد شدن انرژی گسل در محدوده‌ای به بزرگی $x = + 6.3D$ تا $x = - 6.3D$ اتفاق می‌افتند (Savage and Burford, 1973)، با توجه به این که ژرفای قفل‌شدگی این گسل ۱۵ کیلومتر است، می‌توان انتظار داشت که ایستگاه TRAK تحت تأثیر جابه‌جایی‌های لرزه‌ای نباشد.

نتایج حاصل از ده دقیقه پردازش داده‌های GPS حول زمان رخداد این زمین‌لرزه، در شکل ۴ و جابه‌جایی‌های هم‌لرزه حاصل از این نتایج، در شکل ۵ ارائه شده است. موج‌های لاو بویژه در مؤلفه‌های مسطحاتی در نتایج کاملاً آشکار است.

برای ارزیابی کیفیت نتایج، از داده‌های ایستگاه جنبش نیرومند PKD شبکه لرزه‌نگاری برکلی که در فاصله‌ای کمتر از طول موج لرزه‌ای این زمین‌لرزه از ایستگاه PKDB (شکل ۳) قرار دارد، استفاده شده است. پس از دو بار انتگرال‌گیری از داده‌های شتاب ایستگاه یادشده و تبدیل شتاب به جابه‌جایی، امکان مقایسهٔ نتایج شبکهٔ لرزه‌نگاری و داده‌های شبکه GPS به وجود آمد. این مقایسه همخوانی خوبی میان داده‌های لرزه‌ای و GPS آهنگ بالا به‌ویژه در مؤلفه‌های خاوری- باختری و شمالی- جنوبی نشان می‌دهد (شکل ۷). اختلاف مؤلفه‌های ارتفاعی به دلیل دقت ارتفاعی پایین‌تر سامانه تعیین موقعیت جهانی است.

۴- نتیجه‌گیری

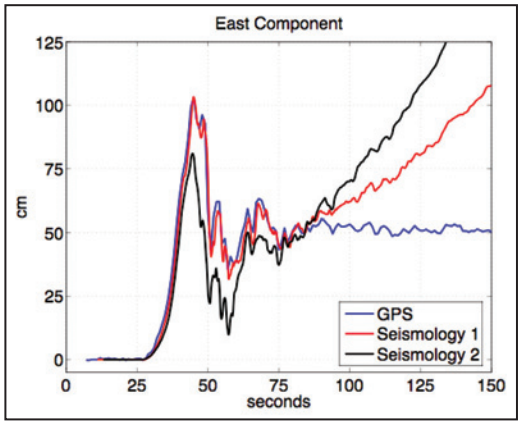
مشکلات موجود در تعیین جابه‌جایی‌های هم‌لرزه از داده‌های لرزه‌نگاری مانند افزایش تجمعی خطاهای اندازه‌گیری از انتگرال‌گیری از این داده‌ها و یا ایجاد برش و یا اشباع شدن این اندازه‌گیری‌ها در صورت رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ از یک طرف و قابلیت گیرنده‌های GPS آهنگ بالا در تعیین جابجایی‌های هم‌لرزهٔ ناشی از چنین زمین‌لرزه‌هایی، شبکه‌های دائم متشکل از این نوع گیرنده‌ها را به ابزار مکملی مناسب در مطالعات لرزه‌نگاری تبدیل کرده است. بررسی‌های انجام‌شده، نشان داده است که بالا بودن سطح نوفه مشاهدات آهنگ بالا (چندین میلی‌متر)، تعیین جابه‌جایی‌های هم‌لرزه با بزرگی کمتر از سانتی‌متر به کمک داده‌های شبکه‌هایی از این نوع را که به روش مطلق پردازش شده است، ناممکن می‌سازد. در این مقاله افزون‌بر بررسی دوباره قابلیت این مشاهدات در تعیین جابه‌جایی‌های هم‌لرزه، برای نخستین بار از روش تعیین موقعیت نسبی برای پردازش این داده‌ها و رسیدن به جابه‌جایی‌های یادشده استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با استفاده از تعیین موقعیت نسبی می‌توان به طور دقیق حرکات زمینی را در مقیاس‌های زمانی لرزه‌ای اندازه‌گیری کرد. بزرگی جابه‌جایی‌های هم‌لرزهٔ قابل تشخیص به این روش به کمتر از ۱۰ میلی‌متر در مؤلفه‌های مسطحاتی و کمتر از ۱۸ میلی‌متر در مؤلفه‌های ارتفاعی کاهش می‌یابد. این دستاورد نتیجهٔ منطقی کاهش اثر منابع بایاس در ترکیب‌های تفاضلی مورد استفاده در تعیین موقعیت نسبی است. با این وجود، بر اساس نتایج این تحقیق تعیین جابه‌جایی‌های کوچک‌تر مستلزم حذف بایاس‌های باقی‌مانده با اتخاذ روش‌های مناسب دیگری مانند فیلترینگ نجومی (Bock et al., 2004) است.



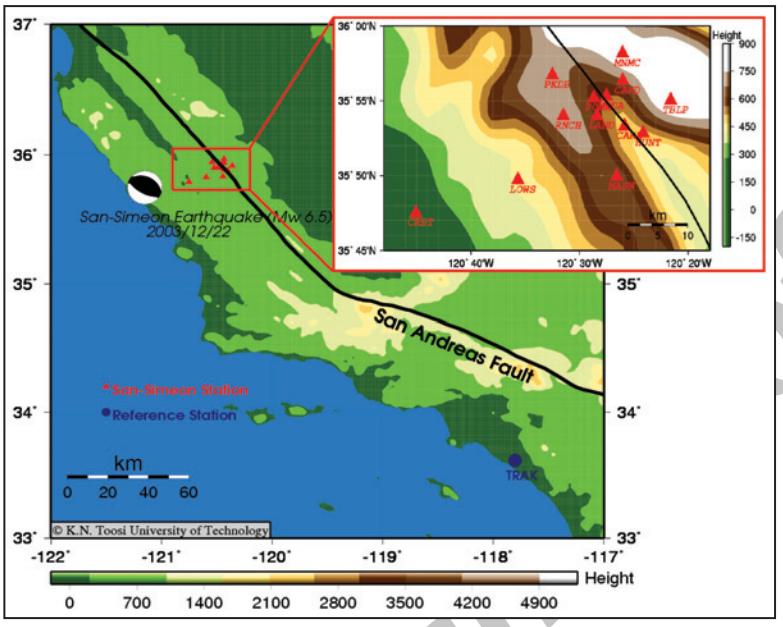
شکل ۱- کاربردهای مختلف GPS در مطالعه دگرشکلی زمین (Blewitt, 2007).

Archive of SID

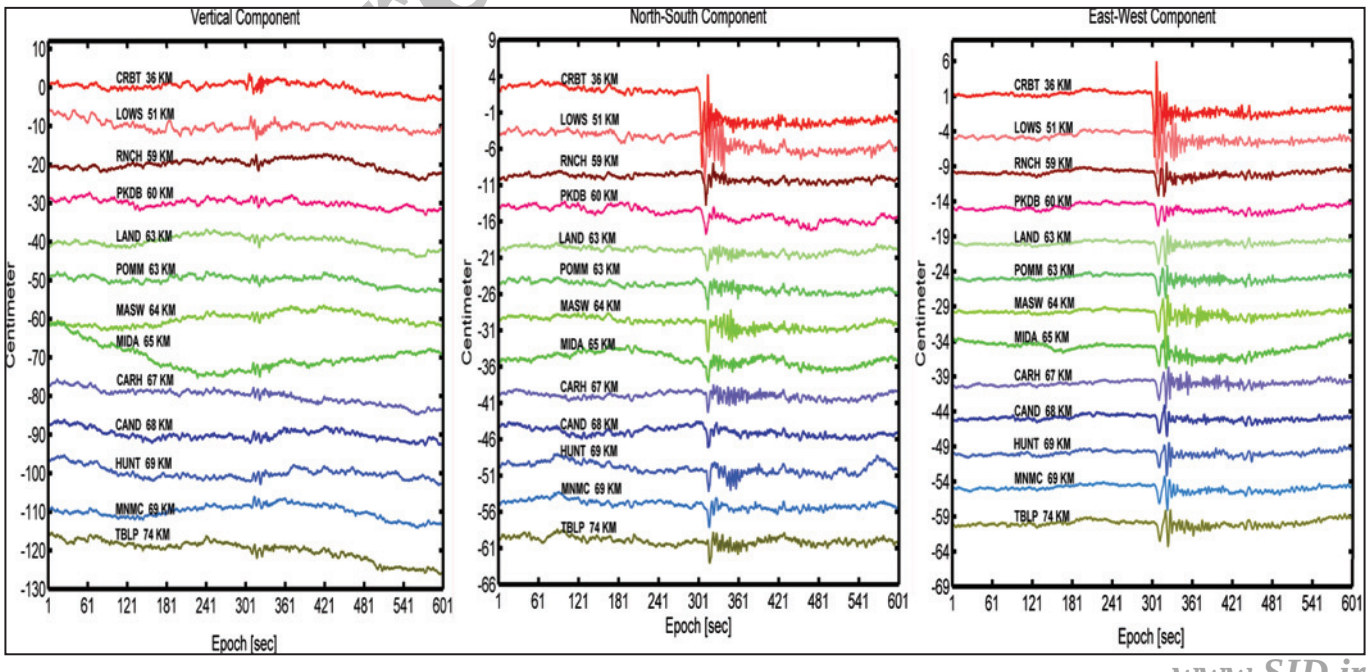
www.SID.ir



شکل ۲- مقایسه جابه‌جایی‌های لرزه‌ای به‌دست آمده از ایستگاه‌های شبکهٔ شتاب‌سنج Knet و KiKnet و جا به‌جایی‌های به دست آمده از شبکهٔ تعیین موقعیت جهانی GEONET در ژاپن برای زمین‌لرزه توکاچی- اکی (Larson, 2009).

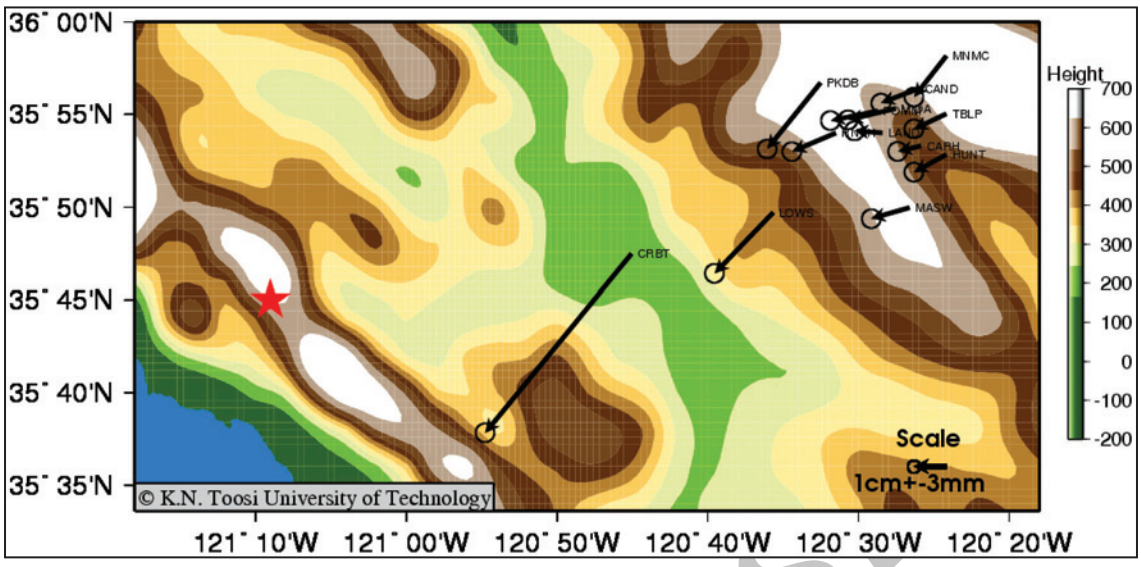


شکل ۳- موقعیت زمین‌لرزهٔ سن‌سیمون و ایستگاه‌های GPS یک هرتزی در کالیفرنیای جنوبی. TRAK ایستگاه استاتیک در نظر گرفته شده است

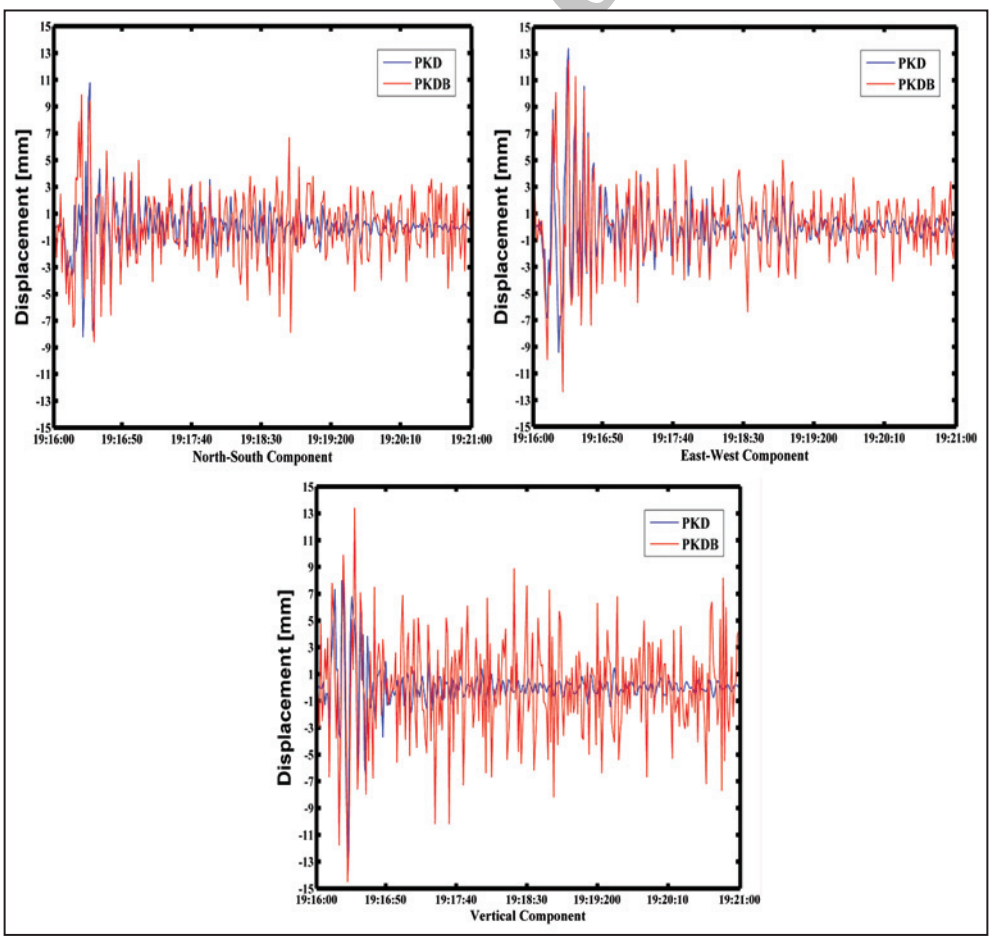


شکل ۴- سری‌های زمانی جابه‌جایی نسبی GPS آهنگ بالا از ساعت ۱۹:۱۱:۰۵ جهانی. این سری‌های زمانی بر اساس فاصلهٔ ایستگاه GPS تا کانون زمین‌لرزه مرتب شده‌اند.

www.SID.ir



شکل ۵- جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای حاصل از سری‌های زمانی آهنگ بالای GPS.



شکل ۶- مقایسه داده‌های لرزه‌نگاری و GPS آهنگ بالا برای ایستگاه PKD و PKDB

www.SID.ir

References

Bilich, A., Cassidy, J. and Larson, K. M., 2008- "GPS Seismology Application to the 2002 Mw=7.9 Denali Fault Earthquake." GPS Seismology Application to the 2002 Mw=7.9 Denali Fault Earthquake 98(2): 593-606.

Blewitt, G., 1989- "Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System ap-plied to geodetic baselines up to 2000 km." J. Geophys. Res 98(8): 10187-10203.

Blewitt, G., 2007- "GPS and Space-Based Geodetic Methods." Treatise on Geophysics 3: 351-390.

Bock, Y., Prawirodirdjo, L. and Melbourne, T. I., 2004- "Detection of arbitrarily dynamic ground motions with dense high-rate GPS network." J. Geophys. Res. Lett. 31.

Chen, G., 1998- GPS kinematic positioning for the airborne laser altimetry at Long Valley, California. Department of Earth Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology.

Elosegui, P., Davis, J. L., Oberlander, D., Baena, R. and Ekstrom, G. 2006- "Accuracy of high-rate GPS for seismology." J. Geophys. Res. Lett. 33.

Ge, L., 1999- GPS seismometer and its signal extraction. 12th Int. Tech. Meeting, Nashville, Tennessee.

Ge, L., Han, S., Rizos, C., Ishikawa, Y., Hoshiba, M., Yoshida, Y., Izawa, M., Hashimoto, N. and Himori, S., 2000- "GPS seismometers with up to 20-Hz sampling rate." Earth Planets Space.

Hardebeck, J., Boatwright, J., Dreger, D., Goel, R., Graizer, V., Hudnut, K., Ji, C. Jones, L. Langbein, J. Lin, J. Roeloffs, E. Simpson, R. Stark, K. Stein, R. and Tinsley, J. C., 2004- Preliminary report on the 22 December 2003, M6.5 San Simeon, California earthquake, Seism. Res. Lett., 75, 155-172.

Herring, T. A., 2010- TRACK GPS kinematic positioning program, version 1.21, Department of Earth Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology.

Herring, T. A., King, R. W., McClusky, S. C., 2009- GAMIT Reference Manual, Department of Earth Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology.

Hirahara, K., Nakano, T., Hoso, Y., Matsuo, S. and Obana, K., 1994- An experiment for GPS strain seismometer, Japanese Symposium on GPS, Tokyo, Japan, 15–16 December, 67–75, 1994.

IGS., 2004- 2001-2002 Annual Report. Pasadena, Jet Propulsion Laborarory.

Ji, C., Larson, K. M., Tan, Y., Hudnut, K. W. and Choi, K., 2004- "Slip history of the 2003 San Simeon earthquake constrained by combining 1-Hz GPS, strong motion, and teleseismic data." J. Geophys. Res. Lett. 31.

Kanamori, H., Hauksson, E. and Heaton, T., 1991- "TERRAscope and CUBE Project at Caltech. EOS." Trans. Am. Geophys. Un. 72.

Kouba, J., 2005- "A Possible Detection of the 26 December 2004 Great Sumatra-Andaman Islands Earthquake with Solution Products of the International GNSS Service." Studia Geophysica et Geodaetica 49(4): 463-483.

Langbein, J. and Bock. Y., 2004- "High-rate real-time GPS network at Parkfield: Utility for detecting fault slip and seismic displacements." J. Geophys. Res. Lett. 31.

Larson, K. M., 2009- "GPS Seismology." Journal of Geodesy 83: 227-233.

Larson, K. M., Bilich, A. and Axelrad, P., 2007- "Improving the precision of high-rate GPS." J. Geophys. Res. Lett. 112.

Larson, K. M., Bodin, P. and Gomberg, J., 2003- "Using 1-hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake." Science: 1421-1424.

Nikolaidis, R., and Bock, Y., de Jonge, P. J., Shearer, P., Agnew, D. C. and Van Domselaar, M., 2001- "Seismic wave observations with the Global Positioning System." J. Geophys. Res. Lett. 106(21): 897,916.

Segall, P. and Davis, J. L., 1997- "GPS Applications for Geodynamics and Earthquake Studies." Ann. Rev. Earth Planet 25: 301-336.

Sohne, W. and Schwahn, W., 2005- Ground motion at a great distance following the Sumatra-Andaman Mw 9.3 earthquake (Dec 26, 2004) using 1 Hz GPS data in a dense network. Advances in GPS data processing and modeling, London.

White, J. E., 1980- " Quantitative Seismology, Theory and Methods Volume I and Volume II by Keiiti Aki and Paul G. Richards." The Journal of the Acoustical Society of America 68(5): 1546.

Yusaku, O., Irwan, M., Takeshi, S., Fumiaki, K. and Kazuro, H., 2006- "Large surface wave of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake captured by the very long baseline kinematic analysis of 1-Hz GPS data." Earth Planets Space 58: 153-157.

Archive of SID

www.SID.ir

Quantifying the Ground Co-Seismic Variations by using High Rate GPS Data, Case Study: San-Simeon Earthquake 2003 Dec. 22 (California- United States of America)

S. Tabibi[1], M. M. Hossainali[1] & Y. Djamour[2]*

[1] Department of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
[2] Geomatics College, National Cartographic Center, Tehran, Iran

Received: 2010 June 12 Accepted: 2010 October 12

Abstract

Better understanding of earthquakes primarily requires more accurate dynamic and kinematic models for fault rupture. There are several methods for ground motion detection; each of them has its own advantages and limitations. The processes, needed for the estimation of displacements by the seismic data, generally increase the noise. Accelerometers, for example, record the details of strong ground motion close to the earthquake source; however it is difficult to transform the measured accelerations into displacement. Broadband seismometers are more sensitive and more accurate than accelerometers but even those may be saturated or clipped in far distances from a large earthquake. InSAR observations can provide good spatial images of some of the surface displacement components in the rupture area. It has, however, drawbacks in some regions, as the InSAR has no sufficient temporal resolution for the analysis of dynamic short period changes during an earthquake. Most of the GPS monitoring systems process the daily or hourly data in order to achieve the station coordinate with millimeter accuracy. But in warning systems, the temporal delay between the natural event and the act of warning must be the least as much as possible. Increasingly more continuous GPS receivers, established primarily for geophysical studies, are now running in seismic frequencies such as 1-Hz. GPS seismology is the unexpected result of the geodetic networks which at first were established to measure the deformation of plates and tectonic plate boundaries. A GPS receiver can accurately measure the movements in the geological time scales (i.e. 1 mm/yr) and that of seismology (i.e. 500 mm/sec). In this paper, the shape of the seismic waves, obtained from thirteen GPS stations, being in 36 to 74 kms of epicentral distances of San-Simeon Earthquake, 2003 are determined. The efficiency of the relative methods of positioning using high rate data has been analyzed; estimated co-seismic displacements have been validated using similar results obtained from the integration of seismic records.

Keywords: High-Rate GPS, Seismology, San-Simeon earthquake

For Persian Version see pages 97 to 102

*Corresponding author: Y. Djamour; E-mail: djamour@ncc.org.ir

Archive of SID

A Fuzzy Model to Predict the Uniaxial Compressive Strength and the Modulus of Elasticity of Shemshak Formation Shales

M. Kianpour[1*], M. Sayari [2], A. Oromiea[1]

[1] Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, Theran, Iran.
[2]Faculty of Science, University of Esfahan, Esfahan, Iran.

Received: 2009 April 18 Accepted: 2010 October 12

Abstract

The uniaxial compressive strength and modulus of deformability of intact rocks are highly important parameters for rock engineering and engineering geology projects. Because of the difficulty of measuring these parameters and the need for laboratory equipments for their prediction, indirect methods are often used. In this study, some predictive models using regression analysis and fuzzy inference system have been developed for the Shales cropping out in the Shemshak formation in Siahbishe area. For this purpose, a series of easy measurable parameters such as density, porosity and point load index were applied. Both multiple regression analyses and the fuzzy inference system

www.SID.ir