سامانه هشدار پایش پیوسته و آنی نشست ساختمان‌های بلند با استفاده از سنسورهای تعیین موقعیت ماهواره‌ای (GNSS)

حسین اعتمادفرد[۱]*، روزبه شاد[۲]،

۱- استادیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد، etemadfard@um.ac.ir
۲- استادیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد، rshad@um.ac.ir

چکیده

سیستم‌های ماهواره‌ای تعیین موقعیت جهانی (GNSS) به عنوان ابزارهای پرکاربرد و عملیاتی در تعیین موقعیت و محاسبه مختصات شناخته می‌شوند. امروزه با توسعه سخت‌افزاری و نرم‌افزاری می‌توان تعیین موقعیت‌های آنی را تا دقت میلیمتر انجام داد. از طرفی یکی از دغدغه‌های موجود در برج‌ها و ساختمان‌های بلندمرتبه پایش لحظه‌ای سازه است و برای متخصصین این حوزه بسیار مهم است تا به جای بردارهای جابجایی سازه در بازه‌های زمانی سالانه، هفتگی ویا روزانه، اطلاعات تغییرات سازه را در بازه‌های زمانی بسیار کوتاه (در حد ثانیه) و نزدیک به آنی داشته باشند. بر اساس همین نیاز سامانه‌های پایشی مبتنی بر داده های گیرنده‌های GNSS ایجاد و توسعه داده شده است.

در این مقاله به بررسی اجزا یک سامانه هشدار پایش آنی نشست ساختمان‌های بلند با استفاده از گیرنده‌های GNSS پرداخته شده است. همواره این‌گونه سامانه‌ها از دو بخش سخت و نرم‌افزاری تشکیل شده است که دارای تنوع در قابلیت اخذ داده‌های ماموریت‌های مختلف و الگوریتم‌های پردازش می‌باشند. بخش سخت‌افزار آن شامل چهار جز: آنتن، گیرنده (ممکن است تنها از ماهواره‌های GPS داده دریافت کند ویا سایر ماموریت‌ها)، تجهیزات و الزامات فنی زیرساخت‌های ارتباطی و اطلاعاتی و ساختمان ایستگاه می‌باشد. نکته حائز اهمیت بخش مرتبط با نرم‌افزاری است به نحوی که بایستی به منظور افزایش دقت و بومی‌سازی با نوع پروژه و تعداد سنورهای GNSS از نرم‌افزاری علمی استفاده کرد؛ چراکه امکان استفاده از الگوریتم‌های مختلف ترکیب مشاهدات را می‌دهد. در سامانه پیشنهادی نرم‌افزار توسعه داده شده پیشنهادی دارای یک هسته پردازش مبتنی بر نرم‌افزار BERNESE است و به منظور نمایش و در اختیار گذاردن اطلاعات مربوط به تحلیل جابجایی ناشی از نشست برج، از بسترهای تحت وب استفاده شده است. روی‌همرفته و با انجام ارزیابی‌های مربوط به راستی آزمایی دقت و صحت نتایج حاصل از سامانه، دقت کمتر ۵ میلیمتر در راستای مسطحاتی و کمتر از ۱ سانتی‌متر در راستای ارتفاعی حاصل شده است.

واژه‌های کلیدی: پایش موقعیت، برج، BERNESE، مشاهدات GNSS

۱- مقدمه

یکی از دغدغه‌های موجود در برج‌ها و ساختمان‌های بلندمرتبه پایش لحظه‌ای سازه است و برای متخصصین این حوزه بسیار مهم است تا به جای بردارهای جابجایی سازه در بازه‌های زمانی سالانه، هفتگی ویا روزانه، اطلاعات تغییرات سازه را در بازه‌های زمانی

بسیار کوتاه (در حد ثانیه) و نزدیک به آنی داشته باشند. بر اساس همین نیاز است که سامانه‌های پایشی مبتنی بر داده‌های گیرنده-های سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای (GNSS[1]) ایجاد و توسعه داده شده است.

ایجاد سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای یکی از مهمترین فناوری‌های نوین در حوزه اطلاعات مکانی در عصر مدرن بوده و امروزه این تکنیک نوین در تعیین موقعیت به‌طور کامل جایگزین اغلب روش‌های کلاسیک و نیمه کلاسیک تعیین موقعیت، نظیر تعیین موقعیت ماهواره‌ای داپلر، فاصله‌یاب‌های الکترونیکی با برد بلند در شبکه‌های ژئودزی کلاسیک، نقشه‌برداری زمینی شده است[1]. از نظر جنبه‌های کاربردی روزمره و مهندسی ساخت نیز به‌کارگیری GNSS بیش از پیش در زمینه‌هایی مانند کاداستر، تهیهٔ نقشه‌های توپوگرافی، مهندسی راه و ساختمان، مطالعهٔ تغییرشکل‌های پوستهٔ زمین و غیره رایج شده است. همچنین هزینه‌های تولید، تجهیز، تامین و بهره‌گیری کارگاه‌ها از این تکنولوژی به‌طور چشم‌گیری نسبت به قبل کاهش یافته است و این روند همچنان ادامه دارد تا جایی که پیش‌بینی می‌شود در آینده‌ای نزدیک بسیاری از خدمات کشاورزی، حمل‌نقلی، مهندسی، اجتماعی، سلامت و بهداشتی برای اجرای اهداف خود از آن بهره‌گیری کنند. به عبارت دیگر نیاز مبرم و تاثیر شگرف و عمیق وجود اینگونه سامانه‌ها، نقش زیرساختی را برای آنها رقم زده است. از طرف دیگر نرخ زمانی مشاهداتی این تکنولوژی است که به عنوان ابزاری منحصربفرد می‌تواند موقعیت‌هایی با بازه زمانی کمتر از یک ثانیه (۲۰ هرتز) را در اختیار کاربران قرار دهد[2]. این ویژگی امکان پایش سازه‌های با حساسیت بالا را ممکن می‌کند که به همین دلیل در این تحقیق مورد بررسی و پیشنهاد قرار گرفته است.

به دلیل اهمیت زیرساختی و اساسی سامانه‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای، تمامی کشورهای توسعه یافته اقدام به تولید آن با پوشش جهانی در دو شکل ایجاد با مالکیت کشوری (آمریکا، روسیه، چین) و منطقه‌ای (اتحادیه اروپا) کرده و امروزه در حال استفاده از آنها هستند. در حال حاضر ماموریت‌های عملیاتی شده عبارتند از، GPS[2]، GLONASS[3]، Galileo[4] و Beidou[5]، که امکان تعیین موقعیت در هر نقطهٔ بالای سطح زمین را برای کاربران خود فراهم می‌آورند[1]. در این روشِ موقعیت‌یابی، ماهواره‌ها نقاطی با مختصات معلوم خواهند بود و کاربر با بهره‌گیری از فاصله‌سنجی تا آن‌ها، مختصات خود را بر پایهٔ راهکار ترفیع محاسبه می‌کند. با توجه به نیاز کاربر که عبارتند از دقت و صحت، محدوده اجرایی، نوع خروجی مورد قبول و نمایش، گیرنده‌های مختلف و نرم‌افزارهای با الگوریتم‌های پردازش متنوع توسعه داده شده‌اند.

نحوه تعیین موقعیت یک نقطه می‌تواند نسبت به نقطه یا نقاط مشخص دیگر (تعیین موقعیت نسبی) یا به صورت مطلق (نسبت به یک سیستم مختصات معین) در یک سیستم مختصات که معمولاً ژئوسنتریک در نظر گرفته می‌شود، انجام شود[2]. اگر در تعیین موقعیت، چه در تعیین موقعیت مطلق و چه در تعیین موقعیت نسبی، حرکت گیرنده مطرح نباشد حالت استاتیک و وقتی موضوع حرکت گیرنده (با تغییرات کم و یا زیاد) باشد، آنرا کنیماتیک می نامند. هر یک از دو روش فوق‌الذکر مستلزم استفاده از گیرنده‌های متناسب با کاربرد و نرم‌افزارهای با الگوریتم‌های منطبق بر داده‌های دریافتی است[3]. این مقاله به دنبال پیشنهاد سامانه هشدار پایش پیوسته و آنی نشست ساختمان‌های بلند است؛ بنا براین دو مورد مشخص می‌شود که ابتدا بایستی مشاهدات دقیق به کار بیایند و ثانیا از گیرنده‌ها و نرم‌افزارهایی استفاده شود که قابلیت اخذ و پردازش به صورت کنیماتیک و آنی را داشته باشند. از اینرو و در ادامه سامانه مورد نیاز جهت پایش ساختمان‌های بلند به دو بخش سخت و نرم‌افزاری تقسیم می‌شود که دارای تنوع در قابلیت اخذ داده‌های ماموریت‌های مختلف و الگوریتم‌های پردازش می‌باشند که در بخش سوم مورد بررسی قرار می‌گیرند. بخش دوم به بررسی سامانه‌های موجود و پیاده‌سازی شده در سایر نقاط دنیا می‌پردازد و در آخر نیز جمع‌بندی و پیشنهادات ارائه می‌شود.

1. Global Navigation Satellite System
2. Global Positioning System
3. GLObal NAvigation Satellite System
4. global navigation satellite system in European Union
5. BeiDou Navigation Satellite System (BDS)

۲- مطالعات انجام شده

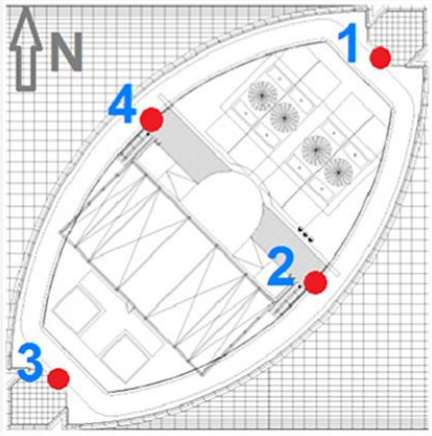
مطالعات مربوط به پایش سازه‌های بلندمرتبه و مرتفع با استفاده از گیرنده‌های GNSS عمر چندانی ندارد؛ چرا که این فناوری خود به صورت کاربردی کمتر از دو دهه است که فراگیر شده است. استفاده از مشاهدات گیرنده‌های GPS به عنوان نخستین ماموریت تعیین موقعیت ماهواره‌ای کاربردی شده، با نصب گیرنده‌ها بر روی سقف برج‌ها جهت پایش سازه به کار رفت[7-4].

در سال ۱۹۹۵ میلادی، برج کلگری در کانادا به عنوان اولین مطالعه در زمینه مانیتورینگ ساختمان‌های بلند با استفاده از گیرنده‌های GPS تک‌فرکانسه مورد تحقیق و بررسی قرارگرفت. در این تحقیق نرخ زمانی مشاهدات برابر با ۱۰ هرتز بوده‌است که تغییرات و جابجایی در حدود ۱۶ میلیمتر حاصل شد[8]. سال ۱۹۹۷ میزان جابجایی ناشی از باد با استفاده از گیرنده GPS بر روی برجِ شان هینگ اسکوئر[6] در چین مطالعه شد[9]. درادامه مطالعات پایش سازه‌های بلندمرتبه با سنسورهای GPS، سال ۲۰۰۲ تامورا و همکاران نیز مطالعات مشابهی را با نرخ زمانی مشاهداتی ۱۰ هرتز انجام داده و جابجایی ۴ سانتیمتری را برای برجی در توکیو ثبت کردند[10]. در تحقیقی دیگر، استفاده از تحلیل موجک مبنا در بررسی نتایج تغییرات و جابجایی پایش دینامیکی حاصل از سامانه تعیین موقعیت (GPS) در ساختمان‌های بلند پیشنهاد شد[11]. استفاده از سنسورهای GPS در سال ۲۰۰۱ نیز در برخی از برج-های سنگاپور (برج جمهوری پلازا[7][12]) مورد استفاده قرار گرفت[13,14]. اهمیت پایش سازه با استفاده از فناوری‌های تعیین موقعیت در حدی مورد توجه قرار گرفت که سپوزیم بین‌المللی مهندسین نقشه‌برداری در ساخت و ساز در سال ۲۰۰۴، ضوابط و استانداردهایی را برای پایش از دور این گونه‌ها سازه‌ها ایجاد کرد[15].

سنسورهای GNSS نیز با توسعه و عملیاتی شدن سایر ماموریت‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای، بر روی چند ساختمان بلند مرتبه ترکیه در سال ۲۰۱۴ به کارگیری شد؛ می‌توان از برج سفیر[8] در استانبول که امروزه به عنوان یکی از بلندترین برج‌های اروپا شناخته می‌شود، نام برد. گزارش و نتایج فرآیند پایش در این برج به صورتی است که کاربران و مدیران برج می‌توانند با استفاده از نرم‌افزار توسعه داده شده، جابجایی و نشست‌های آن را سه بُعدی و در بازه‌های زمانی دلخواه در اختیار داشت[16].

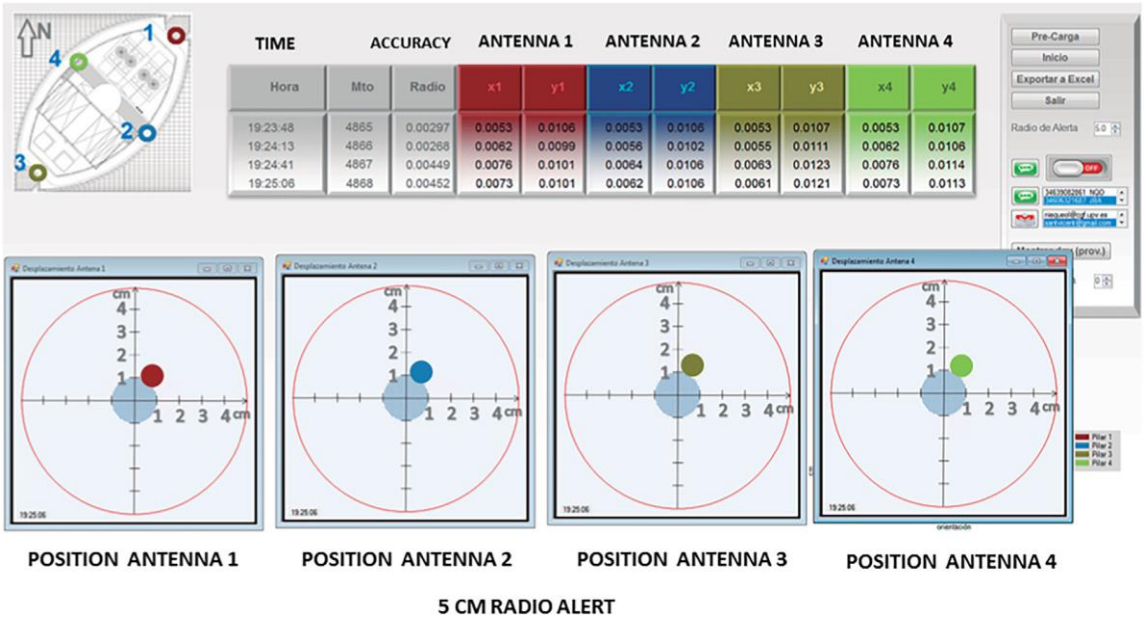
اخیرا تحقیقی نیز در راستای طراحی و پیاده‌سازی کاربردی این تکنولوژی در ساخت‌وساز ساختمان‌های بلند انجام شده است که در آن الگوریتم‌های متنوع پردازش داده‌های مشاهداتی GPS مورد ارزیابی قرار گرفته است[17]. امروزه مطالعات با جزییات بیشتری در این حوزه انجام می‌گیرد که برخی از آنها متمرکز به کاهش اثرات خطاهای مشاهداتی هستند[19-18]. در انتهای این بخش می-توان از ایجاد سامانه آنی پایش سازه‌های بلندمرتبه که بر روی برجی در مادرید اسپانیا ایجاد شده است، به عنوان آخرین پژوهش انجام شده تاکنون نام‌برد. سامانه‌ای که از مشاهدات سنسورهای GNSS به منظور آنالیز رفتاری سازه استفاده می‌کند[20]. شکل زیر نمایی از چیدمان سنسورهای مذکور (به تعداد چهارتا) را بر روی سقف این برج را نمایش می‌دهد.

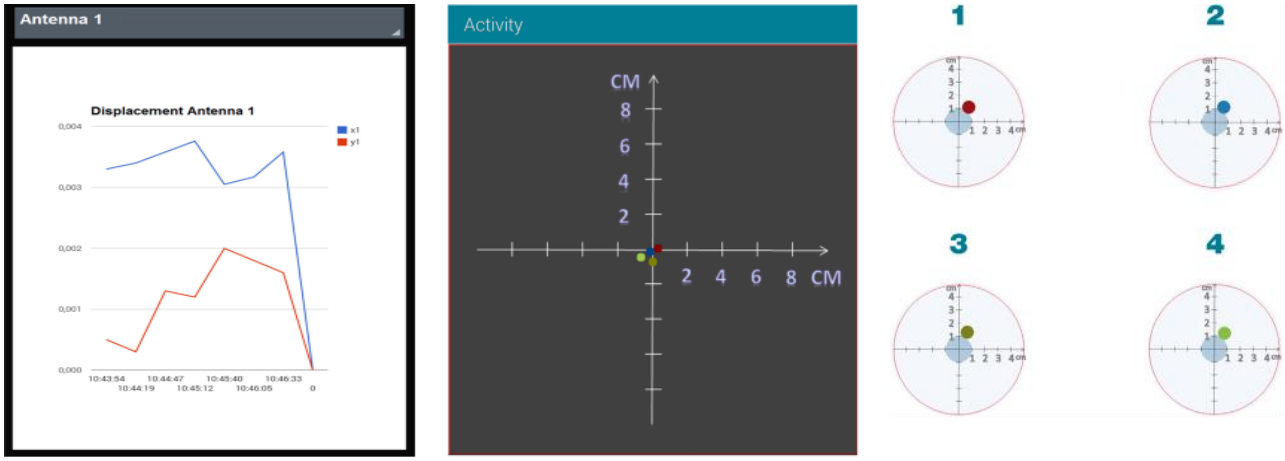
6. Shun Hing Square Tower
7. Republic Plaza Tower
8. Sapphire Tower



شکل۱- محل چهار نقطه ایستگاه‌های نصب سنسور GNSS (راست) و نمایی از سنسور و آنتن GNSS بر روی نقطه۲ (چپ)[20]

داده‌های هر چهار سنسور به صورت پیوسته و آنی به مرکز پردازش ارسال شده و با استفاده نرم‌افزار توسعه داده شده برای این منظور، عملیات پردازش انجام خواهد شد. نتایج به صورت کاملا ساده و مفهوم به صورت گرافیکی بر روی اپلیکیشن نوشته شده بر روی اندروید در اختیار کاربران قرار می‌گیرد. شکل زیر نسخه نهایی خروجی اپلیکیشن است.



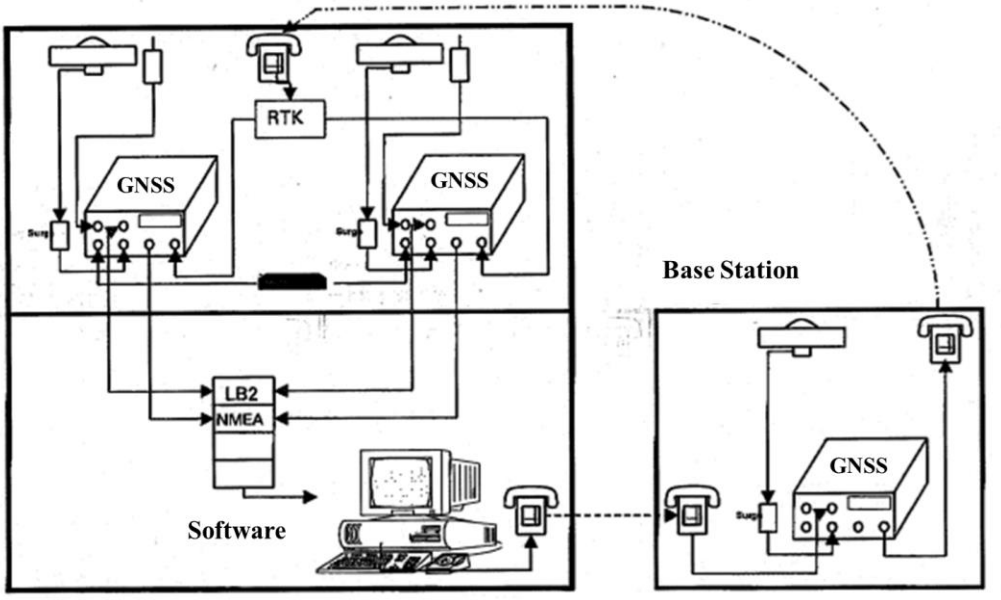


شکل۲- نمایی از نسخه تحت وب نتایج پردازش شده (بالا)، نمایی از مختصات چهار نقطه به صورت مجزا در دایره بزرگ با دقت ۵ سانتیمتری (پایین راست)، نمایی از چهار نقطه بر روی یک سیستم مختصات هم مرکز (پایین وسط)، نمایی از رفتار یک نقطه در راستای x و y (پایین چپ)[20]

پایش سازه در کشور ما از منظر مهندسی نقشه‌برداری به‌صورت کلاسیک (استفاده از دوربین توتال استیشن)، در بازه‌های زمانی بلندمدت (نسبت به نیاز پایش کوتاه‌مدت) و به صورت سلیقه‌ای و غیرکارشناسی انجام می‌شود. البته مطالعات پراکنده‌ای بر روی مطالعات نشست پوسته زمین انجام شده است که این امر اساسا ارتباطی به پایش سازه پیدا نمی‌کند. بنابراین هیچ پروژه عملیاتی موجود نیست و این تحقیق به عنوان اولین مطالعه سامانه پایش آنی مبتنی بر سنسورهای GNSS شناخته می‌شود.

۳- اجزای سامانه پیشنهادی

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، سامانه‌های پایشی از دو بخش عمده سخت‌افزار و نرم‌افزار تشکیل می‌شوند. بخش سخت-افزار آن شامل گیرنده (ممکن است تنها از ماهواره‌های GPS داده دریافت کند ویا سایر ماموریت‌ها)، منبع تغذیه و زیرساخت‌های ارتباطی و اطلاعاتی می‌باشد. از طرف دیگر با توسعه تکنولوژی‌های مرتبط با حوزه‌های پردازشی اعم از پلتفرم‌های برنامه‌نویسی تحت وب، بخش نرم‌افزاری اینگونه سامانه‌ها کاملا متحول شده است. بنابراین نکته حائز اهمیت‌تر در بخش مرتبط با نرم‌افزاری است به نحوی که بایستی به منظور افزایش دقت و بومی‌سازی با نوع پروژه و تعداد سنورهای GNSS از نرم‌افزاری با قابلیت انعطاف‌پذیری بالا استفاده کرد؛ چراکه امکان استفاده از الگوریتم‌های مختلف ترکیب مشاهدات در اختیار کاربران باشد. از طرفی اندازه‌گیری زمان ورود سیگنال‌های GNSS از ماهواره‌ها به گیرنده‌ها با خطاهای مختلفی متاثر می‌شود. این منابع خطاها در سه گروه عمده خطاهای مربوط به ماهواره، خطاهای مربوط به اتمسفر و خطاهای مربوط به گیرنده طبقه‌بندی می‌شوند که نرم‌افزار پردازش مشاهدات، بایستی امکان کاهش و رفع این خطاها را داشته باشد. همچنین بایستی نرم‌افزار مورد نظر قابلیت توسعه و ارتباط به بستر وب را در اختیار توسعه دهنده‌ها قرار دهد. شکل (۳) شمای کلی سامانه پیشنهادی پایش آنی را با استفاده از سنسورهای GNSS نمایش می-دهد.



شکل۳- شمای کلی سامانه پیشنهادی متشکل سخت‌افزار و نرم‌افزار[21]

۳-۱- سخت افزار

سخت‌افزار سامانه پیشنهادی شامل چهار جز: آنتن، گیرنده، تجهیزات و الزامات فنی و ساختمان ایستگاه مورد مطالعه است. از آنجایی که بایستی نقاط مورد پردازش به عنوان ایستگاه دائمی مورد استفاده قرار بگیرند، لذا آنتن‌های چوکرینگ[9] که پایداری مرکز فاز بالا و امکان حذف خطای چندمسیری مشاهدات را دارد توصیه می‌شود. دستگاه گیرنده نیز بایستی به گونه‌ای باشد که بتواند مشاهدات تمامی ماموریت‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای را دریافت کند. ساختمان ایستگاه هم بایستی به گونه‌ای باشد که به سازه مورد مطالعه چسبیده و یا متصل باشد. به عبارت دیگر نحوه اجرای ساختمان ایستگاه بایستی بر گرفته از استانداردهای رایج ساختمان سازی ایستگاه‌های دائمی ژئودتیکی باشد. در نهایت نیز لیست تجهیزات و الزامات فنی در این بخش را میتوان با در اختیار داشتن برق شهری شروع کرد. از آنجایی که گیرنده بایستی به صورت شبانه‌روزی به جمع‌آوری اطلاعات بپردازد، بایستی برق آن نیز تامین شده باشد. علاوه بر اتصال به برق شهری، بایستی باطری اضافی (ویا UPS) در محل تامین شود. تا حداقل به اندازه ۲۴ ساعت برق مورد نیاز دستگاه را تامین کند. به منظور انتقال داده فیمابین مرکز پردازش و سنسور (اعم از گیرنده و آنتن) بایستی مطابق شکل (۳) کابل‌های ارتباطی سامانه ویا تجهیزات رادیویی ارسال تصحیحات موقعیت در نظر گرفته شود. مضاف بر موارد فوق الذکر بایستی مشخص شود که فاصله ساختمان ارسال داده تا گیرنده چقدر است؛ بر این اساس میزان کابل انتقال داده و همچنین انتقال برق مشخص شود.

۳-۲- نرم افزار

نرم افزارهای پردازش داده‌های گیرنده‌های GNSS معمولا با استفاده از فرمت رایج راینکس[10] قابلیت استفاده و کاربرد دارند. بدین ترتیب بایستی سنسورهای مورد نظر قابلیت در اختیار گذاشتن فایل‌های با این فرمت را داشته باشند. نرم‌افزارهای موجود در بازار به دوبخش کلی نرم‌افزارهای تجاری و علمی تقسیم‌بندی می‌شوند؛ که با توجه به الگوریتم‌های پردازش و کارکردهای خاص مورد توجه قرار می‌گیرند. نرم‌افزارهای تجاری معمولا برای پردازش‌های شبکه‌های ژئودتیکی و پیمایش طراحی شده‌اند و دقت مورد

9. Choke ring
10. Receiver Independent Exchange Format (RINEX)

نیاز برای مطالعات پایشی را ندارند. خروجی نرم‌افزارهای فوق الذکر مختصات ایستگاه‌ها و همچنین پردازش شبکه‌های منطقه‌ای به صورت تفاضلی است. حال اینکه الگوریتم‌های پردازش اینگونه نرم‌افزارها منعطف به توسعه و استخراج سایر محصولات مورد نیاز کاربران حرفه‌ای نیست. به عبارت دیگر اهداف کاربردی آنها بسیار محدود و مشخص بوده و در پایش (که در این فاز از طرح مطلوب است) قابل استفاده نیستند. تنها شرکت لایکا است که محصولی برای پایش نقاط شبکه با نام تجاری اسپایدر ایجاد کرده است. این نرم‌افزار اجازه توسعه را به کاربر نمی‌دهد و بایستی شرکت تولیدکننده تغییرات مورد نظر را اعمال کند.

نرم‌افزارهای علمی و دانشگاهی متناسب با نیازهای هر مجموعه، تولید و به کارگیری می‌شوند؛ بدون شک محیط نرم‌افزاری آنها به سهولت نرم افزارهای تجاری نیست. الگوریتم‌های آنها قابلیت پردازش مشاهدات با اکثر مدل‌های مشاهداتی سنسورهای GNSS را دارا هستند. به این ترتیب می‌توانند انعطاف پذیری قابل توجهی در پردازش مشاهدات داشته باشند. برخی از نرم‌افزارهای علمی با برنامه نویسی توسط زبان‌های قابل تبدیل در آن نرم‌افزار، جهت اهداف تحقیقات خاص توسعه پیدا خواهند کرد. به عنوان مثال با تغییر بخشی از روند اتوماتیک اجرای ورودی داده‌های راینکس و پردازش مختصات با استفاده از نرم‌افزار برنیز[۱۱]، می توان این نرم افزار را به کار برد.

نرم‌افزارهای علمی دیگری نیز در زمینه پردازش مشاهدات سامانه‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای وجود دارند که می‌توان به اتوجیپسی[۱۲] اشاره کرد. این سرویس که توسط موسسه JPL[۱۳] از NASA فراهم شده است و به صورت آنلاین و رایگان به کاربر عرضه می شود. تنها کاری که کاربر لازم است انجام دهد قراردادن فایل مشاهدات خود در فرمت راینکس بر روی یک سرور FTP و فردستادن URL آن به JPL است. JPL پس از چند دقیقه نتیجه پردازش را بر روی یکی از سرورهای خود قرار داده که توسط کاربر قابل دسترسی است. از معایب این سسیستم دسترسی همه به نتایج و عدم وجود امنیت، همچنین عدم کنترل کاربر بر فرآیند پردازش است. به طور مثال در زمانیکه کاربر به مختصات محاسبه شده نیاز داشته باشد، سیستم به علت ترافیک بالا قادر به پاسخگویی به کاربر نباشد. نرم‌افزارهای علمی دیگری نیز مانند GAMIT، CSRS-PPP و Magic GNSS وجود دارند که هر یک مزایا و معایب خود را دارند و برای استفاده در این سامانه پیشنهاد نمی‌شوند.

نرم‌افزاری که برای این سامانه پیشنهاد می‌شود توسط دانشگاه برن سوییس توسعه و ایجاد شده است. فایل مشاهدات ورودی به نرم افزار برنیز باید در فرمت استاندارد راینکس باشد. به همراه فایل مشاهدات می توان اطلاعات مداری دقیق ماهواره‌ها، فایل ساعت دقیق ماهواره و فایل پارامترهای دورانی زمین را وارد نمود؛ که نتیجه مختصات در سیستم مختصات انتخابی می‌باشد. این نرم‌افزار همچنین توانایی تبدیل و توسعه به یک موتور پردازش آنلاین و گزارش دهی مختصاتی در بازه‌های زمانی مشخص را دارد. جهت تست و راستی آزمایی سامانه، با انجام ارزیابی‌های مربوطه بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده در یک بازه زمانی ۱ هفته‌ای، دقت و صحت نتایج حاصله به صورت بخش به بخش و مجزا مقادیر قابل اعتمادی را بدست دادند. به عبارت دیگر در نرم‌افزار برنیز با استفاده از الگوریتم‌های مشاهداتی حاصل از داده‌های گیرنده‌های دوفرکانسه می‌توان دقت مسطحاتی کمتر از ۵ میلیمتر را برای یک بازه زمانی کوتاه (نزدیک به آنی) بدست آورد. همچنین با مشاهدات تفاضلی دوگانه بین ایستگاه خارج از محدوده مطالعاتی به دقتی کمتر از ۱ سانتیمتر در راستای قائم رسید.

۴- جمع‌بندی و پیشنهاد

این تحقیق به عنوان اولین مطالعه امکانسنجی در حوزه پایش آنی نشست ساختمان‌های بلندمرتبه در ایران به بررسی اجزا یک سامانه هشدار با استفاده از سنسورهای GNSS پرداخت. از آنجایی که این تحقیق جنبه مروری بر تحقیقات گذشته بوده لذا بیشتر متمرکز بر جنبه‌های ضعف و قوت آنها می‌باشد. پس از تست داده‌های حاصل از شبیه‌سازی سامانه با استفاده از خروجی‌های نرم‌افزار

11. Berneese
12. Auto-Gipsy
13. Jet Propulsion Laboratory

برنیز نتایجی با دقت‌های کمتر از سانتیمتر حاصل شد. به عبارت دیگر، روی‌همرفته و با انجام ارزیابی‌های مربوط به راستی آزمایی دقت و صحت نتایج حاصل از شبیه سازی سامانه، دقت کمتر ۵ میلیمتر در مولفه‌های مسطحاتی و کمتر از ۱ سانتیمتر در مولفه ارتفاعی حاصل شده است.

مراجع

[۱] یحیی جمور، ژئودزی هندسی ماهواره ای، انتشارات سازمان نقشه برداری کشور، زمستان ۱۳۹۵.

[2] Seeber, G. (2008). Satellite geodesy: foundations, methods, and applications. Walter de gruyter.

[۳] مسعود مشهدی حسینعلی، رویا موسویان، تئوری، الگوریتم ها و کاربردهای سیستم تعیین موقعیت جهانی انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۳.

[4] Im, S. B., Hurlebaus, S., & Kang, Y. J. (2011). Summary review of GPS technology for structural health monitoring. Journal of Structural Engineering, 139(10), 1653-1664.

[5] Celebi, M., Prescott, W., Stein, R., Hudnut, K., Behr, J., and Wilson, S. (1998). GPS monitoring of structures: Recent advances. NIST Special Publication SP, 931, 515–528.

[6] Celebi, M., Prescott, W., Stein, R., Hudnut, K., Behr, J., and Wilson, S. (1999). GPS monitoring of dynamic behavior of long-period structures. Earthq. Spectra, 15(1), 55–66.

[7] Celebi, M., and Sanli, A. (2002). GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures. Earthq. Spectra, 18(1), 47–61.

[8] Lovse, J. W., Teskey, W. F., Lachapelle, G., and Cannon, M. E. (1995). Dynamic deformation monitoring of tall structure using GPS technology. J. Surv. Eng., 121(1), 35–40.

[9] GUO, J. J. (1997). Research of displacement and frequency of tall building under wind load using GPS. In Proceedings of the 10th International Technical Meeting of Satellite Divistion of the Institute of Navigation 1997 Part 2 (pp. 1385-1388).

[10] Tamura, Y., Matsui,M., Pagnini, L., Ishibashi, R., and Yoshida, A. (2002). Measurement of wind-induced response of buildings using RTKGPS. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 90(12–15), 1783–1793.

[11] Shengxiang, H., Jingnan, L., & Xianglin, L. (2003). Deformation analysis based on wavelet and its application in GPS dynamic monitoring for high-rise buildings [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 32(2), 153-157.

[12] Ogaja, C., Rizos, C., Wang, J., & Brownjohn, J. (2001). GPS and building monitoring case study: Republic Plaza Building, Singapore.

[13] Brownjohn, J. M. W., Moyo, P., Rizos, C., and Chuan, T. S. (2003). Practical issues in using novel sensors in SHM of civil infrastructure: Problems and solutions in implementation of GPS and fibre optics. Proc., 4th Int. Workshop on SHM, Stanford Univ., Stanford, CA, 499– 506.

[14] Brownjohn, J. M. W., Rizos, C., Tan, G., and Pan, T. (2004). Real-time long-term monitoring of static and dynamic displacements of an office tower, combining RTK GPS and accelerometer data. 1st FIG Int. Symp. on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, U.K.

[15] Meng, X., Roberts, G., Dodson, A. H., Andreotti, M., Cosser, E., & Meo, M. (2004, June). Development of a Prototype Remote Structural Health Monitoring System (RSHMS). In 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering (Vol. 28).

[16] Çaktı, E., & Şafak, E. (2019). Structural Health Monitoring: Lessons Learned. In Seismic Isolation, Structural Health Monitoring, and Performance Based Seismic Design in Earthquake Engineering (pp. 145-164). Springer, Cham.

[17] Hui, D. (2018). The Design and Implementation of High-rise Building Construction Based on GPS Positioning Technology. Journal of Architectural Research and Development, 2(1).

[18] Li, X., Huang, G., Zhang, Q., & Zhao, Q. (2018). A new GPS/BDS tropospheric delay resolution approach for monitoring deformation in super high-rise buildings. GPS Solutions, 22(3), 90.

[19] Xia Y, Zhang P, Ni Y, Zhu H (2014) Deformation monitoring of a super-tall structure using real-time strain data. Eng Struct 67(10):29–38. https ://doi.org/10.1016/j.engst ruct.2014.02.009.

[20] Quesada-Olmo, N., Jimenez-Martinez, M. J., & Farjas-Abadia, M. (2018). Real-time high-rise building monitoring system using global navigation satellite system technology. Measurement, 123, 115-124.

[21] Ogaja, C., Rizos, C., Wang, J., & Brownjohn, J. (2001, March). Toward the implementation of on-line structural monitoring using RTK-GPS and analysis of results using the wavelet transform. In The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements (pp. 19-22).