برآورد رفتار استاتیکی و دینامیکی سازه‌های مهندسی با تحلیل سری زمانی مشاهدات GPS

مطالعه موردی: پل کابلی قدس اردبیل

رحیم نامی‌زاده[1]، اصغر راست‌بود[2*]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲. استادیار، گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مقاله قبل از انتشار (ویراستاری نشده)

چکیده

رفتار سازه‌های مهندسی متأثر از بارهای استاتیکی و دینامیکی بسته به نوع طراحی، نوع مصالح به کار رفته در آنها و زمان بهره-برداری 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 نرم افزار RTKLIB برای تشکیل سری‌های زمانی مورد استفاده قرار گرفته است. برای ارزیابی حرکت پل از پالایه‌های میانگین متحرک، میانگین زمانی و میانه به‌ترتیب برای برآورد مؤلفه‌های نیمه استاتیک، استاتیک و دینامیک حرکت استفاده شد. با اعمال پالایه میانگین متحرک مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک با دقت ۴، ۱ و ۲ میلیمتر به‌ترتیب در راستاهای شرق، شمال و قائم استخراج شده است. بین مؤلفهٔ دینامیک و مؤلفهٔ پریودکوتاه RMSE برابر با ۰/۸، ۰/۱ و۴ میلی‌متر به‌ترتیب در سه جهت شرق، شمال و قائم بدست 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 تغییرشکل 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. به منظور ارزیابی محتوای فرکانسی غیر از تبدیل فوریه سریع، استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل موجک نیز پیشنهاد می‌شود.

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

Estimation of static and dynamic behavior of engineering structures with time series analysis of GPS observations

Case Study: Quds cable bridge of Ardabil

Abstract

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 was 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 processing 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 component and the short period component is 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 drawn and the dominant frequencies were identified. In practice, numerical methods such as the periodogram diagram and its visual inspection are 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 will be 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 indicate 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 basis 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.

۱. مقدمه

امروزه امکان‌سنجی و توجیه 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 به دنبال 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 سطح ایمنی سازه می‌باشد. یکی از رویکردهای جدید، قابل اعتماد و در دسترس برای این امر مهم به همراه

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 آنی اندازه‌گیری و ثبت می‌کند (ایم و همکاران، ۲۰۱۳). پل‌ها به‌عنوان نقطه اتصال زیرساخت جهانی، ملی و منطقه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار هستند و همانند سایر سازه‌ها پایش سلامت سازه‌ای (SHM: Structural Health Monitoring) را به‌عنوان فرآیندی 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 بلند مدت SHM به‌سرعت با رشد اقتصادی کشورهای آسیایی رشد کرده‌اند (آنامداس و همکاران، ۲۰۱۶). پل‌ها بدلیل هندسه و موقعیت قرارگیری آنها، به طور 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 بدلیل آسیب دیدن خصوصیات ساختاری آن، ترک‌ها و گسیختگی‌های اجزایی آن، ویژگی‌های اصلی دینامیکی این سازه تغییر می‌کند (چن و همکاران، ۲۰۱۶ ؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۷). به طور 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 بکارگیری 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 همکارن ۲۰۰۹؛ مسچس و استیروس ۲۰۱۱؛ یی و همکاران، ۲۰۱۲؛ آکپینار، ۲۰۲۲). باتوجه به اینکه شناسایی و حذف خطاهای فرآیند اندازه‌گیری و نوفه سری‌های زمانی GPS در شناسایی صحیح مؤلفه‌های حرکتی پل، یکی از اصل‌های بکارگیری 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 فرآیندهای آماری استفاده کرده‌اند (مسچس و استیروس ۲۰۱۳؛ یو و همکارن ۲۰۱۴؛ یو و همکاران ۲۰۱۶). روش حرکتی پل و ارزیابی رفتار و ساختار آن از طریق خطاهای مدل نیز امکان‌پذیر می‌باشد (لاروکا و همکارن ۲۰۰۶؛ کالوپ و همکارن 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 همکارن 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 پیش رو 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 حرکتی استاتیک، نیمه‌استاتیک 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 به‌صورت تقاطع غیرهمسطح به طول ۹۸۰ متر و تعداد ۲۱ دهانه با ساختمان بتن‌مسلح و عرشه مرکب بتنی و با تیرهای فلزی به عرض ۲۱ متر به‌صورت کنسولی ساخته شده است. طول مسیر اصلی پس از کسر طول کوله‌ها ۸۰۰ متر می‌باشد که با طراحی پنج درز انقطاع در طول مسیر، به‌صورت شش قسمت مستقل سازه‌ای ساخته شده است. بزرگترین دهانه پل به طول ۱۱۵ متر با مشخصات خاص، به‌صورت 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 به‌صورت 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، به‌صورت 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 به‌صورت پین فولادی به عمق ۱۵سانتی‌متر که پس از عبور از ضخامت آسفالت بدلیل عدم تأثیرپذیری از حرکت آسفالت و در دو طرف بدنه بتنی دهانه کابلی پل کاشته شده است، استفاده گردید. 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 آنتنTRM5800 بر روی ایستگاه‌های تحت پایش و گیرنده Leica GR50 با نوع آنتن LEIAR10 در ایستگاه مرجع، به‌صورت استاتیکی انجام شده است باید توجه داشت حرکت‌های لحظه‌ای سازه توسط دستگاه‌های مستقر در نقاط تحت پایش ثبت می‌گردد. 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 جابجایی 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 (کوتاه مدت) 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 به‌صورت بتنی مسلح و عرشه مرکب بتن مسلح با تیرهای فلزی به‌صورت کنسولی بوده و دهانه کابلی با بکارگیری کابل‌های تولید داخل پیش‌تنیده-پس‌کشیده طراحی و ساخته شده است. فوندانسیون‌ها برروی 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 بکارگیری 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 بکارگیری 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.

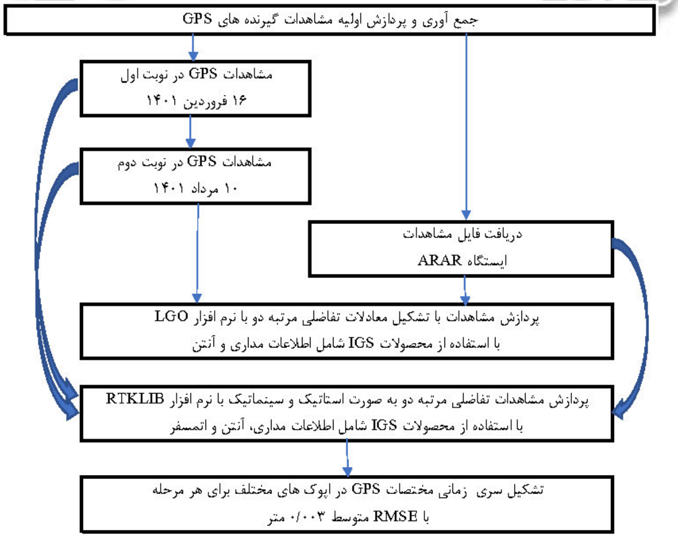
با توجه به اینکه تکنولوژی GPS می‌تواند هر دو پاسخ استاتیکی و دینامیکی سازه را اندازه‌گیری کند، تحقیق حاضر جهت پایش سلامت دهانه کابلی در حوزه بارهای استاتیک و دینامیک به تحلیل مؤلفه‌های سری زمانی داده‌های GPS پرداخته است. به‌همین‌منظور ایستگاه‌های تحت پایش جهت جمع‌آوری داده‌ها با در نظر گرفتن توزیع نیروها 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 به‌صورت مستقل مورد بررسی قرار گرفته و یکپارچه بودن رفتار سازه در مقابل بارهای وارده در زمان پایش مشخص می‌گردد. با شناخت اولیه از رفتار سازه می‌توان در مورد روند بررسی آن تصمیم‌گیری کرد و نتایج صحیح بدست آورد. به‌عنوان 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 بدلیل 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 بکار رفته و تأثیر آن در رفتار سازه، عملکرد میراگرها به‌صورت موردی، بررسی اثر تغییرات دمایی و غیره کمک کند.

پس از جمع‌آوری داده‌ها در دو نوبت در فرودین 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.

همانطورکه 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، بدست آوردن 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 دوگانه و با زاویه برش (cut of angle) پانزده درجه جهت کاهش نوفه حاصل از ماهواره‌های با زاویه ارتفاعی پایین، با نرم‌افزار RTKLIB و با بهره‌گیری از 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 نوفه حساس بوده و باعث کاهش آن می‌گردد. 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 بدست آید، برآورد قبلی با میانگین وزن‌دار بروزرسانی می‌شود. به‌این‌ترتیب 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 به‌دست آمده از پردازش‌ها به‌ترتیب در جداول ۱ و ۲ درج شده است.



شکل۲. الگوریتم جمع‌آوری و پردازش اولیه داده‌ها

جدول ۱. مختصات UTM بدست آمده از پردازش با نرم‌افزار LGO

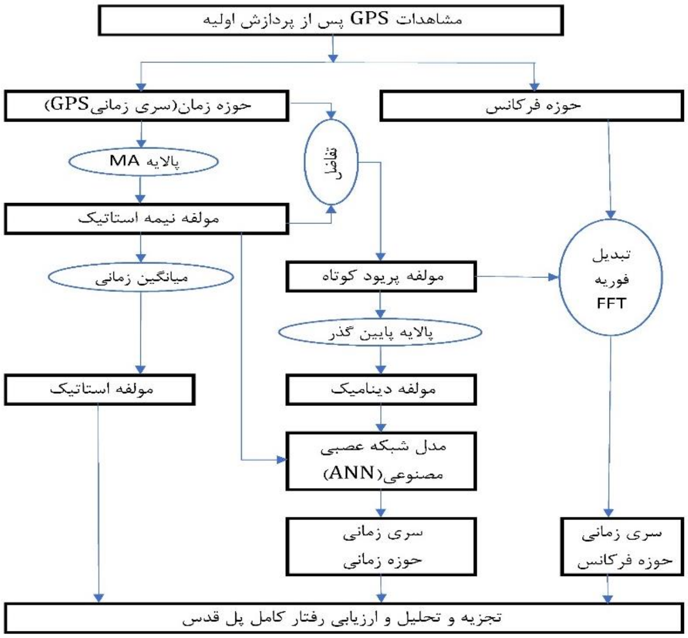
مرحله	طول مبنا	Easting (m)	Northing (m)	Height (m)	RMS (mm)
اول	ARAR-PIN1	۲۶۲۵۲۲/۲۷۵	۴۲۳۵۱۴۰/۵۰۲	۱۳۷۵/۹۳۸	۰/۱
اول	ARAR-PIN2	۲۶۲۵۱۴/۰۸۶	۴۲۳۵۱۲۳/۴۴۸	۱۳۷۶/۵۳۲	۰/۱
دوم	ARAR-PIN1	۲۶۲۵۲۲/۲۸۴	۴۲۳۵۱۴۰/۵۰۵	۱۳۷۵/۹۴۲	۰/۰
دوم	ARAR-PIN2	۲۶۲۵۱۴/۱۰۰	۴۲۳۵۱۲۳/۴۴۹	۱۳۷۶/۵۳۹	۰/۰

جدول ۲. مختصات جغرافیایی بدست آمده از سری‌های پردازش با نرم‌افزار 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

٤. روش تحقیق

جابجایی‌های نشان داده شده توسط GPS شامل سه مؤلفه حرکتی استاتیک، نیمه‌استاتیک و دینامیکی است (تینگ-هووا و همکاران، ۲۰۱۲). مؤلفه‌های نیمه‌استاتیک و دینامیکی حرکت در سری زمانی جابجایی‌های 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 بدست می‌آیند. براین‌اساس، برای استخراج مشخصات دینامیکی سیگنال، نوفه‌ها و مؤلفه‌های نیمه‌استاتیک باید حذف شوند (موشاس و استیروس ۲۰۱۵). از پالایه میانگین متحرک برای استخراج مؤلفه‌های نیمه‌استاتیک و دینامیک رفتار پل استفاده می‌شود (اسیبان 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 (ARMA: Autoregressive Moving Average) و ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) استفاده می‌شود (هوهنسین 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، ۲۰۱۸). در مطالعه حاضر از پالایه میانگین متحرک، میانگین گیری زمانی، پالایه پایین‌گذر در حوزه زمان به‌ترتیب برای استخراج مؤلفه‌های نیمه‌استاتیک، استاتیک و دینامیک استفاده شد. همچنین در حوزه فرکانس از تبدیل فوریه سریع، نمودار پریودوگرام 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 فرآیند ارزیابی کامل رفتار پل در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل۳. الگوریتم فرآیند بکار گرفته شده برای پایش پل قدس

٤-١. شناسایی و ارزیابی مؤلفه‌های حوزه زمان

٤-١-١. استخراج مؤلفۀ نیمه‌استاتیک

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 براین‌اساس تنظیم می‌شوند. از نظر ریاضی، یک میانگین متحرک نوعی از کانولوشن است، بنابراین می‌توان آن‌را به‌عنوان نمونه‌ای از پالایه پایین‌گذر که در پردازش سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرد، در نظر گرفت. همانطورکه از نام این فرآیند 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 فرآیند را می‌توان مطابق رابطه زیر بیان کرد.

$$\mathbf{y[i]=\frac{1}{M}\sum_{j=0}^{M-1} x\,[i+j]} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، x[ ] سیگنال ورودی، y[ ] 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.

٤-١-٢. استخراج مؤلفۀ استاتیک و مؤلفۀ پریودکوتاه

برای برآورد رفتار استاتیک، مطابق با الگوریتم پیشنهادی در شکل۳ از میانگین‌گیری زمانی مؤلفۀ نیمه‌استاتیک استفاده می‌شود. با توجه به‌اینکه نرخ نمونه‌برداری داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، ۳۰ ثانیه می‌باشد؛ میانگین ده دقیقۀ حرکت نیمه‌استاتیک، به‌عنوان یک رفتار استاتیک از هر نقطه در نظر گرفته می‌شود. به‌این‌صورت حرکت استاتیک نقاط تحت پایش پل نیز، محاسبه و ارزیابی می‌شود. با

برداشتن اثر مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک به‌دست‌آمده در بخش ۴-۱-۱ از روی سری زمانی داده‌های پردازش شده در نرم‌افزار RTKLIB، مؤلفهٔ کوتاه‌مدت در مشاهدات باقی می‌ماند که این مؤلفهٔ خود نیز شامل مؤلفهٔ دینامیک و نوفه‌های باقی‌مانده است.

۴-۱-۳. استخراج مؤلفهٔ دینامیک

رفتار دینامیکی با اعمال پالایه پایین‌گذر بر روی مؤلفهٔ پریودکوتاه، برآورد می‌شود. در این تحقیق پالایه‌های پایین‌گذر مختلفی از جمله Butter Filter (آندرو و توماس ۲۰۰۳)، Median Filter (بارنر و همکاران، ۱۹۹۸) و Gaussian Filter (دنگ و همکاران، ۱۹۹۴) جهت استخراج مؤلفهٔ دینامیکی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در نهایت از بین آنها، برای انتخاب پالایه بهینه از معیارهای ارزیابی مانند جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، انحراف معیار (STD)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ماتریس شاخص شباهت ساختاری (SSIM) استفاده شده است.

۴-۲. شناسایی و ارزیابی مؤلفهٔ 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 پریودیک استفاده می‌شود. همچنین از تبدیل فوریه سریع جهت شناسایی نوفه در مؤلفهٔ 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 بررسی قرار گیرد. معادله (۲) تبدیل فوریه سریع (FFT) را نشان می‌دهد:

$$X_{xx}(f) = \sum_{k=o}^{M} \mathrm{corr}_{xx}(k)\, W(k)\, e^{i2\pi f_k/f_s} \qquad (۲)$$

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 براساس FFT نمودار پریودوگرام ترسیم و فرکانس‌های غالب شناسایی می‌گردند.

۴-۳. مدل حرکتی رفتار پل

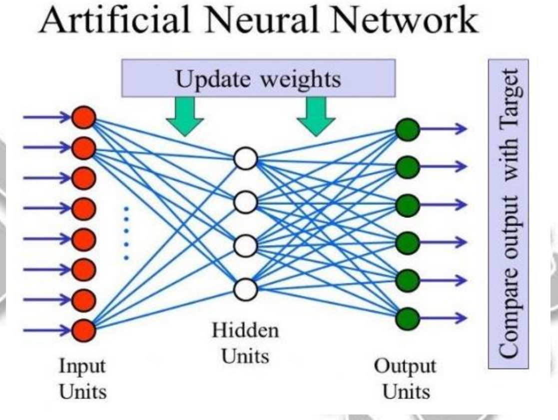
همانطورکه مطرح شد به‌منظور برآورد و پیش‌بینی رفتار دینامیکی پل، مدل شبکه‌عصبی مصنوعی (ANN: Artificial Neural Network) مورد استفاده قرار گرفته است. بسیاری از مطالعات از این مدل برای پیش‌بینی تعیین موقعیت با تلفیق GPS و INS استفاده کرده‌اند (مالسوارن و همکارن ۲۰۱۴؛ وی و همکاران ۲۰۲۰). به‌منظور تعیین مدل 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 پرسپترون 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. نورون‌های همسایه به‌عنوان 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 به‌عنوان ورودی جدید را می‌توان به‌عنوان دیگر وظایف این واحد نام برد (فرهلیچ ۲۰۰۲؛ 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.

$$U_k = \sum_{j=1}^{m} W_{kj} X_j \qquad (۳)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \qquad (۴)$$

دراین رابطه x_1،x_2، ....، x_m ورودی هستند؛ w_{k_1}،w_{k_2}،...، w_{k_m} وزن‌های نورون عصبی k ، U_k خروجی ترکیب خطی از پارامترهای ورودی، b_k بایاس، φ تابع فعال‌سازی و y_k خروجی نورون kام می‌باشد.



شکل ۴- نمای شماتیک از شبکه عصبی MLP

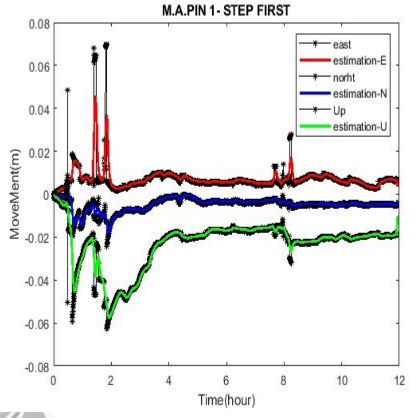
۵. تجزیه و تحلیل نتایج

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

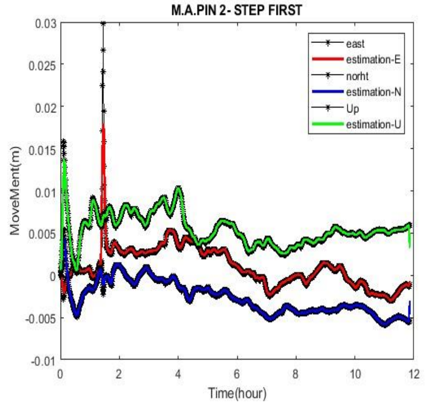
۵-۱. ارزیابی حرکت پل

از پالایه MA، جهت هموارسازی داده‌های GPS به‌منظور برآورد مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک استفاده شد و با اعمال این پالایه، مؤلفهٔ نیمه-استاتیک (پریود طولانی) از روی مشاهدات جدا شده و مؤلفهٔ پریودکوتاه در مشاهدات باقی می‌ماند شکل ۵ داده‌های هموار شده سری‌های زمانی GPS که بیانگر مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک هستند را برای نقاط PIN1 و PIN2 به‌ترتیب سری‌های زمانی مرحله اول و مرحله دوم نشان می‌دهد. مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک برآورد شده با سری‌های زمانی داده‌های GPS حاصل از پردازش اولیه، برای هر دو نقطه در

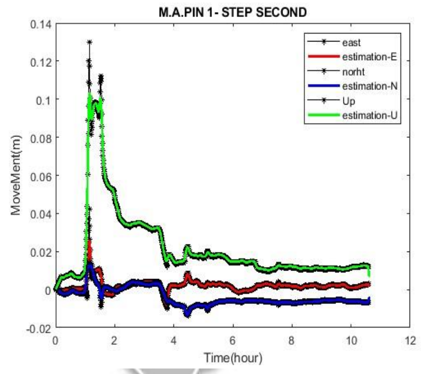
مرحله اول دارای ضریب همبستگی ۸۵ درصد در جهت شرق، ۹۴ درصد در جهت شمال، و ۹۷ درصد در جهت قائم و برای مرحله دوم دارای ضریب همبستگی ۹۷ درصد در جهت شرق، و ۹۹ درصد در جهت شمال و قائم می‌باشد. بنابراین این مؤلفه با سری‌های زمانی داده‌های GPS همبستگی زیادی دارند و تقریباً مشابه آن هستند؛ در نتیجه اطلاعات اولیه در مورد مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک قابل استخراج است.



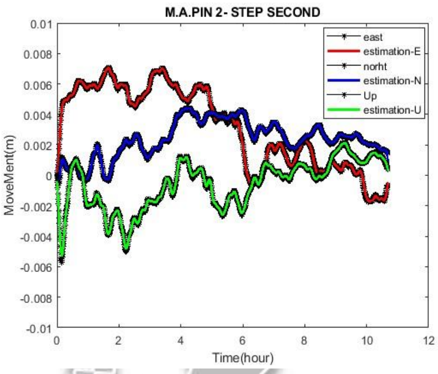
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل۵- 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: مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک در جهت شرق، و منحنی آبی: مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک در جهت شمال، و منحنی سبز: مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک در جهت قائم).

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

	PIN۱ (مرحله اول)			PIN۲ (مرحله اول)		
	E	N	H	E	N	H
میانگین	۷/۲	−۴/۷	−۲۳	۱	−۲/۶	۵/۴۴
بیشینه	۴۵/۸	۱/۶	−۰/۳	۱/۸	۴/۴	۱۳/۶۹
انحراف میار	۴/۷	۳/۰۶	۱/۰۸	۲/۴	۱/۹۷	۱/۸۹
	PIN۱ (مرحله دوم)			PIN ۲ (مرحله دوم)		
	E	N	H	E	N	H
میانگین	۲/۰۶	−۳/۹	۲۱/۹۱	۳/۱۸	۲/۳۸	−۰/۶

بیشینه	۲۵/۸	۱۲/۷۳	۱۰۳/۴	۷/۰۴	۴/۴۱	۲/۱۱
انحراف میار	۳/۰۶	۴/۵۵	۲۰/۰۳	۲/۶۷	۱/۲۱	۱/۶۱

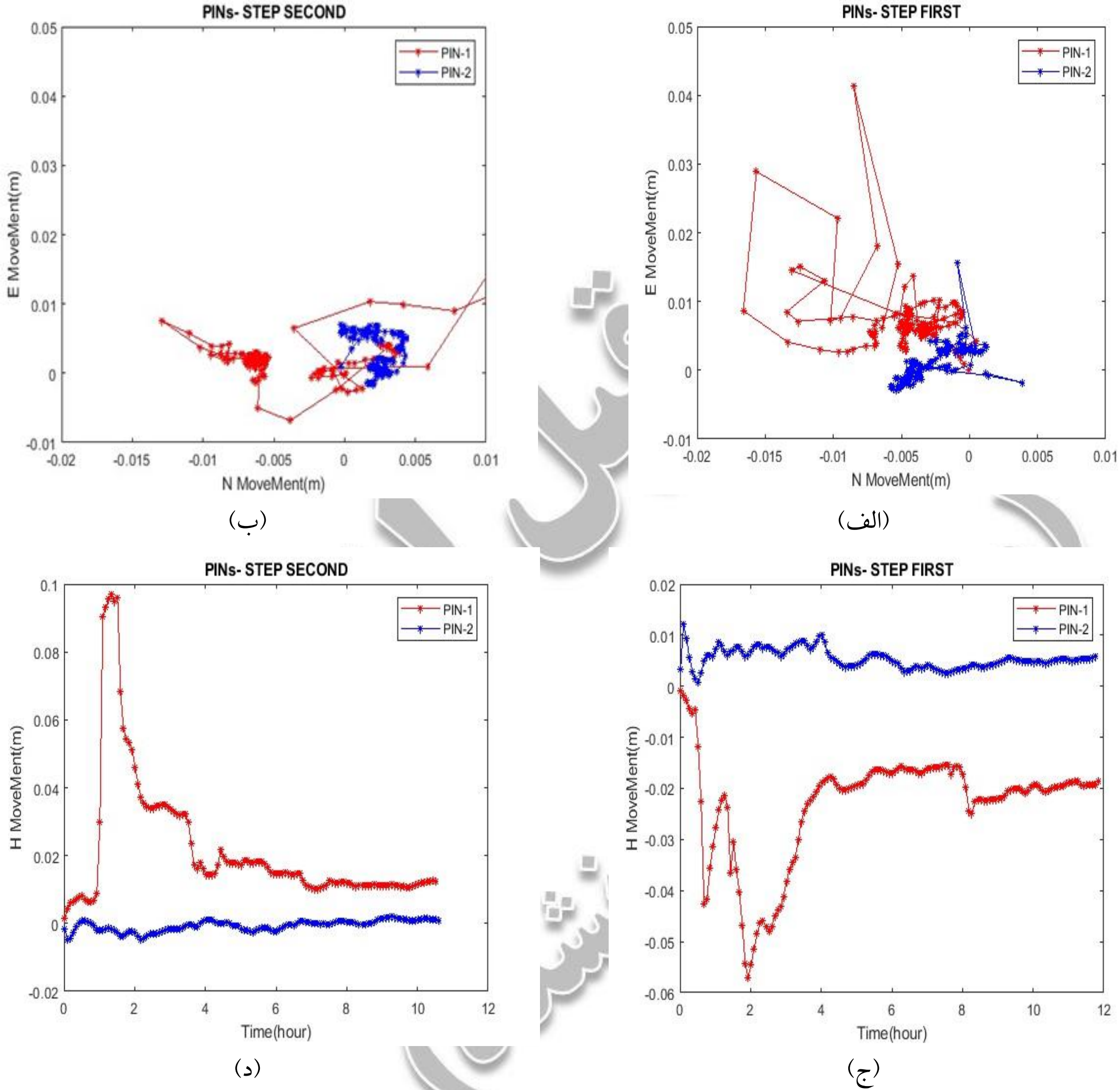
جهت ارزیابی حرکت نیمه‌استاتیک؛ میانگین، مقدار بیشینه و انحراف معیار مقدار جابجایی مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک محاسبه و در جدول شماره ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل ۵ و جدول ۳، بیشینه جابه‌جایی نقاط روی پل در جهت شرق بوده و بیشترین جابجایی در جهت شرقی و غربی می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار انحراف معیار در هر دو 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 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 مؤلفهٔ 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 مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک در دو نقطه، چه‌میزان به یکدیگر وابسته هستند و در اثر جابه‌جایی یک نقطه در یک جهت، نقطهٔ دیگر در جهت‌های مختلف، چه مقدار جابه‌جا می‌شود. همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است، زمانی که نقطهٔ PIN1 در جهت شرق یا شمال یا قائم جابجا می‌شود، نقطهٔ PIN2 نیز در هر سه جهت جابجا می‌شود اما با توجه به اعداد موجود در قطر اصلی جدول، همبستگی و در نتیجه مقدار جابجایی نقطهٔ PIN2، در همان جهتی است که نقطهٔ PIN1، جابجا 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) بدلیل اندرکنش سازه پل در تغییر دمایی و میزان بار ترافیکی ارزیابی می‌گردد. بنابرین می‌توان نتیجه گرفت که این پل تحت تأثیر بار ترافیکی موجود ایمن است. از تجزیه و تحلیل همبستگی می‌توان برای بررسی وضعیت سلامتی سازه‌ها استفاده کرد.

جدول۴- ضریب همبستگی مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک نقطه PIN2 نسبت به PIN1 در دو مرحله

پل	مرحله اول	PIN2		
	جهت	E	N	H
PIN1	E	۰/۵۵۵۱	۰/۱۴۰۹	۰/۰۸۲۵
	N	-۰/۲۷۷	-۰/۲۸۷۸	-۰/۳۰۲۴
	H	-۰/۴۰۷۶	-۰/۴۷۸۶	۰/۴۰۶۱
پل	مرحله دوم	PIN2		
	جهت	E	N	H
PIN1	E	۰/۱۷۴۵	۰/۵۰۷۷	۰/۵۱۳
	N	۰/۰۱۷۱	-۰/۶۱۰۸	-۰/۳۱۴۴
	H	-۰/۰۰۵۴	-۰/۵۲۹۹	-۰/۴۸۸۵

از طرفی حرکات استاتیک نقاط تحت پایش محاسبه و ارزیابی شده است. شکل ۶ – الف و 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 به‌دلیل 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 نمی-

کند. به‌همین‌ترتیب 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 به‌دلیل توزیع بار نقطه‌ای و جهت و ترافیک صبحگاهی روی پل ارزیابی می‌گردد.



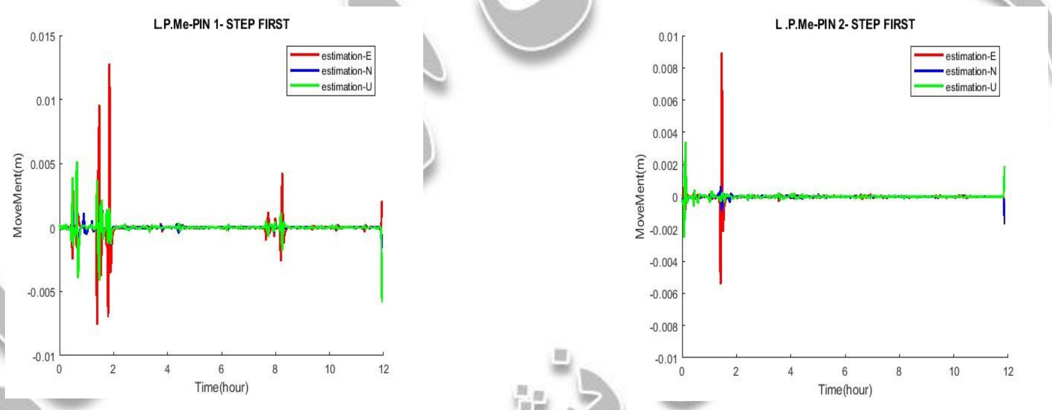
شکل ۶- مؤلفۀ استاتیک نقاط PIN1 و PIN2 روی پل: الف- جابجایی مسطحاتی جهت شرق نسبت به شمال در مرحله اول، ب: جابجایی مسطحاتی جهت شرق نسبت به شمال در مرحله دوم، ج و د: سری زمانی مؤلفۀ استاتیک در جهت H به‌ترتیب مرحله اول و دوم، رنگ قرمز: سری زمانی ارتفاعی نقطه PIN1 و رنگ آبی سری زمانی ارتفاعی نقطه PIN2.

جهت استخراج مؤلفۀ پریودکوتاه، از تفاضل مشاهدات پردازش شده GPS و مؤلفۀ نیمه‌استاتیک به دست آمده استفاده می‌شود. وسپس رفتار دینامیکی با اعمال پالایه پایین‌گذر بر روی مؤلفۀ پریودکوتاه، برآورد می‌شود. در این تحقیق پالایه‌های پایین‌گذر مختلفی از جمله Butter Filter، Median Filter و Gaussian Filter جهت استخراج مؤلفۀ 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 RMSE، MAE، و STD 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 برروی 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 بدست آمده، پالایه میانه با کمترین خطا (۰/۴، ۰/۱ و ۰/۸ میلیمتر به‌ترتیب در راستای شرق، شمال و قائم) و بیشترین دقت به‌عنوان روشی بهینه جهت برآورد مؤلفهٔ دینامیکی انتخاب شده است. شکل ۷ رفتار دینامیکی استخراج شده از نقاط تحت پایش را در هر دو مرحله نشان می‌دهد.

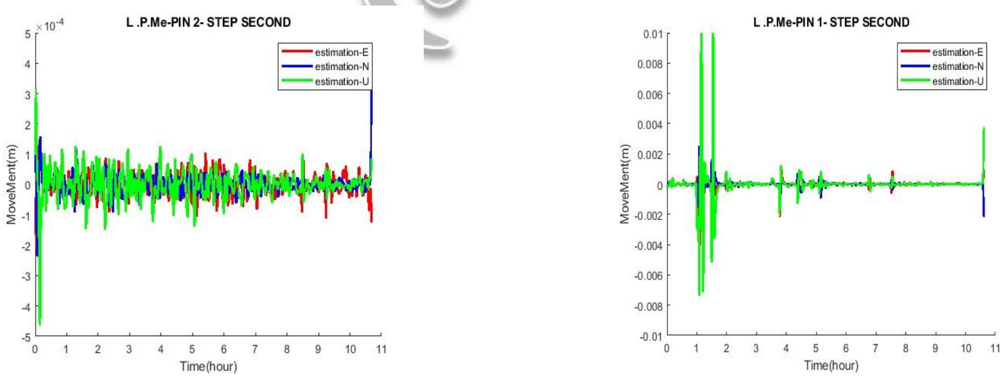
جدول ۵- ارزیابی آماری مؤلفه دینامیک نقطه PIN1 روی پل (واحد: میلی‌متر)

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



(ب) (الف)

شکل۷- سری زمانی مؤلفهٔ دینامیک در سه راستا: (الف)، (ب) به ترتیب برای نقاط تحت پایش PIN1 و PIN2 مربوط به مرحله یک. (منحنی قرمز: مؤلفهٔ دینامیک در جهت شرق و منحنی آبی: مؤلفهٔ دینامیک در جهت شمال و منحنی سبز: مؤلفهٔ دینامیک در جهت قائم).



(الف) (ب)

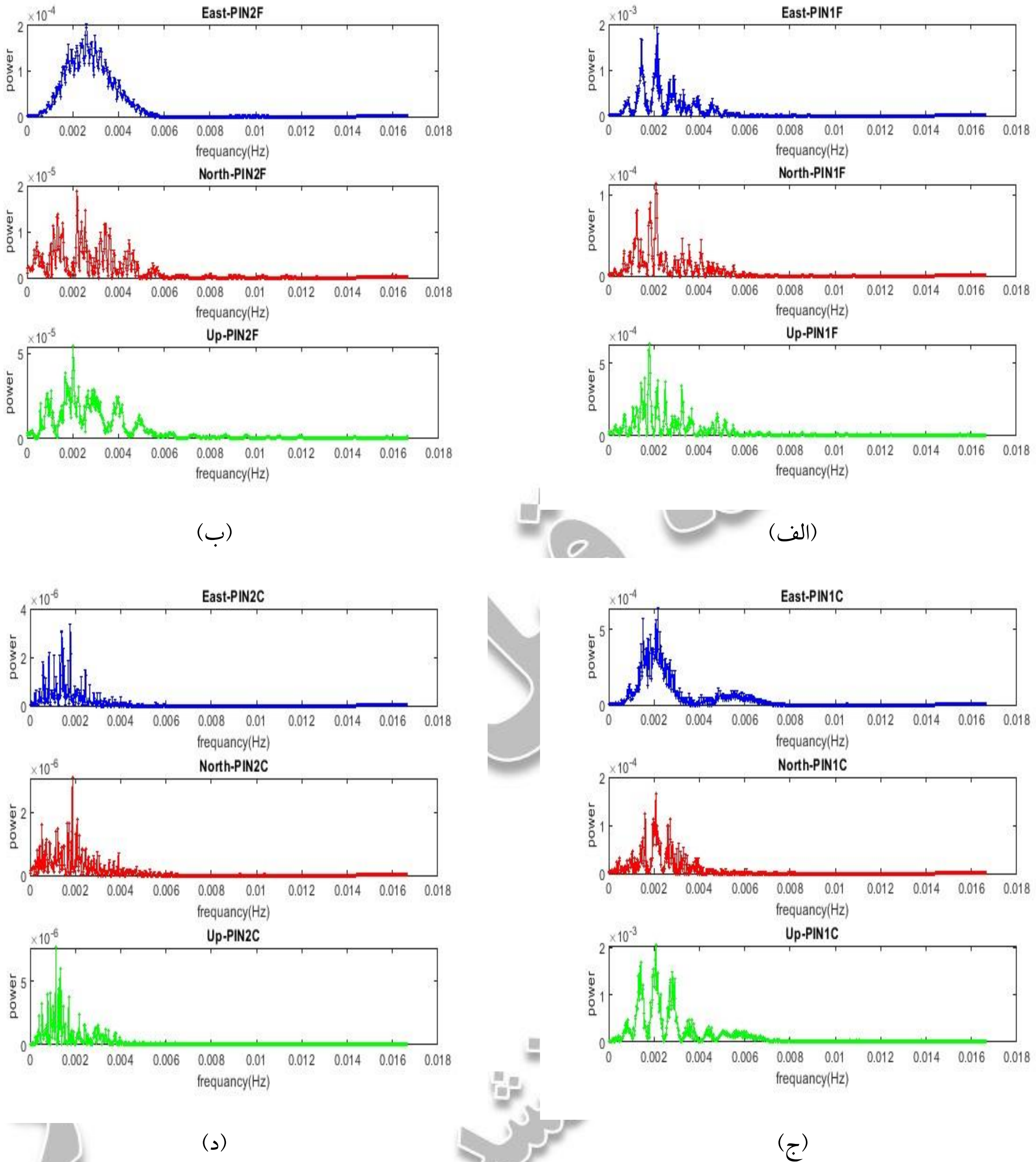
شکل۸- سری زمانی مؤلفهٔ دینامیک در سه راستا: (الف)، (ب) به ترتیب برای نقاط تحت پایش PIN1 و PIN2 مربوط به مرحله دو. (منحنی قرمز: مؤلفهٔ دینامیک در جهت شرق و منحنی آبی: مؤلفهٔ دینامیک در جهت شمال و منحنی سبز: مؤلفهٔ دینامیک در جهت قائم).

با توجه به شکل ۷ و ۸ واکنش دینامیکی نقاط تحت پایش روی پل تقریباً مشابه هستند. همبستگی رفتار دینامیکی دو نقطه تحت پایش در مرحله اول برابر با ۰/۴۲۸۰، ۰/۱۳۴۹ و ۰/۰۰۰۶۴- به‌ترتیب در جهت شرق، شمال و قائم 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، ۱۲/۸ و ۹ میلی‌متر به‌ترتیب برای نقاط PIN1 و PIN2، رخ داده است. از طرفی دیگر همبستگی رفتار دینامیکی دو نقطه تحت پایش در مرحله دوم برابر با ۰/۰۸۹-، ۰/۰۴ و ۰/۱۱- به‌ترتیب 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 ۱۷ و ۰/۳ میلی‌متر به‌ترتیب برای نقاط PIN1 و PIN2 رخ داده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که مؤلفهٔ 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 مؤلفهٔ حوزه فرکانس

در این مطالعه جهت ارزیابی سری زمانی نقاط تحت پایش در حوزه فرکانس، مؤلفهٔ پریودکوتاه که در بخش قبلی، 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 پریودوگرام، فرکانس‌های موجود در نقاط روی پل مشابه هستند که این شباهت نمودار پریودوگرام، 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 نزدیک‌به‌هم 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 پریودوگرام 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.

مقاله قبل از انتشار (ویراستاری نشده)



شکل ۹- نمودار پریودوگرام مؤلفۀ 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: مؤلفۀ پریود کوتاه در جهت شرق و منحنی قرمز: مؤلفۀ پریودکوتاه در جهت شمال و منحنی سبز: مؤلفۀ پریود کوتاه در جهت قائم).

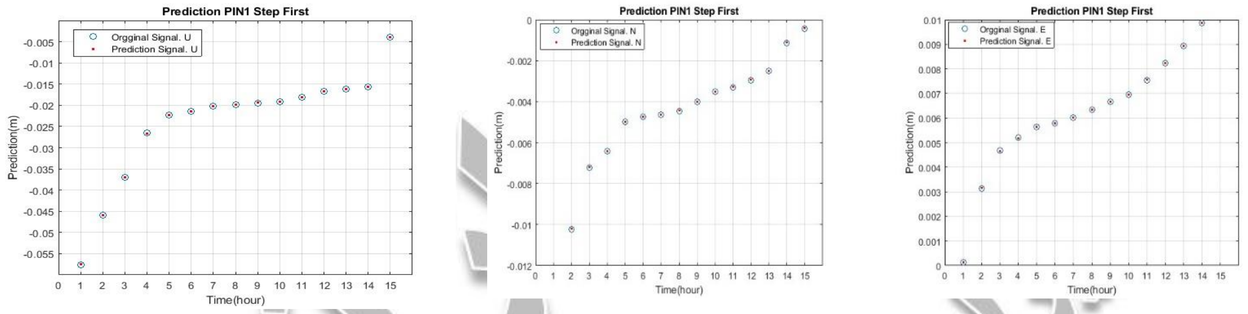
جدول ۶. فرکانس‌های غالب نقاط تحت پایش (واحد: هرتز)

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

PIN2 (مرحله دوم)	۰/۰۰۱۷۷	۰/۰۰۱۸۶	۰/۰۰۱۱۳

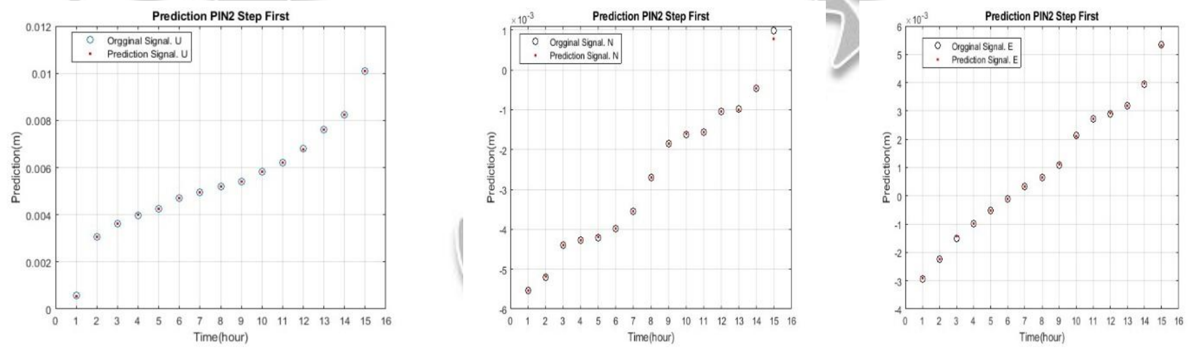
۳-۵. تعیین مدل حرکتی پل

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 لایه-های 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 عصبی بر روی مؤلفهٔ دینامیکی و مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک اعمال شده است. RMSE بین مقدار پیش‌بینی شده برای مؤلفهٔ 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، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ میلی‌متر در مرحله اول و به‌ترتیب در جهت شرق، شمال و قائم می‌باشد و در مرحله دوم برایPIN1 برابر با ۰/۰۸۳، ۰/۰۳۱ و ۰/۱۲ میلی‌متر و برای PIN2 برابر با ۰/۰۲۵، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۰۹ میلی‌متر به‌ترتیب در جهت شرق، شمال و قائم می‌باشد. شکل‌های ۱۰ و۱۱ مدل پیش‌بینی مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک برای حرکت نقاط روی پل را نشان می‌دهد.



(ج) (ب) (الف)

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



(ج) (ب) (الف)

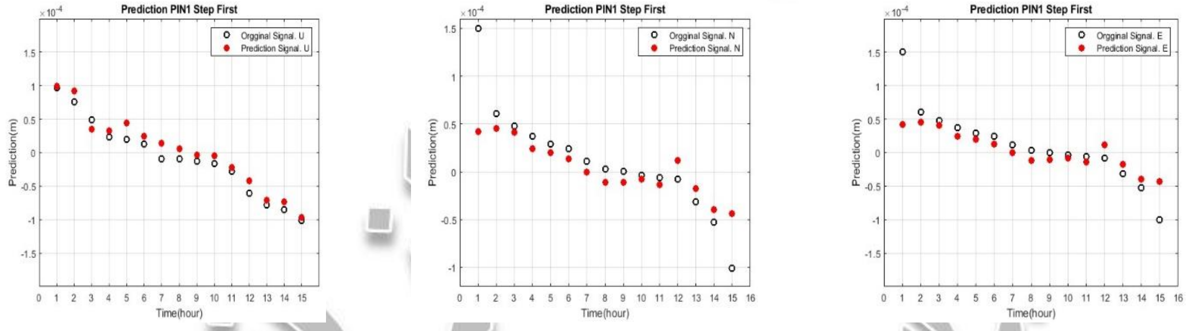
شکل ۱۱. پیش‌بینی مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک حرکت پل برای ایستگاه PIN2 در راستای (الف) شرق، (ب) شمال و (ج) قائم در مرحله اول.

مدل پیش‌بینی مؤلفهٔ دینامیک نقاط روی پل نیز با استفاده از شبکه‌عصبی به‌دست آمده است. شکل ۱۲ مدل پیش‌بینی مؤلفهٔ دینامیکی برای حرکت نقاط تحت پایش را نشان می‌دهد. مقدار RMSE محاسبه شده بین مدل بدست آمده برای این مؤلفهٔ و مقدار اصلی این مؤلفهٔ، برای نقطهPIN1 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

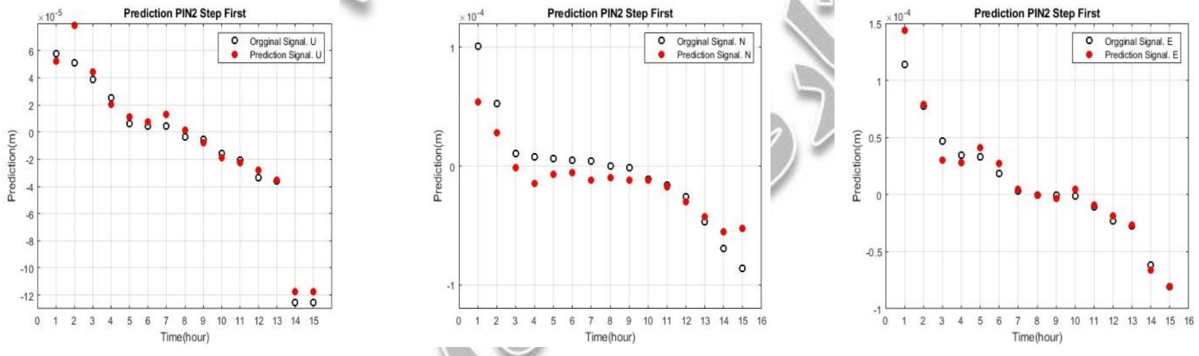
اول و به‌ترتیب در جهت شرق، شمال و قائم می‌باشد. در مرحله دوم برای PIN1 برابر با ۰/۰۶۷ و ۰/۰۶۷ و ۰/۲۸ میلی‌متر و برای PIN2 برابر با ۰/۱۲، ۰/۰۷۸ و ۰/۰۴۷ میلی‌متر به‌ترتیب در جهت شرق، شمال و قائم می‌باشد. مقدار خطای مدل پیش‌بینی برای هر دو نقطه در مراحل مختلف محاسبه و در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج خطاهای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

جدول۷- مقدار خطای مدل پیش‌بینی مؤلفهٔ دینامیکی نقاط تحت پایش (واحد: میلی‌متر)

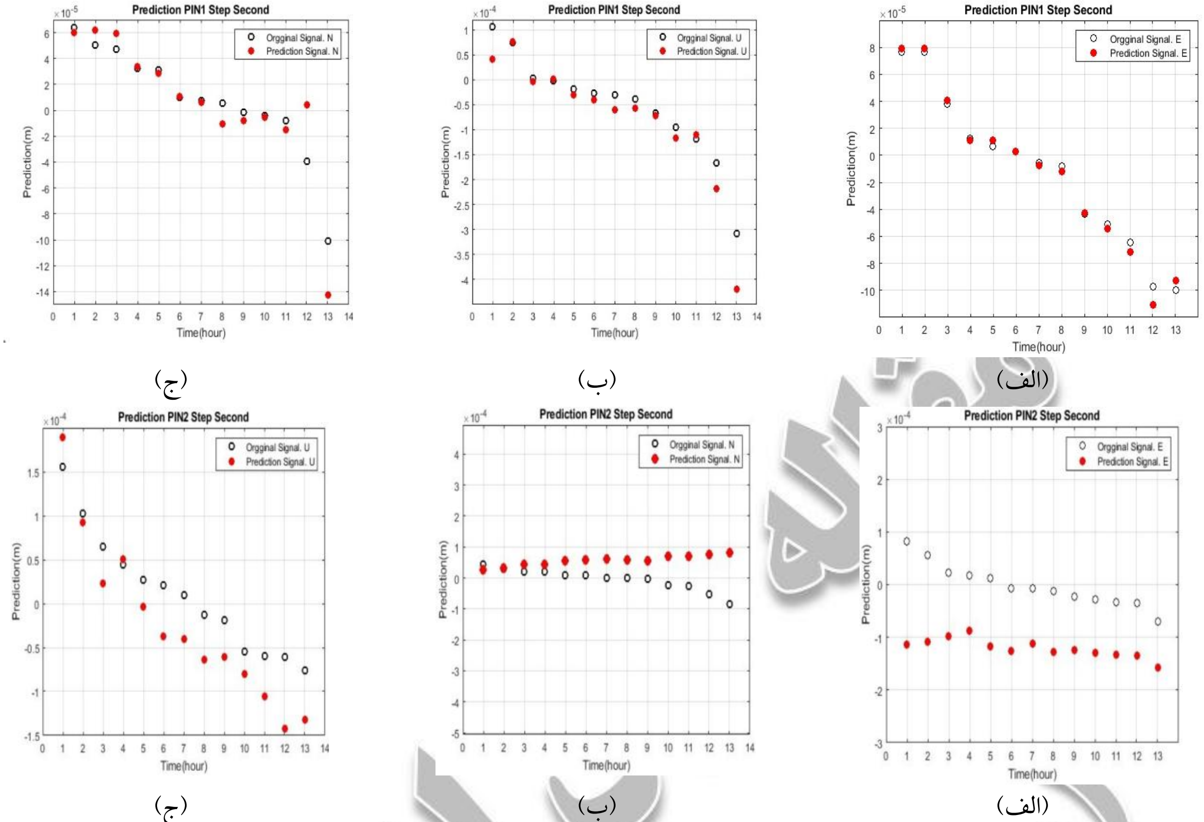
خطای مدل	ایستگاه		E	N	H
RMSE	PIN1	مرحله اول	۰/۲۴۴۵	۰/۰۷۸۹	۰/۱۰۷۶
	PIN2	مرحله اول	۰/۰۶۰۵	۰/۰۶۰۷	۰/۰۴۷۰
	PIN1	مرحله دوم	۰/۰۵۵۲	۰/۰۷۰۵	۰/۲۱۱۹
	PIN2	مرحله دوم	۰/۱۲۲۱	۰/۰۷۷۳	۰/۰۴۷۲



(الف) (ب) (ج)



(الف) (ب) (ج)



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

۶. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر رفتار کامل پل بین‌شهری مرکب بتنی- فلزی قدس واقع در روی رودخانه بالیخلوچای اردبیل با استفاده از خروجی‌های پایش کوتاه‌مدت و دوره‌ای مشاهدات GPS، ارزیابی می‌شود. در ساخت دهانه مورد مطالعه از این پل از تکنولوژی‌های بومی، کابل پیش‌تنیده-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:

(۱) دقت بدست آمده از پردازش اولیه سری‌های زمانی با نرم‌افزار RTKLIB و با بهره‌گیری از قابلیت فیلترکالمن برابر با ۳ میلی‌متر برآورد می‌شود.

(۲) از پالایه MA می‌توان برای استخراج مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک به منظور حذف نوفه‌های باقیمانده در سری زمانی مشاهدات GPS استفاده کرد.

(۳) تکنیک تبدیل فوریه سریع، ابزاری مفید برای استخراج و ارائه اطلاعات در مورد فرکانس‌های طبیعی قابل‌توجه 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.

(۴) 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 مؤلفهٔ دینامیکی و ۰/۰۴ میلی‌متر برای مؤلفهٔ نیمه‌استاتیک حرکت پل بدست آمد.

(۵) 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.

(۶) 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 المان‌محدود 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 بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی سازه‌ها با GPS تنها با اعمال بارهای مصنوعی با ویبره‌ها و ماشین‌-آلات یا وجود زمین‌لرزه‌های هم‌فرکانس با فرکانس سازه‌ها در زمان پایش و جمع‌آوری داده‌ها توسط GPS مقدور می‌باشد.

(۷) 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 اولیهٔ سیستم پایش سلامت پل براساس 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.

Annamdas, V. G. M., Bhalla, S., and Soh, C. K., 2016, IWSHM 2015: Applications of Structural Health Monitoring Technology in Asia, 1-23, DOI: 10.1177/1475921716653278.

Çelebi M, Prescott W, Stein R, Hudnut K, Behr J, Wilson S. GPS Monitoring of Dynamic Behavior of Long-Period Structures. Earthquake Spectra. 1999;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., and 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.

Department of Electronic Engineering, La Trobe University Bundoora Victoria3083 Australia. 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., and 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., Hurlebaus S., and 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.

Jinxing, L., Junling Q., Zhihua F., Jianxun C., and Haobo F., 2015, Prediction of Soil Deformation in Tunnelling Using Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Neurosciences, **2016**, 1-16, DOI: 10.1155/2016/6708183.

Jingzhou, X., Jianting, Z., Simon, X. Y., Xiaoqing L. and Wang Y., 2018, Bridge Structure Deformation Prediction Based on GNSS Data Using Kalman-ARIMA-GARCH Model. Sensors, **18**(1), DOI: 10.3390/s18010298.

Jiayong, Y., Xiaolin, M., Xudong, S., Banfu, Y., Lei, Y., 2014, Yu J, Meng X, Shao X, Yan B, Yang L. Identification of dynamic displacements and modal frequencies of a medium-span suspension bridge using multimode GNSS processing. Engineering Structures, **81**, 432–443, DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.10.010.

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.

Kenneth, E. B., and Gonzalo R. A., 1998, Order-Statistic Filtering and Smoothing of Time-Series: Part II, Handbook of Statistics, **17**, 555-602.

Lima, J., and 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.

Mosbeh, R. K., Mosaruf, H., Dookie, K., 2019, Time-series Analysis of GPS Measurements for Long-span Bridge Movements using Wavelet and Model Prediction Techniques, Advances in Space Research, **63**, 3505-3521, DOI: 10.1016/j.asr.2019.02.027.

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.

Mosbeh R. K., and Hui L., 2009, Monitoring of Bridge Deformation Using GPS Technique, KSCE Journal of Civil Engineering, **13**(6): 423-431, DOI: 10.1007/s12205-009-0423-y.

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.

Siti A. A., Anuar A., and Zulkarnaini, M. A., ARIMA model time-series forecasting for structural monitoring using RTK-GPS, In: 7th International Symposium & Exhibition on Geoinformation (ISG 2008), 13-15 October 2008, Putra World Trade Centre(PWTC), Kuala Lumpur, Malaysia.

Topal G. O., Akpinar, B., 2022, High rate GNSS kinematic PPP method performance for monitoring the engineering structures: Shake table tests under different satellite configurations, Measurement, **189**.

Ting-Hua, Y., Hong-Nan, L., and 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.

Xiaolin, M., Ruijie X., and Yilin X., 2018, Dynamic characteristic of the forth road bridge estimated with GeoSHM, Journal of Global Positioning Systems, 16(1), DOI: 10.1186/s41445-018-0014-7.

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., and Zhang, H., 2017, Health Monitoring and Evaluation of Long-Span Bridges Based on Sensing and Data Analysis: A Survey Sensors, **17**(3), 603.