

بررسی دگرشکلی پوسته ایران زمین به کمک سری‌های زمانی ایستگاه‌های دائم GPS همراه با انجام آنالیز نوفه در آنها

نوشته: شیرزاد روحی* و یحیی جمور*

* سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران.

Investigation of the Crustal Deformation in Iran Using Permanent GPS Station Time Series and Application of Noise Analysis

By: S. Roohi* & Y. Jamour**

*National Cartographic Center, Tehran, Iran

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۶/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۱۰/۰۲

چکیده

امروزه یکی از اهداف عمده ژئودزی، اندازه‌گیری تغییرات پوسته زمین در طی زمان است، چرا که شناخت بسیاری از این تغییرات و پیش‌بینی روند آنها، در طراحی زیرساخت‌ها امری اجتناب‌ناپذیر بوده و عدم اطلاع از روند آنها می‌تواند هزینه‌های گزاف و حتی جبران‌ناپذیری را بر جامعه تحمیل کند. یکی از راه‌های اندازه‌گیری این تغییرات ایجاد شبکه دائم موقعیت‌یابی جهانی، انجام مشاهدات پیوسته و پردازش سری‌های زمانی موقعیت ایستگاه‌هاست. با استفاده از روش برآورد بیشینه احتمال نوع و دامنه نوفه موجود در سری‌های زمانی، دامنه و فاز حرکت‌های پریودیک و پارامترهای حرکت خطی به دست می‌آید. با انجام تحلیل نوفه میزان واقعی تغییر موقعیت ایستگاه‌ها در نقاط مختلف شبکه ژئودینامیک سراسری برآورد می‌شود که با به کار بردن این مقادیر در معادلات حرکتی دگرشکلی می‌توان به تفسیر واقعی دگرشکلی پوسته زمین پرداخت. این یکی از تفاوت‌های بسیار مهم ایستگاه‌های دائم تعیین موقعیت جهانی و ایستگاه‌های موقت تعیین موقعیت جهانی است. پس از انجام تحلیل نوفه بر روی سری‌های زمانی، مشخص شد که مقدار نوفه سفید در مؤلفه ارتفاعی برای همه ایستگاه‌ها بیش از مقدار آن در مؤلفه‌های مسطحاتی است. مقدار نوفه لرزان (Flicker) در مؤلفه ارتفاعی بیش از مقدار آن در مؤلفه‌های مسطحاتی است. بدون تحلیل نوفه خطای برآورد شده برای سرعت تغییرات در ایستگاه‌ها تا حدود ۸ برابر نادیده گرفته می‌شود (ایستگاه تهران).

کلید واژه‌ها: ایستگاه‌های دائم موقعیت‌یابی جهانی، تحلیل نوفه، دگرشکلی، نوفه سفید، نوفه لرزان

Abstract

Today, one of the main objectives of the geodesy is to identify the changes over time at the surface of the earth. It is critical to the design of the infrastructures to know these changes and to be able to predict their trends with time, as any ignorance could lead to incalculable losses to the society. One way to investigate and measure the changes is to establish permanent GPS stations and to process the time series data from the stations. The amplitude and mode of the periodic movements and the parameters of the linear movements can be investigated by the application of the maximum likelihood of the type and amplitude of the noises in the time series.

The noise analysis in time series allows the real changes recorded in any stations in the geodynamic network to be accurately measured. With the application of the measured parameters in the deformation equations, the changes in the crust of the earth can be appropriately interpreted. This research shows that the white and flicker noises in vertical components are more than those in

the horizontal components. Without the application of noise analysis on time series, the estimated errors for the rate of changes in the geodynamic stations would be underestimated by 8 times.

Key word: Permanent GPS stations, Noise analysis, Deformation, White noise, Flicker noise.

۱- مقدمه

مؤلفه‌های مختصات N و E و UP به ترتیب ۱۲/۷ و ۲۰/۱۳ و ۲۶/۵ میلی‌متر بوده است.

۳-۲- کنترل سری‌های زمانی از لحاظ فقدان (Gap) داده

در این تحقیق، ۳۶ ایستگاه با طول مدت مشاهدات بیش از یک سال، انتخاب شدند. با یک بررسی اولیه روی سری‌های زمانی، مشخص شد که در ۱۲ تا از این ایستگاه‌ها، به دلایل مختلف در بعضی از بازه‌های زمانی، داده‌ای وجود ندارد. فقدان داده در این بازه‌ها در حدی بود که امکان بازسازی آنها به کمک روش‌های درون‌یابی وجود نداشت. در نتیجه این ایستگاه‌ها حذف شدند.

۳-۳- کشف مشاهدات اشتباه و حذف آنها از سری زمانی

در نتیجه اعمال آزمون آماری سه سیگمادر فاصله اطمینان ۹۹ درصد (Roohi, 2006; Hollenstein, 2005) تعدادی از مشاهدات به عنوان اشتباه‌های بزرگ از سری‌ها حذف شدند. این کار برای هر دو بخش از سری زمانی مؤلفه‌های مختصات ایستگاه تهران (قبل و بعد از تاریخ تعویض آنتن) به طور جداگانه انجام شد.

۳-۴- محاسبه روند خطی و برداشتن آن از سری‌های زمانی

روند خطی از روش سرشکنی پارامتریک کمترین مربعات خطی (LLSPA) محاسبه شده و از روی سری‌های زمانی برداشته شد.

$$g(t) = f(t) - \hat{p}(t) \quad (1)$$

که در آن $f(t)$ سری زمانی و $\hat{p}(t)$ روند خطی است. البته اجباری در حذف روند خطی در این مرحله نیست، ولی اگر پیش از تحلیل طیفی، روند خطی از روی مشاهدات برداشته شود، محاسبات طیفی سریع‌تر و بهتر انجام می‌شود (Vanicek, 1971; Abbasi, 1999). با حذف بخش خطی تحلیل طیفی برای باقیمانده سری زمانی انجام می‌گیرد.

تاریخچه زمین لرزه‌ها، پیش از سده ششم و نیز داده‌های ثبت شده نشان‌دهنده این مطلب است که ایران همواره دستخوش زمین لرزه‌های بسیار ویرانگری مانند زمین‌لرزه بم در ۵ دی ماه ۱۳۸۲ بوده است (جدیدی و همکاران، ۱۳۸۵). موارد مشابه در سال‌های اخیر توجه مسئولان را به خود جلب کرد منجر به ایجاد شبکه دائم GPS به منظور مطالعه فعالیت‌های ژئودینامیکی ایران شد (جدیدی و همکاران، ۱۳۸۵). پس از انجام تصحیحات لازم بر روی سری‌ها با استفاده از فنون‌های سرشکنی کمترین مربعات خطی (LLSPA)، تحلیل طیفی کمترین مربعات (LSSA) و برآورد بیشینه احتمال بخش‌های خطی، پریودیک و نوفه موجود در این سری‌ها شناسایی شده و اطلاعات لازم برای استفاده در معادلات دگرشکلی حرکتی به دست می‌آید. علاوه بر این، به علت این که تحلیل نوفه بر روی سری‌های زمانی صورت می‌گیرد، مقدار جابه‌جایی واقعی موقعیت ایستگاه‌ها، دامنه و نوع نوفه موجود در این سری‌ها به همراه انحراف معیار واقعی آنها به دست می‌آید.

۲- داده‌های مورد استفاده و پردازش آنها

در انجام این تحقیق، از داده‌های ۲۴ ایستگاه شبکه دائم GPS که تا زمان انجام تحقیق دست کم دارای یک سال مشاهده بوده‌اند، استفاده شده است. این ایستگاه‌ها عبارتند از: ahav, akht, amnd, arng, bojd, far m, foim, fopm, hamd, illm, kalt, krad, krmd, mshn, najm, nish, quch, sagz, s bsh, skoh, smnn, tabz, tehn, vrmn و در شکل ۱ نشان داده شده است. این ایستگاه‌ها دارای گیرنده Ashtech UZ-12 و آنتن Chocke هستند، به منظور به دست آوردن دقت محاسباتی بالا برای پردازش داده‌ها از نرم‌افزار GAMIT-GLOBK استفاده شده است (Jadidi, 2006; Jamour, 2005).

۳- آنالیز سری‌های زمانی ایستگاه‌های دائم GPS

۳-۱- بررسی تغییرات ناگهانی در سری‌های زمانی

در ایستگاه‌های مورد بررسی در پروژه تنها در ایستگاه تهران یک تغییر ناگهانی در ۱۷ ژانویه ۲۰۰۴ به علت تغییر آنتن گیرنده ایستگاه دیده شد. میزان این تغییر ناگهانی که در واقع یک شیفت (offset) می‌باشد، برای هر کدام از

۳-۵- تحلیل طیفی سری‌های زمانی و محاسبه روند نهایی

هر سری زمانی را می‌توان مشکل از دو بخش است: بخش سیگنال (روند نهایی)، که در برگیرنده اطلاعات مفید در مورد رفتار سری بوده و در واقع بخش فرمول‌پذیر سری است که ما نیز به دنبال آن می‌باشیم. بخش نوفه، که به طور کلی یعنی یک چیز ناخواسته و باعث پیچیده و مبهم شدن و آلوده کردن بخش سیگنال می‌شود، سیگنال بخش مورد علاقه ما در سری‌های زمانی است. سری‌های زمانی از رابطه زیر پیروی می‌کنند (Department of Land Surveying and...: Jamour, 2004; 2004)

$$x(t_i) = a + b(t_i - t_0) + \sum_{k=1}^m C_k \sin\left(\frac{2\pi(t_i - t_0)}{T_k} + \varphi_k\right) + \varepsilon_x(t_i) \quad (2)$$

a: مقدار سری زمانی در لحظه t_0

b: شیب خط، بخش خطی که همان سرعت یا آهنگ جابه‌جایی است.

t_0 : لحظه شروع سری زمانی

C_k : دامنه به ازای بسامد k ام

T_k : پریود

φ_k : مقدار فاز بخش مثلثاتی به ازای بسامد k ام و

ε_x : مقدار خطا

برای شناسایی رفتار بخش سیگنال سری، باید ضرایب بخش خطی یعنی a و b تعیین شود و همچنین حدود متغیر k و ضرایب C_k, φ_k, T_k در بخش مثلثاتی مشخص شوند. مقادیر مختلف T_k یعنی پریودهای قابل قبول از طریق تحلیل طیفی تعیین می‌شوند، بخش خطی که همان روند خطی است به روش LLSPA محاسبه شده و از روی سری زمانی برداشته می‌شود و با تحلیل طیفی باقیمانده سری زمانی به روش LSSA، برای مؤلفه‌های مختصات در ایستگاه‌های مختلف پریودهای سالانه، ۶ ماهه و ۳ ماهه کشف شدند که نمونه‌ای از آن در شکل ۴ نشان داده شده‌اند، با معلوم شدن تعداد این پریودها حدود k مشخص می‌شود و با معلوم شدن حدود k می‌توان ضرایب a, b, C_k, φ_k را به روش LLSPA تعیین کرد. این ضرایب برای تمامی ایستگاه‌ها محاسبه شده است. با توجه به ضرایب محاسبه شده برای بخش پریودیک، این منحنی‌ها بر سری زمانی برازنده شده‌اند که در شکل ۵ برای ایستگاه تهران نشان داده شده‌اند. با به دست آوردن حدود k و ضرایب رابطه ۲، روند نهایی سری به دست می‌آید. با حذف روند نهایی از سری زمانی آنچه که باقی می‌ماند، همان نوفه است که در شکل ۶ نشان داده شده است، در این شکل محور قائم مقدار نوفه بر حسب متر و محور افقی زمان بر حسب سال است.

۴- تحلیل نوفه با استفاده از روش برآورد بیشینه احتمال

در تحلیل دگرشکلی پوسته زمین با استفاده از پارامترهای کرنش که بر مبنای اندازه‌گیری‌های ژئودتیک جابه‌جایی پوسته زمین انجام می‌گیرد، نه تنها به محاسبه و برآورد دقیق پارامترهای لازم نیاز است، بلکه برای اطمینان بیشتر به نتایج به دست آمده، باید مقادیر خطای این پارامترها به درستی برآورد شوند. از ابتدای سده بیستم، اندازه‌گیری‌های ژئودتیک در بحث دگرشکلی پوسته زمین قرار گرفتند و در نبود دگرشکلی‌های ناگهانی مانند اثرات زمین لرزه، می‌توان از طریق برازش یک روند خطی بر داده‌های اندازه‌گیری شده موقعیت، آهنگ تغییرات (سرعت ایستگاه‌ها) را به دست آورد. در این روش، محاسبه سرعت یا آهنگ تغییرات از فن کمترین مربعات خطی استفاده می‌شود و در آن فرض بر این است که خطای اندازه‌گیری دارای توزیع نرمال بوده و از نظر آماری مستقل هستند. اما شواهد ژئودتیک زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد در اندازه‌گیری‌های دائمی GPS منابعی از خطا (نوفه) وجود دارد که وابستگی‌های زیادی را در بین داده‌های اندازه‌گیری شده ایجاد می‌کنند، در نتیجه، داده‌های مشاهداتی نمی‌توانند مستقل باشند.

همانند بسیاری از پدیده‌های زمین فیزیکی، نوفه سری‌های زمانی ایستگاه‌های دائم GPS را می‌توان بر حسب قانون توان بیان کرد (Hollenstein, 2005):

$$P_x(f) = P_0 \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^k \quad (3)$$

که در آن f بسامد، P_0 و f_0 ثابت‌های بهنجار سازی و k شاخص طیفی (Spectral) است. در تحلیل نوفه سری‌های زمانی ضریب طیفی k در بازه [1 -3] قرار دارد. اگر $-1 < k < -3$ باشد، آنگاه نوفه از روند حرکت براونی کسری (Fractional Brownian Motion) پیروی می‌کند. اگر $-1 < k < 1$ باشد روند نوفه سفید کسری (Fractional White Noise) خواهیم بود. در حالت‌های خاص اگر $k = 0$ باشد نوفه سفید و اگر $k = -1$ نوفه لرزان (Flicker noise) و اگر $k = -2$ باشد نوفه تصادفی (Random Walk Noise) خواهیم داشت.

۴-۱- منابع نوفه

عواملی که باعث ایجاد نوفه در سری‌های زمانی می‌شوند عبارتند از: نداشتن مدل مدار ماهواره‌ها، شیفت‌های ناشی از چارچوب مرجع، نداشتن مدل شیفت‌های جوئی، عدم مدولاسیون شیفت مرکز فاز آنتن که وابسته به ارتفاع ماهواره‌ها است، ناپایداری ساختمان ایستگاه، عوامل محلی محیطی، دگرشکلی‌های ناشی از تغییر تراز آب‌های زیر زمینی. البته

و برابر I است. در نتیجه $J_k = T \cdot T^T$ خواهد بود. ماتریس تبدیل T نیز به صورت زیر تعریف می‌شود (Williams, 2003):

$$T = \begin{bmatrix} \varphi_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \varphi_1 & \varphi_0 & 0 & \dots & 0 \\ \varphi_2 & \varphi_1 & \varphi_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_n & \varphi_{n-1} & \varphi_{n-2} & \dots & \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن φ_n ها از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\varphi_n = \frac{-k/2(1-k/2)\dots(n-1-k/2)}{n!} = \frac{\Gamma(n-k/2)}{n! \cdot \Gamma(-k/2)} \quad (9)$$

که در آن Γ تابع گاما و n تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. در تشکیل ماتریس J_k برای این که توان طیفی نوفه‌های مختلف باضرب طیفی k و دامنه و بسامد یکسان که هم فاصله هستند، با هم برابر شوند، ماتریس T در $\Delta T^{\frac{k}{4}}$ ضرب می‌شود (مقیاس داده می‌شود). اگر داده‌ها هم فاصله نباشند ماتریس T در $\Delta T_j = |t_j - t_o|$ ضرب می‌شود (Williams, 2003):

$$P = \frac{D_k \cdot b_k^2}{f_s^{k/2+1} \cdot f^k}; D_k = 2 \cdot (2\pi)^k \cdot (24 \times 60 \times 60 \times 365 \cdot 25)^{k/2} \quad (10)$$

که در آن f_s بسامد نمونه برداری است. با استفاده از رابطه ۷ و ۸:

- اگر نوفه سفید وجود داشته باشد $\varphi_0 = 1, \varphi_n = 0 \implies k=0$ در نتیجه $T=I$ و $\Delta T^{\frac{k}{4}} = 1$ در نتیجه ماتریس واریانس - کواریانس $J_k = J_o = I$ و مستقل از زمان خواهد شد.

- اگر نوفه تصادفی وجود داشته باشد $\Delta T^{\frac{k}{4}} = \Delta T^{\frac{1}{2}}, \varphi_n = 1, k=-2 \implies$ در نتیجه ماتریس T به صورت زیر خواهد بود:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

در این حالت ابتدا ستون‌های ماتریس T در $\Delta T^{\frac{1}{2}}$ مربوطه ضرب می‌شود و با استفاده از رابطه $J_k = T \cdot T^T$ ماتریس واریانس - کواریانس محاسبه می‌شود. در نتیجه ماتریس واریانس - کواریانس برای نوفه تصادفی به صورت زیر خواهد بود:

به هنگام پردازش داده‌ها توسط نرم افزارهای GPS یک سری تصحیحات مانند تصحیحات کشندی و جوی، اثرات یون سپهری با استفاده از مدل‌های تقریبی به داده‌ها اعمال می‌شوند، ولی این مدل‌ها قادر نخواهند بود به طور کامل تصحیحات را اعمال کنند در نتیجه خود این اثرات باقیمانده یکی از منابع نوفه هستند.

با استفاده از تحلیل نوفه سری‌های زمانی می‌توان مقادیر نوفه متناظر با تعدادی از این منابع را محاسبه و راه‌های کاهش آنها را ارائه داد. نوفه‌های سفید با افزایش بسامد نمونه برداری کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کنند ولی نوفه‌های رنگی با افزایش تعداد مشاهدات تغییر نمی‌کنند یا کاهش زیادی نمی‌یابند (Williams, 2004).

۴-۲- تشخیص نوفه‌های موجود در سری زمانی و محاسبه مقادیر دامنه آنها

در تحلیل نوفه سری‌های زمانی فرض می‌شود که $\varepsilon_x(t_i)$ (رابطه ۲) به صورت ترکیب خطی از متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع یکنواخت $\alpha(t_i)$ (Identical Distribution) و دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی وابسته $\beta(t_i)$ باشد یعنی (Williams, 2003):

$$\varepsilon_k(t_i) = a\alpha(t_i) + b_k\beta(t_i) \quad (4)$$

که در آن ثابت‌های $a, b_{k \neq 0}$ به ترتیب دامنه‌های نوفه رنگی و نوفه سفید و k توان طیفی هستند. ماتریس واریانس - کواریانس اندازه‌گیری‌های $x(t_i)$ در این حالت به صورت زیر است:

$$C_x = a^2 I + b_k^2 J_k \quad (5)$$

که در آن I یک ماتریس یکه و J_k ماتریس واریانس - کواریانس برای نوفه رنگی است. در تحلیل نوفه به روش برآورد بیشینه احتمال، ماتریس واریانس - کواریانس J_k متغیرهای تصادفی $x(t_i)$ با استفاده از ماتریس تبدیل T بر اساس بردار متغیرهای تصادفی d که مستقل بوده و دارای توزیع یکنواخت می‌باشند، ایجاد می‌شود. یعنی (Williams, 2003):

$$x = T \cdot d \quad (6)$$

با استفاده از قانون انتشار خطاها ماتریس واریانس - کواریانس J_k را می‌توان به صورت زیر حساب کرد:

$$J_k = T \cdot C_d \cdot T^T \quad (7)$$

که در آن C_d ماتریس واریانس - کواریانس بردار متغیرهای تصادفی d بوده

همراه خطای برآورد تک‌تک این کمیت‌ها برآورد کند. ولی به علت این که استخراج همزمان تمامی پارامترهای موجود در سری زمانی نیازمند حافظه رایانه‌ای زیاد می‌باشد، در نتیجه باعث کاهش سرعت محاسبات می‌شود و بهتر است ابتدا مقادیر شیفته‌ها (اگر موجود باشند)، پارامترهای مربوط به حرکت‌های پیرودییک (مثلاً دامنه حرکت‌های فصلی) برآورد شوند سپس انواع نوفه به همراه دامنه آنها تعیین شوند، با این کار سرعت محاسبات زیاد می‌شود. در جدول ۱ نتایج حاصل از روش بیشینه احتمال برآورد دامنه‌های نوفه به همراه خطای برآورد آنها آورده شده است.

۴-۳- محاسبه و بررسی اثر انواع نوفه بر سرعت‌های به دست آمده از سری‌های زمانی

۴-۳-۱- محاسبه سرعت

با استفاده از روش کمترین مربعات خطی که در بخش ۳-۴ توضیح داده شد، از طریق برازش یک خط (Linear trend) می‌توان سرعت ایستگاه‌ها را محاسبه کرد. پس با استفاده از برآورد کمترین مربعات خطی خواهیم داشت (Williams, 2003):

$$\hat{x}(t_i) = \hat{x}_0 + \hat{r}^T t_i \quad (17)$$

که مقادیر r ، x_0 به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\hat{v} = \begin{bmatrix} \hat{x}_0 \\ \hat{r} \end{bmatrix} = [A^T C_x^{-1} A]^{-1} A^T C_x^{-1} x \quad (18)$$

که در آن A ماتریس ضرایب معادلات مشاهدات، C_x ماتریس واریانس-کواریانس اندازه‌گیری‌ها، x بردار مشاهدات است. با استفاده از قانون انتشار خطا می‌توان نوشت (Williams, 2003):

$$C_{\hat{v}} = (A^T C_x^{-1} A)^{-1}; C_x = a^2 I + b_k^2 J_k \quad (19)$$

۴-۳-۲- محاسبه اثر نوفه سفید بر روی سرعت ایستگاه‌ها

در رابطه ۵ و ۱۹ اگر تنها نوفه سفید داشته باشیم آنگاه $b_k = 0$ خواهد بود در نتیجه:

$$C_{\hat{v}} = \begin{bmatrix} \sigma_{x_0}^2 & \sigma_{x_0 r} \\ \sigma_{x_0 r} & \sigma_r^2 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n t_i^2 & -\sum_{i=1}^n t_i \\ -\sum_{i=1}^n t_i & n \end{bmatrix}}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left[\sum_{i=1}^n t_i \right]^2} \Rightarrow \quad (20)$$

$$(\sigma_{\hat{r}}^2)_{wm} = \frac{12 \times a^2}{n \times T^2}; n \geq 2 \quad (21)$$

$$T = \begin{bmatrix} \Delta T_1 & \Delta T_1 & \Delta T_1 & \dots & \Delta T_1 \\ \Delta T_1 & \Delta T_2 & \Delta T_2 & \dots & \Delta T_2 \\ \Delta T_1 & \Delta T_2 & \Delta T_3 & \dots & \Delta T_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta T_1 & \Delta T_2 & \Delta T_3 & \dots & \Delta T_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

- اگر نوفه لرزان داشته باشیم، ماتریس واریانس-کواریانس به صورت زیر تعریف می‌شود (Williams, 2003):

$$C_x = J_{-1} = \left[\left(\frac{3}{4} \right)^2 \times \frac{24I - J_0}{12} \right]_{n \times n} \quad (13)$$

که در آن J_0 یک ماتریس متقارن بوده و اجزای (i, k) آن به صورت زیر

$$J_0 = \begin{cases} 0 & ; i=k \\ \frac{\log(k-i)}{\log 2} + 2 & ; i < k \end{cases} \quad (14)$$

مطالعات زیادی نشان داده است که نوفه‌های موجود در سری‌های زمانی ترکیبی از نوفه سفید و نوفه قانون توان است (Hollenstein, 2005; Williams, 2003). با استفاده از برآورد بیشینه احتمال نوع و دامنه این نوفه‌ها به همراه دقت برآورد دامنه آنها به دست می‌آید (Williams, 2003).

$$likelihood(\hat{v}, C_x) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} \times |C_x|^{1/2}} \exp(-0.5 \hat{v}^T C_x^{-1} \hat{v}) \quad (15)$$

که در آن C_x ماتریس واریانس-کواریانس اندازه‌گیری‌ها و v مقادیر باقیمانده سری زمانی بعد از حذف روند نهایی (سیگنال) و n تعداد اندازه‌گیری‌هاست. برای ساده‌تر شدن فرم مسئله از طرفین در مبنای طبیعی لگاریتم می‌گیریم (Williams, 2003):

$$MLE = \ln[likelihood(\hat{v}, C_x)] = -1/2 [\ln(|C_x|) + \hat{v}^T C_x^{-1} v + n \ln 2\pi] \quad (16)$$

در داخل ماتریس پارامترهای مربوط به نوفه‌های موجود در سری زمانی نهفته است. در این روش پارامترهای نوفه به گونه‌ای برآورد می‌شوند که تابع چگالی احتمال به ازای آنها بیشینه شود. پس از حل، انواع نوفه به همراه دامنه آنها و انحراف از معیار دامنه آنها به دست می‌آیند. البته روش برآورد بیشینه احتمال دارای این توانایی است که سری‌های زمانی را یکباره شناخته و مقادیر شیفته‌های احتمالی ایجاد شده در سری‌ها، حرکت‌های پیرودییک موجود در سری‌های زمانی، سرعت ایستگاه‌ها و انواع نوفه و مقادیر دامنه آنها را به

۴-۳-۳- محاسبه اثر نوفه تصادفی بر روی سرعت ایستگاه‌ها

می‌آیند. این مسئله برای سری‌های زمانی ایستگاه‌های مورد استفاده در پروژه انجام شده و نتایج آن در جداول ۱ آورده شده است.

اگر در سری‌های زمانی تنها نوفه تصادفی موجود باشد آنگاه در رابطه ۵ و ۱۹، $a = 0$ خواهد بود در نتیجه (Williams, 2003):

$$C_y^{-1} = A^T J_2^{-1} A = b^2 \frac{n-1}{T} \begin{bmatrix} 1 & t_1 \\ t_1 & C_{22} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$C_{22} = t_n^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} t_i^2 - 2 \sum_{i=1}^{n-1} (t_i, t_{i+1})$$

پس از معکوس کردن C_y^{-1} در رابطه ۲۲ واریانس \hat{r} برابر است با:

$$(\sigma_{\hat{r}}^2)_{rv} = \frac{b^2}{(n-1) \Delta T} = \frac{b^2}{T} ; n \geq 2 \quad (23)$$

۴-۳-۴- محاسبه اثر نوفه لرزان بر روی سرعت ایستگاه‌ها

۵- نتیجه‌گیری
در سری‌های زمانی ایستگاه‌های دائم GPS به علت پیوسته بودن مشاهدات، تغییرات ناگهانی ایجاد شده در سری زمانی، مانند اثرات ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی مانند زمین‌لرزه و یا آتشفشان، در منطقه مورد مطالعه و یا مناطق اطراف آن، همچنین تمامی تغییراتی که در موقعیت و ساختار ایستگاه ایجاد می‌شود مانند تعویض آنتن ایستگاه ثبت می‌شود و مقدار آنها را می‌توان به سادگی محاسبه کرد.

برای محاسبه اثر نوفه لرزان بر روی سرعت هنوز رابطه تحلیلی مشخصی وجود ندارد و از مدل‌های عددی استفاده می‌شود. یکی از این مدل‌ها به صورت زیر است (Williams, 2003):

$$(\sigma_{\hat{r}}^2) \cong \frac{9b_1^2}{16\Delta T(n^2-1)} \quad (24)$$

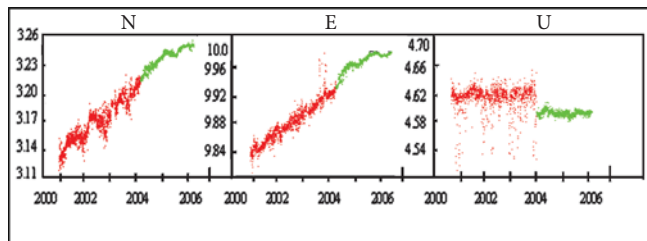
- تغییرات فصلی ناشی از تغییر شرایط آب و هوایی در فصول مختلف سال، به وضوح در رفتار سری‌های زمانی برخی ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود که می‌توان تصحیح ناشی از آن (حذف بخش پرریودیک از سری زمانی) را در محاسبه آهنگ جابه‌جایی اعمال کرد.

که در آن b_1 دامنه نوفه لرزان و n تعداد اندازه‌گیری‌ها و ΔT فواصل نمونه‌برداری است. بعد از تحلیل نوفه ماتریس C_x به دست می‌آید سپس با استفاده از رابطه ۱۸ که در قسمت ۴-۳-۱ مقادیر جدید سرعت‌ها (سرعت‌های بعد از تحلیل نوفه) به دست می‌آیند. در محاسبه سرعت جدید ایستگاه‌ها با استفاده از روش برآورد بیشینه احتمال یک مدل چند پارامتری به سری‌های زمانی برازش داده می‌شود. به همین منظور سری‌های زمانی ایستگاه‌های مختلف را پس از حذف مشاهدات اشتباه از طریق آزمون سه سیگما، به عنوان داده‌های ورودی وارد این نرم‌افزار کرده و پس از پردازش به روش بیشینه احتمال، سرعت ایستگاه‌ها و دامنه‌های نوفه به همراه خطای آنها به دست

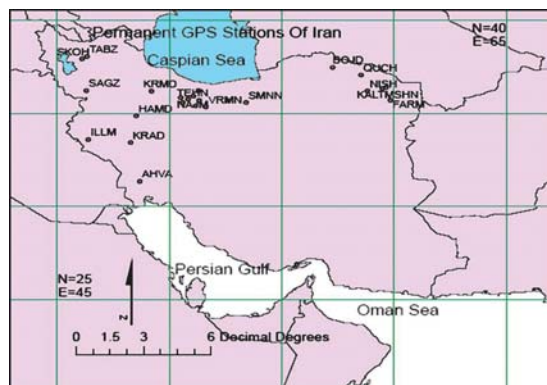
- در استفاده از سری‌های زمانی ایستگاه‌های دائم GPS باید تحلیل نوفه انجام شود، در غیر این صورت، نتایج به دست آمده به دور از واقعیت خواهند بود.
- پس از تحلیل نوفه در مقدار سرعت تفاوت زیادی به وجود نمی‌آید ولی انحراف معیار سرعت‌ها در حدود ۸ برابر تغییر پیدا می‌کند.
- بدون تحلیل نوفه انحراف از معیار سرعت ایستگاه‌ها ۸ برابر نادیده گرفته می‌شود (ایستگاه تهران که جزو ایستگاه‌های IGS است).
- مقدار نوفه سفید در مؤلفه ارتفاعی بیشتر از مقدار آن در مؤلفه‌های مسطحاتی می‌باشد.
- مقدار نوفه لرزان در مؤلفه ارتفاعی بیشتر از مقدار آن در مؤلفه‌های مسطحاتی است.

جدول ۱ - نتایج حاصل از تحلیل نوفه با استفاده از روش بیشینه احتمال برای ایستگاه تهران

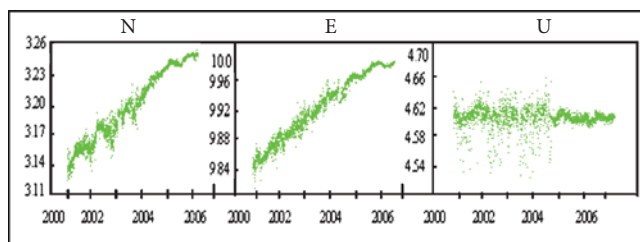
ایستگاه		دامنه نوفه سفید (mm)	دقت دامنه نوفه سفید (mm)	دامنه نوفه Flicker (mm/yr ^{0.25})	دقت دامنه نوفه Flicker (mm/yr ^{0.25})
tehn	N	3.2813	+/- 0.1437	13.4362	+/- 0.6732
	E	4.1024	+/- 0.1842	16.7249	+/- 0.8658
	U	7.8838	+/- 0.3799	28.2841	+/- 1.9370



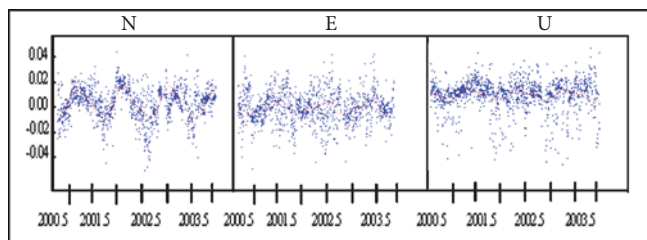
شکل ۲- سری‌های زمانی ایستگاه تهران، محور قائم بیانگر رقم یکان مؤلفه‌های مختصات بر حسب متر و محور افقی بیانگر زمان بر حسب سال



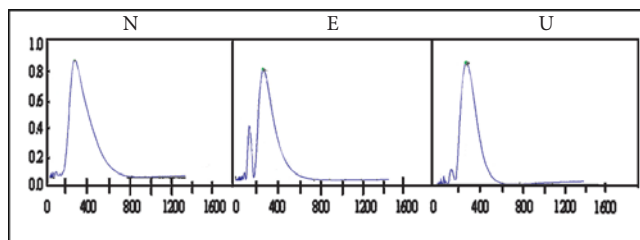
شکل ۱- ایستگاه‌های دائم GPS مورد استفاده در پروژه



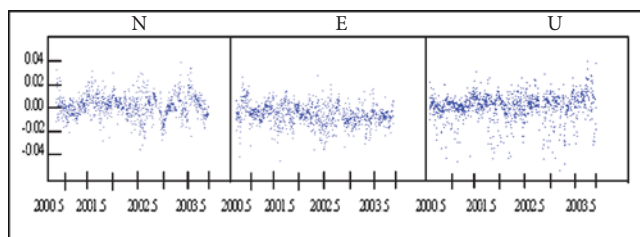
شکل ۳- سری‌های زمانی ایستگاه تهران بعد از حذف اثر تعویض آنتن و گیرنده، محور قائم بیانگر رقم یکان مؤلفه‌های مختصات بر حسب متر و محور افقی بیانگر زمان بر حسب سال



شکل ۵- بخش اول سری زمانی ایستگاه tehان بعد از حذف روند خطی و برازش یک منحنی پرریودیک، محور قائم بر حسب متر و محور افقی بر حسب سال



شکل ۴- تحلیل طیفی سری زمانی ایستگاه tehان محور قائم بیانگر دامنه بهنجار شده و محور افقی بیانگر پریرود زمانی بر حسب روز



شکل ۶- بخش نوبه سرهای زمانی قسمت اول ایستگاه tehان، محور قائم بر حسب متر و محور افقی بر حسب سال

کتابنگاری

- جدیدی، آ.، نانکلی، ح.، جموری، ی.، ۱۳۸۵- ماهنامه علمی و فنی سازمان نقشه برداری کشور سال هفدهم شماره ۶ آبان ماه جموری، ی.، ۱۳۸۴- ماهنامه علمی و فنی سازمان نقشه برداری کشور، سال شانزدهم، طرح ژئودینامیک سراسری ایران و پیشرفت یکساله آن، شماره ۷۰۷ (پیاپی ۷۵) دی ماه
- روحی، ش.، ۱۳۸۵- تئوری خطاها، سازمان نقشه برداری کشور
- گزارش فنی تعیین تغییر شکل سازه‌های مهندسی و پوسته زمین، ۱۳۸۲- کمیته استانداردها، سازمان نقشه برداری کشور
- محمد کریم، م.، ۱۳۷۴- گزارش علمی و فنی ژئودزی مهندسی، آنالیز جابه‌جایی و تغییر شکل‌ها در میکروژئودزی حرکت سدها، وزارت نیرو.

References

- Abbasi, M., 1999- Comparison Of Fourier, Least Squares And Wavelet Spectral Analysis Methods, Tested On Persian Gulf Tidal Data, K.N.Toosi University Of Technology Tehran, Iran
- Beavan, J., 2005- Noise Properties Of Continuous GPS Data From Concrete Pillar Geodetic Monuments In New Zealand And Comparison With Data From U.S Deep Drilled Braced Monuments, Institute Of Geological and Nuclear, Lower Hutt, New Zealand.
- Department Of Land Surveying and Geo-Informatics Hong Kong Polytechnic University, Hong kong, China, 8 July 2004, Recent Sea Level Variations In Southern China From Tide Gauge Observations, p.126-136
- Hollenstein, C.H., Geiger, A., Kahle, H.G. & Veis, G., 2005- CGPS Time- Series And Trajectories Of Crustal Motion Along The West Hellenic Arc, Geodesy And Geodynamics Lab, Institute Of Geodesy And Photogrammetry. ETH/19 .
- jamour, y., 2004 - University Montpellier II, December, Contribution De la Geodesie (GPS et Nivellement) a L'etude De la 4 Deformation Tectonique et De l'alea Sismique Sur La Region De Teheran (Montagnes De l' Alborz, Iran).
- Simon, D. P., Williams, Norman, F. & Teferle, 2004 - CGPS Coordinate Time Series Analysis Strategy .
- Vanicek, P., 1971- Further Development And Properties Of The Spectral Analysis by Least Squares. Astrophysics And Space Science 12, pp, 10-73
- Williams, 2003- The Effect Of Coloured Noise On The Uncertainties Of Rate Estimated From Geodetic Time Series, J. Geodesy, doi:10.1007/s00190-002-0283-4.