

# افزایش آستانه جابه‌جایی‌های هم‌لرزه قابل تشخیص در پردازش داده‌های GPS آهنگ بالا

سجاد طیبی<sup>۱</sup>، یحیی جمور<sup>۲</sup> و مسعود مشهدی حسینی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، آموزشکده نقشه‌برداری، سازمان نقشه‌برداری، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۶/۱۳

## چکیده

افزایش دقت در تعیین موقعیت با سامانه GPS در صورتی که مشاهداتی کوتاه‌تر از ۲۴ ساعت داشته باشیم، به شدت به مدل کردن بهتر خطاهایی که در تجزیه داده‌های GPS معمولاً با میانگین‌گیری کاهش می‌یابند، بستگی دارد. افزایش دقت جابه‌جایی‌های حاصل از پردازش داده‌های آهنگ بالا در کاربردهای ژئوفیزیکی مربوطه مانند لرزه‌نگاری، مستلزم کاهش خطاهای سیستماتیک در طیف بسامدهای لرزه‌ای است. روش‌های استانداردسازی و تصحیح این خطا مبتنی بر تکرارپذیری آرایش فضایی این سامانه هستند. خطاهایی که دقت نتایج را در روش‌های تعیین موقعیت آهنگ بالا روی مقیاس‌های زمانی ۶۰۰-۱۰ ثانیه با سامانه GPS تحت تأثیر قرار می‌دهند تا حد زیادی به هندسه بخش فضایی و ایستگاه اندازه‌گیری بستگی دارند. از آنجا که مدارهای ماهواره‌های GPS ثابت هستند، خطاهای وابسته به این هندسه در هر روز تکرارپذیری بالایی دارند. این ویژگی منبای توسعه روش فیلترینگ نجومی برای کاهش سطح نوفه مختصات حاصل از GPS است. در حالی که فرض بر این است که تکرارپذیری آرایش فضایی ماهواره‌های این سامانه بر اساس دوره تناوب تکرار نجومی اتفاق می‌افتد، زمان واقعی این تکرارپذیری حتی برای هر ماهواره متفاوت است. در این نوشتار، دوره تناوب تکرار مسیر زمینی میانگین، ۲۳ ساعت و ۵۵ دقیقه و ۵۵ ثانیه برآورد و برای کاهش سطح نوفه سری‌های زمانی جابه‌جایی نسبی استفاده شده است. با استفاده از این دوره تناوب، نوفه‌های با بسامد کمتر از ۰/۱ هرترز در موقعیت‌های آهنگ بالای GPS به گونه قابل توجهی کاهش می‌یابند. افزون بر این، با جایگزینی روش مطلق تعیین موقعیت با روش نسبی در این نوشتار، بزرگی جابه‌جایی‌های هم‌لرزه قابل تشخیص به کمتر از ۴ میلی‌متر در مؤلفه‌های مسطحاتی و کمتر از ۱۰ میلی‌متر در مؤلفه ارتفاعی کاهش یافته است.

**کلیدواژه‌ها:** GPS آهنگ بالا، جابه‌جایی نسبی، دوره تناوب (پریود) تکرار مداری، فیلترینگ نجومی

\*نویسنده مسئول: یحیی جمور

E-mail: djamour@ncc.org.ir

## ۱- مقدمه

دیگر منابع خطای موجود در تعیین موقعیت با GPS مانند خطاهای اندازه‌گیری ناشی از شکست امواج الکترومغناطیس در لایه‌های مختلف جو زمین (یونسفر و تروپوسفر) از منابع خطایی به شمار می‌روند که تعامل با آنها در تعیین موقعیت به روش‌های مختلف (مطلق و نسبی) با مشاهدات کوتاه مدت و بلند مدت از روش یکسانی برخوردار است؛ با این وجود، به دلیل نوفه بالای مشاهدات آهنگ بالا از یک طرف و کامل نبودن مدل‌های ریاضی موجود برای حذف یا کاهش این گروه از منابع خطا از طرف دیگر، انتظار می‌رود تا استفاده از روش نسبی تعیین موقعیت در پردازش این مشاهدات به نتایج بهتری منتهی شود. در این نوشتار، افزون بر معرفی روش‌های فیلترینگ نجومی و مکانی و بررسی نتایج مربوطه در شبکه GPS زمین لرزه سن سیمون سال ۲۰۰۳، نتایج حاصل از روش‌های نسبی و مطلق تعیین موقعیت مقایسه خواهد شد. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش نسبی تعیین موقعیت در ارزیابی جابه‌جایی‌های هم‌لرزه، این زمین لرزه، تعیین جابه‌جایی‌های هم‌لرزه کوچک‌تری را در مقایسه با روش مطلق تعیین موقعیت امکان‌پذیر می‌سازد.

## ۲- روش فیلترینگ نجومی اصلاح شده

سیگنال‌های چندمسیری در هر ایستگاه با دوره تناوبی نجومی تکرار می‌شوند، به این ترتیب خطاهای سیستماتیک یکسان هر روز تقریباً ۴ دقیقه زودتر تکرار می‌شوند. این اصل را می‌توان برای کاهش بزرگی اثرات چندمسیری روی سیگنال‌های GPS استفاده کرد. فیلترینگ نجومی روشی است که با تکیه بر دوره تناوب تکرار مداری ماهواره‌ها اثر خطاهای چندمسیری را به نحو قابل توجهی کاهش می‌دهد. برای این منظور، داده‌های دست‌کم دو روز از سامانه GPS مورد نیاز است. در این روش مختصات روزانه محاسبه شده روزهای مختلف با توجه به تفاوت ۳ دقیقه و ۵۶ ثانیه روز نجومی متوسط و روز خورشیدی متوسط در یک چارچوب زمین مرجع مرتب می‌شوند. در مرحله

موقعیت‌های محاسبه شده GPS، تحت تأثیر خطاهای سیستماتیک مختلفی مانند چندمسیری (Multipath)، تغییرات مدل نشده مرکز فاز آنتن، خطای موجود در موقعیت مداری ماهواره‌ها و خطاهای اتفاقی هستند. در تعیین موقعیت با حجم زیادی از داده، مانند تعیین موقعیت با ۲۴ ساعت اندازه‌گیری‌های فاز و کد، این خطاها به گونه قابل توجهی کاهش می‌یابند، زیرا این خطاها در این فاصله زمانی از آنجا که هندسه ماهواره‌های این سامانه تغییر می‌کند، بیشتر میانگین‌گیری می‌شوند. در GPS آهنگ بالا که موقعیت‌ها به گونه‌ای اتفاقی در هر مقطع زمانی (اپوک) برآورد می‌شوند، مختصات، به شدت تحت تأثیر این خطاهاست. بنابراین حذف یا کاهش اثر این منابع خطا در مشاهدات کوتاه مدت (آهنگ بالا) مستلزم استفاده از روش‌های دیگری است. فیلترینگ نجومی (Sidereal filtering) و فیلترینگ مکانی (Spatial filtering) روش‌های استاندارد هستند که کارایی آنها در حذف یا کاهش اثر خطاهای چندمسیری بر مشاهدات آهنگ بالا به اثبات رسیده است (Tabibi, 2010a,b). در اصل، محیطی وجود ندارد که به هیچ‌وجه تحت تأثیر خطاهای چندمسیری قرار نگیرد، بنابراین سری‌های زمانی مؤلفه‌های مختصات محاسبه شده ایستگاه‌های GPS تحت تأثیر این خطا قرار می‌گیرند. منابع خطاهای چندمسیری، وابستگی مستقیمی به هندسه گیرنده-ماهواره دارند، به این معنا که خطاهای موقعیت با فرض موقعیت‌های نسبی یکسان ماهواره و آنتن گیرنده در هر روز تکرار می‌شوند. بنابراین دقت و درستی GPS آهنگ بالا را می‌توان با کمینه کردن یا از بین بردن این خطاها از موقعیت‌ها، بهبود بخشید. غالباً از اصطلاح خطاهای چندمسیری، برای اشاره به همه خطاهایی که دوره تناوبی برابر با دوره تناوب نجومی گردش ماهواره‌های GPS دارند، شامل اثراتی مانند سیگنال میرا شده، سیگنال انعکاس یافته، تغییرات مرکز فاز آنتن و تغییرات روزانه مانند اثرات دما در سخت‌افزار گیرنده استفاده می‌شود. اثرات چندمسیری با دوره تناوبی از چند ثانیه تا یک ساعت به عنوان سیگنال‌های چندمسیری شناخته می‌شوند (Wubben et al., 1996).

اطلاعات زیجی (Almanac) هر ماهواره که از طریق پیام ناوبری در اختیار کاربران سامانه GPS قرار می‌گیرد برای محاسبه دوره تناوب حرکت مداری ماهواره‌های این سامانه استفاده شده است. اگر  $\mu$  حاصل ضرب جرم زمین در ثابت جهانی گرانش که بزرگی آن بر اساس تعریف بیضوی WGS84،  $3.986004418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$  و بزرگی نصف قطر بزرگ بیضی مسیر هر ماهواره که نسبت به اثر فشردگی زمین (n) تصحیح شده، باشند، میانگین بزرگی حرکت هر ماهواره (n) و در نتیجه دوره تناوب حرکت مداری (T) آن را می‌توان با روابط زیر محاسبه کرد (Seeber, 2003):

$$n = \sqrt{\frac{\mu}{a_s^3}} + n_e \quad T = \frac{2\pi}{n} \quad (1)$$

برای آرایش فضایی ماهواره‌های GPS دیده شده در باختر آمریکای شمالی و در ۳ ساعت حول رویداد زمین‌لرزه سن‌سیمون، مقادیر پیشرفت روزانه محاسبه شده بین ۲۳۹ و ۲۵۲ ثانیه متغیر است (شکل ۲). میانگین پیشرفت روزانه همه ماهواره‌های دیده شده ۲۴۵ ثانیه بوده که این مقدار ۹ ثانیه کمتر از دوره تناوب تکرار مداری اسمی آنها است. از این برآورد در فیلترینگ نجومی اصلاح شده سری‌های زمانی مختصات حاصل از پردازش داده‌های شبکه آهنگ بالای زمین‌لرزه سن‌سیمون استفاده می‌شود. دوره تناوب تکرار مداری واقعی متوسط محاسبه شده در این پژوهش برای ماهواره‌های ردیابی شده حول زمان رخداد زمین‌لرزه سن‌سیمون ۱۱ ساعت و ۵۷ دقیقه و ۵۷/۵۰ ثانیه برآورد شده است.

در این نوشتار، سری‌های زمانی جابه‌جایی نسبی آهنگ بالای GPS به دست آمده از تعیین موقعیت نسبی به روش کینماتیک، که اختلاف میان جابه‌جایی‌های مطلق ایستگاه‌های استاتیک و کینماتیک هستند با کاهش خطاهای چندمسیری بهبود یافته‌اند. افزون‌بر این، جابه‌جایی‌های لرزه‌ای نسبی به دست آمده در این نوشتار با جابه‌جایی‌های لرزه‌ای مطلق به دست آمده توسط Ji et al. (2004) مقایسه شده‌اند.

## ۲-۲. بهبود سری‌های زمانی جابه‌جایی نسبی

سری‌های زمانی جابه‌جایی نسبی ۱۳ ایستگاه GPS شبکه GPS جامع کالیفرنای جنوبی (Southern California Integrated GPS Network) که بیشترین فاصله آنها تا کانون زمین‌لرزه سن‌سیمون ۲۲ دسامبر ۲۰۰۳ به بزرگی گشتاوری ۶/۵، ۷۴ کیلومتر است (شکل ۳)، با استفاده از ماژول TRACK (Chen, 1998; Herring, 2010) در نرم‌افزار GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2009) و محصولات مداری دقیق شبکه IGNS (IGS, 2004) محاسبه شده است. امواج لرزه‌ای آشکارا در نتایج، قابل مشاهده است (شکل ۴).

برای بهبود سری‌های زمانی آهنگ بالای GPS از روش فیلترینگ نجومی اصلاح شده استفاده و خطاهای با دوره تناوب نجومی در هر مؤلفه مختصات با میانگین‌گیری وزندار از سری‌های زمانی موقعیت در یک بازه زمانی یا پنجره مناسب کاهش می‌یابند. در این نوشتار پنجره‌های مختلفی مورد آزمایش قرار گرفته و از پنجره‌ای دو روزه به دلیل کاهش بیشتر خطا استفاده شده است.

برای پیاده‌سازی فیلترینگ نجومی اصلاح شده سه روز از داده‌های GPS (۲۰ تا ۲۲ دسامبر ۲۰۰۳)، و سه ساعت از هر روز (۱۹:۴۶:۰۶ تا ۲۰:۴۶:۰۶ در سامانه زمانی GPS) برای حل بهتر ابهام فاز برای تمام ایستگاه‌ها پردازش می‌شوند. سپس موقعیت‌های دو روز اول برای ایجاد نیم‌رخ از خطاهای ویژه هر ایستگاه، با دوره تناوب واقعی ماهواره‌های دیده شده، شیف‌ت داده می‌شوند. این نیم‌رخ، فیلتر نجومی اصلاح شده است. مختصات شیف‌ت داده شده از یک فیلتر پایین‌گذر واگن متحرک (Box-car) بر اساس رابطه ۲ عبور داده می‌شوند. این فیلتر پایین‌گذر، نوبه تصادفی در سری‌های زمانی را بدون ایجاد تغییر فاز کاهش می‌دهد.

$$x_{j, \frac{j+n-1}{2}} = \sum_{m=j}^{j+n} \left[ \frac{x_m}{\sigma_m^2} \right] / \sum_{m=j}^{j+n} \left[ \frac{1}{\sigma_m^2} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_{x_{j, \frac{j+n-1}{2}}} = 1 / \sum_{m=j}^{j+n} \left[ \frac{1}{\sigma_m^2} \right]$$

نخست، موقعیت‌ها در روز اول و با این فرض که در طول مدت اندازه‌گیری، زمین حرکتی نداشته است، ارزیابی می‌شوند. برای حذف خطاهای مرتبط به هندسه ماهواره-گیرنده، این موقعیت‌ها با دوره تناوب نجومی شیف‌ت داده و از موقعیت‌های ارزیابی شده در روز دوم کم می‌شوند. در نتیجه تمام خطاهایی که پس از یک روز نجومی تکرار شده‌اند، حذف می‌شوند. در صورتی که مختصات نقطه یا نقاط مورد نظر در طول بازه زمانی مورد بررسی تغییر نکرده باشند، اختلاف حاصل معرف اثر منابع خطایی است که به هندسه ماهواره-گیرنده مرتبط است. مطالعات انجام شده کارایی این روش را در کاهش سطح نوفه مشاهدات آهنگ پایین و آهنگ بالا، که طولی کمتر از ۲۴ ساعت دارند نشان می‌دهد (Genrich and Bock, 1992; Nikolaidis et al., 2001; Elosegui et al., 1995; Wubben et al., 1996; Bock et al., 2004; Choi et al., 2004; Park et al., 2004). دوره تناوب تکرار مداری ماهواره‌های GPS ثابت و برابر نصف یک روز نجومی نیست (Agnew and Larson, 2006)، بنابراین برای اعمال فیلترینگ نجومی باید دوره تناوب واقعی و یا دست‌کم دوره تناوب متوسط ماهواره‌هایی از این سامانه که از نقاط شبکه مورد نظر ارزیابی شده‌اند، استفاده کرد. این روش به فیلترینگ نجومی اصلاح شده معروف است. فیلترینگ نجومی اصلاح شده نوعی از فیلترینگ نجومی است، که شیف‌ت مختصات بر مبنای تکرار مداری واقعی و نه بر اساس تکرار مداری اسمی ماهواره‌ها محاسبه و اعمال می‌شود (Choi et al., 2004). در فیلترینگ نجومی اصلاح شده سری‌های زمانی مؤلفه‌های مختصات محاسبه شده در هر ایستگاه، با شیف‌ت به اندازه متوسط دوره تناوب تکرار مداری واقعی ماهواره‌های مورد استفاده در تعیین عناصر این سری‌ها به دوره‌های زمانی جدیدی منسوب می‌شوند.

## ۲-۱. دوره تناوب تکرار مدار ماهواره‌های GPS

دوره تناوب ماهواره‌های GPS به‌طور تقریبی نصف یک روز نجومی است. در نتیجه ماهواره‌ای که در لحظه‌ای خاص در نقطه‌ای از آسمان قابل مشاهده باشد، ۲۳ ساعت و ۵۶ دقیقه و ۴ ثانیه (روز نجومی) بعد، برای دومین بار از همان محل عبور خواهد کرد. تفاوت میان روز نجومی و روز خورشیدی سبب می‌شود تا دوره تناوب مداری ماهواره‌های GPS ۱۱۸ ثانیه کمتر از یک روز خورشیدی باشد. ماهواره‌های این سامانه هر روز کم و بیش ۴ دقیقه زودتر از روز پیش در افق دید یک ناظر قرار می‌گیرند. این تقدم زمانی در اصطلاح، به پیشرفت روزانه معروف است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که میزان این پیشرفت در روزهای مختلف و برای ماهواره‌های مختلف با این مقدار تفاوت اندکی دارد (Agnew and Larson, 2006).

وزارت دفاع آمریکا در تأیید تحقیقات انجام شده توسط Seeber et al. (1997) و Choi et al. (2004) اعلام کرد که دوره تناوب تکرار مداری ماهواره‌های GPS حدود ۸ ثانیه کمتر از پیشرفت روزانه اسمی این سامانه است. در بررسی انجام شده توسط Agnew and Larson (2006) دوره تناوب میانگین ماهواره‌های GPS در دهه پیش برآورد و پیشرفت روزانه میانگین ۲۴۶ ثانیه، یا دوره تناوب تکرار مداری ۸۶۱۵۴ ثانیه برای ماهواره‌های این سامانه تعیین شده است. در عمل، این پیشرفت روزانه جدید که ۲۴۶ ثانیه کمتر از یک روز خورشیدی است، همیشه ثابت نیست، دوره تناوب تکرار مداری ماهواره‌های GPS، بیشتر با یکدیگر متفاوت و حتی با پیشرفت روزانه ۲۴۶ ثانیه نیز همواره تطبیق نمی‌کند (شکل ۱).

در صورت کوچک بودن اندازه خطای چندمسیری در یک ایستگاه، می‌توان میانگین دوره تناوب تکرار مداری ماهواره‌های سامانه GPS را به عنوان دوره تناوب تکرار برای آن ایستگاه در نظر گرفت. در غیر این صورت، دوره تناوب تکرار مداری برای هر ماهواره به طور جداگانه بررسی و سپس بزرگی خطای چندمسیری بر اساس دوره تناوب تکرار مداری برآورد می‌شود. در این پژوهش، از قانون کپلر و

مداری ماهواره‌ها، اثر تقدم و تأخر امواج الکترومغناطیس منتشر شده از ماهواره در لایه‌های تروپوسفر و یونسفر است. ایده آل نبودن این مدل‌ها سبب می‌شود تا در این شیوه تعامل با منابع بایاس حتی در صورت کوچک بودن ابعاد شبکه، مشاهدات تصحیح شده در مقایسه با مشاهدات تفاضلی بایاس بیشتری دارند. در نتیجه چنانچه ابعاد شبکه مورد بررسی به اندازه کافی کوچک باشد، روش‌های نسبی تعیین موقعیت می‌تواند به نتایج دقیق‌تری در مقایسه با روش‌های مطلق تعیین موقعیت منتهی شود. به عنوان مثال در پردازش داده‌های بلند مدت، در صورت اتخاذ راهبرد و نرم‌افزار مناسب در پردازش مشاهدات؛ روش نسبی تعیین موقعیت دستیابی به مختصاتی با دقت زیر سانتی‌متر را تضمین می‌کند. در حالی که در بهترین شرایط دستیابی به دقت بهتر از سانتی‌متر در تعیین موقعیت مطلق امکان‌پذیر نیست. مقایسه خطای مربعی متوسط مؤلفه‌های مختلف مختصات نقاط شبکه مورد بررسی در این مقاله، حاصل از تعیین موقعیت این نقاط به روش‌های مطلق و نسبی نشان می‌دهد که روش‌های نسبی تعیین موقعیت می‌تواند به برآورد دقیق‌تری از جابه‌جایی‌های هم‌لرزه منتهی شود. افزون بر این، بزرگی جابه‌جایی هم‌لرزه قابل تشخیص در این روش کم و بیش نصف بزرگی جابه‌جایی هم‌لرزه قابل تشخیص در تعیین موقعیت به روش مطلق کاهش می‌یابد. شکل ۸ نتیجه این مقایسه را برای ایستگاه PKDB، تنها ایستگاه مشترک مورد استفاده توسط (Ji et al. (2004) با این پژوهش، نمایش می‌دهد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام شده نشان داده است که بالا بودن سطح نوفه مشاهدات آهنگ بالا، 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. به این ترتیب استفاده از شبکه‌های GPS آهنگ بالا تنها به بررسی و مطالعه و اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های هم‌لرزه ناشی از زمین‌لرزه‌های بزرگ مقیاس محدود می‌شود. توسعه کارایی استفاده از این اندازه‌گیری‌ها به زمین‌لرزه‌های کوچک مقیاس مستلزم کاهش سطح نوفه مشاهدات آهنگ بالا و یا مختصات حاصل از این مشاهدات است. روش فیلترینگ نجومی اصلاح شده یکی از روش‌های کارآمد موجود برای این منظور به‌شمار می‌رود. از آنجا که یکی از معیارهای سنجش دقت و کیفیت نتایج حاصل از داده‌های آماری، ریشه میانگین مجموع مربعات باقی‌مانده‌هاست، بنابراین در این نوشتار با استفاده از این روش، ریشه میانگین مجموع مربعات خطاهای مؤلفه‌های خاوری-باختری، شمالی-جنوبی و عمودی محاسبه شد. مقایسه این کمیت نشان می‌دهد که نتایج حاصل از اعمال فیلترینگ نجومی برای سری‌های زمانی مؤلفه‌های خاوری-باختری، شمالی-جنوبی و عمودی به ترتیب ۴۲ درصد، ۲۳ درصد و ۳۸ درصد نسبت به پیش از اعمال آن بهبود یافته‌اند.

افزون بر این، نتایج حاصل نشان می‌دهد که با استفاده از تعیین موقعیت نسبی و به‌کارگیری روش فیلترینگ نجومی اصلاح شده می‌توان به گونه دقیق حرکات زمینی را در مقیاس‌های زمانی لرزه‌ای و برای زمین‌لرزه‌های با جابه‌جایی‌های هم‌لرزه کوچک‌تر اندازه‌گیری و بررسی کرد. بزرگی جابه‌جایی‌های هم‌لرزه قابل تشخیص به این روش به کمتر از ۴ میلی‌متر در مؤلفه‌های مسطحاتی و کمتر از ۱۰ میلی‌متر در مؤلفه ارتفاعی کاهش می‌یابد. این دستاورد نتیجه منطقی کاهش اثر منابع بایاس در تفاضلی مورد استفاده در تعیین موقعیت نسبی و تکرارپذیری خطاهای چندمسیری است. این نتایج بیانگر این است که از GPS آهنگ بالا می‌توان برای مطالعه روند گسیختگی در یک گسل و مدل‌سازی آن و نیز کنترل جابه‌جایی‌های بزرگ استفاده کرد.

در این رابطه  $n$  طول پنجره فیلتر واگن متحرک و  $z$  شماره اپوک است. در این نوشتار از پنجره ۷ ثانیه‌ای برای مؤلفه‌های مسطحاتی و ۱۱ ثانیه‌ای برای مؤلفه ارتفاعی استفاده شده است. با فرد انتخاب کردن طول این پنجره، موقعیت میانگین محاسبه شده را می‌توان به اپوک زمانی مشخصی نسبت داد (اپوک‌های زمانی اندازه‌گیری) در صورتی که با زوج در نظر گرفتن طول این پنجره امکان تخصیص موقعیت متوسط محاسبه شده به اپوک زمانی مشخص وجود نخواهد داشت. سپس ساخت فیلتر نجومی برای هر ایستگاه بر اساس رابطه زیر انجام می‌پذیرد:

$$mp_i = \sum_{k=d-1}^d \left[ \frac{(x_i)_k}{(\sigma^2)_k} \right] / \sum_{k=d-1}^d \left[ \frac{1}{(\sigma^2)_k} \right] \quad ; \quad i = 1 + \frac{n-1}{2}, 2 + \frac{n-1}{2}, \dots, 10801 - (n-1) \quad (3)$$

در این رابطه  $d$  تعداد روزهای استفاده شده در ساخت فیلتر،  $i$  نشان‌دهنده شماره اپوک در هر روز،  $x_i$  و  $\sigma_i$  به ترتیب مختصات ارزیابی شده و انحراف معیار آنها هستند. در پایان سری‌های زمانی فیلتر شده با کم کردن این فیلتر (نوفه) از سری‌های زمانی اولیه به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$x_i^{fit} = x_i - mp_i \quad (4)$$

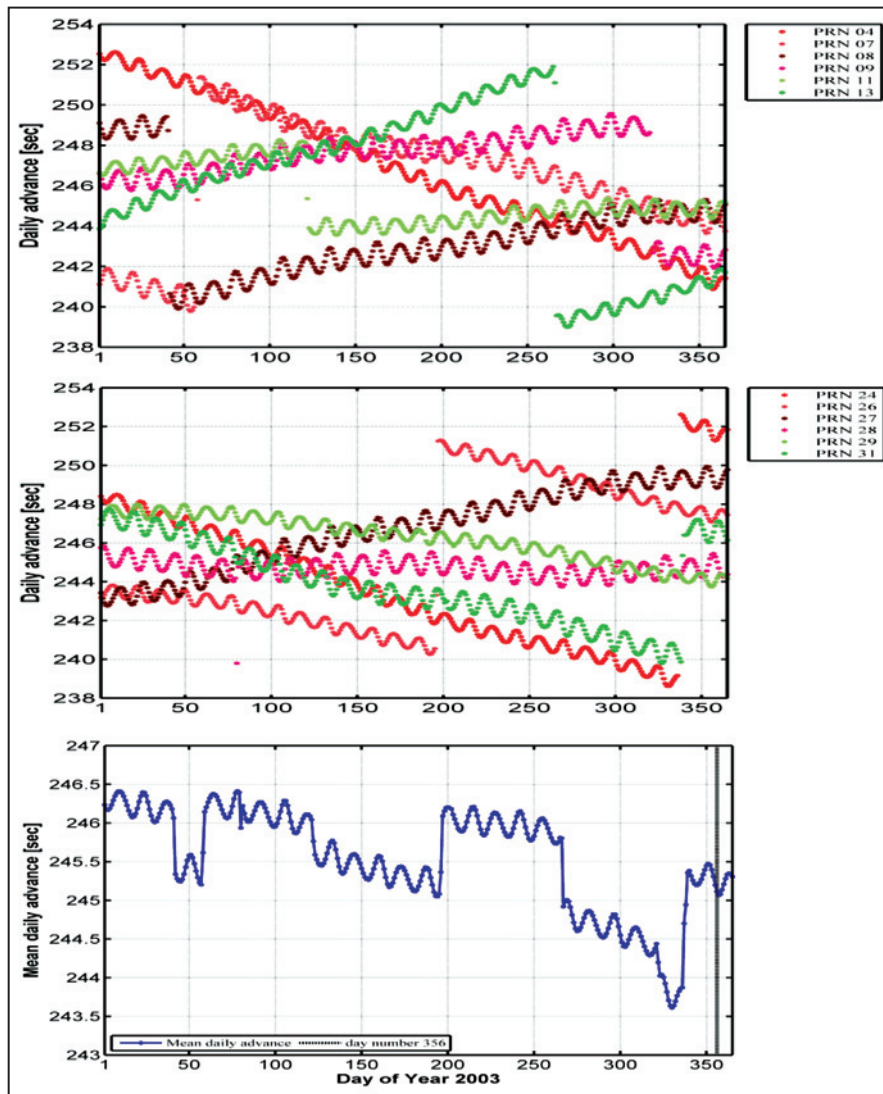
شکل ۵ سری‌های زمانی را پیش و پس از اعمال فیلترینگ نجومی اصلاح شده برای دو ایستگاه CAND و MIDA که دارای کمترین میزان بهبود نسبت به دیگر ایستگاه‌ها بوده‌اند را نشان می‌دهد. کاهش سطح نوفه را می‌توان پس از اعمال فیلترینگ، به روشنی در این نتایج دید.

برای درک بهتر میزان کاهش سطح نوفه در سری‌های زمانی فیلتر شده، چگالی توان طیفی (Power Spectral Density) این دو ایستگاه پیش و پس از اعمال فیلترینگ نجومی و فیلترینگ نجومی اصلاح شده در شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس این نتایج استفاده از هر دو فیلتر (فیلترینگ نجومی و فیلترینگ نجومی اصلاح شده) باعث کاهش سطح نوفه موقعیت‌های GPS به‌ویژه برای بسامدهای کمتر از ۰/۰۱ هرتز می‌شود.

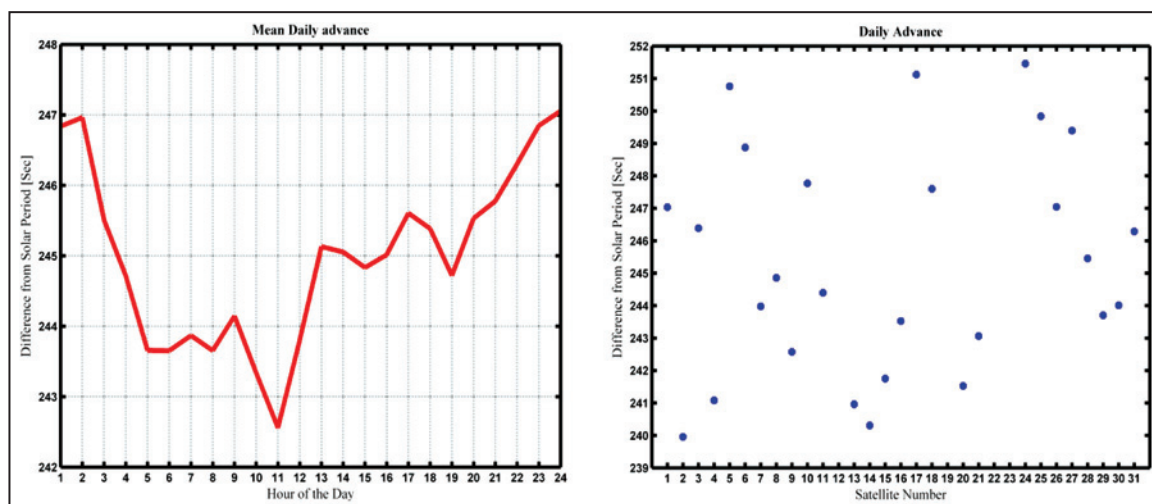
برای ارزیابی بهبود نتایج از ریشه میانگین مجموع مربعات خطاهای (Root Mean Square Errors) ۵۰۰ اپوک داده پیش از رخداد زمین‌لرزه نیز استفاده شده است. بهبود ریشه میانگین مجموع خطاهای سری‌های زمانی فیلتر شده نسبت به سری‌های زمانی خام، به‌ویژه برای سری‌های زمانی شیف‌ت داده شده بر مبنای تکرار مداری واقعی قابل توجه است. شکل ۶ نتایج حاصل از این مقایسه را نمایش می‌دهد.

#### ۳- مقایسه نتایج تعیین موقعیت نسبی و تعیین موقعیت مطلق

در تعیین موقعیت نسبی، با تشکیل مشاهدات تفاضلی در سطوح تفاضل مختلف می‌توان در صورت ردیابی همزمان ماهواره‌ها از دو سر یک طول باز (یا نقاط شبکه) اثر برخی از منابع بایاس در تعیین موقعیت با سامانه GPS را حذف و یا به اندازه قابل توجهی کاهش داد. خطاهای ساعت‌گیرنده و ماهواره نمونه‌هایی از منابع بایاس در دو بخش فضایی و زمینی این سامانه است که در صورت برقراری این شرط از شبه مشاهدات تفاضلی دو گانه کاملاً حذف می‌شوند. افزون بر این، با کاهش ابعاد شبکه می‌توان انتظار داشت که باقی‌مانده اثر منابع بایاس ناشی از محیط انتشار (تروپوسفر و یونسفر) در این شبکه مشاهدات، نسبت به بزرگی اثر این منابع بر مشاهدات خام فاز حامل و کد کاهش یابد. در تعیین موقعیت مطلق، رسیدن به دقت‌های بالا مستلزم استفاده از مدل‌های ریاضی مناسب برای حذف اثر منابع مختلف بایاس مانند خطاهای

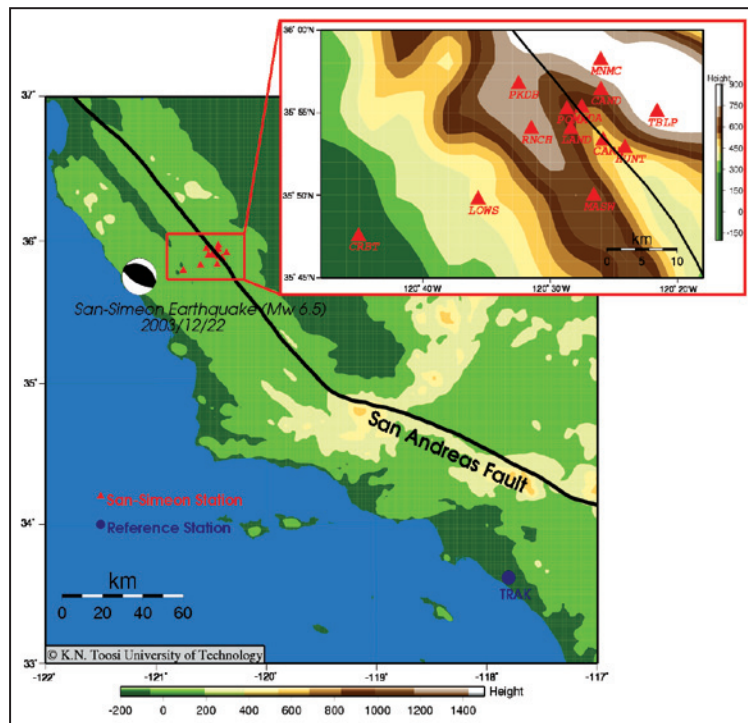


شکل ۱- پیشرفت روزانه و پیشرفت روزانه میانگین ماهواره‌های GPS. فقط ماهواره‌های دیده شده با زاویه ارتفاعی بیشتر از ۱۵ درجه در باختر آمریکای شمالی در زمان رویداد زمین‌لرزه سن سیمون آورده شده‌اند. تغییرات ناگهانی در شیفت زمانی به سبب مانورهای نگهدارنده مداری است که توسط بخش کنترل زمینی اعمال می‌شوند (Tabibi, 2010a).

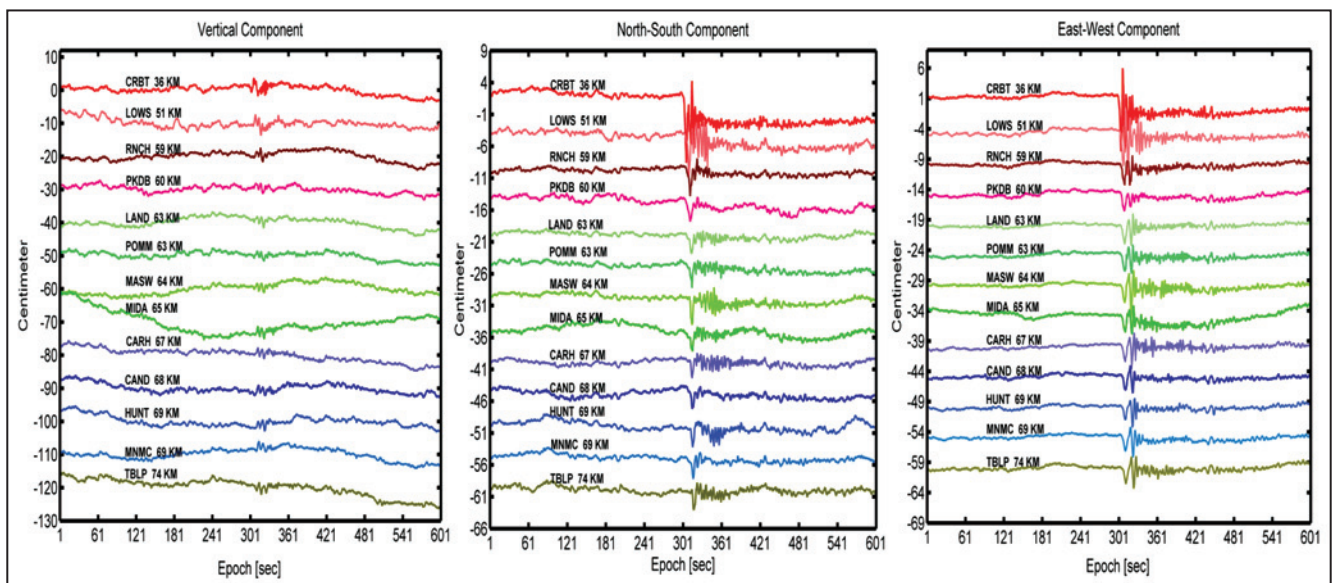


شکل ۲- پیشرفت روزانه و میانگین پیشرفت روزانه ماهواره‌های دیده شده در باختر آمریکای شمالی در ۲۲ دسامبر ۲۰۰۳.

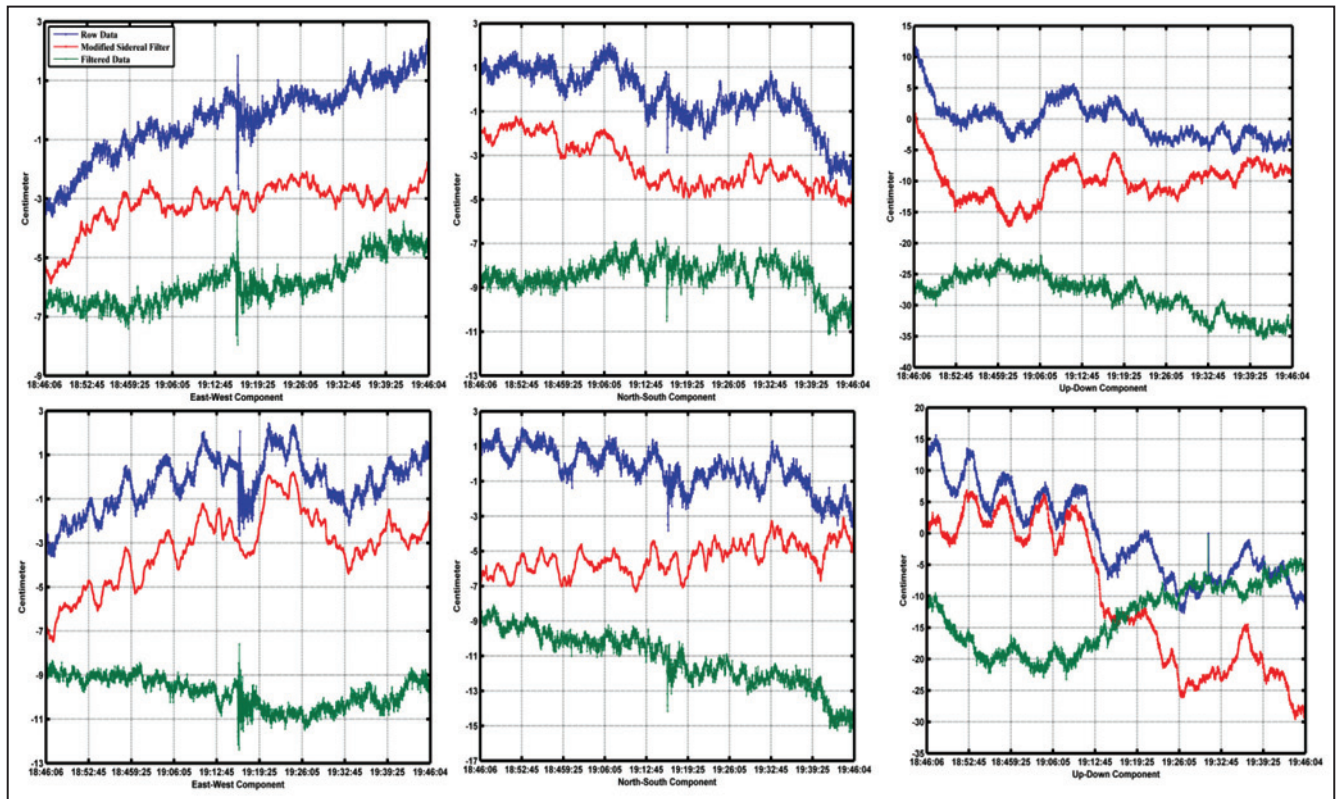




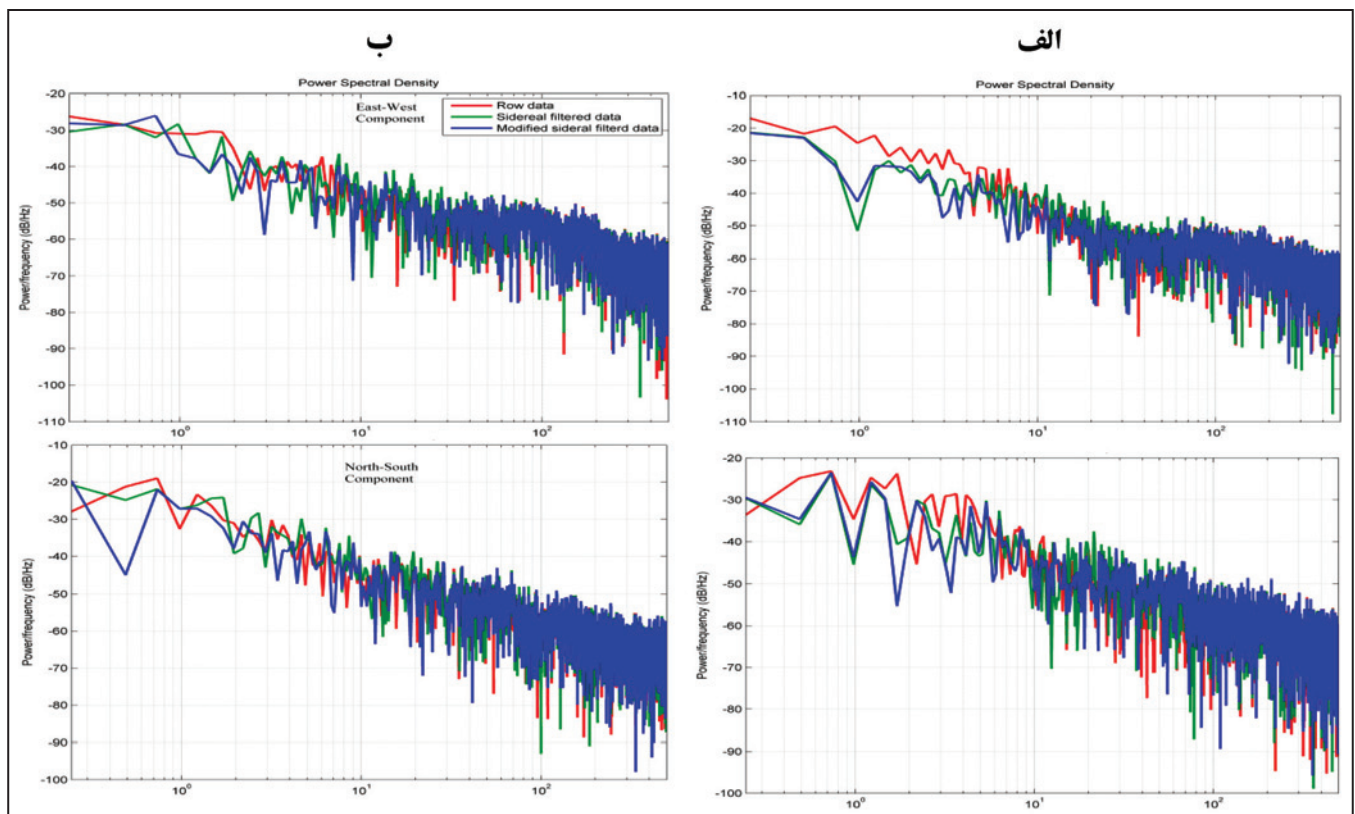
شکل ۳- موقعیت زمین لرزه سن سیمون و ایستگاه‌های GPS یک هرتزی در کالیفرنای جنوبی. TRAK ایستگاه استاتیک در نظر گرفته شده است.



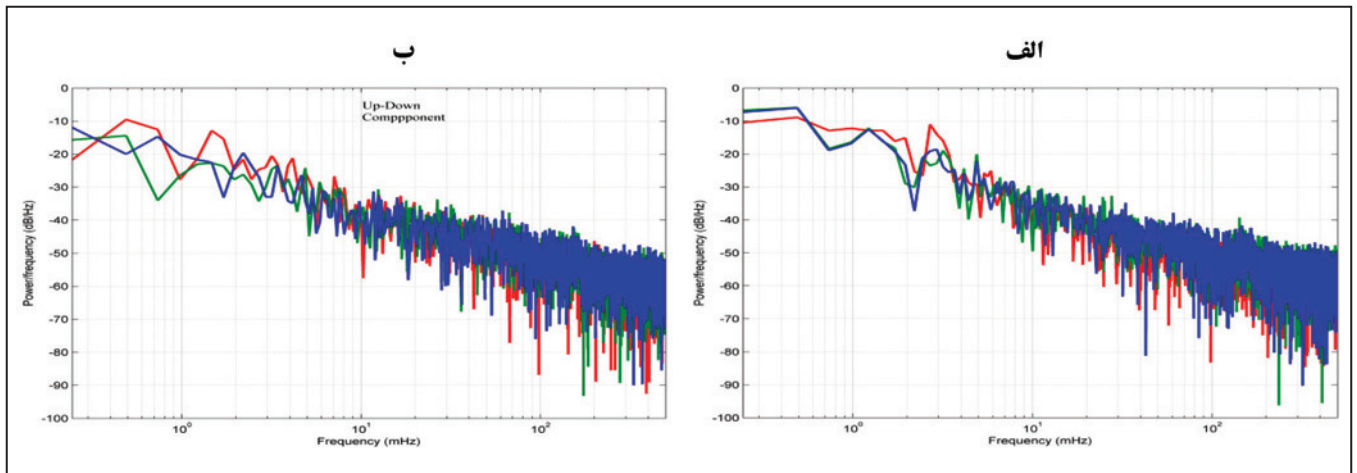
شکل ۴- سری‌های زمانی جابه‌جایی نسبی GPS آهنگ بالا از ساعت ۱۹:۱۳:۳۶ جهانی. این سری‌های زمانی بر اساس فاصله ایستگاه GPS تا کانون زمین لرزه مرتب شده‌اند (Tabibi et al., 2010b).



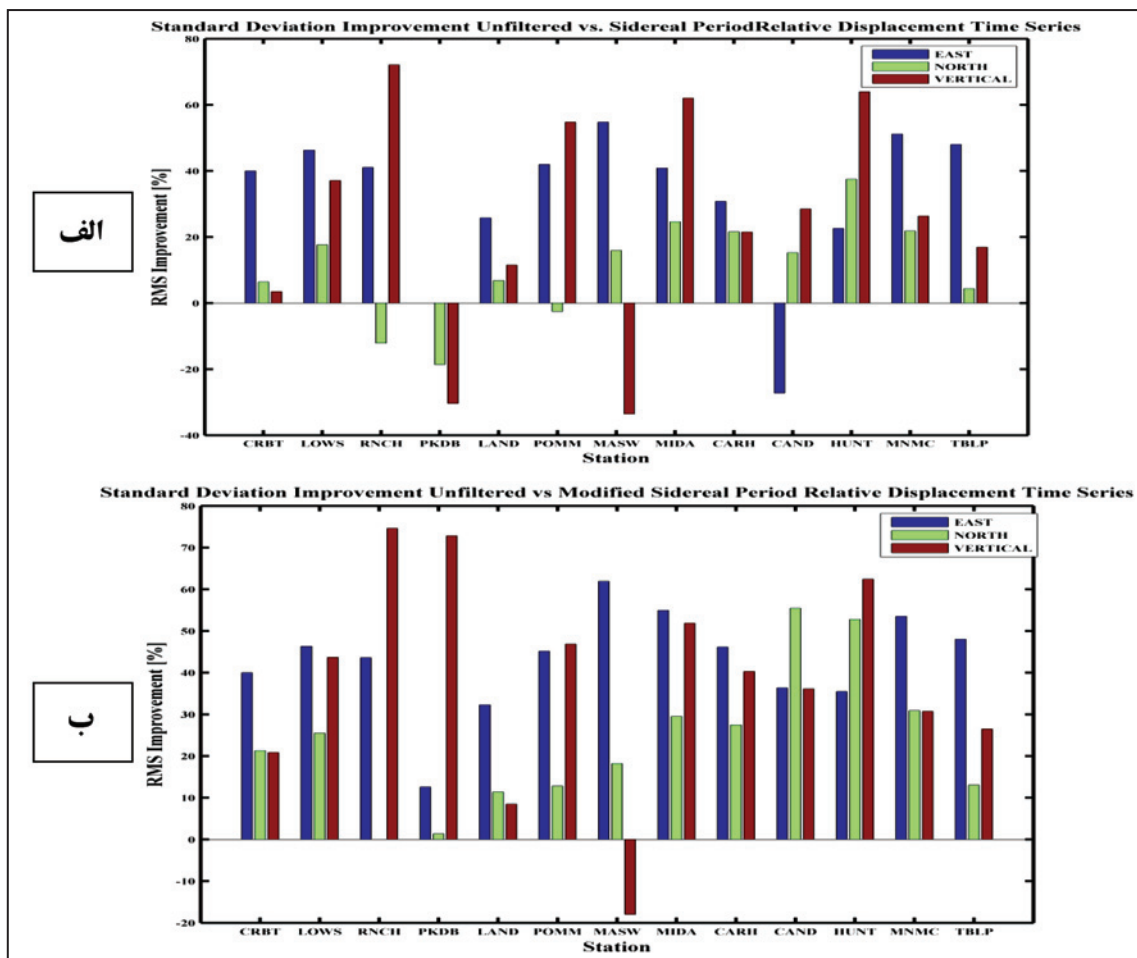
شکل ۵- نیرمخ خطاهای چند مسیری و سری‌های زمانی پیش و پس از اعمال فیلترینگ. ردیف‌های بالا و پایین سری‌های زمانی مؤلفه‌های مختصات محاسبه شده را به ترتیب برای ایستگاه‌های CAND و MIDA نشان می‌دهند.



شکل ۶- چگالی توان طیفی مؤلفه‌های خاوری- باختری، شمالی- جنوبی و ارتفاعی. ستون‌های الف و ب چگالی توان طیفی را به ترتیب برای ایستگاه‌های MIDA و CAND نشان می‌دهند.

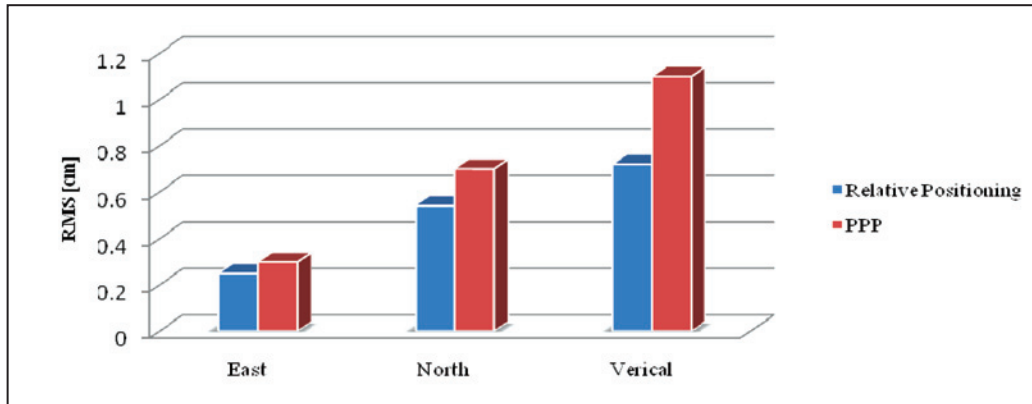


ادامه شکل ۶



شکل ۷- درصد بهبود ریشه میانگین مجموع مربعات خطاهای ۵۰۰ ثانیه پیش از رخداد زمین لرزه. شکل الف درصد بهبود سری های زمانی را بر اساس فیلترینگ نجومی و شکل ب درصد بهبود سری های زمانی را بر اساس فیلترینگ نجومی اصلاح شده نشان می دهد.





شکل ۸- مقایسه ریشه میانگین مجموع مربعات خطاهای روش تعیین موقعیت نسبی و مطلق ایستگاه PKDB. جابه‌جایی‌های لرزه‌ای مطلق توسط Ji et al. (2004) محاسبه شده‌اند.

## کتابکاری

طیبری، س.، ۱۳۸۹- بررسی قابلیت شبکه GPS نرخ بالای بین‌المللی در آشکارسازی زلزله‌های بزرگ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.  
 طیبری، س.، مشهدی حسینی، م.، جموری، ی.، ۱۳۹۱- تعیین نوسانات هم‌لرزه پوسته زمین با بهره‌گیری از داده‌های آهنگ بالای GPS، مطالعه موردی: زمین‌لرزه سن سیمون ۲۲ دسامبر ۲۰۰۳ (کالیفرنیا- ایالات متحده)، فصلنامه علمی- پژوهشی علوم زمین، شماره ۸۳، بهار ۹۱، سال بیست و یکم، ص. ۹۷ تا ۱۰۲.

## References

- Agnew, D. C. & Larson, K. M., 2006- Finding the repeat times of the GPS constellation, *GPS Solutions*, 10 (4), doi:10.1007/s10291-006-0038-4.
- Bock, Y., Prawirodirdjo, L. & Melbourne, T. I., 2004- Detection of arbitrarily large dynamic ground motions with a dense high-rate GPS network. *Geophys Res Lett.* 31:L06604. doi:10.1029/2003GL019150.
- Chen, G., 1998- GPS kinematic positioning for the airborne laser altimetry at Long Valley, Ph.D. dissertation, Department of Earth Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology.
- Choi, K., Bilich, A., Larson, K. M. & Axelrad, P., 2004- Modified Sidereal Filtering: Implications for high-rate GPS positioning, *Geophysical Research Letters*, 31, L22608, doi:10.1029/2004GL021621.
- Elosegui, P., Davis, J. L., Jaldehag, R. T. K., Johansson, J. M., Niell, A. E. & Shapiro, I. I., 1995- Geodesy using the Global Positioning System: the effects of signal scattering on estimates of site position, *J. Geophys. Res.*, 100, 9921-9934.
- Genrich, J. F. & Bock, Y., 1992- Rapid resolution of crustal motion at short ranges with the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, 97, 3261-3269.
- 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.
- IGS, 2004, 2001, 2002- Annual Report. Pasadena, Jet Propulsion Laboratory.
- Ji, C., Larson, K. M., Tan, Y., Hudnut, K. W. & Choi, K., 2004- Slip history of the 2003 San Simeon earthquake constrained by combining 1-hz GPS, strong motion, and tele-seismic data, *Geophysical Research Letters*, 31, L17608, doi:10.1029/2004GL020448.
- Nikolaidis, R. M., Bock, Y., de Jonge, P. J., Shearer, P., Agnew, D. C. & Van Domselaar, M., 2001- Seismic wave observations with the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, 106, 21,897-21,916.
- Park, K. D., Nerem, R. S., Schenewerk, M. S. & Davis, J. L., 2004- Site-specific multipath characteristics of global IGS and CORS GPS sites, *J. Geod.*, 77, 799-803.
- Seeber, G., 2003- *Satellite geodesy: foundations methods and applications*, Berlin, New York, Walter de Gruyter, ISBN: 3110175495, Pages 589.
- Seeber, G., Menge, F., Volksen, C., Wubbena, G. & Schmitz, M., 1997- "Precise GPS positioning improvements by reducing antenna and site dependent effects", paper presented at IAG Symposium No. 115, Int. Assoc. of Geod., Rio de Janeiro, Brazil.
- Wubbena, G., Menge, F., Schmitz, M. Seeber, G. & Volksen, C., 1996- A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations, Proceedings of ION GPS-96, 9th International Technical Meeting, September 10-17, Kansas City, Missouri, USA.