

جابجایی سنجی سازه‌های بزرگ با استفاده از فتوگرامتری پهپاد مبنا

مریم احمدی باغ^{۱*}، مسعود خسروی^۱، علی حسینی نوه احمدآبادیان^۲، مسعود ورشو ساز^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری و سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی
{*ahmadii.eng, khosravi.msd}@gmail.com

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
ali_hosseini_naveh@yahoo.com

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
varshosazm@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۶، تاریخ تصویب آذر ۱۳۹۶)

چکیده

با وجود اینکه فتوگرامتری برد کوتاه در حوزه مهندسی عمران به‌ویژه جابجایی سنجی سازه‌های بزرگ مقیاس خیلی متداول نشده است، اما پروژه‌های موفق اجرا شده در این زمینه گویای پتانسیل بالای این روش در این حوزه است. امروزه با در دسترس بودن دوربین‌های پیشرفته رقومی ارزان قیمت، امکان اخذ و پردازش نرم‌افزاری تصاویر رقومی و درکل کم‌هزینه‌تر و آسان‌تر شدن پیاده‌سازی سیستم‌های فتوگرامتری، امکان به‌کارگیری بیش‌ازپیش فن‌های فتوگرامتری به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های سنتی جابجایی سنجی، توجه‌های بیشتری یافته است. این مقاله یک روش نوین نظارت و بررسی سازه‌های بزرگ مقیاس بر اساس نظارت بصری را بیان می‌کند. این روش، تشخیص جابجایی سازه‌ها بر اساس روش‌های فتوگرامتری و بینایی ماشین با استفاده از آنالیز تصاویر اخذ شده به‌وسیله‌ی پهپاد را امکان‌پذیر می‌سازد. در این تحقیق با علم بر اینکه جابجایی سازه مورد مطالعه در یک بازه زمانی کوتاه نزدیک به صفر است؛ روش فتوگرامتری پهپاد مبنا مورد ارزیابی قرار گرفت؛ به این صورت که مختصات به‌دست‌آمده برای دو ایک باهم مقایسه شده و اختلاف به‌دست‌آمده بیانگر دقت روش مذکور می‌باشد. علاوه بران با طراحی یک ابزار برای سنجش صحت روش فتوگرامتری، تغییری مشخصی در موقعیت دونقطه در مرحله دوم داده شد و میزان جابجایی این تغییر با استفاده از روش ارائه شده مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به دقت به‌دست‌آمده که ۱/۸۹ میلی‌متر می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب سیستم هواپیمای بدون سرنشین و روش‌های فتوگرامتری و بینایی ماشین می‌تواند به بهبود کیفیت و دقت نظارت سازه‌ها کمک کند.

واژگان کلیدی: جابجایی سنجی سازه‌های بزرگ، فتوگرامتری، بینایی ماشین، پهپاد

۱- مقدمه

با توجه به مشکلات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی، افزایش طول عمر سازه‌ها به‌منظور استفاده‌ی مؤثر، یک نیاز اساسی می‌باشد. بدین منظور، تمرکز بیشتری بر روی نظارت، بازسازی و نگهداری سازه‌ها لازم است. از طرفی نظارت سازه‌های بزرگ مقیاس از نظر زمانی، طولانی و از نظر فنی، پیچیده است.

رفتار سنجی سازه‌ها به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد. ازجمله‌ی این روش‌ها، می‌توان به روش‌های میکروژئودزی، سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS)، استفاده از لیزر اسکن، روش‌های فتوگرامتری برد کوتاه و استفاده از ابزارهای دقیق و تجهیزات مکانیکی اشاره کرد.

روش‌های میکروژئودزی علاوه بر این که روش‌های دقیقی هستند؛ اما نیاز به استقرار بر روی نقاط ثابت دارند. همچنین دقت پیمایش در این روش، وابسته به هندسه توزیع این نقاط می‌باشد. همچنین استفاده از این روش‌ها بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. در روش‌های مبنی بر لیزر اسکن نیز مانند روش‌های میکروژئودزی برای مدل‌سازی و اندازه‌گیری نیاز به نقاط مناسبی برای استقرار تجهیزات می‌باشد. این نقاط باید کاملاً ثابت، بدون لرزش و حرکت و همچنین فاصله آن‌ها تا بدنه سازه بسیار کم باشد؛ به‌طوری‌که دقت حاصل از این روش‌ها وابسته به همین فاصله می‌باشد. با توجه به قابلیت روش‌های فتوگرامتری ازجمله پایین بودن هزینه، سرعت و دقت بالا، عدم تماس مستقیم با جسم، نامحدود بودن نقاط انتخابی برای رفتار سنجی، قابلیت استفاده در مناطق پرخطر و غیره، می‌توان گفت این روش بسیاری از محدودیت‌های روش‌های قبل را برطرف می‌کند؛ اما این روش‌ها نیز در سازه‌های بزرگ مقیاس و سازه‌هایی که نیاز به دقت و جزئیات بیشتری از سازه به‌منظور نظارت دارند با محدودیت مواجه است، زیرا نمی‌توان از تمام قسمت‌های سازه جزئیات نقاط سازه را موردبررسی قرارداد. همچنین امکان تصویربرداری در هر ارتفاع و فاصله دلخواه از سازه میسر نمی‌باشد.

با توجه به اینکه پهناد که در هر ارتفاع و هر فاصله‌ای از سازه امکان تصویربرداری را فراهم می‌کند؛ هدف از این مقاله بررسی و ارزیابی امکان استفاده از روش‌های فتوگرامتری و بینایی ماشین با استفاده از تصاویر اخذشده توسط پهناد می‌باشد. دقت، محدودیت و مزایای این روش موردبررسی قرار می‌گیرد.

ساختار این مقاله به این‌گونه است که در ادامه به‌مرور کارهای گذشته در زمینه جابجایی سنجی سازه‌های بزرگ با استفاده از فتوگرامتری، پرداخته‌شده است؛ سپس مراحل کامل روش پیشنهادی و روند انجام آن توضیح داده‌شده است و در بخش بعد نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس به بحث و نتیجه‌گیری پرداخته‌شده است.

۲- پیشینه تحقیق

ایده‌ی استفاده از فتوگرامتری به‌منظور اندازه‌گیری میزان تغییر شکل سازه‌ها در اثر فشارهای مکانیکی، در ابتدا توسط Peter و Ranson در سال ۱۹۸۲ معرفی گردید. به این منظور فن‌های نوری اندازه‌گیری، شامل پردازش تصویر و مقایسه‌ی عددی (به‌منظور اندازه‌گیری میزان تغییر شکل سازه‌ها) معرفی شد [۱]. در ادامه روش‌های سه‌بعدی بررسی نقاط و استفاده از چند دوربین برای اندازه‌گیری، توسعه یافت به‌طوری‌که امروزه از این روش‌ها و با استفاده از دید استریو تغییر شکل و هندسه سازه‌های بزرگ موردبررسی قرار می‌گیرد. Bales و Hilton در سال ۱۹۸۵ انحراف عمودی میله‌ی فولادی را بررسی کردند؛ که در این تحقیق از دوربین Zeiss UMK و تارگتهای مات استفاده شد. به‌منظور کنترل شبکه از نقاط کنترل نقشه‌برداری استفاده کردند [۲]. در سال ۱۹۹۸ Gerd Maas و همکارانش پتانسیل فتوگرامتری در تعیین مختصات نقاط روی سد را مورد ارزیابی قرار دادند. از دوربین Kodak DCS460 و تارگتهای بازتابنده استفاده کردند؛ و به‌منظور کنترل شبکه از نقاط کنترل و ایجاد شبکه ژئودتیکی استفاده کردند و به‌دقت ۲ تا ۳ میلی‌متر رسیدند [۳]. در سال ۲۰۰۰، Fraser و Riedel از فتوگرامتری به‌منظور تغییر شکل میله‌ی فولادی داغ شده، در زمان‌های مختلف استفاده کردند. در روش پیشنهادی سه دوربین به‌منظور اندازه‌گیری تغییر شکل‌های حرارتی میله به کار رفت. به دلیل تغییر ابعاد میله در زمان سرد شدن، تارگت‌های مخصوصی روی میله نصب می‌شود؛ و در مراحل سرد شدن اندازه‌گیری می‌شوند. این مطالعه نشان می‌دهد که تکنولوژی تصویر مینا در محیط‌های خشن و ناگوار که سایر روش‌های اندازه‌گیری نمی‌توانند مورد استفاده قرار گیرند، نیز کاربرد دارد [۴].

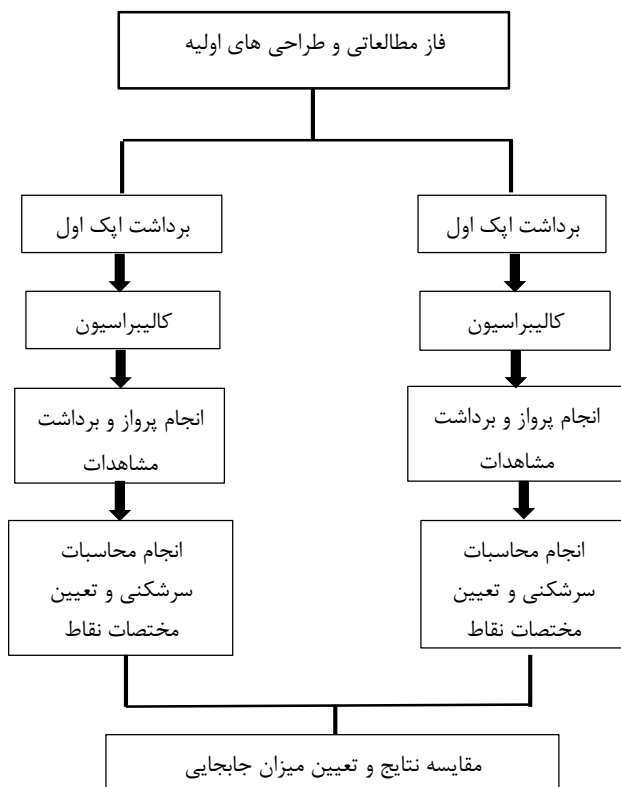
در سال ۲۰۰۲ Calvin Li و همکارانش جابجایی سنجی بنای تاریخی در اثر حفاری را مورد ارزیابی قرار دادند. در این

باعث کاهش دقت می‌شود [۱۰] و یا اینکه در فواصل نزدیک و در چندین رن پرواز به‌طوری‌که از بالا تا پایین سازه پوشش داده شود؛ که این روش باعث افزایش دقت و صحت داده‌ها و محاسبات می‌شود. با استفاده از روش فتوگرامتری پهنپاد مبنا به راحتی قابل اجرا می‌باشد. این روش تاکنون به منظور جابجایی سنجی سازه‌های بزرگ انجام نگرفته است.

۳- مبانی و روند انجام پروژه

همان‌طور که ذکر گردید، هدف از انجام این پروژه بررسی امکان استفاده از فتوگرامتری پهنپاد مبنا به منظور تعیین میزان جابجایی سازه‌ها می‌باشد. جهت بررسی میزان جابجایی یا نشست سازه نیاز به بررسی سازه در بازه‌های زمانی مشخص می‌باشد. در این تحقیق ضرورت استفاده از پهنپاد به منظور تعیین این جابجایی‌ها بررسی شده است. بدین منظور در این بخش مراحل انجام روش موردنظر، بیان شده است.

شکل ۱ فلوچارت روش موردنظر بیان شده است. مرحله اول شامل طراحی شبکه، تارگت گذاری، تعیین دوربین تصویربرداری و پارامترهای مناسب پرواز و طراحی مکان نصب تارگت و پارامترهای مناسب برای پرواز و تعیین مختصات نقاط کنترل با روش‌های میکروژئودزی، می‌باشد. در ادامه به صورت کامل هر کدام از این مراحل بیان گردیده است.



شکل ۱- فلوچارت روش پیشنهادی

تحقیق از دوربین Fujifilm MX2700 و تارگتهای بازتابنده، استفاده شد. از نقاط کنترل و روش میکروژئودزی به منظور کنترل شبکه استفاده کردند؛ و در نهایت به دقت ۲ میلی‌متر در نرم‌افزار Elcovision 10 رسیدند [۵]. انحراف ناشی از باربر روی پل بتنی در سال ۲۰۰۳ توسط Jauregui بررسی شد؛ که در آن از دوربین Kodak DCS5660 و تارگت های مات استفاده شد؛ و به منظور کنترل شبکه از نقاط کنترل نقشه برداری استفاده شد [۶]. همچنین Jauregui اندازه‌گیری تغییر شکل عمودی پل‌ها به وسیله‌ی فتوگرامتری برد کوتاه را بررسی نمود. بدین منظور یک میله فشرده فولادی را به عنوان نمونه شبیه‌سازی شده‌ی آزمایشگاهی در نظر گرفت و میزان جابجایی در نقاط مختلف میله را با استفاده از روش پیشنهادی و همچنین یکسری شاخص‌های مدرج خیلی دقیق اندازه‌گیری کرد. نتایج جابجایی اندازه‌گیری شده با استفاده از روش فتوگرامتری در مقایسه با شاخص به کار گرفته شده، حدود ۲ تا ۱۰ درصد اختلاف داشت [۷].

در سال ۲۰۱۰ Jiang و همکارانش تغییر شکل پل فولادی را بر اثر بارگذاری بررسی کردند. در این تحقیق از دوربین Kodak DCS660 و Kodak proSLR/n استفاده کردند؛ و تارگتهای بازتابنده بر روی سه پایه قرار داده شد. به منظور کنترل شبکه از تارگتهای هم‌تراز و متد RDC استفاده کردند و به دقت ۱ میلی‌متر در جهت x, y و دقت ۲ میلی‌متر در جهت z رسیدند [۸].

Daniel J Cerminaro در سال ۲۰۱۴، جابجایی سنجی دیوار حائل بین باندهای غیر هم‌سطح اتوبان را در دو اپک زمانی ارزیابی کرد. در این تحقیق از دوربین Nikon D5100 و تارگت های بازتابنده روی دیوار استفاده شد. جابجایی سنجی بر اساس منطبق سازی ابر نقاط انجام گرفت؛ و نرم‌افزارهای Agisoft و Cloud Compare استفاده شده و در نهایت به دقت ۵ میلی‌متر رسیدند [۹].

در تمام تحقیقات انجام گرفته در فاصله‌ای مشخص از سازه تصویربرداری انجام گرفته است که در سازه‌های بزرگ با مساحت و ارتفاع زیاد تمامی جزئیات سازه و همه نقاط روی بدنه قابل دسترسی نیست. در سازه‌هایی همانند سد، دیوار حائل و برج‌ها نمی‌توان با تعدادی اندک تصویر و بررسی تعداد محدودی نقاط کنترل به دقت و صحت مناسب رسید؛ زیرا این نقاط بایستی در تمام قسمت‌های سازه پخش شده باشند؛ و در صورتی می‌توان از تمامی نقاط عکس‌برداری کرد که یا در فاصله‌ای دور از سازه عکس‌برداری شود که این روش مسلماً

۳-۱- طراحی شبکه

طراحی شبکه مهم‌ترین عامل جهت رسیدن به دقت‌های موردنظر با اعمال قیودی به‌منظور استحکام بهینه شبکه و دستیابی به نتایج مطلوب‌تر تلقی می‌شود. هدف از این طراحی چیزی جز ارضای معیارهایی نظیر دقت، قابلیت اطمینان و هزینه نمی‌باشد.

در طراحی شبکه پارامترهایی نظیر فاصله پهناد تا سازه، فاصله زمانی تصویربرداری، تعداد تصاویر، فاصله و تعداد رن‌های پروازی باید طراحی شود. در روند طراحی شبکه کمترین و بیشترین فاصله از سازه برآورد می‌شود که بایستی فاصله از سازه به‌منظور تصویربرداری در این بازه قرار داشته باشد؛ که در [۱۱] به تفصیل تمامی فرمول‌ها و مراحل به دست آوردن این فواصل توضیح داده شده است.

یکی از پارامترهای طراحی شبکه، هندسه تصویربرداری است که این پارامتر با توجه به نرم‌افزار مورد استفاده (Agisoft) به‌گونه‌ای طراحی شده که زاویه تصویربرداری به‌صورت عمود بر سطح سازه و یا تارگت باشد.



شکل ۲- نحوه‌ی تصویربرداری از سازه که بایستی محور دوربین عمود بر سازه باشد

۳-۲- تارگت گذاری

با توجه به فاصله تصویربرداری و طراحی شبکه، شعاع تارگت‌های مورد استفاده طراحی می‌شود. با توجه به اینکه از نرم‌افزار Agisoft استفاده شده است از تارگت‌های کد دار این نرم‌افزار بدین منظور استفاده می‌شود. قطر تارگت از فرمول (۱) به دست می‌آید.

$$D_t = n \left(\frac{H}{f} \right) * I_{res} \quad (1)$$

که در آن H فاصله از سازه، f فاصله‌ی کانونی دوربین و I_{res} اندازه پیکسل دوربین می‌باشد. با توجه به اینکه حداقل قطر تارگتها در تصویر بایستی بیشتر از ۳۰ پیکسل باشد (با توجه به پیشنهاد نرم‌افزار)؛ مقدار n برابر ۳۰ می‌باشد.



شکل ۳- تارگت مورد استفاده

۴- پیاده‌سازی روش

بعد از طراحی‌های پروژه به‌صورت تئوری، بایستی به پیاده‌سازی روش مذکور بر روی سازه مورد مطالعه پرداخت در این بخش تجهیزات و منطقه مورد مطالعه و مراحل اجرای پروژه توضیح داده شده است.

۴-۱- تجهیزات و منطقه مورد مطالعه

با توجه به دسترسی و امکان نصب تارگت و پرواز در فاصله طراحی شده رو به روی سازه، یک سوله در دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی به ابعاد $10 \times 45 \times 8 \text{ mm}^3$ به‌عنوان سازه مورد مطالعه انتخاب شد (شکل ۴ (ب)).
به‌منظور تصویربرداری از سازه موردنظر از پهپاد Inspire1 استفاده شده است. مشخصات پهپاد مورد استفاده در جدول ۱ ذکر شده است.



شکل ۴- الف) UAV Inspire 1 (ب) سازه مورد مطالعه (سوله در دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی)

جدول ۲- پارامترهای اصلی در طراحی پرواز

ارتفاع تصویربرداری	در رن اول برابر ۴ متر در رن دوم ۸ متر
پوشش عرضی	۶۰٪
پوشش طولی	۸۰٪
تعداد رن های پروازی	۲
تعداد تصاویر در هر رن	۵۰
فاصله از سازه	۱۷ متر

دو اپک تصویربرداری در یک روز و با اختلاف زمانی دو ساعت انجام می شود. با علم به اینکه در بازه زمانی دو ساعت سازه جابجایی ندارد، یا این جابجایی به سمت صفر میل می کند، بررسی روی تارگت ها انجام می شود. مختصات سه بعدی به دست آمده در دو اپک متفاوت، بایستی برابر هم باشند. همچنین برای اطمینان بیشتر یک جابجایی مصنوعی ایجاد گردید و این جابجایی بررسی شد. بدین صورت که از یک مقیاس بار دقیق با دقت صدم میلی متر استفاده شد. دو تارگت با دقت بالا بر روی کولیس قرار داد شد و این کولیس بر روی سازه نصب گردید. (شکل ۶). در اوپک اول از این تارگت ها تصویربرداری شده، نتایج پردازش شده و به تارگت ها مختصات سه بعدی داده می شود. در مرحله بعد کولیس به یک اندازه مشخص جابجا می گردد. تصویربرداری در مرحله دوم نیز انجام می گیرد و بعد از پردازش به تارگت های اپک دوم نیز مختصات داده می شود. با توجه به اینکه میزان جابجایی کولیس مشخص و ثبت شده است باید اختلاف مختصات سه بعدی تارگت های روی کولیس در فضای سه بعدی برابر این اختلاف باشد.



شکل ۶- کولیس و تارگتهای نصب شده روی آن به منظور ایجاد جابجایی

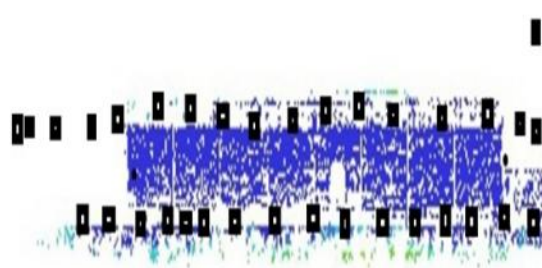
همچنین برای بقیه تارگت ها با توجه به این که جابجایی تقریباً صفر می باشد مختصات به دست آمده در دو اپک بایستی باهم برابر باشد. اختلاف به دست آمده از تفاضل مختصات نقاط در دو اپک بیانگر دقت روش می باشد. با توجه به پارامترهای طراحی شده برای پرواز، تصویربرداری انجام شد که پارامترهای اخذ تصاویر در جدول ۳ آمده است.

جدول ۱- مشخصات پهپاد Inspire 1

DJI Inspire 1 T600	مدل پهپاد
۲۹۳۵ گرم	وزن
لیتیوم پلیمر ۶ سل ایا ظرفیت ۴۵۰۰ میلی آمپر ۱۸ دقیقه پرواز مداوم	باتری
X3 FC350 12.76M	دوربین
۱۲/۷ مگا پیکسلی	دوربین اصلی
مجهز به GPS با دقت بالا و قابلیت برنامه ریزی پرواز	سایر امکانات دوربین
مجهز به سیستم تثبیت کننده تصویر - محدوده ایزو ۱۰۰ الی ۳۲۰۰	سایر امکانات دوربین
Gimbal ZENMUSE X3	مدل گیمبال
۹۴°	زاویه دید FOV

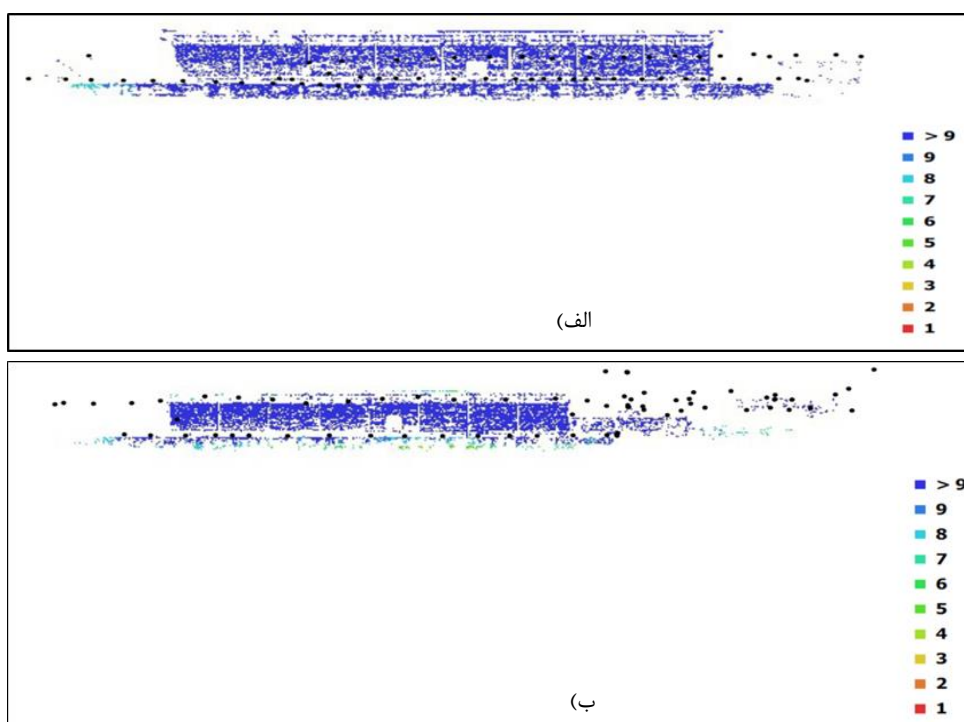
با توجه به فاصله تصویربرداری و طراحی شبکه، شعاع تارگت های مورداستفاده برابر ۳۵ میلی متر می باشد؛ و همچنین تعداد ۲۹ تارگت بر روی بدنه سازه در سه لاین نصب گردید.

با توجه به پارامترهای طراحی شبکه و فضای اطراف سازه، فاصله بهینه پهپاد از سازه برابر ۱۷ متر در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به پوشش طولی و عرضی محاسبه شده برای تصویربرداری، دو رن پرواز و تعداد ۵۰ تصویر در هر رن در نظر گرفته شد. شکل ۵ جانمایی ایستگاه های تصویربرداری را نشان می دهد.



شکل ۵- جانمایی ایستگاه های تصویربرداری

با توجه به پارامتر کشیدگی تصویر سرعت پرواز برای پهپاد یک متر بر ثانیه و زمان تصویربرداری هر یک ثانیه یک تصویر طراحی گردید. پارامترهای اصلی در طراحی پرواز در جدول ۲ مشاهده می شود.



شکل ۷- موقعیت دوربین‌ها و پوشش تصاویر الف) در اپک اول ب) در اپک دوم

۵- نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌گونه که در قسمت قبل توضیح داده شد؛ برای ارزیابی دقت این روش از دو فن استفاده شد. در قسمت اول با توجه به اینکه نقاط در فاصله دو اپک تصویربرداری جابجایی ندارند؛ بایستی مختصات آن‌ها در دو اپک باهم برابر باشد. میزان اختلاف مختصات نقاط در اپک اول و دوم نشان‌دهنده میزان خطای روش می‌باشد. در قسمت دوم فاصله تارگت‌های روی مقیاس بار با مقدار واقعی که با کولیس اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود.

به‌منظور تعیین میزان جابجایی نقاط در ابتدا بایستی نقاط چک و کنترل انتخاب شود. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود نقاط کنترل به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بیشتر گوشه‌های تصویر را شامل شود و به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند؛ که در کل سازه پخش باشد و مدل به‌صورت متقارن توجیه و مقیاس شود و بقیه نقاط به‌عنوان نقاط چک در نظر گرفته شده است که اغلب نقاط چک داخل محدوده نقاط کنترل قرار گرفته‌اند. این عمل باعث می‌شود که شبکه نقاط به‌صورت متقارن پخش شود و از تجمع نقاط کنترل در یک بخش خاص از سازه جلوگیری شود که این عمل از تغییرات زیاد دقت در قسمت‌های مختلف سازه جلوگیری می‌کند و تقریباً دقت تمام نقاط در حد یک تا دو

جدول ۳- پارامترهای اخذ تصویر و زمان تصویربرداری

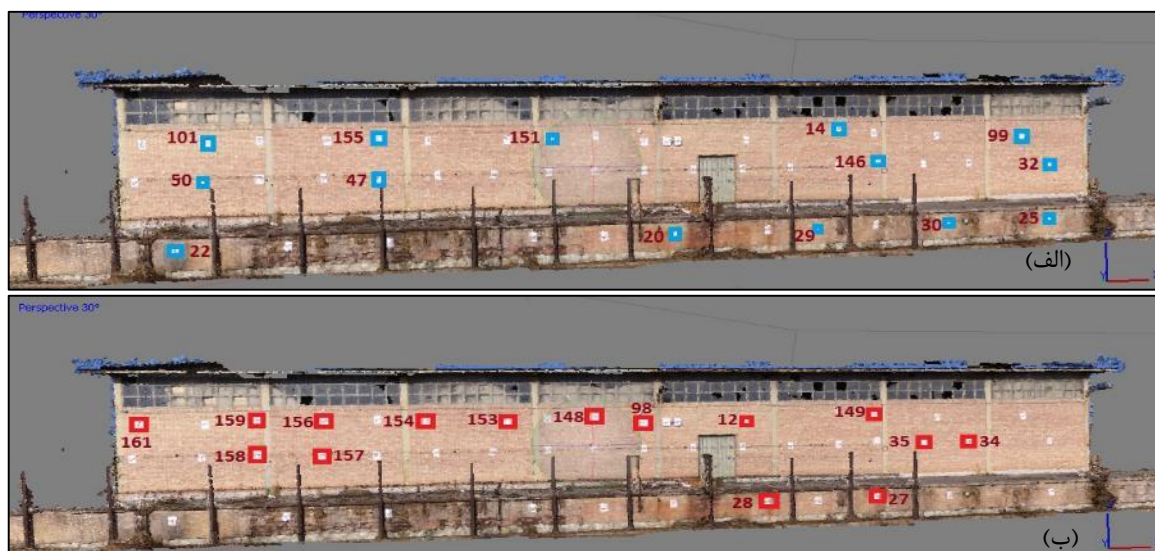
زمان تصویربرداری در هر اپک	۱۸ دقیقه
تعداد ایستگاه‌های تصویربرداری	۷۱
تعداد تصاویر	۷۱
پوشش طولی تصاویر	~ ۸۰٪
پوشش عرضی تصاویر	~ ۶۰٪

موقعیت تصاویر و همچنین میزان پوشش تصاویر در شکل ۷ برای هر اپک نشان داده شده است. همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود؛ میزان پوشش هر منطقه بارنگ خاصی نشان داده شده است؛ که این رنگ بیانگر تعداد تصاویری است که از این منطقه از سازه گرفته شده است. تصویر بیانگر این است که تقریباً همه نقاط روی بدنه سازه در بیشتر از نه تصویر دیده می‌شود.

بعد از تصویربرداری داده‌ها پردازش شده و جابجایی و عدم جابجایی نقاط با استفاده از نرم‌افزار AgiSoft بررسی شد، به‌این ترتیب که تناظر یابی و بازسازی موقعیت دوربین‌ها در ابتدا با استفاده از این نرم‌افزار محاسبه شده، سپس شناسایی تارگتها و کالیبراسیون به‌صورت خودکار انجام شد. مختصات زمینی برداشت شده نقاط کنترل وارد نرم‌افزار شد و در نهایت مختصات نقاط چک با استفاده از این نرم‌افزار محاسبه گردید. مختصات نقاط چک در دو اپک باهم مقایسه و اختلاف آن‌ها محاسبه شد. مقدار اختلاف به‌دست‌آمده بیانگر دقت روش مذکور در جابجایی سنجی سازه می‌باشد.

اپک اول تقریباً باهم یکسان است و این امر بیانگر توزیع مناسب نقاط کنترل و چک در شبکه می باشد که در اپک دوم نیز به همین ترتیب می باشد.

میلی متر باهم تفاوت داشته باشد و شبکه متقارن شود؛ که این امر به وضوح در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است همان طور که مشاهده می شود دقت نقاط کنترل و چک در



شکل ۸- الف) جانمایی نقاط کنترل بر روی سازه ب) جانمایی نقاط چک روی سازه

جدول ۴- RMSE کل نقاط کنترل و چک در اپک اول

تعداد	خطای تصویر	Total(mm)	XY errors(mm)	Z error (mm)	Y error (mm)	RMSE X(mm)	
۱۴	۱/۱۸Pix	۱/۱۴۶۱	۱/۰۷۱۸	۰/۴۰۵۹	۰/۵۳۲۹	۰/۹۲۹۹	نقاط کنترل
۱۵	۱/۱۹Pix	۱/۲۸۲۶	۱/۱۸۷۴	۰/۴۸۴۸	۰/۹۸۶۹	۰/۶۶۰۲۱	نقاط چک

جدول ۵- RMSE کل نقاط کنترل و چک در اپک دوم

تعداد	خطای تصویر	Total(mm)	XY errors(mm)	Z error (mm)	Y error (mm)	RMSE X(mm)	
۱۴	۱/۱۹۶Pix	۱/۱۴۲۷	۱/۰۷۰۲۴	۰/۴۰۰۵	۰/۷۹۷۴	۰/۷۱۳۸	نقاط کنترل
۱۵	۱/۲Pix	۱/۲۵۵۰	۱/۱۵۳۹	۰/۴۹۳۵	۰/۹۹۳۰	۰/۵۸۷۷	نقاط چک

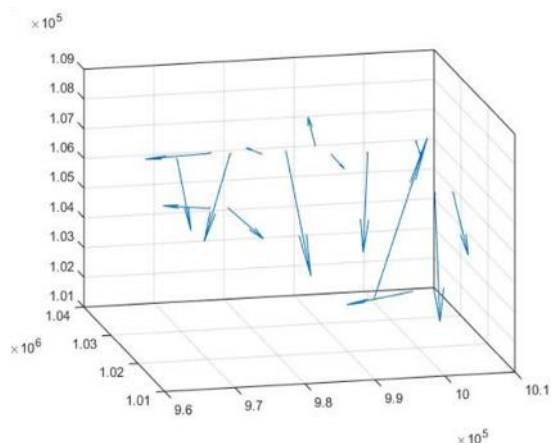
در این مرحله نتایج حاصل از جابجایی سنجی و مقایسه دو اپک محاسبه شده و در جدول ۶ نمایش داده شده است. با استفاده از مختصات به دست آمده از دو اپک برای هر یک از تارگت ها می توان خطای روش را با استفاده از اختلاف به دست آمده برای هر نقطه چک، ارزیابی کرد.

در شکل ۹ نمودار خطای هر نقطه ی چک نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود بیشترین خطا برابر ۲/۲۲ میلی متر می باشد در حالی که کمترین خطا برابر ۰/۲۰۵ میلی متر می باشد.

همان گونه که در جدول های ۴ و ۵ مشاهده می شود مقدار خطای Z در دو اپک و همچنین برای نقاط چک و کنترل تقریباً برابر ۰/۴۰ می باشد. همچنین مقدار خطای XY نقاط کنترل در دو اپک و خطای XY نقاط چک در دو اپک باهم برابر است؛ که این امر می تواند بیانگر تصویربرداری و طراحی شبکه یکسان در دو اپک تصویربرداری و همچنین کیفیت مشابه تصاویر از نظر میزان نور محیط و لرزش دوربین و تار شدگی تصویر باشد؛ که این موارد از لحاظ تئوری با توجه به طراحی شبکه یکسان و دوربین یکسان قابل پیش بینی است، اما از لحاظ عملی با توجه به شرایط محیطی و میزان باد منطقه و نور محیط و نحوه ی تصویربرداری که به صورت دستی (کنترل دستی پهیاد) می باشد، معمولاً این مقادیر اختلافات جزئی باهم دارند.

جدول ۶- خطای هر نقطه در راستای X, Y, Z و خطای کل در هر نقطه

شماره تارگت	X error(mm)	Y error(mm)	Z error(mm)	Total error(mm)
۱۲	۰/۲۹۲۵	۱/۱۱۷	-۰/۸۲۱۲	۱/۴۱۶۹
۲۷	۱/۴۹۹	۱/۲۲۹	۰/۱۹۰۱	۱/۹۴۷۷۱۱
۲۸	۱/۰۵۶۳	۱/۴۰۷	۱/۲۵۹۷	۲/۱۶۳۸۵۳
۳۴	۰/۰۸۹	۰/۹۷۸	۰/۳۵۹۸	۱/۰۴۵۸۷۸
۳۵	۰/۶۱۶	۲/۰۱۶	۰/۷۱۹۶	۲/۲۲۷۴۵۰
۹۸	۰/۲۴۸۹	۰/۳۳۱	۰/۰۶۷۷	۰/۴۱۹۶۳۷
۱۴۸	۰/۴۳۵۲	۰/۵۵۹	۰/۲۵۸۹	۰/۷۵۴۲۶۰
۱۴۹	۰/۲۱۴	۰/۱۰۲	۰/۱۲۹۲	۰/۲۶۹۹۸۶
۱۵۳	۰/۲۶۳۹	۱/۲۷۶	۰/۷۷۱۳	۱/۵۱۴۱۷۳
۱۵۴	۰/۲۹۹۳	۰/۳۷۶	۰/۰۱۱۱	۰/۴۸۰۷۰۷
۱۵۶	۰/۹۶۲	۰/۴۴۶	۰/۵۷۴۲	۱/۲۰۵۸۴۶
۱۵۷	۰/۵۸۳۱	۱/۲۳۴	۰/۱۰۹۵	۱/۳۶۹۲۱۵
۱۵۸	۱/۲۸۵۶	۰-/۳۸۲	-۰/۰۰۰۶	۱/۳۴۱۱۵۳
۱۵۹	۱/۳۸۲۴	-۱/۵۴	۰/۱۷۰۴	۲/۰۷۶۴۵۵
۱۶۱	-۰/۱۶۱۲	۰/۶۷	۰/۴۴۷۸	۰/۸۲۱۸۸۳



شکل ۱۰- نمودار رفتار خطاهای نقاط چک در فضای سه‌بعدی

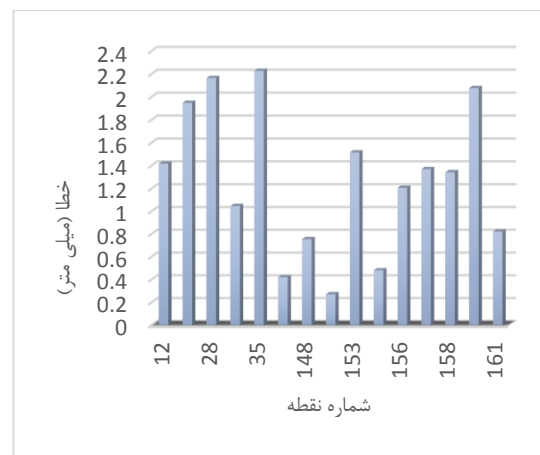
پارامترهای مربوط به خطای بازسازی و خطای تصویر در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸- پارامترهای خطای بازسازی و خطای تصاویر

۰/۳۳۳۳ pix	خطای بازسازی منطقه
۷/۴۴ mm/pix	رزولوشن زمینی
۰/۱۵۲۴۲۶	RMS خطای بازسازی
۰/۳۳۳۳۱۶ pix	
۱/۱۰۳۹۸	بیشترین مقدار خطای بازسازی
۴/۴۲۹۲ pix	
۰/۱۹ pix	خطای تصویر
۱۲۸,۶۲۸۳۸۲ mm	اختلاف به دست آمده از فتوگرامتری

جدول ۷- RMSE کل شبکه

RMSE X (mm)	RMSE Y (mm)	RMSE Z (mm)	TOTAL (mm)
۱/۰۲۲۰۸۵۶	۱/۳۹۳۵۲۹۲	۱/۷۶۹۳۰۹۵	۱/۸۹۱۶۷۱



شکل ۹- نمودار مقدار خطا در هر نقطه چک

شکل ۹ مقدار خطا را برای هر نقطه نشان می‌دهد درحالی‌که جهت و رفتار خطا نیز بایستی بررسی شود در شکل ۱۰ رفتار خطاها برای هر نقطه چک در فضای سه‌بعدی نشان داده شده است. این نمودار تنها نشان‌دهنده رفتار خطا می‌باشد که به منظور نمایش بهتر آن‌ها در مقیاس بزرگ‌تری نمایش داده شده‌اند.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان خطای روش پیشنهادی نسبت به کولیس برابر ۰/۳۴۱۶ میلی‌متر است

۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله هدف بررسی امکان استفاده از پهپاد و روش‌های فتوگرامتری و بینایی ماشین به‌منظور جابجایی سنجی سازه‌ها می‌باشد. پهپادها امروزه با توجه به هزینه کم، اخذ و انتقال سریع داده‌ها، رزولوشن بالای اطلاعات مکانی، وجود سیستم‌های ناوبری و کنترل، حس‌گرهای مختلف برای اخذ سریع داده‌های دیجیتالی، موردتوجه قرار گرفته‌اند. پهپاد امکان اخذ داده در نقاط غیرقابل دسترسی و با جزئیات کامل را بدون تماس با سازه در کمترین زمان فراهم می‌کند؛ که نسبت به روش‌های قبلی برای جابجایی سنجی سازه‌ها، به‌منظور تشخیص جابجایی در نقاط مختلف سازه، روشی بهینه و مقرون‌به‌صرفه است.

در این مقاله یک روش جابجایی سنجی با استفاده از فن‌های فتوگرامتری برد کوتاه و بینایی ماشین با به‌کارگیری پهپاد ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده، بیانگر آن است که روش‌های فتوگرامتری پهپاد مبنای همراه تعدادی نقاط کنترل زمینی به‌منظور ایجاد شبکه نقاط سه‌بعدی دقیق، ترکیب مناسبی به‌منظور جابجایی سنجی سازه‌های بزرگ می‌باشد. این روش نسبت به سایر روش‌های جابجایی سنجی امکان نظارت و بررسی سازه‌ها را در بازه‌های زمانی کوتاه، با توجه به سرعت و قابلیت پردازش سریع داده‌ها، فراهم می‌کند. این روش می‌تواند تحولی جدید در نظارت و ایمنی سازه‌ها ایجاد نماید. در این تحقیق جابجایی سنجی در نقاط خاص و محدودی از سازه بررسی گردید و بقیه نقاط سازه بررسی نشده است در تحقیقات آینده از روش مدل‌سازی و تولید ابر نقطه متراکم از سازه و مقایسه‌ی ابر نقطه، می‌توان جابجایی سازه در تمام قسمت‌های سازه را نمایش داد و بررسی کرد. پهپاد در زمینه تصویربرداری و پرواز با چالش‌هایی همراه است که اگر این چالش‌ها به حداقل برسند دقت و عملکرد پهپاد در این زمینه افزایش می‌یابد. ازجمله این محدودیت‌ها می‌توان به شرایط آب و هوایی منطقه اشاره نمود در صورتی که هوا بارانی باشد، GPS پهپاد با دریافت سیگنال با مشکل مواجه می‌شود و تصویربرداری با مشکل مواجه می‌شود. در مناطقی که شدت وزش باد شدید است، با توجه به اینکه پهپاد بایستی برای مقابله با باد انرژی بیشتری مصرف کند

در قسمت بعد دقت روش مذکور نسبت به کولیس بررسی می‌شود که در جدول ۹ اختلاف مختصات به‌دست‌آمده برای دو تارگت نصب‌شده روی مقیاس بار در دو اپک بیان شده است.

جدول ۹- اختلاف مختصات دو تارگت نصب‌شده بر روی کولیس

شماره تارگت	Diff X	Diff Y	Diff Z
۸۸	۱۲۸/۵۰۷۵	۵/۹۴۴	۱/۸۶۳
۱۰۰	۰/۳۰۲۵	۰/۹۳	۰/۲۹۹۱

با توجه به اینکه میزان جابجایی مقیاس بار برابر ۱۲۹ میلی‌متر (با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شده است) می‌باشد. با تفاضل طول به‌دست‌آمده در اپک اول و دوم با استفاده از روش فتوگرامتری از میزان واقعی اختلاف طول جابجا شده، دقت روش فتوگرامتری نسبت به مقیاس بار به دست می‌آید. بدین ترتیب خواهیم داشت:

$$\text{Diff}_{\text{Photo}} = \sqrt{(\Delta X_{100} - \Delta X_{88})^2 + (\Delta Y_{100} - \Delta Y_{88})^2 + (\Delta Z_{100} - \Delta Z_{88})^2}$$

$$\Delta \text{Diff}_{(\text{Photogrammetry})} = 128.6583828 \text{ mm}$$

$$\text{Accuracy} = \Delta \text{Diff}_{(\text{Scale bar})} - \Delta \text{Diff}_{(\text{Photogrammetry})}$$

$$\text{Accuracy} = 0.3416 \text{ mm}$$



شکل ۱۱- الف) نشان‌دهنده تارگتها رو کولیس قبل از جابه‌جایی در اپک اول و ب) نشان‌دهنده تارگتهای جابجا شده در اپک دوم می‌باشد.

جدول ۱۰- اختلاف به‌دست‌آمده از فتوگرامتری

۰/۳۴۱۶ mm	اختلاف دو روش
۱۲۹ mm	اختلاف روی مقیاس بار یا کولیس

هم باتری آن به سرعت تخلیه می‌شود و هم اینکه تصاویر تاری می‌شود. در آینده با توجه به پیشرفت فناوری پهنپایه‌ها می‌توان امیدوار بود که مشکلات بیان شده به حداقل برسد.

مراجع

- [1] Peters, W. and W. Ranson, Digital imaging techniques in experimental stress analysis. Optical engineering, 1982. 21(3): p. 213427-213427.
- [2] Hilton, M.H. and F. Bales, Application of close range terrestrial photogrammetry to bridge structures. 1985.
- [3] Maas, H.-G. Photogrammetric techniques for deformation measurements on reservoir walls. in The Proceedings Of The IAG Symposium On Geodesy For Geotechnical And Structural Engineering, Eisenstadt, Austria. 1998.
- [4] Fraser, C.S. and B. Riedel, Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000. 55(4): p. 268-276.
- [5] Li, C. and B. King, Close range photogrammetry for the structural monitoring of the Star Ferry colonnade. Journal of Geospatial Engineering, 2002. 4(2): p. 135-143.
- [6] Jáuregui, D.V., et al., Noncontact photogrammetric measurement of vertical bridge deflection. Journal of Bridge Engineering, 2003. 8(4): p. 212-222.
- [7] Jauregui, D.V. and K.R. White, Bridge inspection using virtual reality and photogrammetry. Inspection and Monitoring Techniques for Bridges and Civil Structures, Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington, Cambridge CB, 2005. 1: p. 216-246.
- [8] Jiang, R. and D.V. Jauregui, Development of a digital close-range photogrammetric bridge deflection measurement system. Measurement, 2010. 43(10): p. 1431-1438.
- [9] Cerminaro, D.J., Implementation of photogrammetry to improve proactive assessment of retaining walls along transportation corridors. 2014: Michigan Technological University.
- [10] Shirkhani, A., D.M. Varshosaz, and M. Saadatseresht, 3D Coordinate Measurement of Dam by Close Range Photogrammetry. Department of Photogrammetry and Remote Sensing. Tehran: KN Toosi University of Technology, 2006.
- [11] Seresht, S.a., The concept of network design in close range photogrammetry. PHD Thesis, 1383.