

Estimation of static and dynamic behavior of engineering structures with time series analysis of GPS observations, Case Study: Quds cable bridge of Ardabil

Namizadeh, R.¹  | Rastbood, A.¹  

1. Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Corresponding Author E-mail: arastbood@tabrizu.ac.ir

(Received: 4 Jan 2023, Revised: 20 Feb 2023, Accepted: 26 Sep 2023, Published online: 5 May 2024)

Summary

The behavior of engineering structures affected by dynamic and static loads are different depending on the type of design, the type of materials used in them and the operating time of the structures. These behaviors can be observed and evaluated with the time series obtained from GPS observations in the time and the frequency domains. The current study is conducted with the aim of investigating the behavior of Quds cable bridge of Ardabil, using the geodetic monitoring of the GPS system at a rate of 30 seconds. Microgeodesy network is used for static data collection and RTKLIB software with Kalman filter capability used for initial processing and time series formation. The processed results have an error of 3 mm. In order to evaluate the movement of the bridge, moving average, time average, and median filters have been used to estimate the semi-static, static, and dynamic components of the bridge movement, respectively. The results of applying the moving average filter indicate that the semi-static component is extracted with 4 mm accuracy in the East, 1 mm in the North and 2 mm in the Height directions. The RMSE between the obtained dynamic components and the short period components are 0.8, 0.1 and 4 mm in three directions E, N and H respectively. In order to extract the dominant frequencies of the bridge, the Fast Fourier Transform (FFT) method was used. Then, based on FFT, the periodogram diagram was obtained and the dominant frequencies were identified. In practice, numerical methods such as the periodogram diagram and its visual inspection were used to extract the existing dominant frequencies. A periodogram diagram presents the relation between the power spectrum and the frequency. In the next step, this diagram is used to compare the power spectrum of each frequency with its neighboring frequencies. Finally, the frequencies with a higher power spectrum were considered as the dominant frequencies. Finally, the Artificial Neural Network model (ANN) with 10 hidden layers and 10 delays was used to predict bridge deformation and the accurate evaluation of the components. The results obtained from the processing of GPS observations in the time and frequency domains indicated the least changes compared to the safety design range of the bridge behavior. Besides, the frequency analysis of the bridge movement time series and the Neural Network model, can be used to detect significant frequency changes and study the bridge performance rigidity, respectively.

Given that, since bridges are designed with a high reliability factor for static and dynamic loads more than the loads received during bridge monitoring, the natural frequencies of the bridge are extracted with the existing process with high accuracy, which can be the biases of early warnings. On the other hand, the bridge health monitoring system should be based on modern measurement methods. In the case of Quds Bridge, its complete behavioral investigation shows that the bridge is safe in its current condition and within the design limits.

In order to evaluate the frequency content other than the fast Fourier transform, it is also suggested to use short time Fourier transform and wavelet transforms.

Keywords: Bridge Movement Modeling, Structural Health Monitoring, GPS, FFT, Neural Network.

Cite this article: Rastbood, A., & Namizadeh, R. (2024). Estimation of static and dynamic behavior of engineering structures with time series analysis of GPS observations, Case Study: Quds cable bridge of Ardabil. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(1), 1-21. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.353038.1007487>

E-mail: (1) r_nami@gmx.com



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.353038.1007487>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

برآورد رفتار استاتیکی و دینامیکی سازه‌های مهندسی با تحلیل سری زمانی مشاهدات GPS، مطالعه موردی: پل کابلی قدس اردبیل

رحیم نامی‌زاده^۱ | اصغر راست‌بود^۱ ✉

۱. گروه نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: arastbood@tabrizu.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۷/۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۲/۱۶)

چکیده

رفتار سازه‌های مهندسی متأثر از بارهای استاتیکی و دینامیکی بسته به نوع طراحی، نوع مصالح به کار رفته در آنها و زمان بهره‌برداری متفاوت است. این رفتارها را می‌توان با سری‌های زمانی حاصل از مشاهدات GPS در حوزه زمانی و فرکانسی مشاهده و ارزیابی کرد. تحقیق حاضر با هدف بررسی رفتار پل کابلی قدس اردبیل با پایش ژئودتیکی توسط GPS انجام شد. شبکه میکروژئودزی برای گردآوری داده و نرم‌افزار RTKLIB برای تشکیل سری‌های زمانی مورد استفاده قرار گرفته است. برای ارزیابی حرکت پل از پالایه‌های میانگین متحرک، میانگین زمانی و میانه به ترتیب برای برآورد مؤلفه‌های نیمه استاتیک، استاتیک و دینامیک حرکت استفاده شد. با اعمال پالایه میانگین متحرک مؤلفه نیمه‌استاتیک با دقت ۴، ۱ و ۲ میلی‌متر به ترتیب در راستاهای شرق، شمال و قائم به دست آمده است. فرکانس‌های غالب حرکت پل، با استفاده از نمودار پریودوگرام حاصل از ۴ میلی‌متر به ترتیب در سه جهت شرق، شمال و قائم به دست آمده است. فرکانس‌های غالب حرکت پل، با استفاده از نمودار پریودوگرام حاصل از تبدیل فوریه سریع برآورد شدند. در نهایت مدل شبکه عصبی با تعداد ۱۰ لایه پنهان و ۱۰ تأخیر، جهت پیش‌بینی تغییر شکل پل، براساس داده‌های استخراج شده و ارزیابی مؤلفه‌های متغیر با زمان ارائه شده است. نتایج حاصل از پردازش مشاهدات GPS در حوزه‌های زمان و فرکانس کمترین تغییرات را در مقایسه با محدوده طراحی ایمنی رفتار پل قدس نشان می‌دهند. به‌منظور ارزیابی محتوای فرکانسی غیر از تبدیل فوریه سریع، استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل موجک نیز پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی حرکت پل، پایش سلامت سازه، GPS، FFT، شبکه عصبی.

۱. مقدمه

سطح ایمنی سازه می‌باشد. یکی از رویکردهای جدید، قابل‌اعتماد و در دسترس برای این امر مهم به‌همراه بهره‌گیری از توسعه علوم و فنون ژئوماتیک و دانش‌آموختگان آن استفاده از داده‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) می‌باشد که توسط کلبی در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۳ توسعه داده شد. این روش اطلاعات دقیقی از پارامترهای مؤثر در ارزیابی سلامت سازه را به‌صورت آبی اندازه‌گیری و ثبت می‌کند (ایم و همکاران، ۲۰۱۳). پل‌ها به‌عنوان نقطه اتصال زیرساخت جهانی، ملی و منطقه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار هستند

امروزه امکان‌سنجی و توجه اقتصادی سازه‌های عمرانی در فاز بهره‌برداری و نگهداری، جهت ارتقاء بهره‌وری امری اجتناب‌ناپذیر بوده و جوامع بشری که اکنون سازه‌ها بخشی از دلایل پیشرفت و توسعه تمدن آنها نیز محسوب می‌شود همواره به‌دنبال راه‌های شناسایی خطراتی هستند که سازه‌ها را تهدید می‌کنند تا بتوانند با پیشگیری از آسیب‌های احتمالی و تصمیم‌گیری به موقع از هدر رفت سرمایه ملی جلوگیری کنند. پایش سلامت سازه مجموعه تلاش‌هایی جهت تعیین وضعیت سازه‌ها و انجام اقدامات لازم جهت افزایش طول عمر سرویس‌دهی و افزایش

استناد: نامی‌زاده، رحیم و راست‌بود، اصغر (۱۴۰۳). برآورد رفتار استاتیکی و دینامیکی سازه‌های مهندسی با تحلیل سری زمانی مشاهدات GPS، مطالعه موردی: پل کابلی قدس

اردبیل. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۰(۱)، ۱-۲۱. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.353038.1007487>

رایانامه: r_nami@gmx.com (۱)



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.353038.1007487>

استیروس، ۲۰۱۱؛ بی و همکاران، ۲۰۱۳؛ تاپال و آکپینار، ۲۰۲۲). با توجه به این‌که شناسایی و حذف خطاهای فرایند اندازه‌گیری و نوفه سری‌های زمانی GPS در شناسایی صحیح مؤلفه‌های حرکتی پل، یکی از اصل‌های به‌کارگیری این روش می‌باشد برخی از مطالعات از پالایه کالمن و روش آنالیز موجک استفاده کرده‌اند و همچنین در برخی از تحقیقات جهت استخراج مؤلفه‌های نیمه‌استاتیک (پریود طولانی) و دینامیک سازه (پریود کوتاه) از پالایه میانگین متحرک، پالایه دوگانه (Double Filtration) ویا فرایندهای آماری استفاده کرده‌اند (مسچس و استیروس، ۲۰۱۳؛ یو و همکاران، ۲۰۱۴؛ یو و همکاران، ۲۰۱۶). روش حرکتی پل و ارزیابی رفتار و ساختار آن از طریق خطاهای مدل نیز امکان‌پذیر می‌باشد (لاروکا و همکاران، ۲۰۰۶؛ کالوپ و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین تبدیل فوریه سریع (FFT) به‌عنوان ابزار مهم در برآورد فرکانس‌های سازه استفاده می‌شود.

تاکنون در حوزه زمانی، مطالعات بسیاری برای شناسایی تغییرات حرکتی سازه‌ها انجام شده است. درحالی‌که در حوزه فرکانس مطالعات محدودی، به‌ویژه برای ارزیابی حرکت‌های پل صورت گرفته است (لاروکا و همکاران، ۲۰۰۶؛ گروسکی، ۲۰۱۵). در این مقاله تلاش شده است با شناسایی مؤلفه‌های ساختاری پل و تجزیه و تحلیل سری زمانی در هر دو حوزه زمانی و فرکانسی، صورت گیرد. این مطالعه با هدف ارزیابی ایمنی رفتار پل کابلی قدس اردبیل در دامنه طراحی آن، با استفاده از پایش کوتاه‌مدت و دوره‌ای و برآورد تغییرات سری‌های زمانی مشاهدات GPS، در حوزه‌های زمان و فرکانس انجام شده است؛ که می‌تواند پایه و اساس هشدار اولیه برای سیستم پایش پل باشد. رفتار کامل سازه پل در حوزه استاتیک، نیمه‌استاتیک و دینامیک مورد بررسی قرار گرفته و از تحلیل سری‌های زمانی برای برآورد رفتار پل استفاده شده است. مطالعه پیش‌رو از پنج بخش تشکیل شده است. در بخش ۲، شبکه جمع‌آوری داده‌ها و در بخش ۳ به بررسی سیستم پایش پل قدس و داده‌های مورد استفاده پرداخته شده است. در بخش ۴، الگوریتم استخراج مؤلفه‌های

و همانند سایر سازه‌ها پایش سلامت سازه‌های SHM (Structural Health Monitoring) را به‌عنوان فرایندی جهت بررسی عملکرد، وضعیت ساختاری، قابلیت اطمینان و سلامت سازه‌ها، با استفاده از اندازه‌گیری داده‌ها و تفسیر آنها تعریف کرده‌اند. جمع‌آوری اطلاعات صحیح و با کیفیت باعث نتیجه ایده‌آل در تصمیم‌گیری مدیریت سازه‌ها در مراحل طراحی، ساخت و بهره‌برداری از آنها می‌شود، لذا سیستم بلندمدت SHM به‌سرعت با رشد اقتصادی کشورهای آسیایی رشد کرده‌اند (آنامداس و همکاران، ۲۰۱۷). پل‌ها به‌دلیل هندسه و موقعیت قرارگیری آنها، به‌طور قابل توجهی می‌توانند در اثر بارهای ترافیکی، باد، بارهای ضربه‌ای، زمین‌لرزه و سایر بارهای دینامیکی و استاتیکی تحت تأثیر قرار گیرند و یا در اثر تغییرات دما و عوامل محیطی، دچار خوردگی و تغییرشکل‌های بزرگ شوند؛ که به‌دلیل آسیب‌دیدن خصوصیات ساختاری آن، ترک‌ها و گسیختگی‌های اجزایی آن، ویژگی‌های اصلی دینامیکی این سازه تغییر می‌کند (چن و همکاران، ۲۰۱۶؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۷). به‌طور گسترده از سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) برای پایش پل استفاده می‌شود و این سیستم می‌تواند مستقیماً پاسخ دینامیکی و استاتیکی را اندازه‌گیری کند (تینگ-هووا و همکاران، ۲۰۱۲). جابه‌جایی‌های استاتیک که بیشتر در اثر وزن خود سازه اتفاق می‌افتد معمولاً دارای الگوی ثابت بوده و با گذشت زمان تغییر چشم‌گیری نمی‌کند و جزء جابه‌جایی‌های دائمی و پریود طولانی محسوب می‌شوند. اما الگوی جابه‌جایی‌های دینامیک با گذشت زمان تغییر می‌کند و دارای پریودهای کوتاه‌مدت هستند و به‌کارگیری GPS جهت شناسایی مؤلفه دینامیک مرسوم می‌باشد زیرا سیستم پایش مرسوم با استفاده از شتاب‌سنج، نمی‌تواند جابه‌جایی‌های استاتیک و نیمه‌استاتیک را مشاهده کند (ایم و همکاران، ۲۰۱۳). بسیاری از مطالعات سیستم پایش RTK، DGPS و PPP با نرخ بالا را مورد ارزیابی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که GPS می‌تواند یک سیستم مؤثر در برآورد عملکرد دقیق پل‌ها باشد (کالوپ و لی، ۲۰۰۹؛ مسچس و

حرکتی استاتیکی، نیمه‌استاتیکی و دینامیک پل و همچنین مدل حرکتی آتی پل پیش‌بینی شده است و نهایتاً در بخش ۵ نتایج حاصل از این تحقیق به همراه ارزیابی آنها ارائه شده است.

۲. شبکه جمع‌آوری داده‌ها

پل قدس اردبیل در قسمت غربی شهر اردبیل و با هدف انتقال بار ترافیکی بین شهری مابین شهرهای شمالی و غربی استان و همچنین انتقال بار ترافیکی مرکز و شمال شهر به بخش توسعه یافته شهر اردبیل یعنی به سمت جنوب و جنوب غربی و بر روی رودخانه بالیخلوچایی احداث شده است.

مسیر اصلی این پل به صورت تقاطع غیرهمسطح به طول ۹۸۰ متر و تعداد ۲۱ دهانه با ساختمان بتن مسلح و عرشه مرکب بتنی و با تیرهای فلزی به عرض ۲۱ متر به صورت کنسولی ساخته شده است. طول مسیر اصلی پس از کسر طول کوله‌ها ۸۰۰ متر می‌باشد که با طراحی پنج درز انقطاع در طول مسیر، به صورت شش قسمت مستقل سازه‌ای ساخته شده است. بزرگترین دهانه پل به طول ۱۱۵ متر با مشخصات خاص، به صورت کابلی پیش‌تنیده-پس‌کشیده با ارتفاع ۷ متر از تقاطع همسطح و ۱۵ متر از کف رودخانه طراحی و اجرا شده است و این دهانه مورد بررسی تحقیق حاضر می‌باشد. در طراحی این پل که به صورت المان محدود انجام شده بارگذاری دینامیکی و استاتیکی صورت گرفته و با بررسی دوره تناوب طبیعی پل و پاسخ حرکتی سرویس عبوری، از ایجاد پدیده تشدید جلوگیری می‌شود.

جهت پایش دهانه کابلی پل، شبکه میکروژئودزی با طول کوتاه، متشکل از دو ایستگاه بر روی پل و یک ایستگاه ثابت سامانه شمیم، به صورت شبکه‌ای با طول اضلاع مثلثی حداقل ۲۰ و حداکثر ۱۲۸۵ متر تشکیل و داده‌ها جمع‌آوری شدند و مورد پایش قرار گرفتند که موقعیت قرارگیری ایستگاه‌ها و فواصل ایستگاه‌ها از هم در شکل ۱

نمایش داده شده است. شبکه میکروژئودزی با طول‌های کوتاه متشکل از یک ایستگاه ثابت شبکه دائم سازمان ثبت اسناد و املاک کشور موسوم به ایستگاه شبکه دائم ژئودزی شمیم و بنام ARAR که در فاصله ۱۲۸۵ متر از پل مورد مطالعه و در بالای ساختمان اداره کل ثبت اسناد و املاک استان اردبیل قرار دارد و دو ایستگاه GPS به نام‌های PIN1 و PIN2 به صورت پین فولادی به عمق ۱۵ سانتی‌متر که پس از عبور از ضخامت آسفالت به دلیل عدم تأثیرپذیری از حرکت آسفالت و در دو طرف بدنه بتنی دهانه کابلی پل کاشته شده است، استفاده شد. شبکه ایستگاه‌های شمیم شامل ۱۴۳ ایستگاه دریافت اطلاعات ماهواره‌ای تعیین موقعیت، با هندسه و تراکم مناسب است که توسط سازمان نقشه‌برداری کشور پشتیبانی و مختصات این ایستگاه‌ها در چارچوب مرجع زمینی بین‌المللی ITRF و با بهره‌گیری از محصولات IGS و در قالب سیستم مختصات WGS84 ارائه می‌شود.

جمع‌آوری داده‌ها با استقرار گیرنده‌های دوفرکانسه Trimble 5700 با نوع آنتن TRM39105.00 و Trimble5800 با نوع آنتن TRM5800 بر روی ایستگاه‌های تحت پایش و گیرنده Leica GR50 با نوع آنتن LEIAR10 در ایستگاه مرجع، به صورت استاتیکی انجام شده است باید توجه داشت حرکت‌های لحظه‌ای سازه توسط دستگاه‌های مستقر در نقاط تحت پایش ثبت می‌شود. دلیل انتخاب شبکه میکروژئودزی جهت پایش سلامت سازه‌های مهندسی حذف بیشتر خطاهای سیستماتیک و کاهش خطاهای اتفاقی می‌باشد. همچنین ایستگاه‌های تحت پایش در محل‌هایی از سازه که نماینده بیشترین جابه‌جایی سازه (حد نهایی خیز عرشه) و بخش‌هایی از سازه که محل انتقال یا خنثی شدن بارهای وارده (تکیه‌گاه‌ها و اتصالات) می‌باشند، قرار می‌گیرند. جمع‌آوری داده‌ها و زمان آن به هدف از پایش سازه‌ها که به دو صورت موردی و موضعی (کوتاه‌مدت) و دائمی که در طول عمر سازه اتفاق می‌افتد، بستگی دارد.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های تحت پایش PIN1 و PIN2 روی پل و ایستگاه ARAR شبکه شمیم.

۳. سیستم پایش پل قدس

ساختمان پل قدس که به صورت بتنی مسلح و عرشه مرکب بتن مسلح با تیرهای فلزی به صورت کنسولی بوده و دهانه کابلی با به کارگیری کابل‌های تولید داخل پیش‌تنیده-پس‌کشیده طراحی و ساخته شده است. فوندانسیون‌ها بر روی شمع‌های بتنی مسلح قرار گرفته و پایه‌های بتنی با اتصال به داخل فوندانسیون از آن بیرون آمده‌اند. در محل اتصال پایه به عرشه از تعداد هشت عدد نئوپرن (الاستومر مسلح شده با فولاد تولید داخل) استفاده شده است. هدف از به کارگیری کابل‌های با مقاومت بالا و اعمال نیروی فشار به بتن قبل از اعمال بارها به سازه، رسیدن به مزیت سازه‌های پیش‌تنیده از جمله باربری بیشتر عضو با هندسه مشابه نسبت به بتن مسلح معمولی، کنترل تغییرشکل، کاهش ارتعاش ناشی از بارهای ضربه‌ای و دینامیکی، کاهش ضخامت دال‌ها یا تیرهای بتنی، کاستن وزن مرده ساختمان و مصالح مصرفی، کنترل ترک، دوام بسیار بالا و کم کردن نیروهای زمین‌لرزه و مقاومت بیشتر در برابر زلزله می‌باشد. همچنین هدف از به کارگیری نئوپرن افزایش مقاومت سازه در برابر ارتعاشات، مقاومت در برابر فشار بالا، کاهش بار مرده و مقاومت بالا در شرایط دمایی و جوی مختلف می‌باشد.

با توجه به این که تکنولوژی GPS می‌تواند هر دو پاسخ

استاتیکی و دینامیکی سازه را اندازه‌گیری کند، تحقیق حاضر جهت پایش سلامت دهانه کابلی در حوزه بارهای استاتیکی و دینامیک به تحلیل مؤلفه‌های سری زمانی داده‌های GPS پرداخته است. به همین منظور ایستگاه‌های تحت پایش جهت جمع‌آوری داده‌ها با در نظر گرفتن توزیع نیروها در دوطرف دهانه کابلی قرار گرفته است. با پردازش اولیه مشاهدات گیرنده‌های GPS در نقاط تحت پایش احتمال وجود رفتار موضعی در نقاط تحت پایش به صورت مستقل مورد بررسی قرار گرفته و یکپارچه‌بودن رفتار سازه در مقابل بارهای وارده در زمان پایش مشخص می‌شود. با شناخت اولیه از رفتار سازه می‌توان در مورد روند بررسی آن تصمیم‌گیری کرد و نتایج صحیح به دست آورد. به عنوان مثال ممکن است رفتار یکی از ایستگاه‌ها که هم‌زمان با سایر ایستگاه‌ها در حال ثبت مشاهده توسط گیرنده‌های GPS می‌باشد متفاوت باشد و این تفاوت به دلیل ساختمان سازه در محل قرارگیری آن ایستگاه باشد و یا یک بار ضربه‌ای فقط در آن محل به سازه وارد شده باشد. این وضعیت با برداشت دوره‌ای و حداقل در دو نوبت قابلیت بررسی بهتری دارد. از طرفی برداشت دوره‌ای می‌تواند به بررسی مواردی از جمله وجود اشکال در یکی از گیرنده‌ها، تکراری بودن رفتار سازه در مراحل مختلف، بررسی مصالح به کار رفته و تأثیر آن در رفتار

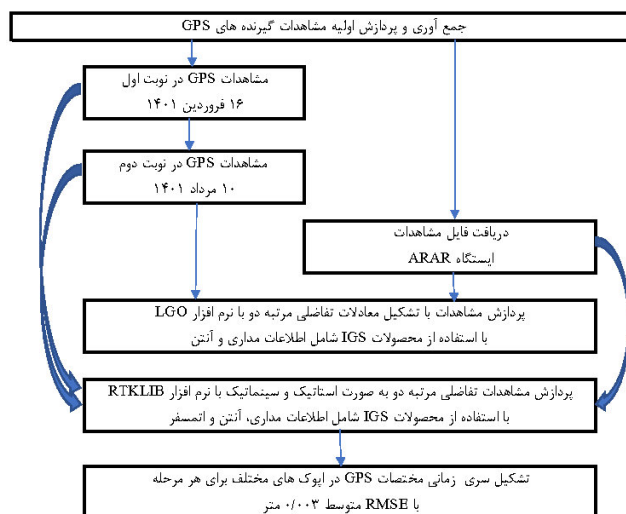
محصولات فاز آنتن، اطلاعات مداری و اطلاعات جوی که توسط IGS ارائه می‌شود و همچنین قابلیت استفاده از پالایه کالمن که از امکانات نرم‌افزار RTKLIB می‌باشد، پردازش شده‌اند. پالایه کالمن یک پالایه بهینه‌سازی سیستم می‌باشد که به نطفه حساس بوده و باعث کاهش آن می‌شود. این پالایه که به‌عنوان برآوردگر خطی مرتبه دوم نیز از آن یاد می‌شود، الگوریتمی است که حالت یک سیستم پویا را با استفاده از مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های شامل خطا در طول زمان برآورد می‌کند. این الگوریتم در دو گام اجرا می‌شود. در گام پیش‌بینی، پالایه کالمن برآوردی از وضعیت فعلی متغیرها را در شرایط عدم قطعیت ارائه می‌کند. زمانی که نتیجه اندازه‌گیری بعدی به‌دست آید، برآورد قبلی با میانگین وزن‌دار روزرسانی می‌شود. به‌این ترتیب که وزن اطلاعاتی که دارای قطعیت بیشتری هستند، بیشتر خواهد بود. الگوریتم بازگشتی می‌باشد و با استفاده از ورودی‌های جدید و حالات محاسبه شده قبلی به‌صورت آنی اجرا می‌شود. درمورد ورودی‌های فیلتر کالمن نمی‌توان بیان کرد که تمام خطاها نرمال هستند، اما در عمل فیلتر برآوردهای احتمالاتی را با فرض توزیع نرمال انجام می‌دهد (کالمن، ۱۹۶۰).

مقادیر مختصات UTM و مختصات جغرافیایی به‌همراه دقت به‌دست‌آمده از پردازش‌ها به ترتیب در جداول ۱ و ۲ درج شده است.

سازه، عملکرد میراگرها به‌صورت موردی، بررسی اثر تغییرات دمایی و غیره کمک کند.

پس از جمع‌آوری داده‌ها در دو نوبت در فروردین ماه و مرداد ماه سال ۱۴۰۱ شمسی از ایستگاه‌های تحت پایش با نرخ ۳۰ ثانیه توسط گیرنده‌ها در بخش قبلی، پردازش اولیه بر روی داده‌های GPS جهت تشکیل سری‌های زمانی این داده‌ها، مطابق الگوریتم ارائه شده در شکل ۲ صورت گرفت. دلیل برداشت داده‌ها در ماه‌های مختلف بررسی اثرات جوی و سایر عوامل مؤثر بر رفتار سازه بوده است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشخص شده است مشاهدات GPS در دو نوبت به فاصله زمانی ۴ ماه جمع‌آوری و به‌صورت جداگانه پردازش شده‌اند. در گام اول پردازش بین خطوط مبنا با نرم‌افزار LGO و با بهره‌گیری از محصولات فاز آنتن و اطلاعات مداری ارائه شده توسط سامانه IGS با هدف ارتقاء کیفیت پردازش، اطمینان از داده جمع‌آوری شده، به‌دست‌آوردن مختصات دقیق نقاط تحت پایش قبل از تشکیل سری زمانی و در مختصات UTM صورت گرفت که می‌توان آن را مرحله پیش‌کنترل نامید. سپس با هدف تشکیل سری‌های زمانی، خطوط مبنای بین ایستگاه‌ها به‌صورت خط مبنا به خط مبنا و مدل تفاضلات دو گانه و با زاویه برش (cut of angle) پانزده درجه جهت کاهش نطفه حاصل از ماهواره‌های با زاویه ارتفاعی پایین، با نرم‌افزار RTKLIB و با بهره‌گیری از



شکل ۲. الگوریتم جمع‌آوری و پردازش اولیه داده‌ها.

جدول ۱. مختصات UTM به دست آمده از پردازش با نرم افزار LGO

| مرحله | طول مبنا | Easting (m) | Northing (m) | Height (m) | RMS (mm) |
|-------|-----------|-------------|--------------|------------|----------|
| اول | ARAR-PIN1 | ۲۶۲۵۲۲/۲۷۵ | ۴۲۳۵۱۴۰/۵۰۲ | ۱۳۷۵/۹۳۸ | ۰/۱ |
| اول | ARAR-PIN2 | ۲۶۲۵۱۴/۰۸۶ | ۴۲۳۵۱۲۳/۴۴۸ | ۱۳۷۶/۵۳۲ | ۰/۱ |
| دوم | ARAR-PIN1 | ۲۶۲۵۲۲/۲۸۴ | ۴۲۳۵۱۴۰/۵۰۵ | ۱۳۷۵/۹۴۲ | ۰/۰ |
| دوم | ARAR-PIN2 | ۲۶۲۵۱۴/۱۰۰ | ۴۲۳۵۱۲۳/۴۴۹ | ۱۳۷۶/۵۳۹ | ۰/۰ |

جدول ۲. مختصات جغرافیایی به دست آمده از سری‌های پردازش با نرم افزار RTKLIB در بیضوی WGS84

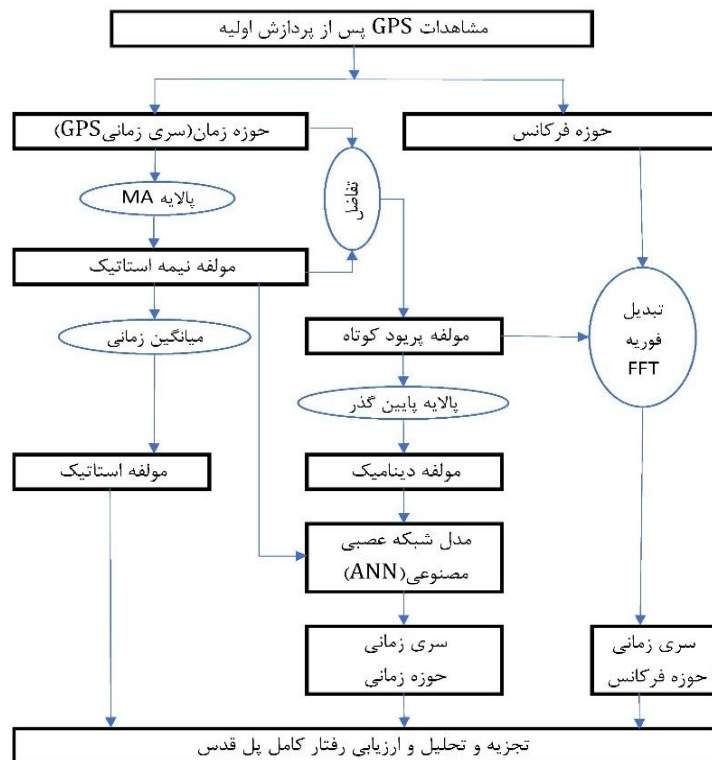
| مرحله | طول مبنا | Easting | Northing | Height (m) | RMS (mm) |
|-------|-----------|---------------|---------------|------------|----------|
| اول | ARAR-PIN1 | ۴۸°۱۷'۱۲/۴۶۱" | ۱۳°۳۸'۵۸/۵۳۹" | ۱۳۷۵/۹۳۸ | ۵ |
| اول | ARAR-PIN2 | ۴۸°۱۷'۱۲/۱۴۵" | ۱۳°۳۸'۵۸/۹۷۸" | ۱۳۷۶/۵۳۲ | ۳ |
| دوم | ARAR-PIN1 | ۴۸°۱۷'۱۲/۴۶۱" | ۳۸°۱۳'۵۸/۵۳۹" | ۱۳۷۵/۹۴۲ | ۵ |
| دوم | ARAR-PIN2 | ۴۸°۱۷'۱۲/۱۴۶" | ۳۸°۱۳'۵۸/۹۷۸" | ۱۳۷۶/۵۳۹ | ۲ |

۴. شیوه پژوهش

جابه‌جایی‌های نشان داده شده یک ساختار توسط GPS شامل سه مؤلفه حرکتی استاتیکی، نیمه‌استاتیکی و دینامیکی است (تینگ-هووا و همکاران، ۲۰۱۲). مؤلفه‌های نیمه‌استاتیکی و دینامیکی حرکت در سری زمانی جابه‌جایی‌های ظاهری تجسم می‌یابند که شامل مؤلفه‌های حرکت (سیگنال) و نوفه‌ها در هر جهت مختصاتی می‌باشند که پس از حذف روند خطی از سری زمانی مؤلفه‌های مختصات به دست می‌آیند. بر این اساس، برای استخراج مشخصات دینامیکی سیگنال، نوفه‌ها و مؤلفه‌های نیمه‌استاتیکی باید حذف شوند (مسچس و استروس، ۲۰۱۵). از پالایه میانگین متحرک برای استخراج مؤلفه‌های نیمه‌استاتیکی و دینامیک رفتار پل استفاده می‌شود (اسیان و همکاران، ۲۰۱۷؛ منگ و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین برای مدل‌سازی و برآورد خطاهای سری زمانی جهت پایش پل از روش‌های مختلفی از جمله مدل خودهمبسته میانگین متحرک (Autoregressive) ARMA

(Moving Average) و (ARIMA) Autoregressive

(Integrated Moving Average) استفاده می‌شود (هوهنسن و همکاران، ۲۰۲۰). داده‌های سری زمانی GPS دارای نوفه هستند که برای کاهش و حذف آنها پالایه‌های مختلفی از جمله پالایه میانگین متحرک برای برداشتهای با فرکانس بالا استفاده می‌شود (لیما و کازاکا، ۲۰۰۸). همچنین رایج‌ترین پالایه جهت کاهش نوفه پالایه آنالیز موجک در تحلیل‌های دینامیکی هست (کالوپ و همکاران، ۲۰۱۹). در مطالعه حاضر از پالایه میانگین متحرک، میانگین‌گیری زمانی، پالایه پایین‌گذر در حوزه زمان به ترتیب برای استخراج مؤلفه‌های نیمه‌استاتیکی، استاتیکی و دینامیک استفاده شد. همچنین در حوزه فرکانس از تبدیل فوریه سریع، نمودار پرلودوگرام و تحلیل طیفی جهت شناسایی فرکانس‌های غالب و نیز از شبکه عصبی مصنوعی جهت تعیین مدل دینامیکی حرکت پل استفاده شد که به تفصیل به توضیح آنها پرداخته شده است. الگوریتم فرایند ارزیابی کامل رفتار پل در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. الگوریتم فرایند به کار گرفته شده برای پایش پل قدس.

۴-۱-۴. شناسایی و ارزیابی مؤلفه‌های حوزه زمان

۴-۱-۱-۴. استخراج مؤلفه نیمه استاتیک

پالایه میانگین متحرک (MA) این امکان را فراهم می‌کند که سری زمانی را بتوان به یک مؤلفه بلندمدت و یک مؤلفه کوتاه‌مدت تفکیک کرد. میانگین متحرک معمولاً در سری‌های زمانی برای هموار کردن نوسانات کوتاه‌مدت و برجسته‌سازی روندها یا دوره‌های بلندمدت استفاده می‌شود. حد آستانه بین کوتاه‌مدت و بلندمدت به کاربرد مورد نظر بستگی دارد و پارامترهای میانگین متحرک نیز بر این اساس تنظیم می‌شوند. از نظر ریاضی، یک میانگین متحرک نوعی از کانولوشن است، بنابراین می‌توان آن را به عنوان نمونه‌ای از پالایه پایین گذر که در پردازش سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرد، در نظر گرفت. همان‌طور که از نام این فرایند پیداست، پالایه میانگین متحرک با میانگین تعدادی از نقاط سیگنال ورودی کار می‌کند تا هر نقطه از سیگنال خروجی را تولید کند. فرم ریاضی این فرایند را می‌توان مطابق رابطه زیر بیان کرد.

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i+j] \quad (1)$$

که در این رابطه، $x[i]$ سیگنال ورودی، $y[i]$ سیگنال خروجی و M تعداد نقاطی است که در میانگین متحرک استفاده می‌شود. این معادله فقط از نقاط در یک طرف نمونه خروجی محاسبه شده، استفاده می‌کند.

۴-۱-۲-۴. استخراج مؤلفه استاتیک و مؤلفه پریود کوتاه برای برآورد رفتار استاتیک، مطابق با الگوریتم پیشنهادی در شکل ۳ از میانگین‌گیری زمانی مؤلفه نیمه استاتیک استفاده می‌شود. با توجه به این که نرخ نمونه برداری داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، ۳۰ ثانیه می‌باشد؛ میانگین ده دقیقه حرکت نیمه استاتیک، به عنوان یک رفتار استاتیک از هر نقطه در نظر گرفته می‌شود. به این صورت حرکت استاتیک نقاط تحت پایش پل نیز، محاسبه و ارزیابی می‌شود. با برداشتن اثر مؤلفه نیمه استاتیک به دست آمده در بخش ۴-۱-۱ از روی سری زمانی داده‌های پردازش شده در نرم افزار RTKLIB، مؤلفه کوتاه‌مدت در مشاهدات باقی می‌ماند که این مؤلفه خود

نیز شامل مؤلفه دینامیک و نوفه‌های باقی‌مانده است.

بررسی قرار گیرد. معادله (۲) تبدیل فوریه سریع (FFT) را نشان می‌دهد:

$$X_{xx}(f) = \sum_{k=0}^M \text{corr}_{xx}(k) W(k) e^{i2\pi f k / f_s} \quad (2)$$

در این معادله M جمع حداکثر اختلاف زمانی و $W(k)$ طول پنجره است. در تحلیل سری زمانی با الگوریتم FFT، تبدیل در دو قسمت و هر قسمت به اندازه $M/2$ انجام می‌گیرد. بنابراین تعداد نمونه‌های تحلیل سری زمانی بایستی توان صحیحی از عدد دو باشد. اگر تعداد نمونه‌ها توان صحیحی از دو نباشد، بایستی عددی را به‌عنوان تعداد نمونه‌ها معرفی کنیم که نزدیکترین عدد به تعداد نمونه‌ها و توان صحیحی از دو باشد. مثلاً اگر تعداد نمونه‌ها ۵۰۰ باشد برای تحلیل با FFT تعداد ۵۱۲ نمونه وارد خواهد شد. سپس بر اساس FFT نمودار پرلودوگرام ترسیم و فرکانس‌های غالب شناسایی می‌شوند.

۳-۱-۴. استخراج مؤلفه دینامیک

رفتار دینامیکی با اعمال پالایه پایین‌گذر بر روی مؤلفه پرلودوکوتاه، برآورد می‌شود. در این تحقیق پالایه‌های پایین‌گذر مختلفی از جمله Butter Filter (هاروی و تریمبور، ۲۰۰۳)، Median Filter (بارنر و همکاران، ۱۹۹۸) و Gaussian Filter (دنگ و کیهیل، ۱۹۹۳) جهت استخراج مؤلفه دینامیکی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در نهایت از بین آنها، برای انتخاب پالایه بهینه از معیارهای ارزیابی مانند جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، انحراف‌معیار (STD)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ماتریس شاخص شباهت ساختاری (SSIM) استفاده شده است.

۲-۴. شناسایی و ارزیابی مؤلفه حوزه فرکانس

جهت ارزیابی واکنش نقاط تحت پایش در حوزه فرکانس از روش‌های موجود از جمله تبدیل فوریه سریع و برآورد هارمونیک کمترین مربعات در تحلیل طیفی استفاده می‌شود. این روش‌ها جهت بهبود بخش تابعی مدل مشاهداتی، به‌منظور تشخیص فرکانس‌های موجود در سیگنال‌هایی با ماهیت پرلودویک استفاده می‌شود. همچنین از تبدیل فوریه سریع جهت شناسایی نوفه در مؤلفه باقی‌مانده تابع آماری مدل مشاهداتی استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر از تبدیل فوریه سریع در این بخش استفاده شده است که در ادامه به شرح کاربردی آن پرداخته شده است.

تبدیل فوریه سریع روشی متداول است که می‌توان از آن در جهت برآورد طیف توان و فرکانس طبیعی سازه‌ها و شناسایی تغییرات اندازه‌گیری‌های سیستم پایش GPS استفاده کرد. تفاوت آن با تبدیل فوریه گسسته در پنجره $w(k)$ ای است که در این روش ایجاد و باعث می‌شود سری زمانی در محدوده زمانی معینی و به‌صورت زمان اجرای کاهش یافته و نه در بازه زمانی $-\infty$ تا $+\infty$ مورد

۳-۴. مدل حرکتی رفتار پل

همان‌طور که مطرح شد به‌منظور برآورد و پیش‌بینی رفتار دینامیکی پل، مدل شبکه‌عصبی مصنوعی ANN (Artificial Neural Network) مورد استفاده قرار گرفته است. بسیاری از مطالعات از این مدل برای پیش‌بینی تعیین موقعیت با تلفیق GPS و INS استفاده کرده‌اند (مالسوارن و همکاران، ۲۰۱۴؛ وی و همکاران، ۲۰۲۰). به‌منظور تعیین مدل دینامیکی حرکت پل نیز از شبکه‌عصبی مصنوعی استفاده می‌شود (لای و همکاران، ۲۰۱۶؛ شین و همکاران، ۲۰۱۸). این مطالعات نشان داده‌اند که از قدرت مدل‌های ANN می‌توان برای پیش‌بینی سیستم پایش استفاده کرد. شبکه‌عصبی روشی مبتنی بر هوش مصنوعی جهت تقریب توابع مختلف در علوم مهندسی و جزء مدل‌های غیرخطی است (آلپایدین، ۲۰۰۴). شبکه پرپرسترون چندلایه MLP (Multilayer perceptron) از متداول‌ترین و پرکاربردترین انواع شبکه‌های عصبی است که از اتصال بین واحدهای پردازش به نام نرون (گره) تشکیل شده است. شکل ۴ نمای شماتیک از این نوع شبکه‌ها می‌باشد. نرون‌های

همسایه به عنوان ورودی و انتساب پارامتر وزن به هر یک از ورودی‌ها می‌باشد. همچنین محاسبه پاسخ نورون به داده‌های ورودی توسط تابع عملکرد داخلی آن و نهایتاً ارسال پاسخ محاسبه شده به سایر نورون‌های شبکه به عنوان ورودی جدید را می‌توان به عنوان دیگر وظایف این واحد نام برد (فرهلیچ و همکاران، ۲۰۰۳؛ آلپایدین، ۲۰۱۴). شبکه MLP حداقل شامل سه لایه ورودی، میانی (پنهان) و خروجی است. روش قانونمندی برای تعیین تعداد لایه‌ها و نورون‌های هر لایه وجود ندارد و عوامل زیادی در این زمینه تأثیرگذار هستند. اطلاعات مربوط به داده ورودی به اولین لایه داده می‌شود و پس از ضرب با ضریب وزن و اضافه کردن بایاس به لایه پنهان، ارسال می‌شود. مقادیر خروجی حاصل از نورون‌های لایه پنهان به عنوان مقدار ورودی برای لایه خروجی در نظر گرفته می‌شوند (آلپایدین، ۲۰۱۴). از نظر ریاضی نورون k را می‌توان با نوشتن روابط (۳) و (۴) توصیف کرد.

$$U_k = \sum_{j=1}^m W_{kj} X_j \quad (3)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (4)$$

در این رابطه x_1, x_2, \dots, x_m ورودی هستند؛ W_{k1}, W_{k2}, \dots وزن‌های نورون عصبی k ، U_k خروجی ترکیب خطی از پارامترهای ورودی، b_k بایاس، φ تابع فعال‌سازی و y_k خروجی نورون k ام می‌باشد.

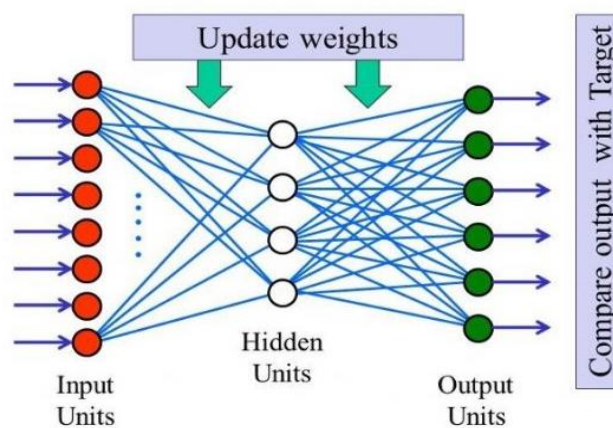
۵. تجزیه و تحلیل نتایج

پردازش اولیه داده‌های GPS و شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله به ترتیب با استفاده از نرم‌افزارهای LGO، RTKLIB و MATLAB صورت گرفته است.

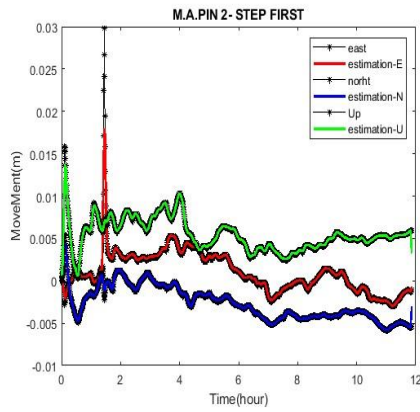
۱-۵. ارزیابی حرکت پل

از پالایه MA، جهت هموارسازی داده‌های GPS به منظور برآورد مؤلفه نیمه‌استاتیک استفاده شد و با اعمال این پالایه، مؤلفه نیمه‌استاتیک (پریود طولانی) از روی مشاهدات جدا شده و مؤلفه پریود کوتاه در مشاهدات باقی می‌ماند شکل ۵ داده‌های هموار شده سری‌های زمانی GPS که بیانگر مؤلفه نیمه‌استاتیک هستند را برای نقاط PIN1 و PIN2 به ترتیب سری‌های زمانی مرحله اول و مرحله دوم نشان می‌دهد. مؤلفه نیمه‌استاتیک برآورد شده با سری‌های زمانی داده‌های GPS حاصل از پردازش اولیه، برای هر دو نقطه در مرحله اول دارای ضریب همبستگی ۸۵ درصد در جهت شرق، ۹۴ درصد در جهت شمال، و ۹۷ درصد در جهت قائم و برای مرحله دوم دارای ضریب همبستگی ۹۷ درصد در جهت شرق، و ۹۹ درصد در جهت شمال و قائم می‌باشد. بنابراین این مؤلفه با سری‌های زمانی داده‌های GPS همبستگی زیادی دارند و تقریباً مشابه آن هستند؛ در نتیجه اطلاعات اولیه در مورد مؤلفه نیمه‌استاتیک قابل استخراج است.

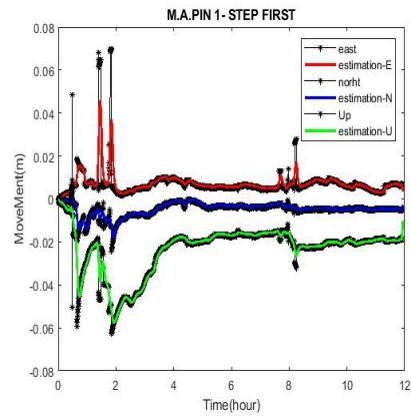
Artificial Neural Network



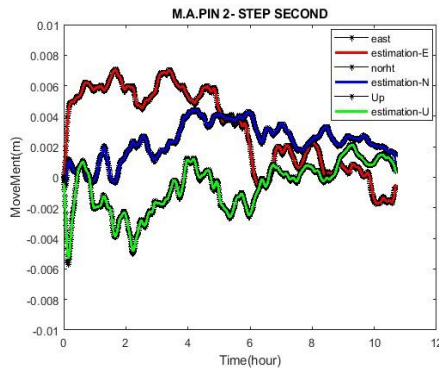
شکل ۴. نمای شماتیک از شبکه عصبی MLP.



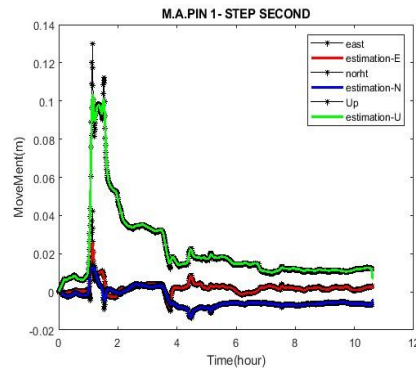
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵. سری زمانی نیمه‌استاتیک در سه راستا: (الف) و (ب) به ترتیب نقاط PIN1 و PIN2 در مرحله اول و (ج) و (د) به ترتیب نقاط PIN1 و PIN2 در مرحله دوم نقاط تحت پایش روی پل هستند. (منحنی مشکی سری زمانی داده‌های GPS، منحنی قرمز: مؤلفه نیمه‌استاتیک در جهت شرق، و منحنی آبی: مؤلفه نیمه‌استاتیک در جهت شمال، و منحنی سبز: مؤلفه نیمه‌استاتیک در جهت قائم).

جدول ۳. ارزیابی آماری مؤلفه نیمه‌استاتیک نقاط تحت پایش (واحد: میلی‌متر)

| PIN2 (مرحله اول) | | | PIN1 (مرحله اول) | | | |
|------------------|------|------|------------------|-------|------|-------------|
| H | N | E | H | N | E | |
| ۵/۴۴ | -۲/۶ | ۱ | -۲۳ | -۴/۷ | ۷/۲ | میانگین |
| ۱۳/۶۹ | ۴/۴ | ۱/۸ | -۰/۳ | ۱/۶ | ۴۵/۸ | بیشینه |
| ۱/۸۹ | ۱/۹۷ | ۲/۴ | ۱/۰۸ | ۳/۰۶ | ۴/۷ | انحراف میار |
| PIN2 (مرحله دوم) | | | PIN1 (مرحله دوم) | | | |
| H | N | E | H | N | E | |
| -۰/۶ | ۲/۳۸ | ۳/۱۸ | ۲۱/۹۱ | -۳/۹ | ۲/۰۶ | میانگین |
| ۲/۱۱ | ۴/۴۱ | ۷/۰۴ | ۱۰۳/۴ | ۱۲/۷۳ | ۲۵/۸ | بیشینه |
| ۱/۶۱ | ۱/۲۱ | ۲/۶۷ | ۲۰/۰۳ | ۴/۵۵ | ۳/۰۶ | انحراف میار |

غربی می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار انحراف معیار در هر دو مرحله برای نقطه PIN1 مربوط به جهت قائم می‌باشد که بیانگر آن است که بیشترین جابه‌جایی در این راستا می‌باشد که عامل اصلی آن بار ترافیکی و ضربه‌ای می‌باشد. و بیشترین مقدار انحراف معیار در نقطه PIN2، در

جهت ارزیابی حرکت نیمه‌استاتیک؛ میانگین، مقدار بیشینه و انحراف معیار مقدار جابه‌جایی مؤلفه نیمه‌استاتیک محاسبه و در جدول شماره ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل ۵ و جدول ۳، بیشینه جابه‌جایی نقاط روی پل در جهت شرق بوده و بیشترین جابه‌جایی در جهت شرقی و

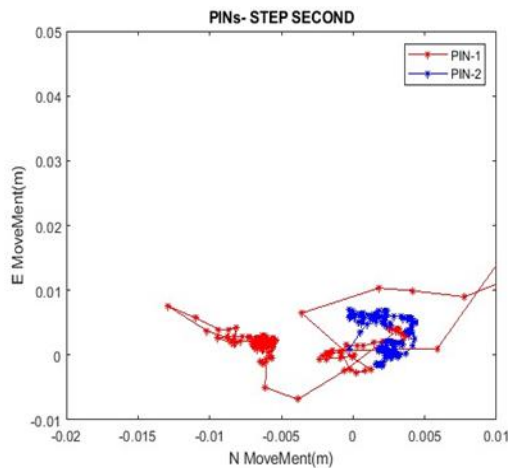
می‌توان برای بررسی وضعیت سلامتی سازه‌ها استفاده کرد.

از طرفی حرکات استاتیک نقاط تحت پایش محاسبه و ارزیابی شده است. شکل ۶-الف و ۶-ب محاسبات رفتار استاتیک برای نقاط روی پل در جهت شرق نسبت به جهت شمال را در مراحل مختلف نشان می‌دهد که نشان‌دهنده جابه‌جایی‌های مسطحاتی می‌باشد. پاسخ استاتیک نقاط متفاوت بوده و رفتار استاتیک در نقطه PIN1 بیشتر از رفتار نقطه PIN2 می‌باشد. این اتفاق به دلیل موقعیت بار مربوطه به موقعیت نقاط رخ داده است. لیکن اثر بار کم می‌باشد و از طرفی رفتار نقاط تحت پایش از الگوی رفتاری مشابه پیروی نمی‌کند. به همین ترتیب با توجه به اشکال (ج) و (د) می‌توان مشاهده کرد که واکنش استاتیک نقاط تحت پایش، در جهت قائم، مشابه نیست و این واکنش در PIN2 تا حدودی خنثی و در PIN1 از بازه زمانی ساعت ۱ تا ۴ بازه زمانی پایش، تحت تأثیر بار واکنش زیادی نشان داده است و این واکنش در مرحله یک نسبت به مرحله دوم هم‌زمانی داشته اما عکس همدیگر می‌باشند. حداکثر انحراف استاتیک برای این نقطه ۰/۰۶ متر در مرحله اول و ۰/۱ متر در مرحله دوم رخ داده است این اثرپذیری به دلیل توزیع بار نقطه‌ای و جهت و ترافیک صبحگاهی روی پل ارزیابی می‌شود.

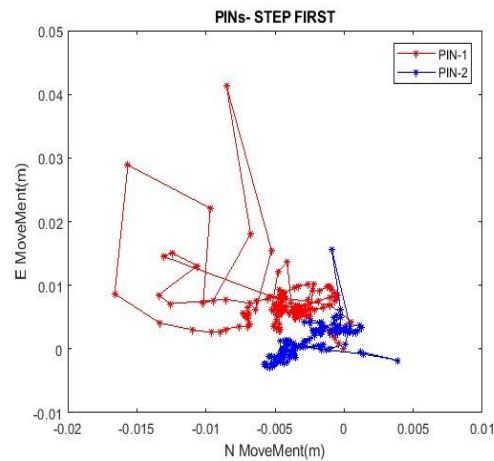
هر دو مرحله مربوط به جهت شرقی است که عامل اصلی آن بار ترافیکی می‌باشد. ارزیابی‌های آماری برای نقاط PIN1 و PIN2 تقریباً مشابه هستند. این بدین معنی است که رفتار نیمه‌استاتیک دو نقطه، تحت بار ترافیکی بی‌خطر است. همچنین ضریب همبستگی مؤلفه نیمه‌استاتیک در سه جهت شرق، شمال و قائم، بین نقاط تحت پایش در جدول ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. این جدول نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌های مؤلفه نیمه‌استاتیک در دو نقطه، چه میزان به یکدیگر وابسته هستند و در اثر جابه‌جایی یک نقطه در یک جهت، نقطه دیگر در جهت‌های مختلف، چه مقدار جابه‌جا می‌شود. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، زمانی که نقطه PIN1 در جهت شرق یا شمال یا قائم جابه‌جا می‌شود، نقطه PIN2 نیز در هر سه جهت جابه‌جا می‌شود اما با توجه به اعداد موجود در قطر اصلی جدول، همبستگی و در نتیجه مقدار جابه‌جایی نقطه PIN2، در همان جهتی است که نقطه PIN1، جابه‌جا شده است، همبستگی بالا به معنای کنترل حرکت سازه می‌باشد. دلیل تغییر مقادیر همبستگی در مرحله اول (اول فروردین ماه) با مرحله دوم (اواسط مرداد ماه) به دلیل اندرکنش سازه پل در تغییر دمایی و میزان بار ترافیکی ارزیابی می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این پل تحت تأثیر بار ترافیکی موجود ایمن است. از تجزیه و تحلیل همبستگی

جدول ۴. ضریب همبستگی مؤلفه نیمه‌استاتیک نقطه PIN2 نسبت به PIN1 در دو مرحله.

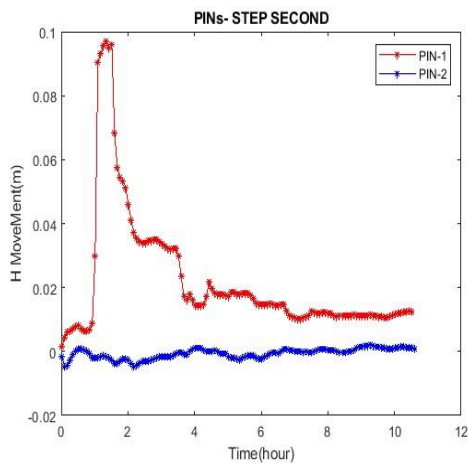
| PIN2 | | | مرحله اول | پل |
|---------|---------|----------|-----------|------|
| H | N | E | جهت | PIN1 |
| ۰/۰۸۲۵ | ۰/۱۴۰۹ | ۰/۵۵۵۱ | E | |
| -۰/۳۰۲۴ | -۰/۲۸۷۸ | -۰/۲۷۷ | N | |
| ۰/۴۰۶۱ | -۰/۴۷۸۶ | -۰/۴۰۷۶ | H | |
| PIN2 | | | مرحله دوم | پل |
| H | N | E | جهت | PIN1 |
| ۰/۵۱۳ | ۰/۵۰۷۷ | ۰/۱۷۴۵ | E | |
| -۰/۳۱۴۴ | -۰/۶۱۰۸ | ۰/۰۱۷۱ | N | |
| -۰/۴۸۸۵ | -۰/۵۲۹۹ | -۰/۰۰۰۵۴ | H | |



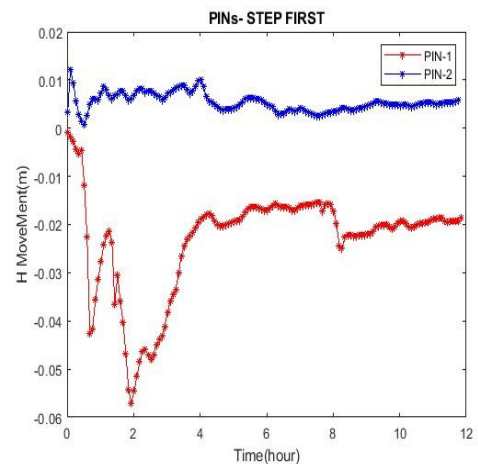
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

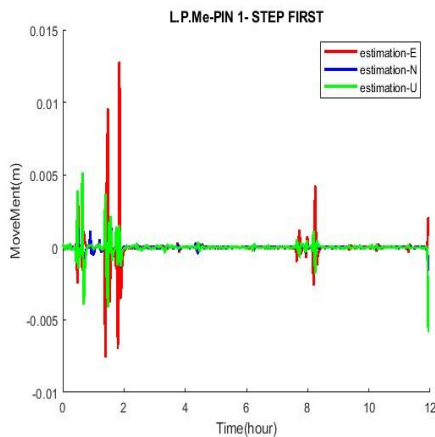
شکل ۶. مؤلفه استاتیکی نقاط PIN1 و PIN2 روی پل. الف) جابه‌جایی مسطحاتی جهت شرق نسبت به شمال در مرحله اول، ب) جابه‌جایی مسطحاتی جهت شرق نسبت به شمال در مرحله دوم، ج و د) سری زمانی مؤلفه استاتیکی در جهت H به ترتیب مرحله اول و دوم، رنگ قرمز: سری زمانی ارتفاعی نقطه PIN1 و رنگ آبی سری زمانی ارتفاعی نقطه PIN2.

و بیشترین مقدار را برای SSIM داشته باشند به‌عنوان پالایه بهینه در نظر گرفته می‌شوند. پس از شرح عملکرد فیلترهای پایین‌گذر به‌عنوان نمونه عملکرد آنها بر روی نقطه PIN1، اعمال شده و نتایج آن جهت انتخاب بهترین پالایه در جدول شماره ۵ نشان داده شده است که با توجه به مقادیر شاخص‌های به‌دست آمده، پالایه میانه با کمترین خطا (۰/۴، ۰/۱ و ۰/۸ میلی‌متر به ترتیب در راستای شرق، شمال و قائم) و بیشترین دقت به‌عنوان روشی بهینه جهت برآورد مؤلفه دینامیکی انتخاب شده است. شکل ۷ رفتار دینامیکی استخراج شده از نقاط تحت پایش را در هر دو مرحله نشان می‌دهد.

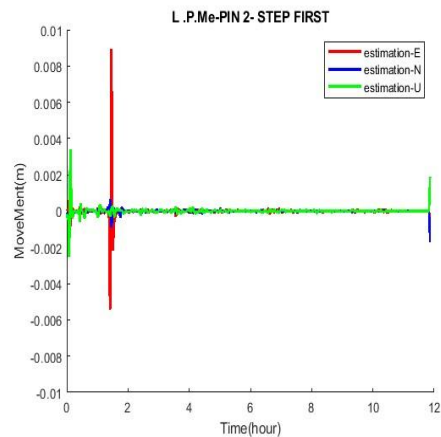
جهت استخراج مؤلفه پریود کوتاه، از تفاضل مشاهدات پردازش شده GPS و مؤلفه نیمه‌استاتیکی به دست آمده استفاده می‌شود. سپس رفتار دینامیکی با اعمال پالایه پایین‌گذر بر روی مؤلفه پریود کوتاه، برآورد می‌شود. در این تحقیق پالایه‌های پایین‌گذر مختلفی از جمله Butter Filter، Median Filter و Gaussian Filter جهت استخراج مؤلفه دینامیکی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند در نهایت از بین آنها، برای انتخاب پالایه بهینه از شاخص‌های بهینگی مانند جذر میانگین مربعات خطا، انحراف معیار، میانگین مطلق خطا و ماتریس شاخص شباهت ساختاری استفاده شده است. پالایه‌ای که کمترین مقدار برای پارامترهای MAE، RMSE، و STD

جدول ۵. ارزیابی آماری مؤلفه دینامیک نقطه PIN1 روی پل (واحد: میلی‌متر).

| Butter | | | Median | | | Gaussian | | | شاخص |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|------|
| E | N | U | E | N | U | E | N | U | |
| ۰/۹ | ۰/۲ | ۰/۵ | ۰/۸ | ۰/۱ | ۰/۴ | ۰/۹ | ۰/۲ | ۰/۵ | RMSE |
| ۱/۲ | ۰/۲ | ۰/۶ | ۱ | ۰/۲ | ۰/۵ | ۱/۱ | ۰/۲ | ۰/۶ | STD |
| ۰/۲ | ۰/۰ | ۰/۱ | ۰/۱ | ۰/۰ | ۰/۱ | ۰/۲ | ۰/۰ | ۰/۱ | MAE |
| ۰/۹۹۷۳ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۹۹۹۰ | ۰/۹۹۷۳ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۹۹۹۰ | ۰/۹۹۷۱ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۹۹۸۹ | SSIM |

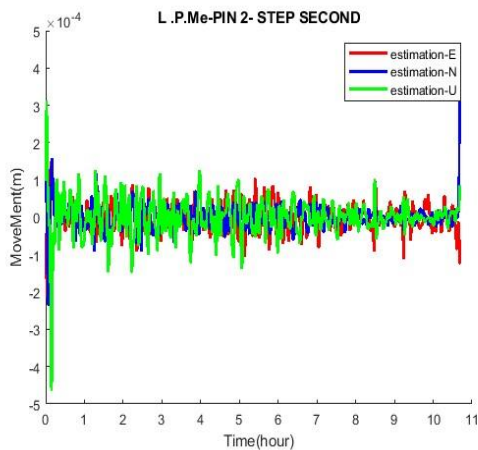


(ب)

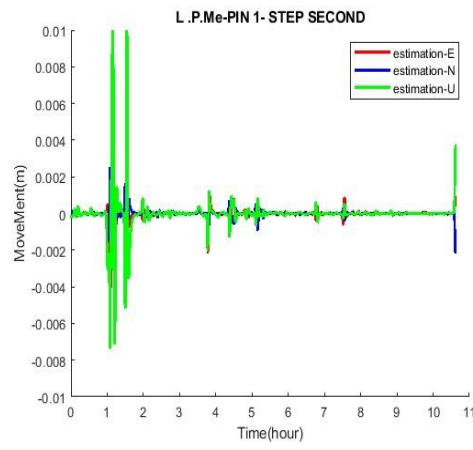


(الف)

شکل ۷. سری زمانی مؤلفه دینامیک در سه راستا: (الف)، (ب) به ترتیب برای نقاط تحت پایش PIN1 و PIN2 مربوط به مرحله یک. (منحنی قرمز: مؤلفه دینامیک در جهت شرق و منحنی آبی: مؤلفه دینامیک در جهت شمال و منحنی سبز: مؤلفه دینامیک در جهت قائم).



(ب)



(الف)

شکل ۸. سری زمانی مؤلفه دینامیک در سه راستا: (الف)، (ب) به ترتیب برای نقاط تحت پایش PIN2 و PIN1 مربوط به مرحله دو. (منحنی قرمز: مؤلفه دینامیک در جهت شرق و منحنی آبی: مؤلفه دینامیک در جهت شمال و منحنی سبز: مؤلفه دینامیک در جهت قائم).

نقطه تحت پایش در مرحله اول برابر با ۰/۴۲۸۰، ۰/۱۳۴۹ و ۰/۰۰۰۶۴- به ترتیب در جهت شرق، شمال و قائم

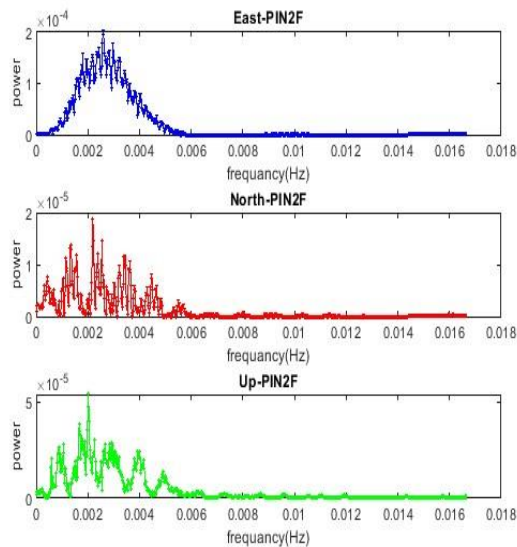
با توجه به شکل ۷ و ۸ واکنش دینامیکی نقاط تحت پایش روی پل تقریباً مشابه هستند. همبستگی رفتار دینامیکی دو

استخراج شده است، مورد استفاده قرار گرفت و تبدیل فوریه سریع به‌عنوان پالایه دوم جهت استخراج فرکانس‌های غالب در حوزه فرکانس، بر روی آن اعمال شده است. شکل ۹ و جدول ۶ نشان‌دهنده نتیجه اعمال این فیلتر و بیانگر مقدار فرکانس غالب برای نقاط تحت پایش در مراحل مختلف، در طول مدت پایش می‌باشد. باتوجه به نمودار پررودوگرام، فرکانس‌های موجود در نقاط روی پل مشابه هستند که این شباهت نمودار پررودوگرام، عملکرد سختی بالایی از پل را نشان می‌دهد. علاوه‌براین، فرکانس‌های موجود در دو راستای شرقی و شمالی نسبت به راستای قائم، بیانگر حساسیت GPS نسبت به اثرات بار است. با توجه به جدول ۶ فرکانس‌های غالب دو نقطه بسیار نزدیک به هم هستند که این بدان معنی است که حرکت پل بی‌خطر می‌باشد. در جدول ۶ غالب‌ترین مقدار فرکانس نقاط در جهت‌های مختلف درج شده است. همان‌طور که از نمودار پررودوگرام پیداست تعداد فرکانس‌های غالب بیشتر است، که این بیانگر اثرپذیری مجاز نقاط در مقابل بارهای وارده می‌باشد. ارزیابی‌های حاصل، حاکی از آن است که این پل در حوزه فرکانس، در دامنه طراحی ایمن می‌باشد.

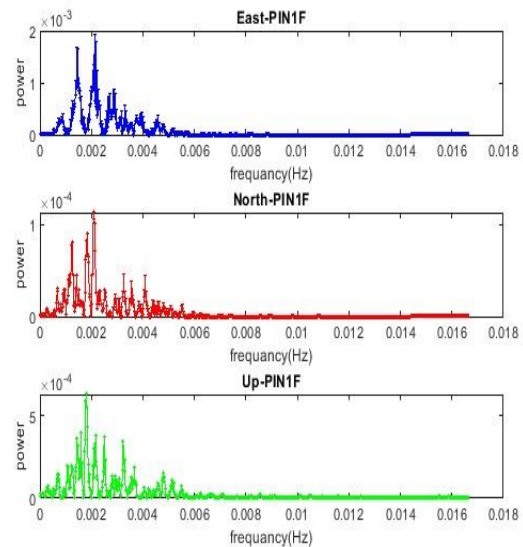
می‌باشد، که بیانگر این است که رفتار دینامیکی نقاط روی پل در راستای شرقی، بیشترین همبستگی را دارند. همچنین بیشینه حرکت مطلق دینامیکی در جهت شرقی، $12/8$ و 9 میلی‌متر به ترتیب برای نقاط PIN2 و PIN1 رخ داده است. از طرفی دیگر همبستگی رفتار دینامیکی دو نقطه تحت پایش در مرحله دوم برابر با $-0/089$ ، $0/04$ و $-0/11$ به ترتیب در جهت شرق، شمال و قائم می‌باشد، که بیانگر این است که رفتار دینامیکی نقاط روی پل در راستای ارتفاع، بیشترین همبستگی را دارند. همچنین حداکثر حرکت مطلق دینامیکی در راستای قائم 17 و $0/3$ میلی‌متر به ترتیب برای نقاط PIN2 و PIN1 رخ داده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که مؤلفه دینامیکی نقاط پل، کوچک هستند و این بدان معنی است که رفتار دینامیکی، تحت تأثیر بارهای فعلی ترافیکی، بی‌خطر است و اثری از سایر بارهای دینامیکی در بازه زمانی پایش مشاهده نشده است.

۲-۵. شناسایی و ارزیابی مؤلفه حوزه فرکانس

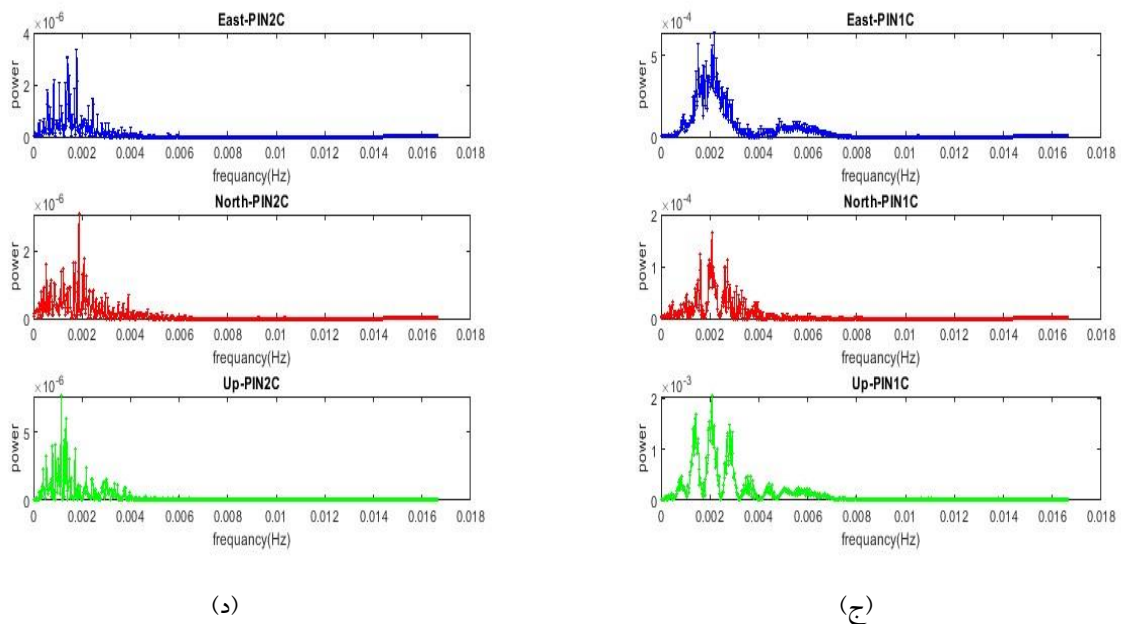
در این مطالعه جهت ارزیابی سری زمانی نقاط تحت پایش در حوزه فرکانس، مؤلفه پررود کوتاه که در بخش قبلی،



(ب)



(الف)



شکل ۹. نمودار پریودوگرام مؤلفه پریودکوتاه در سه راستای شرقی، شمالی و قائم، برای نقاط تحت پایش PIN1 (الف و ج) و PIN2 (ب و د) روی پل و مربوط به مراحل یک (الف و ب) و دو (ج و د). (منحنی آبی: مؤلفه پریود کوتاه در جهت شرق و منحنی قرمز: مؤلفه پریودکوتاه در جهت شمال و منحنی سبز: مؤلفه پریود کوتاه در جهت قائم).

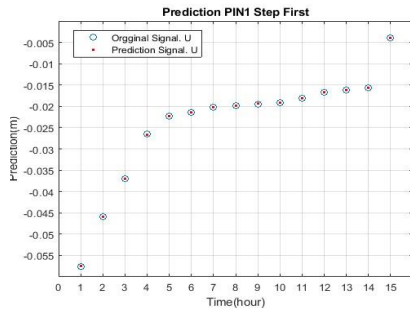
جدول ۶. فرکانس‌های غالب نقاط تحت پایش (واحد: هرتز).

| U | N | E | نقطه |
|---------|---------|---------|------------------|
| ۰/۰۰۱۸ | ۰/۰۰۲۰۷ | ۰/۰۰۲۱۲ | PIN1 (مرحله اول) |
| ۰/۰۰۲۰۷ | ۰/۰۰۲۰۷ | ۰/۰۰۲۱۶ | PIN1 (مرحله دوم) |
| ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۲۱۹ | ۰/۰۰۲۸۵ | PIN2 (مرحله اول) |
| ۰/۰۰۱۱۳ | ۰/۰۰۱۸۶ | ۰/۰۰۱۷۷ | PIN2 (مرحله دوم) |

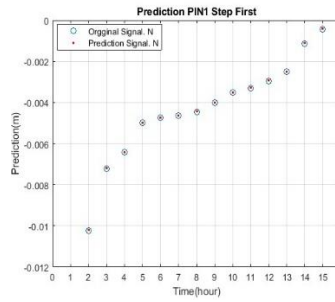
عصبی بر روی مؤلفه دینامیکی و مؤلفه نیمه‌استاتیک اعمال شده است. RMSE بین مقدار پیش‌بینی شده برای مؤلفه نیمه‌استاتیک و مقدار اصلی این مؤلفه، برای نقطه PIN1 برابر با ۰/۰۸۲ و ۰/۰۴۷ و ۰/۰۷۶ میلی‌متر و برای نقطه PIN2 نیز برابر با ۰/۰۳ و ۰/۰۱ و ۰/۰۲ میلی‌متر در مرحله اول و به ترتیب در جهت شرق، شمال و قائم می‌باشد و در مرحله دوم برای PIN1 برابر با ۰/۰۸۳، ۰/۰۳۱ و ۰/۱۲ میلی‌متر و برای PIN2 برابر با ۰/۰۲۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۰۹ میلی‌متر به ترتیب در جهت شرق، شمال و قائم می‌باشد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مدل پیش‌بینی مؤلفه نیمه‌استاتیک برای حرکت نقاط روی پل را نشان می‌دهد.

۳-۵. تعیین مدل حرکتی پل

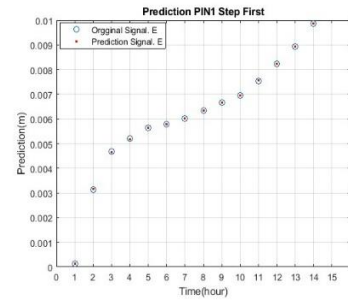
جهت تعیین مدل دینامیکی حرکت پل و پیش‌بینی آن، از جعبه‌ابزار شبکه‌های عصبی مصنوعی در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. در این بخش فقط از یک سری زمانی جهت پیش‌بینی رفتار آن در آینده استفاده می‌شود. در این مطالعه برای تعیین تعداد لایه‌های پنهان و تعداد تأخیر، یک روند تکراری مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت، مرحله‌ای که بیشترین تطابق و کمترین خطا را دارد، به‌عنوان بهترین حالت انتخاب شده است. در نهایت به‌منظور پیش‌بینی حرکت پل از شبکه عصبی با تعداد ده لایه پنهان و تعداد ده تأخیر استفاده می‌شود. مدل شبکه



(ج)

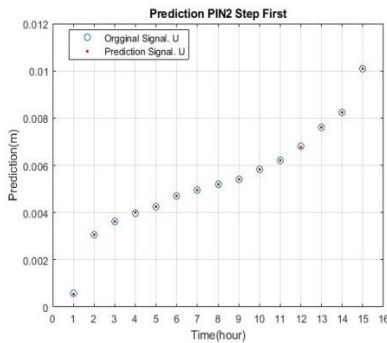


(ب)

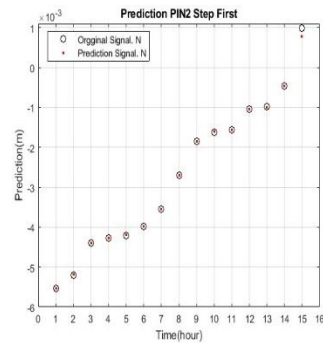


(الف)

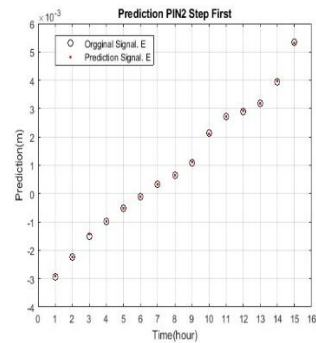
شکل ۱۰. پیش‌بینی مؤلفه نیمه‌استاتیک حرکت پل برای ایستگاه PIN1 در راستای (الف) شرق، (ب) شمال و (ج) قائم، در مرحله اول.



(ج)



(ب)



(الف)

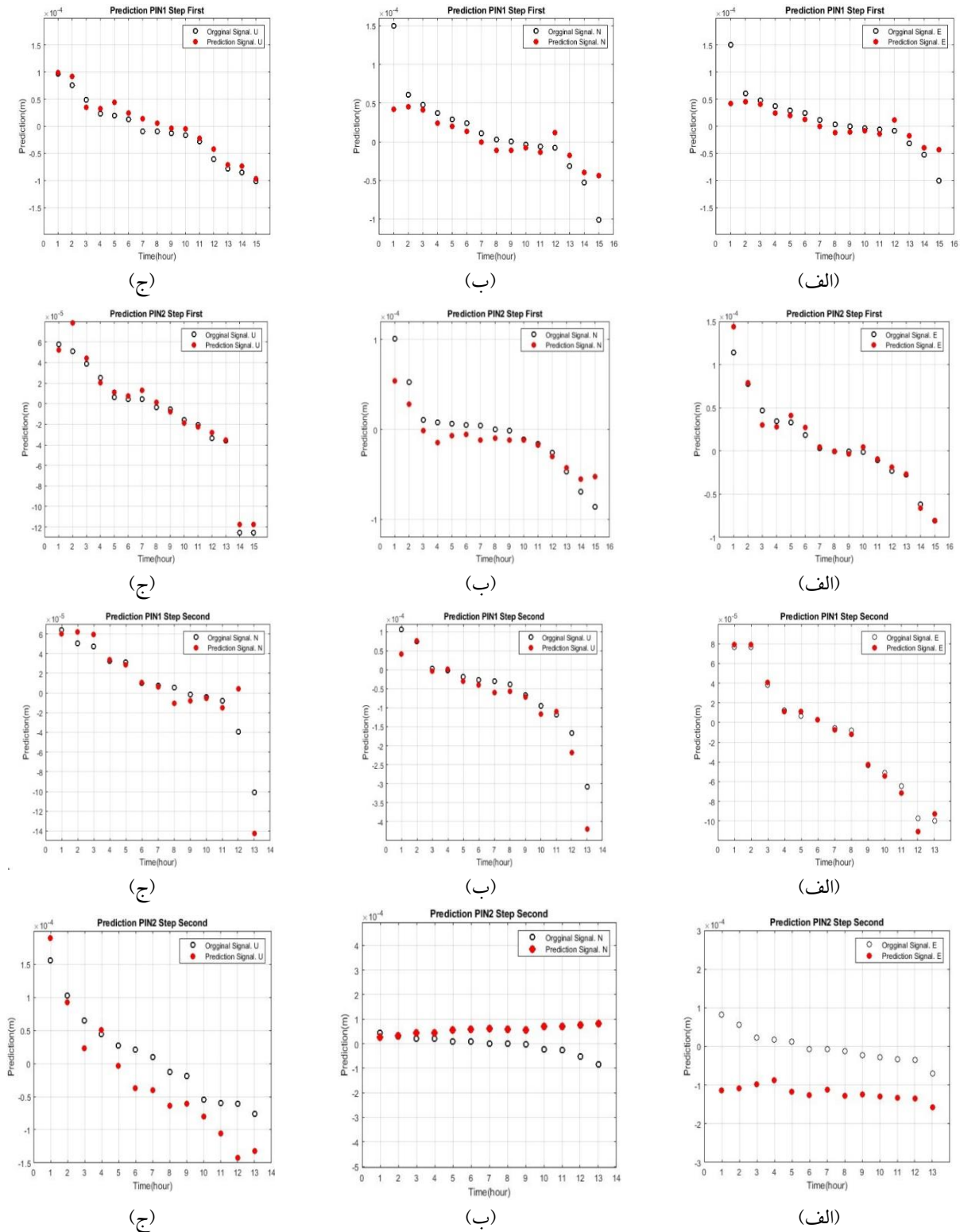
شکل ۱۱. پیش‌بینی مؤلفه نیمه‌استاتیک حرکت پل برای ایستگاه PIN2 در راستای (الف) شرق، (ب) شمال و (ج) قائم، در مرحله اول.

شرق، شمال و قائم می‌باشد. در مرحله دوم برای PIN1 برابر با ۰/۰۶۷ و ۰/۰۶۷ و ۰/۲۸ میلی‌متر و برای PIN2 برابر با ۰/۱۲، ۰/۰۷۸ و ۰/۰۴۷ میلی‌متر به ترتیب در جهت شرق، شمال و قائم می‌باشد. مقدار خطای مدل پیش‌بینی برای هر دو نقطه در مراحل مختلف محاسبه و در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج خطاهای مدل نشان‌دهنده این است که رفتار کامل پل در حوزه زمان بی‌خطر می‌باشد.

مدل پیش‌بینی مؤلفه دینامیک نقاط روی پل نیز با استفاده از شبکه‌عصبی به‌دست آمده است. شکل ۱۲ مدل پیش‌بینی مؤلفه دینامیکی برای حرکت نقاط تحت پایش را نشان می‌دهد. مقدار RMSE محاسبه‌شده بین مدل به‌دست آمده برای این مؤلفه و مقدار اصلی این مؤلفه، برای نقطه PIN1 برابر با ۰/۲۶، ۰/۰۸۴ و ۰/۱۱۵ میلی‌متر و برای نقطه PIN2 نیز برابر با ۰/۸۵۹، ۰/۰۶۳ و ۰/۰۴۱ میلی‌متر در مرحله اول و به ترتیب در جهت

جدول ۷. مقدار خطای مدل پیش‌بینی مؤلفه دینامیکی نقاط تحت پایش (واحد: میلی‌متر)

| ایستگاه | | خطای مدل | |
|---------|--------|----------|-------------------|
| H | N | E | |
| ۰/۱۰۷۶ | ۰/۰۷۸۹ | ۰/۲۴۴۵ | مرحله اول PIN1 |
| ۰/۰۴۷۰ | ۰/۰۶۰۷ | ۰/۰۶۰۵ | مرحله اول PIN2 |
| ۰/۲۱۱۹ | ۰/۰۷۰۵ | ۰/۰۵۵۲ | مرحله دوم PIN1 |
| ۰/۰۴۷۲ | ۰/۰۷۷۳ | ۰/۱۲۲۱ | مرحله دوم PIN2 |



شکل ۱۲. پیش‌بینی مؤلفه دینامیکی حرکت پل در جهت (الف) شرق، (ب) شمال و (ج) قائم؛ برای نقاط PIN1 و PIN2 به ترتیب در مرحله اول و دوم.

۶. نتیجه‌گیری

استفاده از خروجی‌های پایش کوتاه‌مدت و دوره‌ای مشاهدات GPS، ارزیابی می‌شود. در ساخت دهانه مورد مطالعه از این پل از تکنولوژی‌های بومی، کابل پیش‌تنیده

در مطالعه حاضر رفتار کامل پل بین شهری مرکب بتنی - فلزی قدس واقع در روی رودخانه بالیخلوچای اردبیل با

۰/۰۴ میلی‌متر برای مؤلفه نیمه‌استاتیک حرکت پل به‌دست آمد.

- باتوجه به این‌که اندازه‌گیری داده‌ها و ارزیابی آنها تنها پس از ۵ ماه بعد از بهره‌برداری پل در مرحله اول و ۹ ماه پس از بهره‌برداری صورت پذیرفته است، نتایج به‌دست آمده با فاصله تقریباً چهارماه گویای سختی بالای پل در مقابل تغییرشکل ضربه‌ای می‌باشد.

- فرکانس طبیعی استخراج شده با فرکانس طبیعی طراحی شده اختلاف معناداری دارد و دلیل آن این است که طراحی سازه‌ها معمولاً با فرکانس‌های بالاتر از زمین‌لرزه‌های اخیر هر منطقه طراحی می‌شوند و از طرفی در طراحی و ساخت سازه‌ها، طراحی با المان محدود روی سازه صورت می‌گیرد و بارهای زمان بهره‌برداری اعم از بارهای دینامیکی ترافیکی، بار زنده، بار زمین‌لرزه و بار استاتیک به آنها اعمال و مدل‌سازی می‌شود. امکان به‌دست آوردن فرکانس‌های طبیعی سازه‌ها با GPS تنها با اعمال بارهای مصنوعی با ویرها و ماشین‌آلات یا وجود زمین‌لرزه‌های هم‌فرکانس با فرکانس سازه‌ها در زمان پایش و جمع‌آوری داده‌ها توسط GPS مقدور می‌باشد.

- بدیهی است طراحی پل‌ها با ضریب اطمینان بیشتر و برای بارهای استاتیکی و دینامیکی بیشتری از بارهای وارده در زمان پایش پل، طراحی می‌شوند. لذا در این تحقیق فرکانس طبیعی پل با فرایند موجود با دقت بالایی استخراج می‌شوند و می‌تواند پایه و اساس هشدار اولیه سیستم پایش سلامت پل بر اساس روش‌های اندازه‌گیری نوین باشد.

جهت ارزیابی محتوی فرکانسی غیر از تبدیل فوریه سریع استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیلات موجک نیز پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- Alpaydin, E. (2014). *Introduction to machine learning*. The MIT Press, USA, ISBN: 0262028182,9780262028189.
- Annanddas, V. G. M., Bhalla, S & ,Soh, C. K. (2017). Applications of structural health monitoring technology in Asia. *Structural*

پس‌کشیده و تکیه‌گاه الاستومری استفاده شده است. قابلیت هر دو این تکنولوژی‌ها استقامت بالا در مقابل تغییرشکل می‌باشد. در این تحقیق سعی شده است در پردازش اولیه مشاهدات GPS، با نرم‌افزار RTKLIB و قابلیت فیلتر کالمن که به ورود نوفه‌ها حساس می‌باشد نوفه سری‌های زمانی کاهش داده شود و سپس طی سه مرحله (استخراج مؤلفه‌های حرکتی پل، برآورد فرکانس‌های غالب پل و تعیین مدل دینامیک) مدل پیش‌بینی حرکات نقاط تحت پایش حاصل شود. روش‌های تحلیل سری زمانی، تبدیل فوریه سریع و مدل شبکه عصبی، برای ارزیابی حرکت پل در حوزه‌های زمان و فرکانس استفاده شده است. همچنین دقت داده‌های مورد استفاده قبل از مطالعه رفتار پل ارزیابی می‌شود. نتایج برآمده از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- دقت به‌دست آمده از پردازش اولیه سری‌های زمانی با نرم‌افزار RTKLIB و با بهره‌گیری از قابلیت فیلترکالمن برابر با ۳ میلی‌متر برآورد می‌شود.

- از پالایه MA می‌توان برای استخراج مؤلفه نیمه‌استاتیک به‌منظور حذف نوفه‌های باقی‌مانده در سری زمانی مشاهدات GPS استفاده کرد.

- تکنیک تبدیل فوریه سریع، ابزاری مفید برای استخراج و ارائه اطلاعات در مورد فرکانس‌های طبیعی قابل توجه پل می‌باشد. نتایج تجزیه و تحلیل این روش نشان می‌دهد که می‌توان از موقعیت‌های فرکانس‌های غالب برای شناسایی عملکرد پل تحت تأثیر بار در طول زمان پایش استفاده کرد.

- از مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌توان برای پیش‌بینی رفتار نیمه‌استاتیکی و دینامیکی پل در زمان‌های بعدی با دقت مناسب استفاده کرد. در این مطالعه، پیش‌بینی با RMSE نزدیک به ۰/۰۷ میلی‌متر برای مؤلفه دینامیکی و

Health Monitoring, 16(3), 324-346 ,DOI: 10.1177/1475921716653278.

Barner, K. E., & Arce, G. R. (1998). 21 Order-statistic filtering and smoothing of time-series: Part II, *Handbook of Statistics, Elsevier*, 17 , 555-602 ,<https://doi.org/10.1016/S0169->

- 7161)98(17023-2.
- Çelebi, M., Prescott, W., Stein, R., Hudnut, K., Behr, J., & Wilson, S. (1999). GPS Monitoring of Dynamic Behavior of Long-Period Structures. *Earthquake Spectra*, 15(1), 55-66. doi:10.1193/1.1586028.
- Çelebi, M., Prescott, W., Stein, R., Hudnut, K., Behr, J., & Wilson, S. (2003). GPS Monitoring of Structures: Recent Advances. In: Zschau, J., Küppers, A. (eds) Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction. *Springer*, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55903-7_94.
- Chen, G., Lin, X., Yue, Q., & Liu, H. (2016). Study on separation and forecast of long term deflection based on time series analysis. *J. Tongji Univ. Nat. Sci. Ed.*, 44, 962-968.
- Deng, G., & Cahill, L. W. (1993). An adaptive gaussian filter for noise reduction and edge detection, IEEE Conference Record Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 1615-1619, DOI: 10.1109/NSSMIC.1993.373563.
- Esteban Vazquez, G., Ramon Gaxiola-Camacho J., Bennett, R., Michel Guzman-Acevedo, G., & Gaxiola-Camacho, I. E. (2017). Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the Juarez Bridge using GPS technology. *Measurement*, 110, 146-153, DOI: 10.1016/j.measurement.2017.06.026.
- Frohlich, H., Chapelle, O., & Scholkopf, B. (2003). Feature Selection for Support Vector Machines by Means of Genetic Algorithm. Paper presented at the proceedings. 15th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, DOI: 10.1109/TAI.2003.1250182.
- Górski, P. (2015). Investigation of dynamic characteristics of tall industrial chimney based on GPS measurements using Random Decrement Method. *Engineering Structures*, 83, 30-49, DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.11.006.
- Harvey, A. C., & Trimbur, T. M. (2003). General model-based filters for extracting cycles and trends in economic time series. *Review of Economics and Statistics*, 85(2), 244-255.
- Hohensinn, R., Häberling, S., & Geiger, A. (2020). Dynamic displacements from high-rate GNSS: Error modeling and vibration detection. *Measurement*, 157, DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107655.
- Im, S. B., Hurlbaus S., & Kang, Y. J. (2013). Summary review of GPS technology for structural health monitoring. *Journal of Structural Engineering*, 139(10), 1653-1664, DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000475.
- Lai, J., Qiu, J., Feng, Z., Chen, J., & Fan, H. (2016). Prediction of Soil Deformation in Tunnelling Using Artificial Neural Networks. *Computational Intelligence and Neurosciences*, 2016, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2016/6708183>.
- Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering, 82(D): 35-45, doi:10.1115/1.3662552.
- Kalooop, M. R., & Li, H. (2009). Monitoring of bridge deformation using GPS technique. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 13(6), 423431. <https://doi.org/10.1007/s12205-009-0423-y>.
- Kalooop, M. R., Hussan, M., & Kim, D. (2019). Time-series analysis of GPS measurements for long-span bridge movements using wavelet and model prediction techniques. *Advances in Space Research*, 63(11), (3505-3521).
- Lima, J., & Casaca, J. (2008). Smoothing GNSS time series with asymmetric simple moving averages. *Lnec, Lisbon*, 12-15 May, 1-8.
- Larocca, A. P. C., Schaal, R. E., Santos, M. C., & Langley, R. B. (2006). Analyzing the dynamic behavior of suspension bridge towers using GPS. ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division, 26-29 September, Fort Worth, TX, USA.
- Malleswaran, M., Vaidehi, V., & Sivasankari, N. (2014). A novel approach to the integration of GPS and INS using recurrent neural networks with evolutionary optimization techniques. *Aerospace Science and Technology*, 32(1), 169-179, DOI: 10.1016/j.ast.2013.09.011.
- Meng, X., Xi, R. & Xie, Y. (2018). Dynamic characteristic of the forth road bridge estimated with GeoSHM. *J. Glob. Position. Syst.*, 16(4). (<https://doi.org/10.1186/s41445-018-0014-7>).
- Moschas, F., & Stiros, S. (2015). Dynamic Deflections of a Stiff Footbridge Using 100-Hz GNSS and Accelerometer Data. *Journal of Surveying Engineering*, DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000146.
- Moschas, F., & Stiros, S. (2011). Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer. *Engineering Structures*, 33, 10-17.
- Moschas, F., & Stiros, S. C. (2013). Noise characteristics of high-frequency, short-duration GPS records from analysis of identical, collocated instruments. *Measurement*, 46(4), 1488-1506. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.12.015.
- Topal, G. O., & Akpınar, B. (2022). High rate GNSS kinematic PPP method performance for monitoring the engineering structures: Shake

- table tests under different satellite configurations. *Measurement*, 189, 110451.
- Ting-Hua, Y., Hong-Nan, L., & Ming G. (2012). Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures. *Structural Control and Health Monitoring*, DOI: 10.1002/stc.1501.
- Wei, F., Jinguang, J., Shuangqiu, L., Yilin, G., Yifeng, T., Yanan, T., Peihui, Y., Haiyong, L., & Jingnan, L. (2020). Wei Fang, Jinguang Jiang, Shuangqiu Lu, Yilin Gong, Yifeng Tao, Yanan Tang, Peihui Yan, Haiyong Luo and Jingnan Liu. A LSTM Algorithm Estimating Pseudo Measurements for Aiding INS during GNSS Signal Outages. *Remote Sensing*, 12(2) 256, DOI: 10.3390/rs12020256.
- Xin, J., Zhou, J., Yang, S. X., Li, X., Wang, Y. (2018). Bridge Structure Deformation Prediction Based on GNSS Data Using Kalman-ARIMA-GARCH Model. *Sensors*, 18(1), 298. <https://doi.org/10.3390/s18010298>.
- Yu, J., Meng, X., Shao, X., Yan, B., & Yang, L. (2014). Identification of dynamic displacements and modal frequencies of a medium-span suspension bridge using multimode GNSS processing. *Engineering Structures*, 81, 432-443, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.010>.
- Yi, T. H., Li, H. N., & Gu, M. (2013). Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures. *Structural control and health monitoring*, 20(5), 649-670. <https://doi.org/10.1002/stc.1501>.
- Yu, J., Yan, B., Meng, X., Shao, X., & Ye, H. (2016). Measurement of Bridge Dynamic Responses Using Network-Based Real-Time Kinematic GNSS Technique. *Journal of Surveying Engineering*, 143(3) DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000167.
- Zhou, J., Li, X., Xia, R., Yang, J., & Zhang, H. (2017). Health Monitoring and Evaluation of Long-Span Bridges Based on Sensing and Data Analysis: A Survey, *Sensors*, 17(3), 603.