

پیشنهاد استفاده از مشاهدات GPS به منظور آنالیز جابجائی سکوهای حجیم دریائی در برابر نیروهای باد و توفانهای دریائی

ابوالفضل غلامعلی، دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروگرافی، دانشگاه تهران

a.gholamali@gmail.com

عبدالحسین حاجی زاده دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروگرافی، دانشگاه تهران

Hajizadeh6331@gmail.com

سید محمد سید اردکانی، دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله دانشگاه تهران

seyyedardakani@yahoo.com

مرضیه ثمره هاشمی، کارشناس ارشد سازه های آبی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

Samareh.hashemi@gmail.com

علی شیخ بهائی، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های دریائی، دانشگاه هرمزگان

Ali.sheikhbahaei@gmail.com

چکیده

در این مقاله روش استفاده از GPS جهت نمایش تغییرات مسطحاتی سازه‌های عظیم دریائی ناشی از نیروی باد و توفان تشریح شده که اساس آن بر مبنای آنالیز سری زمانی مشاهدات GPS می باشد. جابجائی‌هایی با فرکانس پائین، توسط GPS قابل تشخیص بوده، اما مشاهدات ناشی از آن نویزآلود هستند. بهبود نسبت سیگنال به نویز، توسط روش‌های مختلف حذف و کاهش نویز قابل حل می‌باشد. همچنین مدل‌سازی سری‌های زمانی مشاهدات GPS، جهت تشخیص عکس-العمل‌های جزئی سازه در مقابل نیروی باد، بیان شده است. جهت تشخیص بردار جابجائی، الگوریتم فیلترینگ تغییرات ناگهانی و نویزهایی با فرکانس پائین و آنالیز طیفی جابجائی سازه به کار گرفته شده است. مشاهدات GPS در دریا دارای خطاهائی نظیر چندمسیری و جهش فاز می باشد که روش‌هایی جهت حذف و کاهش این خطاها نیز ارائه شده است.

کلمات کلیدی: جابجائی سازه، GPS، فیلترینگ، باد و توفان دریائی

۱- مقدمه

. به منظور جلوگیری از تخریب سازه‌ها توسط عوامل طبیعی از جمله باد و توفان‌های مهیب، بایستی ساختار مهندسی این گونه سازه‌ها در مقابل نیروهای خارجی دارای مقاومت و پایداری بالایی باشند. لازمه این امر، توانایی تشخیص میزان دوران و شیفت مسطحاتی و ارتفاعی سازه، متناسب با نوع سازه از طریق تجهیزات دقیق و قابل اطمینان می‌باشد. بررسی پیوسته تغییرات و جابه‌جایی‌های سازه، برای متخصصان امکان مقایسه بین فاز مطالعاتی و اجرایی را فراهم می‌آورد و آن‌ها را در بررسی نوع ساختار مهندسی سازه راهنمایی می‌نماید. مانیتور کردن تغییرات سازه به مدت طولانی، می‌تواند جهت بدست آوردن آنامولی‌های تغییر شکل سازه مورد استفاده قرار گیرد و رفتار سازه از لحاظ عادی یا غیرعادی بودن وضعیت نیروهای خارجی وارد بر آن، بررسی گردد. نمایش رفتار دینامیکی سازه‌های عظیم، به طور کلی بر مبنای اندازه‌گیری‌های بدست آمده از شتاب‌سنج و بادسنج‌های نصب شده در بام سازه استوار است.

باتوجه به این که GPS یک منبع غنی اخذ اطلاعات فنی و محاسبه مختصات می‌باشد و باتوجه به محدودیت‌های شتاب‌سنج، علاقه‌مندی بیشتری به سمت گسترش روش‌هایی که به منظور تعیین فرکانس‌های پائین عکس‌العمل سکوها‌های بلند در مقابل نیروهای خارجی، از متدهای نوینی همچون اطلاعات اخذ شده از GPS استفاده می‌کنند، وجود دارد. اما از سوی دیگر، در جابجائی‌های بدست آمده از GPS، سیگنال‌های جابجائی حقیقی در مقایسه با نویزهای موجود در سیگنال، ضعیف هستند (نسبت سیگنال به نویز پائین)، و بایستی به روش‌های مختلف و با استفاده از فیلترهای مختلف این نویزها را از مشاهدات رفع نمود. یکی از مسائل پیچیده از لحاظ مهندسی، اندازه‌گیری دینامیکی جابجائی نسبی بین طبقات ساختمان به طور مستقیم، می‌باشد که در صورت استفاده از GPS، در سازه‌های حجیم، می‌توان مقدار این جابه‌جایی‌ها را با دقت بسیار خوبی به دست آورد. (شکل ۱)

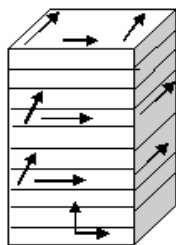
به علت محدودیت GPS از نظر نرخ نمونه برداری (کمتر از ۲۰ هرتز)، در محاسبه جابجائی طبقات پایین سازه از آن استفاده نمی‌شود، بلکه تنها از GPS در بالاترین سقف سازه استفاده می‌شود.

دقت مشاهدات GPS از نظر مسطحاتی $\pm 1\text{ cm}$ و از نظر ارتفاعی $\pm 2\text{ cm}$ می‌باشد [1].

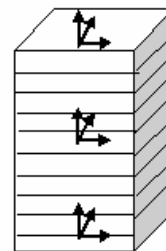
پس برای اندازه گیری جابجائی دینامیکی بین طبقات، از دستگاه شتاب‌سنج استفاده می‌شود که با استفاده از تکنیک‌ها و نیروهای فیزیکی و قوانین نیرو، میزان جابجائی را از طریق شتاب محاسبه شده می‌توان به دست آورد که مزیت این کار تسهیل در بدست آوردن دریفت طبقه می‌باشد.

سپس تمام مشاهدات از طریق سرویس‌های اینترنتی و پردازش‌های مقدماتی، می‌تواند به صورت

آنی در اختیار کاربران قرار گیرد. (شکل ۲)



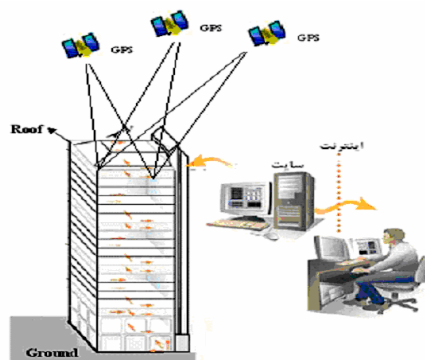
(ب)



(الف)

شکل ۱ : الف) نمائی از سیستم مختصات در قسمت‌های مختلف ساختمان ، ب) نمائی از

بردارهای جابجائی ساختمان در مقابل نیروی باد به کمک GPS و شتاب‌سنج



شکل ۲- نمایی از یک سیستم محاسبه جابه‌جایی‌های سازه تحت تأثیر نیروهای خارجی به کمک

GPS

واکنش سکو در بارگذاری زیاد شامل سه مولفه است:

۱- مولفه استاتیکی ناشی از میانگین نیرو

۲- مولفه شبه استاتیکی ناشی از نوسانات نیروی فرکانس پائین

۳- مولفه تشدید ناشی از نوسانات نیروی نزدیک به سکو (دومین مد فرکانس طبیعی)

منابع نیروی خارجی اعمال شده به سازه شامل: بادهای، حرکت شناورهای عبوری، سیل و حرکات ارتعاشی ناشی از زلزله دریائی می باشند. بنابراین ضروری است که یک سیستم برای نمایش رفتار دینامیکی سازه ها برای تعیین فرکانسهای طبیعی آنها و کاراکترهای میرائی سازه و همچنین نمایش پیوسته تغییر شکل ساختمان ارائه شود.

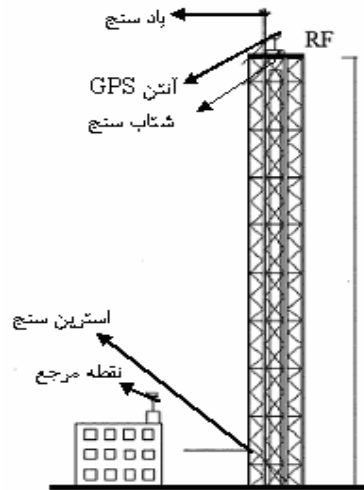
به طور کلی تاکنون، مانیتورینگ واکنش دینامیکی سکوها و برای ارزیابی میزان تغییر شکل و تخریب سازه، براساس اندازه گیری های حاصل از سنسورهای شتاب سنج نصب شده روی سازه انجام می شده است.

پردازش همزمان دوگانه ای روی داده های شتاب سنج و GPS به منظور دستیابی به جابجائی های نسبی لازم می باشد و راهی برای رسیدن به جابجائی های استاتیک و شبه استاتیک، با استفاده از شتاب سنج ها وجود ندارد. بنابراین، پیشنهاد می شود که از سنسورهای شتاب سنج به همراه GPS برای بهره گیری بهتر از مزایای هر کدام از این وسایل استفاده شود [2]. از GPS برای به دست آوردن مستقیم جابه جایی استفاده می شود. در دهه اخیر پیشرفت های مهمی در کارهای با دقت بالا و همچنین افزایش دقت تعیین موقعیت به کمک GPS، به وجود آمده است. به عنوان مثالی از یک سیستم نوین، پس از اخذ اطلاعات مشاهداتی، این اطلاعات برای پردازش از طریق لینک های ارتباطی گیرنده مرجع به گیرنده نمایش دهنده فرستاده خواهد شد. این سیستم ها معمولاً تحت عنوان سیستم های کینماتیکی آنی (RTK) شناخته می شوند و استفاده از GPS علاوه بر RTK، برای بسیاری کاربردها از قبیل نقشه برداری مهندسی و نمایش تغییرات ساختمانی میسر است [3]. اگرچه GPS راه حل های آنی را پیش رو می گذارد، ولی دارای محدودیت های خاص خود می

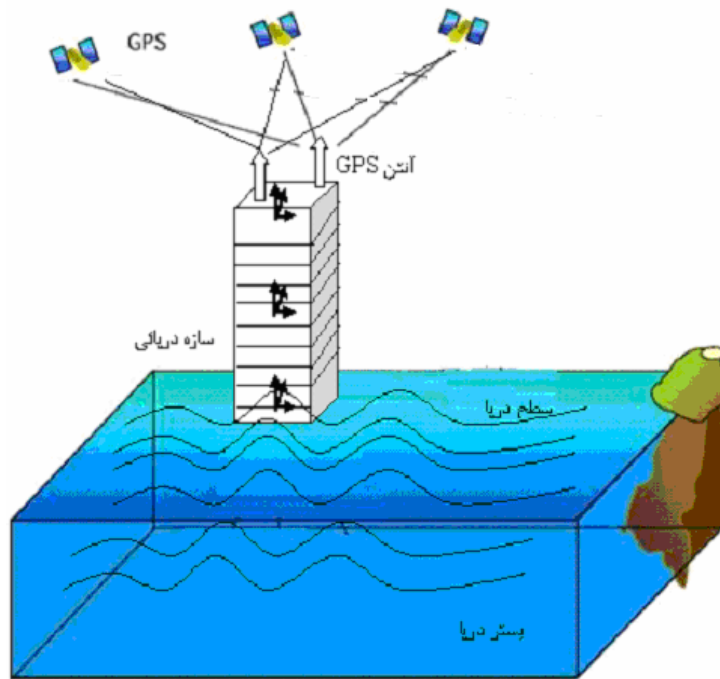
باشد. برای مثال مشکل اصلی تعیین موقعیت اصلی این است که دقت اندازه گیری می تواند تحت تاثیر خطای چند مسیری قرار گیرد و کیفیت مختصات به دست آمده از GPS به شدت به هندسه ماهواره ها بستگی دارد. به هر حال مشاهدات GPS و شتاب سنجها معمولاً به صورت مجزا آنالیز می شوند. تکنولوژی شتاب سنجها و GPS مکمل یکدیگرند، زیرا که مشاهداتشان از نظر تئوری بوسیله قانون حرکت مرتبط می شوند. به هر حال به علت نویز سنسور، مشاهدات به طور مستقیم از طریق انتگرال گیری یا دیفرانسیل گیری ساده قابل انتقال نیست. بنابراین بایستی متدی برای غلبه بر این مشکل در عمل اتخاذ شود، طوری که نمایش جابه جایی ساختمانها عملی گردد.

۲- سنسورهای شتاب سنج و GPS برای نمایش و بازبینی تغییر شکل

یک سیستم مرکب از GPS و شتاب سنج را می توان روی یک سکو، قرار داد. برای بررسی تغییر شکل به صورت پیوسته، در بالای برج یک آنتن GPS به همراه شتاب سنج و یک بادسنج نصب می شوند. آنتن دیگر GPS بالای ساختمان مستحکم دیگری با ارتفاع کمتری نسبت به ساختمان اول و به عنوان یک نقطه مرجع با فاصله معینی از ساختمان بلند(برج) نصب می شود. علاوه بر این استرین سنجها، برای اندازه گیری استرینها، در پایه برج نصب می شوند (شکل ۳ و ۴). در اینجا می توان از یک سیستم مختصات محلی برای نمایش جابه جایی سازه استفاده کرد. بایستی ذکر شود که موقعیت مرجع بایستی ایده آل باشد و زاویه ارتفاعی پوشش (mask elevation angle) و شرایط گیرندهها نسبت به هم بایستی مناسب باشند. پس مجموعه اطلاعاتی که در این حالت مورد استفاده قرار میگیرند دو دسته اند: مشاهدات GPS و مشاهدات شتاب سنجها. این دو مجموعه مشاهدات بدین دلیل انتخاب می شوند که ساختمانهای بلند و سبک و انعطاف پذیر، بیشتر در مقابل نیروی ارتعاشی مقاومند و سکوهای سنگین، از استقامت بیشتری در برابر نیروی باد برخوردارند. پس در طراحی سازه های مرتفع، بایستی این دو ویژگی کاملاً متناقض را مد نظر قرار داد.



شکل ۳-نمایی از به کارگیری همزمان GPS و شتابسنج در یک سازه عظیم



شکل ۴ - نمایی از کاربرد GPS در محاسبه جابجایی سازه های دریایی در برابر باد و توفانهای

دریائی

۲-۱- عکس‌العمل سازه‌های بلند نسبت به نیروهای ناشی از باد و طوفان‌های شدید باد:

واکنش یک سازه نسبت به باد به طور کلی شامل سه مولفه است :

۱- مولفه استاتیک ناشی از میانگین نیروی باد

۲- مولفه شبه استاتیک ایجاد شده بوسیله نوسانات نیروی باد با فرکانس پائین باد

۳- مولفه تشدید ایجاد شده بوسیله نوسان نیروی باد نزدیک سازه

تاکنون هیچ سنسور به تنهایی نتوانسته است همه اطلاعات مورد نیاز برای آنالیز جابه‌جایی رابه تنهایی فراهم کند. از سنسور GPS بیشتر اطلاعات مورد نیاز در حیطه فرکانس‌های پائین و از سنسورهای شتاب سنج بیشتر اطلاعات در مورد فرکانس‌های بالا را می‌توان به دست آورد. نتیجه اینکه هر دو مشاهده دارای نقص اطلاعات هستند. دستیابی به اطلاعات کامل در مهندسی بسیار حائز اهمیت است، پس با استفاده همزمان GPS و شتاب‌سنج می‌توان سیستمی را ایجاد کرد که همه اطلاعات و فرکانس‌های مدنظر را دارا باشد.

۳- عکس‌العمل ساختمان‌های بلند در مقابل نیروی ناشی از باد

عکس‌العمل سازه‌های بلند در مقابل نیروهای جانبی ناشی از باد به وسیله معادله تعادل نیرو $L[R(h,t)] = P(h,t)$ بیان می‌شود. $L[\square]$ یک اپراتور خطی است که بر روی بردار جابجائی $R(h,t)$ عمل می‌کند. این فرمول فرض می‌کند که تغییرات نیروها در بالای سازه‌ها به صورت آرام و ملایم صورت می‌گیرد، بنابراین قوانین مکانیک محیط‌های پیوسته در مورد این مساله صادق است. در غیر این صورت یک مدل گسسته که با هر کدام از طبقات به عنوان یک واحد مجزا برخورد می‌کند، مورد نیاز است. مدل پیوسته در صورتی مورد قبول است که ارتفاع ساختمان‌ها کمتر از ارتفاع مشخصه تندباد باشد. برای عوامل اغتشاشی در راستای متوسط وزش باد، این ارتفاع در حدود ۱۲۰۰ متر است. اغلب ساختمانهای انعطاف پذیر دارای یک فرکانس اساسی عکس‌العمل f_0 با پیوند $T_0 = \frac{1}{f_0}$ هستند. این پیوند به وسیله فرمول تجربی (Celebi et al.1998) و به صورت

$T_0 = C_b N_f$ برآورد می‌شود که در این فرمول N_f تعداد طبقات ساختمان و C_b ثابت زمان با مقدار بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ ثانیه (وابسته به انعطاف پذیری ساختمان) هستند.

دست یابی به یک قاعده کلی و یک ضابطه ایمن، نیازمند ارائه یک روش اولیه و نهایتاً بهبود روش و تکمیل آن دارد. این مهم با آنالیز اطلاعات ثبت شده از سنسورهای مختلف، واکنش های استاتیکی و دینامیکی سازه‌ها در طول توفان‌ها و سایر بادهای شدید، تحقق می‌یابد [4].

۴- قالب تئوری برای پردازش داده های GPS.

منابع اصلی نویز که باعث ایجاد انحراف جابجائی های اصلی و حقیقی مشاهدات GPS از مقدار واقعی می‌شوند، شامل نویزهای چند مسیری، تاخیرهای اتمسفری، نویزهای گیرنده و سایر عوامل هستند. نویز ناشی از چندمسیری، یک فرایند اتفاقی با میانگین صفر نیست، در عوض این نویز با یک سری تغییرات سیستماتیک می‌تواند هر روزه مشخص شود (در صورتی که موقعیت آنتن GPS را ثابت در نظر بگیریم). مشخصات آماری و اطلاعات اصولی در مورد نویزهای GPS به طور کامل شناخته شده نیستند اما توزیع طیفی این نویزها به صورت زیر است. (Han and Rizos

1997)

۱- نویز اتمسفری دارای بازه ای بین 5×10^{-5} تا 8×10^{-4} هرتز

۲- نویز چندمسیری دارای بازه ای بین 8×10^{-4} تا 10^{-2} هرتز

۳- نویز گیرنده دارای بازه ای بین 8×10^{-4} تا 2×10^{-2} هرتز

۴- نویز ناشی از سایر منابع در بازه ای بین 0 تا 10 هرتز واقع شده است.

نویزهای با فرکانس بالاتر از فرکانس نایکوست ۴ هرتز (با نرخ نمونه برداری ۸ هرتز) می‌توانند برطرف شوند و این نویزها مربوط به فرکانسهای پائین عکس العمل ساختمانها نیستند. به علاوه داده های جابجائی GPS از داده های خام، به دست آمده از پروسه کمترین مربعات، استخراج می‌شوند که این پروسه نویزهای اصلی را در مختصات نهائی منتشر می‌نماید [5].

۵- تعریف مولفه‌های جابجائی

اجازه دهید که زمانهای نمونه برداری را با $\{T_s\} = \{t_1, \dots, t_n\}$ نمایش دهیم که در آن N_s طول سری زمانی می باشد. بردار جابجائی حاصل از GPS، $\delta_i(t_i)$ $i=1,2,\dots$ (که اندیس‌های $i=1,2,3$ سه راستای عمود برهم در سیستم مختصات کارتزین را مشخص می کند) ، می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\begin{aligned} \delta_i(t) &= d_i(t) + m_i(t) + n_i(t) + s_i(t), \\ t \in \{T_s\} &= \{t_1, \dots, t_n\} \end{aligned} \quad (1)$$

که در این رابطه ، $d_i(t)$ جابجائی واقعی، و $m_i(t)$ نویز بافرکانس پائین که نویز چندمسیری نامیده می شود، $n_i(t)$ اتفاقی از منابع مختلف، $\delta_i(t)$ نمایش دهنده پالسهای متناوب (عدم پیوستگی در سیگنال) که ناشی از عوامل مختلف مانند قطع ارتباط ماهواره گیرنده است ، می باشند.

از آنجائی که cross correlation بین جابجائی های قائم را بررسی نکرده ایم ، ما اندیس $\{i\}$ را در معادله ۱ وارد نموده ایم. در صورتی که مدت زمان مشاهدات در مقایسه با مقیاس زمانی نویزهای با فرکانس پائین، کوتاه باشد، موارد زیر را انتظار داریم:

۱- $d(t)$ نمایش دهنده جابجائی واقعی است که از فرکانس طبیعی سازه مهندسی پیروی می کند.

۲- $m(t)$ به عنوان یک ترند non stationary ظاهر می شود.

۳- $n(t)$ نمایش دهنده سیگنالهای non stationary است. در نهایت $s(t)$ شامل یک پالس

منفرد خارج از کنترل است. جابجائی هائی $\delta(t)$ استخراج شده از GPS ، از معادله (۱) بدست

می آید. این معادله تحت تاثیر اجزای بدون تغییر از قبیل $m(t)$ و $s(t)$ قرار دارد.

جابجائی واقعی $d(t)$ ، دارای دامنه به مقدار قابل توجهی کوچکتر از دامنه اجزای بدون تغییر است

که اجزای با فرکانس پائین واکنش ساختمان، که با نویزهای با فرکانس پائین هم پوشانی دارند را

شامل می شود [6].

۶- مراحل آنالیز داده‌ها:

روش پیشنهادی برای آنالیز سری زمانی مشاهدات GPS شامل سه مرحله ذیل می باشد:

۱- فیلتر کردن پالسهای خارج از کنترل^{۸۶}، برش و کوتاه سازی و شیفت جابجائی های بدست

آمده از مشاهدات GPS

۲- فیلتر کردن نویزهای با فرکانس پائین

۳- آنالیز واریوگرام^{۸۷} باقیماندهها

۴- آنالیز طیفی

مرحله اول شامل تشخیص و حذف کردن پالسهای خارج از کنترل می باشد. مرحله دوم با زدودن نویزهای با فرکانس پائین تحقق می یابد. تلفیق این دو مرحله، سیگنالهای غیر ساکن را از $\delta(t)$ رفع می کند و سیگنال های ضعیف و اجزاء بدون تغییر، که شامل جابجائی حقیقی $d(t)$ و نویز تصادفی هستند، را بازیابی می کند. در سومین مرحله، بدون تغییر (stationary) بودن سیگنالها، با استفاده از توابع واریوگرام آزمایشی (yaglom 1987) مورد بررسی قرار می گیرد و همبستگی مشخصه نویز بدست می آید. در چهارمین مرحله، فرکانس ساختمان با به کارگیری روش های استاندارد آنالیز طیفی، تخمین زده می شود (press et al.1992).

اجزاء مختلف سیگنال برآورده شده که از داده ها بدست می آید با علامت (^) نمایش داده شده اند، پالس های خارج از کنترل با $\hat{\delta}(t)$ ، فرکانس های پائین و دارای تغییر برآورده شده با $\hat{m}(t)$ ، و جابجائی برآورد شده ساختمانها با $\hat{d}(t)$ نشان داده شده اند [7].

۶-۱- مرحله ۱، رفع تغییرات شدید و ناگهانی

در مرحله اول آنالیز داده ها، تغییرات ناگهانی برآورد شده، که با $\hat{\delta}(t)$ نمایش داده شده است، از داده های موقعیت GPS حذف می شود و بنابراین یک سری از جابه جایی های $\delta(t) - \hat{\delta}(t)$ به دست می آید. $\hat{\delta}(t)$ غیر ساکن است و از لحاظ آماری یک اپراتور غیر گوسین (non Gaussian) است. نوسانات بی نهایت متغیر می تواند به صورت سیستماتیک مشخص شده و حذف شوند که حذف این متغیرها موجب می شود $d(t)$ ، $n(t)$ از توزیع گوسین تبعیت نمایند و $m(t)$

⁸⁶ Out of control

⁸⁷ variogram

یک متغیر کران دار باشد. سیگنال فیلترشده با حذف کردن قسمت‌هایی از سری‌ها که $\hat{\delta}(t)$ رخ داده است، کوتاه می‌شود. از این رو طول پالس سیگنال‌های خارج از کنترل در مقایسه با طول سری‌های ورودی بسیار کوچک‌تر است. حذف کردن پالس‌ها، به طور کلی، ماهیت آماری جابجائی-های برآورد شده GPS را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. عمل فیلترینگ پالس‌های خارج از کنترل، بر مبنای این فرض بنا نهاده شده است که قسمت‌های Stationary سیگنال تقریباً دارای توزیع آماری گوسین (Gaussian) هستند.

۶-۱-۱- روش اصولی برای حذف کردن پالس‌های خارج از کنترل

یک تابع فیلتر کننده $g^{(k)}(t)$ از مرتبه K ام برای حذف کردن $\hat{s}(t)$ از جابجائی‌های به دست آمده از GPS با استفاده از یک فرآیند تکرار شونده (iterative) باید تعریف شود. تابع از مرتبه صفرنمایشگر جابجائی‌های استخراج شده از GPS است، بنابراین $g^0(t) = \delta(t)$ می‌باشد. برای تشخیص دادن نوسانات با استفاده از یک روش آماری غیرگوسین، ضابطه بیشترین انحراف از میانگین به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$|g^{(k)}(t) - \langle g^{(k)}(t) \rangle| > 4Std [g^{(k)}]$$

که در آن $Std [g^{(k)}]$ انحراف معیار $g^{(k)}$ است. به جای انحراف از معیار، سایر برآوردهای پراکندگی، از قبیل انحراف مطلق میانگین یا M-estimator می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند (mertikas 1994). توابع فیلتر کننده از مرتبه بالاتر از صفر ($k > 0$) با بکارگیری فیلتر تکرار کننده CEDM⁸⁸، که در ادامه به آنها اشاره می‌شود، بدست می‌آیند.

۱- در ابتدا مرتبه فیلتر صفر در نظر گرفته می‌شود $k=0$

۲- مقدار میانگین $\langle g^{(k)}(t) \rangle$ و وریانس جابجائی‌ها با استفاده از فرمول

$$Var [g^{(k)}(t)] = \langle [g^{(k)}(t)]^2 \rangle - \langle g^{(k)}(t) \rangle^2$$

محاسبه می‌شود.

⁸⁸ Criterion of extreme deviation from the mean

۳- مجموعه‌ای از زمان‌ها $\{T_{extr}^{(k)}\}$ که عناصر آن طبق ضابطه بیشترین پراکندگی تعیین می‌شوند، تشکیل می‌شوند

۴- اگر $\{T_{extr}^{(k)}\}$ یک مجموعه غیرتهی باشد، مرتبه فیلترینگ k یک واحد اضافه می‌شود و مقادیر اندازه‌گیری شده در زمان $\{T_{extr}^{(k)}\}$ از $g^{(k)}(t)$ با اپراتوری که در ادامه صفر می‌شود، حذف می‌شوند.

$$g^{(k)}(t) = \begin{cases} g^{(k-1)}(t) & t \notin \{T_{extr}^{(k)}\} \\ NaN & t \in \{T_{extr}^{(k)}\} \end{cases} \quad (2)$$

در معادله ۲، علامت "NaN" معرف عدم وجود عدد است و برای معرفی کردن پالس‌های خارج از کنترل استفاده می‌شود. عمل فیلترینگ سپس با بازگشت مجدد به مرحله ۲ ادامه می‌یابد.

۵- اگر $\{T_{extr}^{(k)}\}$ یک مجموعه تهی باشد، عمل فیلترینگ متوقف می‌شود. $k_{max} = k$.

۶-۱-۲- کوتاه کردن و جابجا کردن سری زمانی

سری زمانی $g^{(k)}(t)$, $k = k_{max}$ شامل ۲ بخش مجزا می‌باشد. اگر سری دارای مقادیر عددی باشد، با استفاده از یک باند از مقادیر بدون مقدار عددی جدا می‌شوند. در نظر بگیرید قسمت اول سیگنال در زمان $t_{e,1} = n_1 t_s$ قطع شود و بخش دوم سیگنال در زمان $t_{s,2} = n_2 t_s$ شروع شود. با استفاده از جابجائی ثانیه‌ها و عقب آوردن زمان می‌توان دو قسمت سیگنال را به یکدیگر متصل نمود. با استفاده از این عمل یک سری زمانی $\varphi(t)$ با طول $N = N_s + n_1 - n_2$ جانشین سری زمانی GPS می‌شود [8].

$$\varphi(t_m = m t_s) = \begin{cases} g^{(k_{max})}(m t_s) & m \leq n_1 \\ g^{(k_{max})}(m' t_s), N + n_1 - n_2 > m > n_1, m' = m + n_2 - n_1 \end{cases} \quad (3)$$

۶-۲- مرحله دوم حذف نویز با فرکانس پائین:

اجزای با فرکانس پائین از سری جایگذاری شده را می‌توان با استفاده از توابع دارای تغییرات پیوسته و هموار مدل‌سازی نمود، که این توابع می‌توانند به صورت ترکیب خاصی از توابع هارمونیک بیان

شوند. خصوصیت اصلی اجزای با فرکانس پائین این است که دارای خاصیت شبه تناوبی^{۸۹} و غیرساکن هستند، که این خصوصیات از این حقیقت که دوره تناوب توابع لزوماً در مقایسه با طول سری زمانی، کوچک نمی باشد، نشأت می گیرد. حال یک روش اصولی را برای برآورد کردن اجزای با فرکانس پائین $\hat{m}(t)$ ارائه می کنیم. اگر سری GPS جایگذاری شده را با $\varphi(t)$ نمایش دهیم، و این سری به بازه ها با طول λ تقسیم بندی شود، و λ در مقایسه با کوچکترین دوره تناوب $m(t)$ ، کوچک باشد. شیب هر تابع خطی، تغییر در هر قطعه می باشد، اما قطعه های مختلف در انتهای نقاط به هم متصل می شوند تا پیوستگی کلی را حفظ کنند. برای یک λ داده شده، جابجائی برآورد شده از GPS برای سازه مورد نظر، از کم کردن $\hat{m}(t)$ از $\varphi(t)$ به دست می آید. بنابراین

$$\hat{d}(t) = \varphi(t) - \hat{m}(t). \quad (4)$$

حال اجازه می دهیم λ نوسان و تغییر نماید و مقدار بهینه λ را که با λ^* نمایش داده شده است، با استفاده از مینیمم کردن واریانس نوسانات باقیمانده ها $\hat{d}(t)$ بدست می آید. مقدار $\lambda_{\min} = T_{\min} / 10$ در نظر گرفته می شود که T_{\min} کوچکترین دوره تناوب $m(t)$ می باشد. این ویژگی برای یک تقریب خطی از یک تابع پریودیک برقرار می باشد، مادامی که در زمان های مشابه این توابع از مقادیر خیلی کوچک از λ ، که ممکن است منجر به حذف شدن تغییرات جابجائی مربوط به فرکانسهای طبیعی ساختمانها می شود، اجتناب کنند [9].

۶-۳- تاثیر برش و شیفت سری زمانی در تشخیص فرکانسهای طبیعی

جابجائی تخمین زده شده GPS یا $\hat{d}(t)$ از یک تابع پریودیک تشکیل شده است که عکس العمل حقیقی سازه بعد از اعمال جابجائی و شیفت سری زمانی، و یک پروسه اتفاقی بدون تغییر که نمایش دهنده نویز باقیمانده ها می باشد، را در بر می گیرد. ما فرض می کنیم که تأثیر اپراتورهای

⁸⁹ quasi periodicity

برش در مرحله ۱ روی مقدار حقیقی جابه جایی $d(t)$ اعمال شده است. فرمول تبدیل فوریه سریع

(DFT) برای $d(t)$ عبارت است از

$$\bar{d}(w) = \sum_{k=0} e^{-i\omega k t_s} d(k t_s) \quad (5)$$

چگالی طیف توانی (با صرفنظر کردن از عوامل نرمال سازی غیر ضروری) با استفاده از $|\bar{d}(t)|^2$

محاسبه می شود. مقدار جابجائی حقیقی $d(t)$ می تواند با استفاده از بسط توابع هارمونیک به

صورت زیر بیان شود:

$$d(t) = \sum_{j=1}^n c_j \cos(\omega_j t + \phi_j) \quad (6)$$

با فرض این که $N_s \gg 1$ ، DFT به صورت زیر درمی آید.

$$\bar{d}(w) \approx \frac{N_s}{2} \sum_{j=1}^n c_j (\delta_{\omega, \omega_j} e^{i\phi_j} + \delta_{\omega, -\omega_j} e^{-i\phi_j}) \quad (7)$$

در این فرمول $\delta_{\omega, \omega_j} = 1$ ، اگر $\omega = \omega_j$ و در غیر این صورت $\delta_{\omega, \omega_j} = 0$ است. عملگرهای برشی و شیفت

در طول فرایند حذف پالسهای خارج از کنترل، $d(t)$ را به $d_{t-s}(t)$ تبدیل می کنند که $d_{t-s}(t)$ از

طریق فرمول زیر قابل محاسبه می باشد:

$$d_{t-s}(t) = \begin{cases} d(t) & t \leq t_{e,1} \\ d(t + \delta\tau) & t > t_{e,1} \end{cases}, \quad t = 0, \dots, N_s t_s - \delta\tau \quad (8)$$

که در این فرمول $\delta_t = t_{s,2} - t_{e,1}$ طول وقوع پالسهای خارج از کنترل می باشد. تابع $d_{t-s}(t)$

جایگزین جابجائیهای برآورد شده GPS شده است. ما فرض می کنیم که طول سریهای زمانی از

طول دوره وقوع پالسهای خارج از کنترل بیشتر است (بنابراین $\delta_t \gg N_s t_s$). برای سریهای زمانی

GPS آنالیز شده، $\delta_t / N_s t_s \approx 0.05$ می باشد. بنابراین DFT برای $\bar{d}_{t-s}(\omega)$ با استفاده از فرمول

زیر محاسبه می شود:

$$\bar{d}_{t-s}(\omega) = \sum_{k=0}^{n_1} e^{-i\omega k t_s} d(k t_s) + \sum_{k=n_1}^{N_s + n_2 + n_1} e^{-i\omega k t_s} d(k t_s + \delta\tau) \quad (9)$$

با جمع و تفریق بخش‌های اصلی سری، از $t_{e,1} = n_1 t_s$ تا $N_s t_s$ ، DFT به صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$\bar{d}_{t-s}(\omega) \approx \bar{d}(\omega) + \sum_{k=n_1}^{n_1} e^{-i\omega k t_s} d(k t_s) + \sum_{k=n_1}^{N_s} e^{-i\omega k t_s} [d(k t_s + \delta\tau) - d(k t_s)] \quad (10)$$

ترم دوم در معادله ۹ خطای شیفت و برش است که می‌تواند به صورت $\sum_{j=1}^n c_j \hat{d}_{t-s,j}(\omega)$ بیان شود. در

این رابطه $\hat{d}_{t-s,j}(\omega)$ خطای Mode از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \bar{d}_{t-s,j}(\omega) \approx & \frac{1}{2} \bar{d}(\omega) + \sum_{k=n_1}^{N_s} e^{-i\omega k t_s} \left[e^{i\omega(k t_s + \delta\tau) + i\phi_j} - e^{i\omega_j k t_s + i\phi_j} \right] + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{k=n_1}^{N_s} e^{-i\omega k t_s} \left[e^{-i\omega_j(k t_s + \delta\tau) - i\phi_j} - e^{-i\omega_j k t_s - i\phi_j} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

این ترم در فرکانس $\omega \delta\tau = 2n\pi$ صفر می‌شود که n یک عدد صحیح است. در $\omega \neq \pm\omega_j$ انطباق

متناقض و بی ربط عوامل نمائی، مانع از خطای mode شیفت می‌شود

اگر $N_s - n_1 \gg 1$ در $\omega = -\omega_j$ ، خطای شیفت $\bar{d}_{t-s,j}(\omega)$ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{d}_{t-s}(\omega) = \left(\frac{N_s - n_1}{2}\right) e^{i\phi_j} (e^{i\omega_j \delta\tau} - 1) + \frac{1}{2} (e^{-i\omega_j \delta\tau} - 1) e^{-i\phi_j} \sum_{k=n_1}^{N_s} e^{-2i\omega k t_s} \quad (12)$$

ترم دوم بعد از علامت مساوی در فرمول ۱۱، یک انطباق متناقض و بی ربط از توابع هارمونیک است

بنابراین قابل صرف نظر کردن است. ترم اول نشان دهنده Peak نمودار می‌باشد. ارتفاع هر کدام از

این قله‌ها به $N_s - n_1$ محدود می‌شود (دارای کران بالای $N_s - n_1$ می‌باشند). حال اگر $\omega = -\omega_j$

باشد برش (Truncation) و جابجائی باعث ایجاد تغییر در دامنه قله می‌شود اما هیچ تغییری در

فرکانس موقعیت طیف ایجاد نخواهد کرد

۷-مرحله ۳ - آنالیز واریوگرام

واریوگرام به عنوان یک تابع ساختاری از پروسه‌های اتفاقی $X(t)$ شناخته می‌شود که با $2\gamma_X(\tau)$

نمایش داده می‌شوند. این معادل میانگین مربع توابع صعودی $\{X(t+\tau) - X(t)\}$ با تاخیر τ

می‌باشد. در عمل نیمه واریوگرام $\gamma_X(\tau)$ به جای واریوگرام استفاده می‌شود. اگر مقادیر

$\{X(t_j = j t_s), j = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N\}$ موجود باشند، آن گاه نیمه واریوگرام با میانگین نمونه زیر محاسبه می شود:

$$\hat{\gamma}_X(\tau_p = p t_s) = \frac{A^2}{2(N-p)} \sum_{i=1}^{N-p} [X(t_i + \tau_p) - X(t_i)]^2 \quad (13)$$

سپس $\gamma_X(\tau)$ مدل تئوری بهینه ای است که می تواند به $\hat{\gamma}_X(\tau)$ (Journal and Huijbregts 1978) منطبق شود. نیمه واریوگرام $\gamma_X(\tau)$ پروسه تصادفی تصحیح شده ای می باشد که در مقدار $\tau = 0$ صفر است. اگر $X(t)$ شامل نوسانات غیرقابل حل (non-resolved) باشد، نیمه واریوگرام $\hat{\gamma}_X(\tau_p)$ ممکن است به طور ناگهانی به مقدار محدود جهش پیدا کند. اگر $X(t)$ پروسه ایستا از مرتبه دوم باشد، نیمه واریوگرام به asymptotically به سمت محدود تمایل می یابد. برای یک پروسه stationary، شناسایی $c_X(\tau) = \sigma_X^2 - \gamma_X(\tau)$ ، تعیین کردن توابع اتوکورلیشن $c_X(\tau)$ ، را از نیمه واریوگرام ممکن می سازد. جابجائی تخمین زده شده GPS یا $\bar{d}(t)$ ، یک فرکانس طبیعی منفرد را شامل می شود. بنابراین $\bar{d}(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi) + \eta(t)$ است. که در این رابطه A و φ متناظر با دامنه و فاز مد جابجائی غالب، و $\eta(t)$ نشان دهنده ترم نویز تصادفی است. این ترم شامل اندازه گیری های نویز $n(t)$ و نویزهای عددی که به وسیله اپراتورهای فیلترینگ ایجاد می شود، می باشد. سپس نیمه واریوگرام جابجائی ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\hat{\gamma}_d(\tau) = \frac{A^2}{2} [1 - \cos(\omega_0 \tau)] + \hat{\gamma}_\eta(\tau) \quad (14)$$

۸-مرحله ۴ آنالیز طیفی

آنالیز طیفی به منظور شناسائی فرکانس های طبیعی سازه و به کمک پیش بینی اغتشاشات ناشی از باد و زلزله به کار می رود. شناسائی این عوامل منجر به بهبود طراحی سازه می شود. در این مطالعه چگالی طیفی توانی با استفاده از پرودوگرام اصلاح شده استاندارد Welch's محاسبه گردیده است. در روش Welch، سری زمانی قطعه قطعه می شود و چگالی توانی طیفی با میانگین گیری از تمام

قطعه‌ها محاسبه می‌شود. بنابراین عدم قطعیت آماری پریودوگرام اولیه کاهش می‌یابد، به علاوه توابع پنجره‌ای به منظور محدود کردن تاثیر فقدان طیفی^{۹۰} استفاده می‌شود. کاهش عدم قطعیت می‌تواند با استفاده از قطعاتی که هم پوشانی دارند انجام گیرد.

۷- جمع بندی:

سنسورهای شتاب سنج و GPS روی یک سکوی بلند نصب می‌شود و مشاهدات GPS و شتاب سنج به صورت پیوسته ثبت می‌شود. طی یک توفان ویا یک زمین لرزه تغییر شکل‌هایی در سری-های زمانی مشاهدات ایجاد می‌گردد که این سری‌ها در حیطه فرکانس و زمان مورد آنالیز قرار می‌گیرند. فقط مسئله این است که مشاهدات GPS در فرکانس‌های پائین نویز دارند و مشاهدات شتاب سنج در فرکانس بالا نویز دار می‌باشند. مشاهدات بایستی به جابجائی‌ها (در حالت شتاب سنج) و به شتاب (در حالت GPS) تبدیل شوند. پس می‌توان به نقص مشاهدات GPS و شتاب سنج‌ها در بررسی تغییر شکل پی برد.

۸- نیمه‌واریوگرام^{۹۱} یک فرآیند اتفاقی با یک ترند پریودیک:

در نظر بگیرید: $X(t) = w(t) + \eta(t)$ ، که $w(t)$ یک ترند پریودیک و $\eta(t)$ یک فرآیند اتفاقی وابسته هستند. وریوگرام آزمایشی $X(t)$ به وسیله معادله ۱۲ بیان می‌شود:

$$\hat{d}_{t-s}(\omega) = \left(\frac{N_s - n_1}{2}\right) e^{i\phi_j} (e^{i\omega_j \delta \tau} - 1) + \frac{1}{2} (e^{-i\omega_j \delta \tau} - 1) e^{-i\phi_j} \sum_{k=n_1}^{N_s} e^{-2i\omega k t_s} \quad (14)$$

با استفاده از معادله $X(t)$ نیمه‌واریوگرام از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\hat{\gamma}_X(pt_s) = \gamma_{ww}(pt_s) + \gamma_{\eta\eta}(pt_s) + \gamma_{\eta w}(pt_s), \quad (15)$$

⁹⁰ spectral leakage

⁹¹ semivariogram

که در این رابطه $\gamma_{\eta\eta}$ نویز نیمه‌وریوگرام است. ترم وابستگی $\gamma_{\eta w}(pt_s)$ صفر است، هنگامی که تابع پریودی یک $w(t)$ و فرآیند اتفاقی $\gamma(t)$ غیروابسته باشند. در نتیجه، برای $N - p \gg 1$ ، ترم $\gamma_{ww}(pt_s)$ می‌تواند به صورت زیر تقریب زده شود:

$$\gamma_{ww}(pt_s) \approx \frac{1}{2T} \int_0^T dt [w(t + pt_s) - w(t)]^2 \quad (16)$$

اگر $w(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$ ، باشد محاسبه مستقیم سمت راست معادله ۱۶ منجر به ارتباط با معادله ۱۵ با نتیجه حاصله از معادله ۱۳ می‌شود.

۸- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مقاله نمایش ارائه یک روش برای استفاده از قابلیت‌های سری زمانی مشاهدات GPS به منظور تعیین عکس‌العمل ساختمان‌های بلند در برابر نیروهای ناشی از باد، و بررسی وابستگی سیگنال‌های GPS می‌باشد. در این مقاله یک فرآیند فیلترینگ که از سیگنال‌های GPS، پالس‌های منفرد به وجود آمده به دلیل قطع ارتباط بین ماهواره و گیرنده، و نویزهای بافرکانس پایین را حذف می‌نماید. همچنین نشان داده شد که سیگنال‌های فیلتر شده (جابه‌جایی‌های استخراج شده از GPS) یک فرآیند تصادفی می‌باشد که با دقت بالایی فرکانس‌های اصلی ساختمان را به گونه‌ای که در مقایسه با طیف فرکانس‌های استخراج شده از شتاب سنج معتبر باشند، استخراج می‌نماید. به عبارت دیگر، یک قسمت کوچک از جابه‌جایی‌های برآورد شده به وسیله GPS، در داخل محدوده دقت GPS می‌باشند. فرکانس‌های پایین عکس‌العمل ساختمان‌ها در طول فرآیند فیلترینگ، حذف می‌شوند. به دلیل این کمبود، عکس‌العمل ساختمان‌ها در بازه DC (بین ۰ تا ۰.۰۲ هرتز)، که به وسیله اجزای شبه آماری^{۹۲} نیروی باد به وجود می‌آیند، به وسیله فرآیند آنالیزی پیشنهاد شده در این مقاله نمی‌تواند تعیین شوند. یک روش برای رفع این مشکل در آینده شامل آنالیز چندین سری زمانی گردآوری شده از زمان‌های مختلف و شرایط مختلف نیروی باد می‌-

⁹² Quasi statistic

باشد. آنالیز یکباره ممکن است باعث به دست آوردن اجزای با فرکانس پایین "پایا"^{۹۳} در سیگنال های GPS که مستقل از شرایط و نیروهای ناشی از باد هستند، گردد. احتمالاً این اجزا متناظر با نویزهای ناشی از مولتی‌پس و سایر منابع نویزهای سیستماتیک (که به طور محسوس با زمان تغییر نمیکنند)، هستند.

۹- منابع و مراجع:

- [1]- Assimaki D, Pecker A, Popescu R, Prevost J (2003) Effects of spatial variability of soil properties on surface ground motion. *J Earthq Eng* 7(1): 1-44
- [2]- Brownjohn JMW (2005) Lateral loading and response for a tall building in the non-seismic doldrums. *Eng Struct* 27:1801- 1812
- [3]- Brownjohn JMW, Pan TC, Deng XY(2000) correlating dynamic characteristics from field measurement and numerical analysis of a high- rise
- [4]- Celebi M, Prescott W, Hudnut K, Behr J, Wilson S (1998) GPS monitoring of structures: recent advances.
- [5]- Han S, Rizos C (1997) Multipath effects on GPS in mine environments. In: Xth international congress of the int.
- [6]- Journal AG, Huijbregts CJ (1978) Mining geostatistics. Academic, London, pp 1-600
- [7]- Kijewski T, Haan F Kareem A (2001) Wind- induced vibrations.
- [8]- Li XL, Ge L, Ambikairajah E, Rizos C, Tamura Y Yoshida A (2006) Full- Scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system.
- 1. [9]- Mertikas SP (1994) The description of accuracy using conventional and robust estimates of scale.

⁹³ persistent