

کاربرد روش پردازش تصاویر در تعیین زمان تناوب سازه‌ها

محمد جواد نجاری^۱، موسی محمودی صاحبی^{۲*}، میراحمد میرقاسم‌پور^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، زلزله- دانشکده مهندسی عمران- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
mj.najari@gmail.com

^۲ دانشیار گروه عمران- دانشکده مهندسی عمران- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
m.mahmoudi@srttu.edu

^۳ عضو هیات علمی گروه نقشه‌برداری- دانشکده مهندسی عمران- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
mirghasempour@gmail.com

(تاریخ دریافت مهر ۱۳۹۳، تاریخ تصویب دی ۱۳۹۳)

چکیده

زمان تناوب سازه‌ها، یکی از خصوصیات دینامیکی مهم سازه‌ها به‌شمار می‌رود. مقدار زمان تناوب سازه‌ها (عکس فرکانس)، مستقل از بارگذاری بوده و فقط به مشخصات سازه بستگی دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین زمان تناوب سازه‌ها وجود دارد که عبارتند از روش‌های تجربی، تحلیلی و آزمایشگاهی. در این تحقیق، زمان‌های تناوب یک سازه سه طبقه، به روش آزمایش ارتعاش آزاد مورد مطالعه قرار گرفت. برای ایجاد ارتعاش در سازه، یک جابه‌جائی اولیه در بام سازه ایجاد شد و به‌طور ناگهانی آزاد گردید. این آزمایش در دو جهت محلی سازه برای تعیین فرکانس‌های طبیعی ارتعاش، انجام گرفت. برای اندازه‌گیری پاسخ سازه و تعیین زمان تناوب آن، از دو روش استفاده شد. در روش اول، پاسخ سازه با استفاده از دوربین با دقت بالا، ضبط شد و با پردازش تصاویر، زمان تناوب سازه تعیین شد. در روش دوم، پاسخ سازه به کمک یک دستگاه جی‌پی‌اس دو فرکانسه، ثبت شد و سپس با تبدیل منحنی‌های اولیه به منحنی‌های ارتعاشی، زمان تناوب سازه محاسبه شد. اندازه‌گیری با جی‌پی‌اس برای کنترل نتایج حاصل از پردازش تصاویر صورت پذیرفت. برای کنترل نتایج حاصل از هر دو روش آزمایشگاهی، از روش تحلیلی نیز استفاده شد. بر اساس مطالعات انجام شده، فرکانس‌های طبیعی (عکس زمان تناوب) سازه در جهت x با استفاده از جی‌پی‌اس، پردازش تصاویر و روش تحلیلی، به ترتیب برابر $۱/۰۷$ ، $۱/۰۹$ و $۰/۹۳$ هرتز به‌دست آمد. همچنین مقادیر مربوطه در جهت y به کمک این سه روش به ترتیب برابر $۱/۱۳$ ، $۱/۱۹$ و $۱/۰۸$ هرتز حاصل شد. نتایج حاصل از پردازش تصاویر با نتایج به‌دست آمده از جی‌پی‌اس بسیار نزدیک است ولی مقادیر حاصل از روش‌های آزمایشگاهی با مقادیر حاصل از روش تحلیلی، اندکی تفاوت دارد. این موضوع بخاطر این است که در روش تحلیلی، مقداری خطا به دلیل شبیه‌سازی رفتار سازه در مدل کامپیوتری وارد می‌شود.

واژگان کلیدی: خصوصیات دینامیکی، زمان تناوب ارتعاش، فرکانس ارتعاش، پردازش تصاویر، جی‌پی‌اس

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

می‌توان با انجام تعداد بیشتر آزمایش‌ها، دقت روابط تجربی و پیشنهادی در آئین‌نامه‌ها را افزایش داد.

دومین کاربرد تعیین زمان‌های تناوب به کمک آزمایش‌های تجربی، کنترل کیفیت اجرای سازه‌ها است. برای این منظور می‌توان زمان‌های تناوب سازه را به کمک تحلیل کامپیوتری تعیین نمود و آنگاه پس از اجرای ساختمان و به کمک آزمایش‌های ساده، زمان تناوب‌های سازه را مجدداً تعیین نمود. در صورت یکسان بودن زمان‌های تناوب در این دو حالت، می‌توان کیفیت اجرای ساخت را تأیید نمود.

۱-۲- دستگاه‌های اندازه‌گیری ارتعاش

در تعیین زمان‌های تناوب سازه به روش آزمایشی، به یک دستگاهی که پاسخ سازه‌ها را در برابر ارتعاش اندازه بگیرد نیاز است. دستگاه‌های مختلفی برای اندازه‌گیری پاسخ سازه‌ها وجود دارد که عبارتند از: سرعت‌سنج‌ها و شتاب‌سنج‌ها [۱]. تغییر مکان‌سنج‌ها هم می‌توانند پاسخ سازه را اندازه‌گیری نمایند به شرط اینکه دستگاه مورد نظر قابلیت اندازه‌گیری سریع و ارتعاشی را داشته باشد. دستگاه جی‌پی‌اس با دقت بالا، می‌تواند این اندازه‌گیری را انجام دهد. همچنین فیلمبرداری با کیفیت بالا از ارتعاش نیز می‌تواند تغییر مکان سازه را رصد نماید.

۱-۳- روش پردازش تصاویر

از اکتبر سال ۱۹۵۷ میلادی بحث استفاده از تصاویر در علم ژئوماتیک مطرح گردید و با توجه به اخذ تصاویر ماهواره‌ای زمین در طول موج‌های مختلف، ابعاد جدیدی در شاخه سنجش از دور ژئوماتیک (Remote sensing) ایجاد شد. از آن به بعد، علم سنجش از دور، جایگاه مهمی در اخذ داده‌های تصویری بدون تماس با عوارض و سپس تجزیه و تحلیل آن در رشته ژئوماتیک پیدا کرد [۲ و ۳]. با گسترش روزافزون روش‌های مختلف اخذ اطلاعات گسسته مانند پویوگرها و دوربین‌های دیجیتال، پردازش تصویر، کاربرد فراوانی یافته است. تصاویر حاصله از این اطلاعات، کم و بیش، همراه با مقداری نویز بوده و در مواردی نیز دارای مشکل محوشدگی مرزهای نمونه‌های داخل تصویر می‌باشد که موجب کاهش وضوح تصویر دریافتی می‌گردد. مجموعه عملیات و روش‌هایی که به منظور کاهش عیوب و

امروزه علوم بین رشته‌ای، نقش اساسی در پیشرفت علوم مهندسی دارند. علوم بین رشته‌ای علمی هستند که به بیش از یک زمینه علمی مرتبط می‌باشند. در حقیقت علوم بین رشته‌ای تلفیق دانش و تجارب دو یا چند حوزه تخصصی برای شناخت و حل یک مسئله خاص است. در این مقاله به یکی از موضوعات بین رشته‌ای شامل مهندسی نقشه برداری و مهندسی زلزله پرداخته می‌شود. در مهندسی زلزله، تعیین خصوصیات دینامیکی سازه‌ها (زمان‌های تناوب ارتعاش، شکل مودهای ارتعاش، نسبت‌های میرایی)، یکی از مهم‌ترین موضوعات اساسی به شمار می‌آید. بررسی خصوصیات دینامیکی سازه‌ها و ارزیابی آن‌ها یک ضرورت انکار ناپذیر است. خصوصیات دینامیکی سازه‌ها نقش تعیین کننده‌ای در رفتار سازه‌ها در مقابل زلزله دارد. تعیین میزان نیروهای وارد بر سازه‌ها با استفاده از طیف‌های طراحی از جمله موارد کاربرد خصوصیات مذکور می‌باشد [۱].

۱-۱- زمان تناوب سازه‌ها

زمان تناوب ارتعاش، زمانی است که طول می‌کشد تا سازه یک ارتعاش کامل انجام دهد. یک سازه ممکن است دارای چندین زمان تناوب در جهت‌های عمود بر هم و پیچشی باشد. زمان‌های تناوب ارتعاش دارای کاربردهای مختلفی در مهندسی سازه و زلزله هستند. زمانهای تناوب هم در بارگذاری و تحلیل سازه‌ها و هم در کنترل کیفیت سازه‌ها نقش دارند [۱].

در بخش تحلیل، زمان‌های تناوب ارتعاش سازه‌ها هم در تحلیل دینامیکی کاربرد دارند و هم در تحلیل استاتیکی. در تحلیل‌های دینامیکی، زمان‌های تناوب به کمک نرم‌افزارهای مربوطه تعیین می‌شوند ولی در تحلیل‌های استاتیکی، زمان‌های تناوب ارتعاش به کمک روابط تجربی محاسبه می‌شوند. هر چه دقت تعیین این کمیت بیشتر باشد، دقت تعیین نیروی زلزله وارد بر سازه بیشتر خواهد بود. روشهای تجربی عمدتاً براساس نتایج تحلیل‌های کامپیوتری و علی‌الخصوص نتایج آزمایشگاهی پیشنهاد می‌شوند. اگر انجام آزمایش‌ها تسهیل شود

افزایش کیفیت ظاهری تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد، پردازش تصویر نامیده می‌شود.

علم پردازش تصاویر در چند دهه اخیر از هر دو جنبه نظری و عملی پیشرفت‌های چشمگیری داشته است. سرعت این پیشرفت به اندازه‌ای بوده است که به راحتی می‌توان ردپای پردازش تصاویر را در بسیاری از علوم و صنایع مشاهده نمود. بعضی از این علوم و صنایع آن چنان به پردازش تصاویر وابسته هستند که بدون آن پیشرفتی حاصل نخواهد شد. زمینه‌های مختلف کاربرد پردازش تصویر عبارتند از: صنعت، پزشکی، علوم نظامی و امنیتی، زمین‌شناسی، فضاوردی و نجوم، شهرسازی، فناوری‌های علمی و بسیاری از علوم دیگر که خارج از حوصله‌ی این مقاله است [۲].

در خصوص پیشینه و تاریخچه کاربرد پردازش تصویر می‌توان به موارد استفاده از این روش در فتوگرامتری صنعتی اشاره کرد که نزدیک به یک دهه از آن استفاده می‌شود. در ارتباط با این موضوع می‌توان به مقاله ارزیابی روش فتوگرامتری صنعتی در کنترل هندسی اجرای نمای ساختمان نام برد [۳]. مثال‌هایی از کاربرد فتوگرامتری صنعتی در مهندسی عمران شامل ابزاری برای اندازه‌گیری رفتار تغییرشکل تیرها، اندازه‌گیری تغییر شکل سازه‌های بزرگ مقیاس مانند یک پل فلزی طویل و کنترل ابعادی تغییرشکل یک ساختمان هنری با شکل بسیار پیچیده است [۴]. روش پردازش تصاویر در تعیین خصوصیات دینامیکی سازه‌ها به خصوص سازه‌های بلند مرتبه و نیمه صلب نیز کاربرد دارد که موضوع اصلی این تحقیق است.

۱-۴- روش مبتنی بر جی‌پی‌اس

با این که در ابتدا، جی‌پی‌اس برای هدف‌های نظامی و ناوبری طراحی شده بود ولی امروزه در بسیاری از علوم مختلف از جمله: سازه، راه‌سازی، محیط زیست، ترافیک و حمل و نقل، زمین‌شناسی، شهرسازی کاربرد دارد [۴].

از عمده‌ترین تحولات سال‌های اخیر در زمینه رفتارسنجی سازه‌ها، بوجود آمدن امکان پایش پیوسته سازه‌ها بصورت آنی و خودکار با GPS است که با پیروید ۰/۱ ثانیه و دقتی در حد میلی‌متر امکان پذیر است. بدین لحاظ امروزه در کشورهای پیشرفته تقریباً هیچ سازه بزرگی را نمی‌توان یافت که فاقد مشاهدات پایش پایداری

ژئودتیکی باشد. در ایران نیز این موضوع همواره مد نظر بوده و در تعداد زیادی از سازه‌ها از پایش ژئودتیکی استفاده می‌گردد. در روش ژئودتیکی، شبکه‌ای از نقاط بر روی بدنه و محیط اطراف سازه ایجاد و از طریق مشاهدات ژئودتیکی (طول، زاویه و مختصات یا تصویربرداری) در زمان‌های مختلف، رفتار سازه مورد پایش واقع می‌شود. اینگونه مشاهدات امکان کنترل جابجایی و تغییر شکل بیرونی سازه را لحظه به لحظه مهیا می‌سازند. در رفتار سنجی سازه‌ها با این روش، نوعاً کار با بردارهای جابجایی بوده و سپس تفسیر این بردارهای جابجایی گویای تغییرات سازه در زمان‌های مختلف خواهد بود. تجربه نشان داده است که با استفاده از دستگاه جی‌پی‌اس در سازه‌ها، می‌توان به نتایج مفیدی برای پایداری و دوام سازه‌ها دست یافت.

امروزه دستگاه‌های جی‌پی‌اس به دلیل ایجاد تحول در علوم نقشه‌برداری، علاوه بر تعیین موقعیت هر نقطه از زمین، به یکی از مهم‌ترین ابزارها در زمینه‌های ذیل تبدیل شده‌اند:

- ۱) کنترل جابه‌جایی ساختمان‌ها و برج‌های بلند،
- ۲) بررسی جابه‌جایی پاشنه‌های سدها در دراز مدت،
- ۳) بررسی اثر نیروی باد بر سازه‌های بلند،
- ۴) نظارت بر وضعیت پل‌ها جهت اندازه‌گیری شکست، جابه‌جایی و تغییر شکل آن‌ها،
- ۵) تعیین خصوصیات دینامیکی سازه‌ها،
- ۶) شناسایی و مکان‌یابی آسیب‌های احتمالی در سازه‌ها،
- ۷) بررسی طولانی مدت سلامت سازه‌ها،
- ۸) ارزیابی ایمنی سازه‌ها بعد از بارگذاری‌های شدید

جی‌پی‌اس موقعیت مکانی را از طریق فرایندی به نام ترفیع^۱ فضایی تعیین می‌کند. این تعیین موقعیت می‌تواند دو یا سه بعدی باشد. در حالت سه بعدی حداقل ۴ ماهواره برای تعیین موقعیت نیاز است و با توجه به مبحث سرشکنی^۲ خطاها در صورتی که گیرنده جی‌پی‌اس در هر لحظه با بیش از ۴ ماهواره در ارتباط باشد و نیز هندسه قرارگیری ماهواره‌ها مناسب باشد، دقت تعیین موقعیت بالاتر می‌رود.

۱ Resection
۲ Adjustment

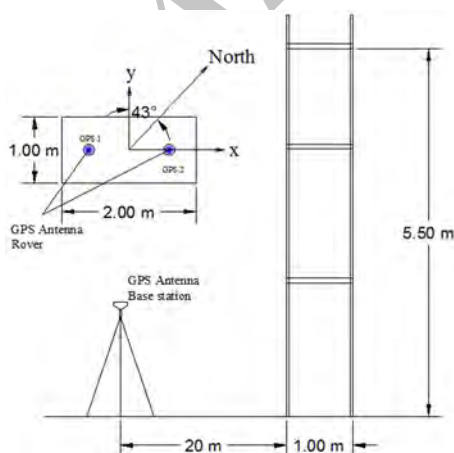
هدف از این تحقیق تعیین زمان‌های تناوب ساختمان آزمایشگاهی با استفاده از پردازش تصاویر است. برای راستی آزمائی نتایج حاصل از پردازش تصاویر از نتایج حاصل از جی‌پی‌اس استفاده می‌شود. برای اطمینان بیشتر از نتایج آزمایشگاهی، نتایج حاصل از پردازش تصاویر و جی‌پی‌اس با نتایج حاصل از تحلیل‌های کامپیوتری مقایسه می‌شود.

۲- مدل آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش، از یک قاب مقیاس شده استفاده شد. این قاب، یک سازه فولادی قاب خمشی به ابعاد پلان 2×1 متر مربع و ارتفاع $5/5$ متر و دارای سه سقف است که برای همین منظور ساخته شد. برای اینکه بتوان زمان تناوب ارتعاشی را به راحتی به دست آورد از ساز نرم با ارتفاع زیاد استفاده شد. در شکل ۱ نمای این قاب و در شکل ۲ وضعیت قرارگیری گیرنده‌های جی‌پی‌اس بر روی قاب نشان داده شده است. در این مدل سقف‌ها کاملاً صلب و اتصالات به صورت کاملاً گیردار اجرا شد.



شکل ۱- نمای کلی سازه‌ی مورد آزمایش



شکل ۲- وضعیت سازه و گیرنده‌های جی‌پی‌اس

از جمله کارهای انجام شده در خصوص سنجش رفتار سازه‌ها به وسیله جی‌پی‌اس (GPS) می‌توان به کارهای انجام شده زیر اشاره نمود.

کازانیکا، پینتو، فورلانی و آبروزی در سال ۲۰۰۵ [۵]؛ نیکوتوپولو، پروتوپسالتی و استایروس در سال ۲۰۰۶ [۶]؛ هر کدام به مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده با جی پی اس و شتاب‌سنج بر روی سازه‌های مختلفی مثل ساختمان و دودکش نیروگاه پرداختند.

لی جی، ریازوس، تامورا و یوشیدا در سال ۲۰۰۶، مطالعه‌ای بر روی ساختمانی با سازه فولادی به ارتفاع ۱۰۸ متر در شهر توکیو انجام دادند. در این تحقیق زمان تناوب به دست آمده برای ساختمان که تحت اثر طوفان و زلزله قرار گرفته بود با استفاده از گیرنده‌های جی پی اس و شتاب‌سنج مطابقت بسیار خوبی را نشان داد [۷].

پارک، سوهورن، کیم و جی پارک در سال ۲۰۰۸، به مطالعه رفتار یک ساختمان ۶۶ طبقه که به طور هم زمان از سنجنده‌های لیزری، شتاب‌سنج و جی پی اس رصد می‌شد، پرداختند. نتایج، نشان‌دهنده تطابق خوب اندازه‌گیری‌های جی پی اس و سنجنده‌های شتاب‌سنج بود. ولی در مقایسه با سنجنده‌های لیزری نتایج نشان - دهنده این موضوع بود که جی پی اس و شتاب‌سنج نسبت به سنجنده‌های لیزری عملکرد بهتر و اندازه‌گیری‌های دقیق‌تری دارند [۸].

در سال ۲۰۱۱ مطالعه‌ای برای به دست آوردن فرکانس طبیعی یک پل عابر پیاده توسط موسچاس و استایوس به کمک جی پی اس انجام شد [۹].

در حال حاضر برای به دست آوردن زمان تناوب سازه‌ها در مهندسی سازه عمدتاً از روابط تجربی و یا مدل‌های کامپیوتری استفاده می‌شود. این خصوصیات دینامیکی به بسیاری از جزئیات رفتار مصالح و ترکیب سازه بستگی دارد که تمام این جزئیات را نمی‌توان در مدل‌های تحلیلی دخالت داد. بنابراین همیشه بین مدل‌های تحلیلی و سازه واقعی اختلافاتی وجود دارد [۱۰]. لذا انجام آزمایش‌های لرزه‌ای بر روی سازه‌ها، مطمئن‌ترین روش برای به دست آوردن خصوصیات مذکور بوده و تاکنون روش‌های مختلفی در دنیا برای انجام این آزمایش‌ها به کار گرفته شده است.

۵) نوع حسگر CCD و با دقت موثر ۱۶ مگاپیکسل. هم‌زمان با تصویربرداری، مشاهدات جی‌پی‌اس نیز انجام شد. از آنجائیکه در این تحقیق، هدف به دست آوردن زمان تناوب سازه است، می‌توان از طریق مشاهدات به روش PPK و تعیین موقعیت نسبی دو نقطه با جی‌پی‌اس، نمودار جابجایی-زمان را تعیین نمود. در جدول ۲، دقت مشاهدات جی‌پی‌اس در دو حالت RTK و استاتیک مشاهده می‌شود.

جدول ۲- دقت برداشت جی پی اس در حالات مختلف

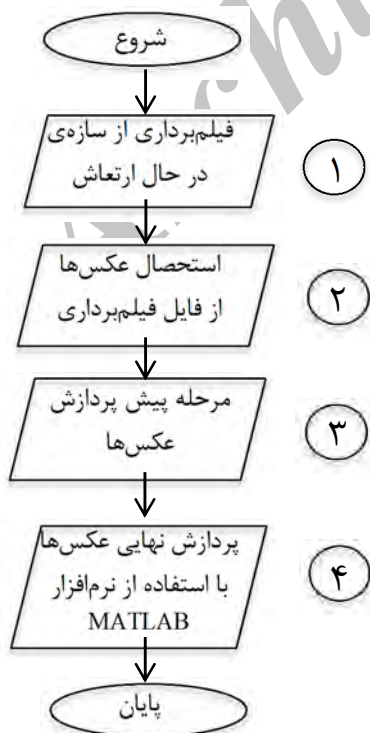
جهت قائم (RMS)	جهت افقی (RMS)	جهت برداشت
2 cm + 1 ppm	1 cm + 1 ppm	RTK
5 mm + 1 ppm	5 mm + 0.5 ppm	Static

۵- پیاده‌سازی‌ها و نتایج

بعد از به ارتعاش درآوردن سازه، پاسخ سازه به کمک دوربین فیلم‌برداری و دستگاه جی‌پی‌اس ثبت شد.

۵-۱- نتایج به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر

در فلوجارت شکل ۳ نحوه‌ی به‌دست آوردن زمان تناوب سازه با استفاده از پردازش تصاویر به‌صورت مرحله به مرحله نمایش داده شده است که هر یک از مراحل تشریح می‌شود.



شکل ۳- فلوجارت مراحل پردازش تصویر

سازه مورد نظر یک قاب خمشی دو طرفه است که مشخصات تیر و ستون آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مقاطع اعضای سازه

اعضا	ستون‌ها (mm)	تیرها (mm)
ابعاد	40 × 40 × 2	50 × 30 × 2

۳- ایجاد ارتعاش

روش‌های مختلفی برای ایجاد ارتعاش در سازه وجود دارد که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

الف- ایجاد ارتعاش در اثر وزش باد:

وزش باد یکی از روش‌های ایجاد ارتعاش در سازه است. به دلیل قدرت پائین وزش باد، این روش عمدتاً برای ساختمانهای بلند با سختی کم قابل استفاده است. از معایب این روش این است که می‌بایست مدت‌ها برای وزش چنین بادی منتظر ماند.

ب- ایجاد ارتعاش توسط یک لرزاننده:

از تحریک یک دستگاه مرتعش کننده در بالاترین نقطه سازه، می‌توان برای ایجاد لرزه در سازه استفاده نمود. در این روش، اعمال بار کاملاً قابل کنترل است و به کمک آن می‌توان دامنه و فرکانس بارگذاری را تنظیم نمود.

ج- ایجاد ارتعاش به کمک جابه‌جائی اولیه:

در این حالت، سازه در اثر یک جابه‌جائی اولیه به ارتعاش درمی‌آید. در این آزمایش، از روش جابجائی اولیه، برای ایجاد ارتعاش استفاده شد. برای ایجاد ارتعاش در سازه، بام سازه به وسیله یک طناب با مقدار جابجائی‌های اولیه متفاوت کشیده و رها شد. این کار چندین بار تکرار گردید. ایجاد ارتعاش به دفعات برای دو جهت x و y سازه انجام شد.

۴- روش‌های ثبت پاسخ‌های سازه

برای اندازه‌گیری نوسان سازه (پاسخ سازه در برابر ارتعاش) در دو جهت مختلف، ارتعاش سازه به کمک دوربین کانن مدل SX160 IS (دوربین غیرمتریک فیلم‌برداری با حد تفکیک ۱۶ مگاپیکسل) با نرخ و سرعت فیلم‌برداری ۲۵-۳۰ فریم بر ثانیه، با مشخصات ذیل تصویربرداری شد:

۱) فاصله کانونی ۲۸-۴۴۸ میلی‌متر

۲) بزرگنمایی اپتیکال ۱۶ برابر

۳) قابلیت فیلم‌برداری با کیفیت HD در ابعاد ۷۲۰ ×

۱۲۸۰ پیکسل و با سرعت‌های ۲۵ و ۳۰ فریم بر ثانیه

۴) قابلیت فیلم‌برداری با کیفیت VGA در ابعاد ۴۸۰ ×

۶۴۰ پیکسل و با سرعت ۳۰ فریم بر ثانیه،

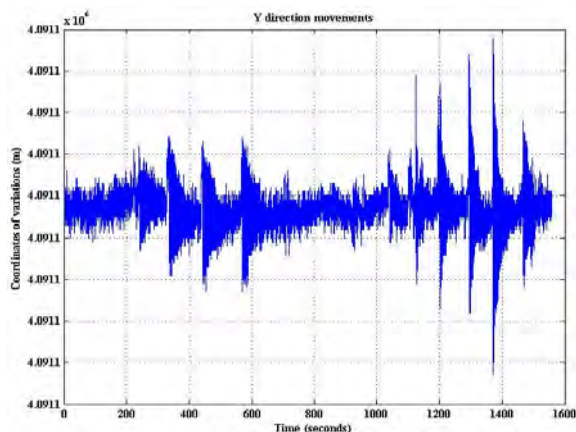
جدول ۳- مقادیر فرکانس‌های حاصل از روش پردازش تصاویر

IP	Mode 1
X-Direction (Hz)	1.087
Y-Direction (Hz)	1.191

۵-۲- نتایج حاصل از جی پی اس

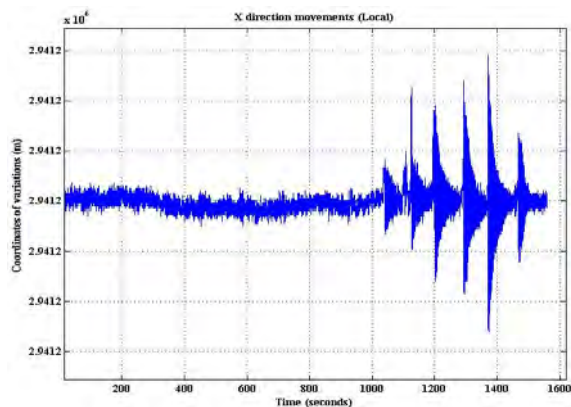
در این تحقیق از GPS دو فرکانسه مدل ۵۷۰۰ شرکت تریمبل استفاده گردید. نرخ برداشت GPS برابر ۱۰ هرتز تنظیم شد. بعد از اتمام برداشت داده‌ها، اطلاعات دستگاه‌های GPS تخلیه شد و این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Leica Geo Office پردازش و موقعیت بام سازه در هر اپک زمانی در سیستم مختصات کارترین به دست آمد. سپس با استفاده از همین نرم‌افزار مختصات بام سازه در سیستم مختصات UTM تعیین شد. با عملیات نجومی و با استفاده از دوربین زاویه یاب، راستای سازه با جهت شمال جغرافیایی به دست آمده و با تبدیلات هندسی مختصات‌های UTM به مختصات محلی سازه تبدیل شد. فرکانس و یا زمان تناوب‌های این قاب با استفاده از اندازه‌گیری توسط دستگاه جی‌پی‌اس تعیین گردید.

در شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات مختصات سازه بر حسب زمان در هر دو راستای X و Y در سیستم مختصات که از مشاهدات جی پی اس حاصل شده است مشاهده می‌گردد. این نمودارها با تبدیلات و دوران‌های هندسی به مختصات محلی سازه تبدیل می‌گردد.



شکل ۹- تغییرات مختصات - زمان سازه در جهت Y حاصل از دستگاه جی‌پی‌اس

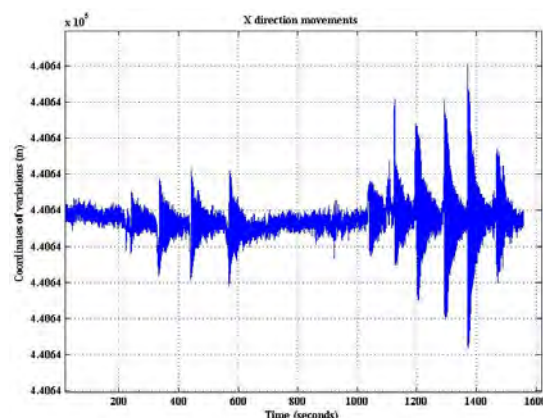
شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نمودارهای جابجایی-زمان سازه را در سیستم مختصات محلی سازه نشان می‌دهند. به دلیل اینکه مشاهدات جی پی اس به صورت پیوسته و بدون توقف انجام شد، نمودار جابجایی-زمان سازه با مقدار جابجایی‌های اولیه‌ی مختلف در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌گردد.



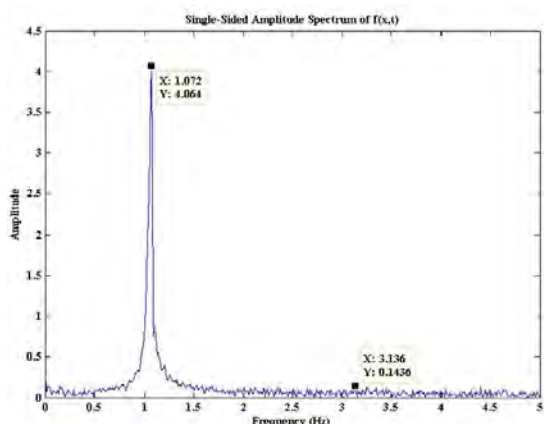
شکل ۱۰- تغییرات مختصات - زمان سازه در جهت X در سیستم مختصات محلی حاصل از دستگاه جی‌پی‌اس

با استفاده از نمودارهای کلی نوسان سازه، برای هر کدام از مقادیر اولیه جابجایی، نمودار نوسانی جداگانه ترسیم شد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳).

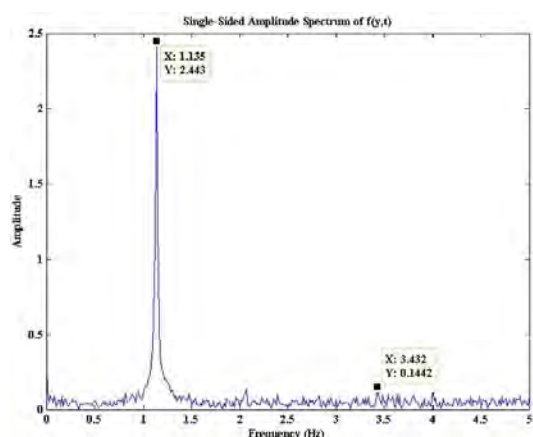
برای هر یک از نمودارهای نوسانی، با استفاده از نرم افزار مطلب (MATLAB) و تبدیل سریع فوریه (FFT) که از انواع تبدیل‌های گسسته می‌باشد ترسیم شد. به کمک منحنی تبدیل فوریه، فرکانس غالب برای هر کدام از نمودارها به دست آمد. مقادیر متناظر با اوج منحنی در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ همان فرکانس طبیعی سازه در دو جهت عمود برهم است. شکل ۱۴ طیف فوریه نمودار شکل



شکل ۸- تغییرات مختصات - زمان سازه در جهت X حاصل از دستگاه جی‌پی‌اس



شکل ۱۴- طیف فوری در جهت X برای (شکل ۱۰)



شکل ۱۵- طیف فوری در جهت Y برای (شکل ۱۱)

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، فرکانس غالب سازه در مود اول به وضوح قابل مشاهده است. فرکانس مود دوم سازه نیز به سختی قابل تشخیص است. ولی فرکانس مود سوم آنها قابل تشخیص نیست. در هر راستا چندین بار سازه به ارتعاش درآمد و مشاهدات جی پی اس انجام شد و فرکانس سازه در هر راستا چندین بار اندازه‌گیری شد. فرکانس موجود در جدول ۴ در هر راستا، از میانگین فرکانس‌ها اندازه‌گیری شده، به دست آمده است.

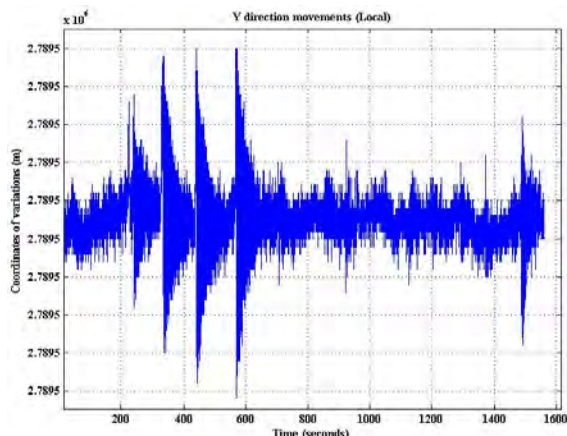
جدول ۴- مقادیر فرکانس‌های حاصل از اندازه‌گیری جی پی اس

GPS	Mode 1	Mode 2
X-Direction (Hz)	1.071	3.225
Y-Direction (Hz)	1.134	3.419

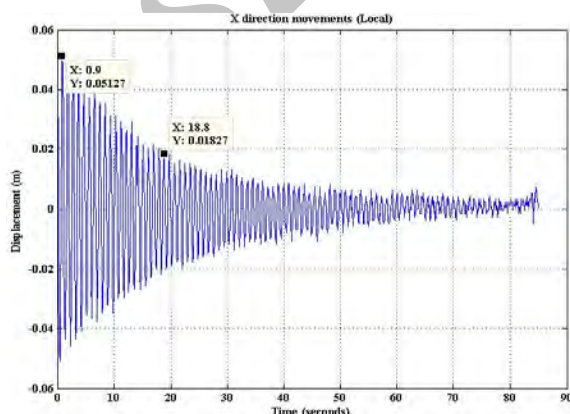
۵-۳- نتایج حاصل از مدل‌سازی کامپیوتری

همانگونه که قبلاً اشاره شد، در این تحقیق، زمان‌های تناوب سازه (و یا فرکانس) با استفاده از روش‌های تحلیلی نیز تعیین شد. برای این منظور، مشخصات سازه، مشابه

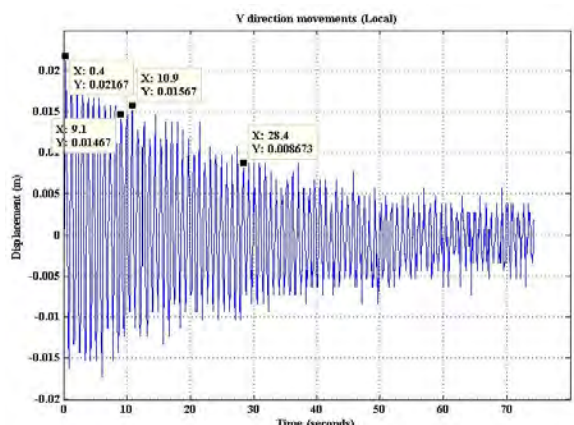
۱۲ و در راستای X است و شکل ۱۵ طیف فوری نمودار شکل ۱۳ در راستای Y می‌باشد.



شکل ۱۱- تغییرات مختصات زمان سازه در جهت Y در سیستم مختصات محلی حاصل از دستگاه جی پی اس



شکل ۱۲- نمودار نوسانی سازه در جهت X حاصل از دستگاه جی پی اس



شکل ۱۳- نمودار نوسانی سازه در جهت Y حاصل از دستگاه جی پی اس

۶- نتیجه گیری

زمان تناوب سازه‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار لرزه‌ای سازه‌ها در برابر بارگذاری‌های مختلف دارد. تعیین مقادیر دقیق آن می‌تواند دقت تحلیل و طراحی لرزه‌ای را افزایش دهد. در این تحقیق به سه روش (پردازش تصاویر، جی‌پی‌اس و تحلیلی) فرکانس‌های طبیعی (عکس زمان تناوب) یک سازه‌ی مدل، تعیین و با هم مقایسه شد.

فرکانس‌های طبیعی این سازه در جهت X با استفاده از روش‌های پردازش تصاویر، جی‌پی‌اس و تحلیلی به ترتیب برابر ۱/۰۷، ۱/۰۹ و ۰/۹۳ هرتز به دست آمد. همچنین مقادیر مربوطه در جهت Y به کمک این سه روش به ترتیب برابر ۱/۱۳، ۱/۱۹ و ۱/۰۸ هرتز حاصل شد. با مقایسه مقادیر فوق نتایج زیر حاصل می‌گردد:

- نتایج حاصل از پردازش تصاویر با نتایج به دست آمده از جی‌پی‌اس بسیار نزدیک است. خطای حاصل برای دو جهت X و Y به ترتیب برابر ۲ و ۵ درصد است. لذا می‌توان ادعا کرد که از روش پردازش تصاویر می‌توان برای تعیین زمان‌های تناوب در آزمایش‌های لرزه‌ای استفاده نمود.

- مقادیر حاصل از روش‌های آزمایشگاهی با مقادیر حاصل از روش تحلیلی، اندکی تفاوت دارد. این موضوع بخاطر این است که در روش تحلیلی، مقداری خطا به دلیل شبیه‌سازی رفتار سازه در مدل کامپیوتری وارد می‌شود و باعث می‌شود مقادیر حاصل از تحلیل همراه با خطا باشد.

- در تمامی حالات، فرکانس طبیعی در جهت Y از فرکانس طبیعی در جهت X بیشتر شد. این موضوع نشان می‌دهد که این سازه در جهت Y سخت‌تر است.

با توجه به سهل‌الاجرا بودن روش پردازش تصاویر، سرعت انجام و هزینه پائین آن در تعیین زمان تناوب سازه‌ها، پیشنهاد می‌شود، از این روش برای تعیین زمان‌های تناوب سازه‌های واقعی در اثر تحریکات وزش باد استفاده شود. نتایج حاصل از این روش با مقادیر پیشنهادی آئین‌نامه‌ها (به عنوان مثال استاندارد ۲۸۰۰) برای تعیین زمان‌های تناوب مقایسه گردد و در صورت نیاز، مقادیر پیشنهادی آئین‌نامه‌ها اصلاح شود.

آنچه در هنگام آزمایش اتفاق افتاد به کمک نرم‌افزار ETABS-9.7 مدلسازی شد و با استفاده از یک تحلیل دینامیکی طیفی، زمان‌های تناوب سازه محاسبه شد. این نرم‌افزار بر پایه روش المان‌های محدود به حل مسئله می‌پردازد. در این مدل‌سازی سقف به صورت یک دال دو-طرفه‌ی صلب مدل شد و بار هر کدام از دیافراگم‌ها به مقدار ۳۲۰ کیلوگرم (مشابه آزمایش) در نظر گرفته شد. تمام اتصالات از نوع گیردار فرض شد.

در جدول ۵ مقادیر فرکانس‌های طبیعی سازه با استفاده از روش تحلیلی ارائه شده است. دو فرکانس طبیعی مربوط به جهت X، دو فرکانس مربوط به جهت Y و دو فرکانس طبیعی مربوط به پیچش می‌باشد. با توجه به روش ایجاد ارتعاش در آزمایش، تعیین فرکانس‌های طبیعی پیچشی به روش آزمایشگاهی امکان‌پذیر نبود. هر چند می‌توان با تغییر روش ایجاد ارتعاش (ارتعاش اجباری) فرکانس‌های مربوط به پیچش را نیز تعیین کرد.

جدول ۵- نتایج به دست آمده از تحلیل کامپیوتری

ETABS	Mode 1	Mode 2
X-Direction(Hz)	0.932	3.019
Y-Direction(Hz)	1.083	3.304
Torsion Mode(Hz)	1.189	3.561

۵-۴- مقایسه نتایج حاصل از سه روش

در جدول ۶ فرکانس‌های طبیعی سازه حاصل از سه روش: GPS، پردازش تصاویر (IP) و روش تحلیلی (ETABS) مقایسه شده است.

جدول ۶- مقایسه فرکانس‌های طبیعی حاصل از سه روش بر حسب هرتز

	Mode 1-X direction	Mode 1-Y direction
GPS	1.07	1.13
IP	1.09	1.19
ETABS	0.93	1.08

همانگونه که از جدول ۶ مشاهده می‌گردد می‌توان ادعا کرد که تطابق خوبی بین نتایج حاصل از دو روش آزمایشگاهی وجود دارد. یعنی اینکه به کمک روش پردازش تصاویر و جی‌پی‌اس می‌توان فرکانس‌ها و یا زمان‌های تناوب سازه‌ها را با دقت قابل قبولی به دست آورد. نتایج حاصل از روش تحلیلی نیز مطابقت خوبی با دو روش آزمایشگاهی دارد هر چند مقدار در هر دو جهت کمتر از مقادیر آزمایشگاهی به دست آمد.

مراجع

- [۱] آقاچوک، ع.، محمودی صاحبی، م.، (۱۳۷۵)، "بررسی خصوصیات دینامیکی ساختمان‌های چند طبقه با استفاده از روش آزمایش ارتعاش اجباری"، فصلنامه مهندسی عمران و محیط زیست امیرکبیر، سال هشتم، شماره ۳۱.
- [2] Steven M. Dejong and Freek D. Van Der Meer, (2004), "Remote Sensing Image Analysis: Including The Spatial Domain", Kluwer Academic Publisher, USA.
- [۳] سعادت سرشت، م.، یوسف زاده، م.، (۱۳۸۸)، "ارزیابی روش فتوگرامتری صنعتی در کنترل هندسی اجرای نمای ساختمان"، همایش ژئوماتیک ۱۳۸۸.
- [۴] قطبی‌زاده، ر.، سعیدی، ر.، حسامی، م.، (۱۳۸۹)، "کاربرد جی‌پی‌اس در کنترل و نگهداری سازه‌ها"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، اردیبهشت ۱۳۸۹، مشهد.
- [5] Cazzaniga, N., Pinto, L., Forlani, G., and Abruzzi, P., (2005), "Monitoring Oscillations of Slender Structures with GPS and Accelerometers", FIG Working Week 2005 and GSDI-8 Cairo, Egypt April 16-21.
- [6] Nickitopoulou, A., Protopsalti, K. and Stiros, S., (2006), "Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises", Engineering Structures, Vol. 28, Issue 10, P: 1471–1482.
- [7] Xiaojing, Li, and et al, (2006), "Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system", GPS Solut, Vol. 10: 233–247.
- [8] Park, H., Sohn, H., Kim, I., and Park, J., (2008), "Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings", The Structural Design of Tall and Special Buildings", Vol. 17, Issue 1, P: 117–132.
- [9] 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, Vol. 33, Issue 1, P: 10–17.
- [۱۰] یادگاری، ج.، بهار، ا.، (۱۳۸۹)، "شناسایی پارامترهای مودال بر اساس داده‌های آزمایش ارتعاش محیطی با نرم افزار جدید SIP"، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری- دانشکده فنی، دوره ۴۴، شماره ۱، فروردین ۱۳۸۹، صفحه ۱۲۱ تا ۱۳۰.