



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Digital documentation of immovable cultural heritage using drone photogrammetry: The dome of soltaniyeh, zanzan, as a case study

A.M. Moazezi Mehr-e-Tehran, M.R. Mahmoodi Ghouzhdī*

Conservation of Architectural Heritage Department, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

ABSTRACT

Received: 15 April 2026
 Reviewed: 30 May 2026
 Revised: 17 July 2026
 Accepted: 05 September 2026

KEYWORDS:

Conservation
 Soltaniyeh Dome
 Photogrammetry
 Documentation
 Zanzan

* Corresponding author

✉ m.mahmoodi@arc.ikiu.ac.ir

☎ (+98915) 5599235

Background and Objectives: In cultural heritage documentation, the first and most fundamental step involves producing accurate records and maps of the current condition of heritage assets. Recent scientific advancements have enabled the application of innovative tools and methodologies that not only reduce the time required for documentation but also significantly enhance its accuracy and quality. Among the approaches that have attracted increasing attention in recent years is photogrammetry. In Iran, in parallel with global developments and growing international interest in digital heritage documentation, several of the country's most significant cultural monuments have been documented using photogrammetric techniques. Nevertheless, despite the increasing scholarly and practical attention devoted to this field and the widespread global adoption of photogrammetry, its application within the domain of Iranian cultural heritage—particularly UAV-based photogrammetry—remains limited. Given the vast extent of Iran's cultural heritage and the growing importance of digital heritage documentation, greater attention to heritage photogrammetry, both theoretically and operationally, is essential. Accordingly, the present study aims to elucidate the process of employing UAV photogrammetry for the surveying and three-dimensional modeling of historical and cultural monuments in Iran.

Methods: Due to the outstanding universal value of the Dome of Soltaniyeh in Zanzan and the absence of prior digital documentation using photogrammetric methods, this UNESCO World Heritage monument was selected as the case study. This applied, case-based research was conducted using stereophotogrammetry (stereo-pair photogrammetry) supported by UAV photogrammetry through sequential stages of data acquisition, image processing, and three-dimensional modeling.

Findings: Practical implementation of the study demonstrated that an image overlap ratio of 60–80%, as emphasized in similar studies, is essential during data acquisition and aerial imaging to prevent gaps and voids in the three-dimensional model of the Soltaniyeh Dome. Furthermore, due to the dome's curvature and large scale, employing multiple flight platforms with varying UAV gimbal angles resulted in improved image mosaicking and model reconstruction. In addition, the appropriate spatial distribution of control and check points across different elevation levels ensured satisfactory accuracy in both horizontal and vertical dimensions. The achieved errors—approximately 2 cm in the horizontal dimension and 0.83 cm in the vertical dimension—confirm the reliability and precision of the adopted methodology. Ultimately, highly accurate two-dimensional and three-dimensional digital records of the Soltaniyeh Dome, capable of continuous updating, were produced for the first time, thereby facilitating the conservation and change management of this World Heritage property.

Conclusion: The findings demonstrate the considerable capability of UAV photogrammetry for the accurate documentation and modeling of heritage monuments, despite the geometric complexity characteristic of traditional Iranian architecture. Consequently, this method can—and should—be widely employed to produce reliable metric documentation of immovable cultural heritage assets. As a non-destructive technique that does not require physical contact with the monument, UAV photogrammetry provides updatable digital documentation that supports future knowledge-based conservation, monitoring, planning, and management of heritage properties, including the World Heritage Site of Soltaniyeh. Given its accessibility, cost-effectiveness, and compatibility with other documentation techniques, widespread and

substantial adoption of this method is anticipated in the near future. Furthermore, integrating heritage digitization requirements into national guidelines for heritage registration dossiers and conservation projects will accelerate the adoption and dissemination of such effective documentation tools. Enhanced interdisciplinary collaboration among specialists in architecture, conservation, and geomatics sciences will likewise contribute significantly to the proper implementation of this methodology and to the production of accurate and reliable heritage documentation.



NUMBER OF REFERENCES

43



NUMBER OF FIGURES

13



NUMBER OF TABLES

2

مقاله پژوهشی

رقومی سازی میراث فرهنگی غیرمنقول با روش فتوگرامتری پهباد؛ نمونه مورد مطالعه: گنبد سلطانیه زنجان

امیر محمد معززی مهر طهران، محمدرضا محمودی قوژدی *

گروه مرمت و احیاء بناهای تاریخی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: در مستندنگاری میراث فرهنگی، نخستین گام تهیه نقشه های دقیق از وضعیت فعلی آثار است. پیشرفت های علمی، امکان بهره گیری از ابزارها و روش های نوین را فراهم کرده تا علاوه بر کاهش زمان مستندنگاری، دقت و کیفیت آن نیز افزایش یابد. از جمله روش های مورد توجه در سال های اخیر، فتوگرامتری است. در سال های اخیر در ایران، همگام با تحولات و توجهات جهانی، برخی از مهمترین آثار فرهنگی کشور به کمک این روش مستندسازی شده اند. با این وجود، علیرغم افزایش توجه علمی و عملی به این موضوع و گسترش استفاده از این روش در جهان، کاربرد فتوگرامتری در حوزه میراث فرهنگی کشور، به ویژه فتوگرامتری پهباد، همچنان محدود است. این در حالی است که به موجب گستردگی میراث این سرزمین همچنین اهمیت مستندنگاری دیجیتال میراث، ضروری است به موضوع فتوگرامتری میراث - چه در ساحت نظری و چه در عرصه عملیاتی- بیشتر پرداخته شود. مقاله حاضر در همین راستا و با هدف تشریح فرایند استفاده از فتوگرامتری پهباد در برداشت و مدل سازی آثار فرهنگی تاریخی کشور انجام شده است.

روش ها: به دلیل اهمیت جهانی گنبد سلطانیه در زنجان و نبود سابقه مستندنگاری دیجیتال آن به روش فتوگرامتری، این اثر جهانی به عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شد تا در مسیر تحقق هدف پیش گفته مورد استفاده قرار گیرد. این مطالعه که از نوع کاربردی و مورد پژوهی است با اتکا به روش فتوگرامتری زوج عکس یا استریوفتوگرامتری و با کمک فتوگرامتری پهباد، با طی مراحل اکتساب داده، پردازش، مدل سازی انجام شده است.

یافته ها: در برخورد عملی با موضوع، مشخص شد که همپوشانی ۶۰ الی ۸۰ درصدی در فرایند اخذ داده و تصویربرداری که در پژوهش های مشابه نیز تصریح شده است، به منظور جلوگیری از ایجاد حفره در مدل سه بعدی گنبد سلطانیه باید رعایت شود. ضمناً با توجه به انحنای گنبد و اندازه فراخ آن، اتخاذ چند پلتفرم پروازی با زوایای مختلف گیمبال پهباد دستیابی به موزاییک تصاویر بهتری را در اختیار قرار می دهد. پراکندگی مناسب نقاط چک و کنترل در سطوح ارتفاعی مختلف نیز در هر دو بعد مسطحاتی و ارتفاعی رسیدن به دقت مناسب را تضمین می کند. حصول خطای قابل قبول دو سانتی متری در بعد مسطحاتی و ۰/۸۳ سانتی متر در بعد ارتفاعی، از همین مهم حکایت دارد. در نهایت اطلاعاتی دقیق از گنبد سلطانیه در قالب اسناد رقومی دو و سه بعدی که قابلیت به روز رسانی دارند برای نخستین بار بدست آمد که حفاظت و مدیریت تغییرات این میراث جهانی کشور را تسهیل می کند.

نتیجه گیری: نتایج بدست آمده توانایی بالای فتوگرامتری پهباد در مستندنگاری و مدل سازی آثار میراثی با دقت مناسب را علیرغم هندسه پیچیده آثار معماری سنتی ایران نشان می دهد. به به همین خاطر از این روش می توان و می بایست در تولید مستندات صحیح متریک از آثار غیرمنقول میراثی استفاده فراگیر داشت. این روش غیرمخرب که بدون نیاز به تماس فیزیکی با اثر، مستندات رقومی قابل به روز رسانی در اختیار قرار می دهد، شناخت، نظارت، برنامه ریزی و مدیریت

تاریخ دریافت: ۲۶ فروردین ۱۴۰۵
تاریخ داوری: ۰۹ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ اصلاح: ۲۶ تیر ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴ شهریور ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

حفاظت
گنبد سلطانیه
فتوگرامتری
مستندنگاری
زنجان

* نویسنده مسئول

m.mahmoodi@arc.ikiu.ac.ir

۰۹۱۵-۵۵۹۹۲۳۵

دانش‌بنیان آتی آثار میراثی کشور از جمله میراث جهانی سلطانیه را ممکن می‌سازد. انتظار می‌رود از این روش، با توجه به در دسترس و ارزان بودن آن و همچنین قابلیت ترکیبش با سایر روش‌های مستندنگاری، دیر یا زود به شکل گسترده و چشم‌گیر استفاده شود. الزام رقومی‌سازی میراث در دستورالعمل‌های اجرایی تهیه پرونده‌های ثبتی آثار و پروژه‌های مرمتی در سرتاسر کشور به تسریع توجه به چنین ابزارهای مفید مستندنگاری و فراگیری آن خواهد انجامید. ارتباط و تعامل بیشتر متخصصین رشته‌های معماری، مرمت و علوم ژئوماتیک، نیز به کاربست اصولی و درست این روش و بدست‌آمدن اسناد صحیح و دقیق کمک شایانی خواهد کرد.

مقدمه

میراث ملموس فرهنگی کشورها، شواهدی بر فرهنگ‌های سازنده آنها و نشان‌دهنده دانش و سنت معماری، ساختار اجتماعی، پیشرفت دانش، توسعه اقتصادی و نحوه معیشت یک جامعه هستند. حفاظت از این آثار و بن‌مایه‌های تاریخی- فرهنگی نه تنها ضروری است بلکه نیازمند شناخت کامل و دقیق از مشخصه‌های عریان و نهفته و مستندنگاری وضعیت آنها، پیش از هرگونه اقدام و دخالتی است [۱]. بر همین اساس است که مستندنگاری مهمترین مرحله در حفاظت و مرمت میراث فرهنگی به‌شمار می‌آید؛ تا جایی که امروزه برخی اعتقاد دارند در موارد بسیاری اهمیت دادن به آن از اقدام به مرمت واجب‌تر است. این امر بدان سبب است که مستندنگاری دقیق جزئیات، به‌صورت روشمند ما را در فهم شرایط موجود اثر، آسیب‌های وارده، ثبت اشکال و جزئیات اختصاصی و همین‌طور شواهد فنی و ساختاری آن یاری می‌کند [۲]. نیاز مبرم به مستندنگاری موثر تر سبب شکل‌گیری «ثبت واقعیت» شده است، اصطلاحی که امروزه برای فناوری‌های که مدل سه بعدی از آثار با ابعاد دقیق تهیه می‌کنند، استفاده می‌شود [۳]. مستندنگاری میراث غیرمنقول، با کمک ابزارها و روش‌های متنوعی انجام می‌شود، که بسته به شرایط و ویژگی‌های اثر، همچنین صحت و دقت مورد نیاز، انتخاب و بکار گرفته می‌شود. در میان فناوری‌های نوین که امروزه برای اخذ داده از میراث معماری مورد استفاده قرار می‌گیرد، فتوگرامتری رقومی برد کوتاه (تصویر پایه) و سکوها‌های هوایی بدون سرنشین (پهپادها) از جمله روش‌های رایج به‌شمار می‌آیند [۱]. در این مقاله تلاش شده است با تشریح فرایند اصولی و گام به گام مستندنگاری رقومی گنبد سلطانیه با کمک روش فتوگرامتری پهپاد، چگونگی رقومی‌سازی میراث غیرمنقول معرفی شده و راهنمایی برای فتوگرامتری میراث معماری در اختیار متخصصین و علاقه‌مندان به امر مستندنگاری ارائه شود. برای این منظور، ضمن تدوین فرایند عملی مستندنگاری رقومی اثر، داده‌های متریک آن استخراج و اسناد لازم تولید و عرضه می‌شود تا توانایی فتوگرامتری پهپاد در اخذ داده تا تولید مدل سه‌بعدی دقیق و صحیح، مورد تأکید قرار گیرد.

علت انتخاب گنبد سلطانیه به عنوان نمونه مطالعاتی پژوهش نیز علاوه بر جایگاه جهانی آن، و ویژگی‌های معمارانه و سازه‌ای اثر، عدم وجود مستندات فنی دقیق و به‌روز از اثر، در عین محدودیت‌های مستندنگاری سنتی اثر به علت دشواری در دسترسی به بخش‌های فوقانی آن در نتیجه ارتفاع گنبدخانه بود.

پیشینه پژوهش

از دهه ۷۰ هجری شمسی، پژوهش‌ها پیرامون موضوع فتوگرامتری میراث در ایران آغاز شده و رفته‌رفته رو به فزونی گذاشته است. عدل و کریمی (۱۳۷۷) که اولین مقاله منتشرشده در این حوزه را به رشته تحریر درآورده‌اند، به مستندنگاری مجموعه‌های میراثی موجود در بسطام و زوزن به کمک فتوگرامتری پرداختند و ضرورت استفاده از این روش را علاوه بر پیچیدگی فضایی موضع‌های مطالعاتی، تهدید روزافزون میراث برمی‌شمارند. آن‌ها در جایی از مقاله تأکید دارند که فتوگرامتری اجازه می‌دهد هر اثر در لحظه ثبت و به همان شکل موجود مستند شود و تغییرات بعدی آن با رجوع به مستندات حاصل از فتوگرامتری قابل تشخیص باشد [۴]. پس از آن پژوهش‌های متعددی به موضوع فتوگرامتری پرداخته‌اند؛ برخی از پژوهش‌ها با پذیرش اهمیت علم ژئوماتیک در حوزه میراث فرهنگی، کاربرد روش‌های مختلف این علم از جمله روش فتوگرامتری را در امر حفاظت از میراث مورد تأکید قرار داده‌اند [۵، ۶، ۷، ۸]. در میان آنها گروهی از پژوهش‌ها با ناکارآمد دانستن روش‌های سنتی مستندنگاری، فتوگرامتری را امکانی در مستندنگاری دقیق و تحلیل‌های قیاسی بر می‌شمارند [۹، ۴، ۱۰] و به معرفی ارکان و مراحل مستندنگاری رقومی میراث [۱۱، ۱]، در مقیاس‌های مختلف از شیء [۱۲، ۱۳]، تا بافت [۱۴، ۱۵] و با اتکا به گونه‌های مختلف فتوگرامتری می‌پردازند. این گروه از مطالعات، فتوگرامتری را فرایندی مفید و استاندارد برای دستیابی به داده‌های سه‌بعدی دقیق و تجسم مجازی آثار تاریخی برشمرده و این روش را یکی از توصیه‌شده‌ترین روش‌های غیرمزامح و غیرمخرب معرفی می‌کنند [۱۶] که امکان تولید اسنادی برای معرفی اثر و توسعه گردشگری [۱۷] همچنین تعیین عرصه اثر و حرایم حفاظتی آن [۱۸] را مهیا می‌کند. برخی از مطالعات نیز مستندنگاری آثار با کمک فتوگرامتری را با هدف آسیب‌شناسی و آسیب‌نگاری آثار تاریخی مورد توجه قرار داده‌اند و با بی‌خطر دانستن این روش، بر پتانسیل آن در شناسایی میزان تغییرات در ساختار اصیل و اولیه آثار تأکید دارند [۲، ۱۹]. در مطالعه‌ای متاخر نیز کاربرد عملی «موبایل فتوگرامتری» به‌عنوان روشی در دسترس برای همگان معرفی می‌شود [۲۰] که می‌تواند جایگزینی برای دوربین‌های حرفه‌ای و گران‌قیمت در فتوگرامتری مرسوم به‌شمار آید.

برگزاری دو همایش ملی مستندنگاری میراث فرهنگی و طبیعی در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ را باید نقطه عطفی در انجام و انتشار عمومی پژوهش‌های مرتبط به حوزه فتوگرامتری میراث دانست. رخدادی که باعث شده است فراوانی پژوهش‌ها در دهه ۹۰ نسبت به سایر ادوار زمانی

و فرایندهای حفاظت و مدیریت میراث را داشته باشد.

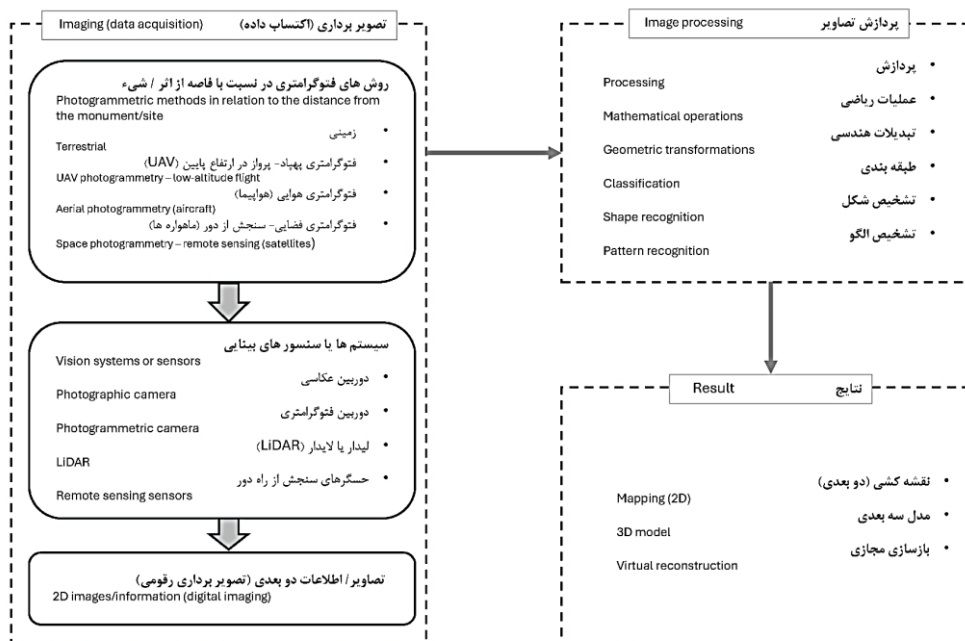
مبانی نظری / فتوگرامتری برد کوتاه و امر مستندنگاری رقومی میراث

فتوگرامتری مطابق تعریف انجمن بین‌المللی فتوگرامتری و سنجش از دور (ISPRS)، هنر، علم و فناوری به‌دست‌آوردن اطلاعات قابل اعتماد در مورد اجسام فیزیکی و محیط از طریق فرایندهای ضبط، اندازه‌گیری و تفسیر تصاویر است [۳۲].

فتوگرامتری در واژه به معنی استخراج عدد و اندازه از عکس یا علم و فناوری اندازه‌گیری به وسیله عکس است و شامل روش‌های اندازه‌گیری و تفسیر تصویر می‌شود [۳۳]. این روش در مستندنگاری بناهای تاریخی (میراث فرهنگی) بسیار سودمند و مفید است و به همین خاطر مورد توجه باستان‌شناسان، معماران و مرمت‌گران قرار دارد. در فتوگرامتری دوربین می‌تواند از فاصله چند متر تا چند سانتی‌متر از سوژه موردنظر قرار گیرد و با دقتی در حد میلی‌متر به مستندنگاری آثار منتج شود [۲]. این روش در سال‌های زیادی مورد توجه بوده است، اما امروزه در نتیجه پیشرفت‌های بدست آمده، از فرایندهای سنتی آن (فتوگرامتری آنالوگ) به فتوگرامتری رقومی گسیل شده که در آن نقشه‌های تولید شده در نرم‌افزارهای ترسیمی قابل فراخوانی و نمایش است. به‌همین خاطر محصول کنونی فتوگرامتری انعطاف‌پذیری بالاتری داشته و از قابلیت بازبینی بیشتری نیز برخوردار است [۳۴، ۱۹]. قابلیت اکتساب اطلاعات در مقیاس بزرگ در روش فتوگرامتری، به همراه سرعت و دقت بالا، هزینه به نسبت کم، و قابلیت مدیریت و به‌روزرسانی داده‌ها، این روش را به ابزاری محبوب در حوزه حفاظت و مرمت بدل کرده‌است [۳۵]. سه مرحله اصلی در این روش، اکتساب داده، پردازش داده و کار توگرافی است (شکل ۱).

چشم‌گیر باشد [۲۱]. در سال‌های اخیر نیز، همگام با تحولات و توجهات جهانی، در کنار انجام پژوهش‌های گوناگون، برخی از مهمترین آثار فرهنگی کشور به روش فتوگرامتری مستندسازی شده‌اند که از افزایش توجه علمی و عملی به این موضوع حکایت می‌کند.

در مجموع، مرور مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که پژوهش‌های فتوگرامتری میراث در ایران طی سه دهه اخیر، از مرحله معرفی و آزمون قابلیت‌های این فناوری در مستندنگاری آثار، به سمت کاربردهای تخصصی‌تر آن در تولید داده‌های سه‌بعدی، آسیب‌شناسی، تحلیل تغییرات، حفاظت و معرفی میراث حرکت کرده‌اند. با وجود این، بخش قابل‌توجهی از مطالعات موجود بر تبیین قابلیت‌های روش، معرفی فرایندهای مستندنگاری و یا مطالعه موردی آثار و مجموعه‌های محدود متمرکز بوده و هنوز میان ظرفیت‌های فتوگرامتری به‌عنوان یک فناوری مستندساز و ضرورت ایجاد اسناد رقومی دقیق، قابل بازخوانی و قابل به‌روزرسانی برای آثار میراثی کشور، فاصله وجود دارد. از این منظر، خلأ موجود صرفاً فقدان مستندنگاری برخی آثار نیست، بلکه فقدان رویکردی عملیاتی برای تبدیل فناوری فتوگرامتری به بخشی از فرایند مستمر شناخت، پایش و حفاظت از میراث است. بررسی مطالعات مرتبط با گنبد سلطانیه نیز نشان می‌دهد که اگرچه این اثر از جنبه‌های تاریخی، معماری، کالبدی و میراثی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته [۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱]، مستندنگاری رقومی و تولید اسناد فتوگرامتری آن کمتر مورد توجه قرار داشته است. بنابراین، پژوهش حاضر با تمرکز بر این میراث جهانی کشور می‌کوشد ضمن بهره‌گیری عملی از ظرفیت فتوگرامتری در ثبت و بازنمایی دقیق وضعیت موجود اثر، بخشی از این خلأ را پوشش داده، فرایند رقومی‌سازی را گام‌به‌گام در یک نمونه واقعی نشان دهد و مستندات رقومی از گنبد سلطانیه فراهم آورد که قابلیت استفاده در مطالعات آتی، پایش تغییرات



شکل ۱: خلاصه فرایند عملیاتی فتوگرامتری آثار [۳۵]

Fig. 1: Summary of the Operational Photogrammetry Workflow for Heritage Objects [35]

شده است (جدول ۱). پهپاد شناخته شده ترین بستر هوایی یکپارچه برای اخذ تصاویر هوایی با سنجنده های مرئی نزدیک مادون قرمز یا حرارتی به شمار می رود [۳۶].

همچنین با توجه به قرارگیری اثر در فضای باز، عدم وجود عناصر مصنوع در مجاورت آن، و عدم محدودیت زمانی در عملیات برداشت، از نور طبیعی در فرایند تصویربرداری استفاده شد. برای دریافت بیشترین جزئیات ممکن نیز تعداد ۱۰۰۲ عکس با همپوشانی طولی و عرضی ۸۰ درصد از این اثر ثبت جهانی اخذ شد. لازم به ذکر است برای استحکام شبکه اخذ تصاویر و به حداقل رساندن نواحی پنهان، علاوه بر تصاویر عمود، از بالای سوژه و منطبق بر مسیرهای متعامد پروازی، تصاویر مایل با زاویه ۴۵ درجه و تصاویر قائم بر جداره نیز اخذ شد (شکل ۲).

پس از اتمام مرحله اخذ تصویر با پهپاد، کیفیت تصاویر در ایستگاه زمینی مورد بررسی قرار گرفت و تغییرات لازم در تنظیمات دوربین برای مرحله بعد و پوشش خطاهای تصویربرداری صورت گرفت.

فرایند پردازش تصاویر در نرم افزار ای جی آی سافت (Agisoft Metashape) نسخه استاندارد (نسخه ۲.۱.۲) انجام شده است. این نرم افزار یک پکیج مدل سازی سه بعدی پیشرفته تصویر پایه است [۳۹] که به عنوان نرم افزار فتوگرامتریک، قابلیت تعیین موقعیت و اندازه گیری اتوماتیک، تولید اطلاعات سه بعدی برداری، ارتو تصاویر رقومی و مدلی رقومی سطح با بافت واقعی را دارد [۴۰، ۴۱].

در مرحله اکتساب داده، ابزارها و روش های مختلفی وجود دارد که با توجه به فاصله تا شیء تعیین می شود. از جمله آن ها فتوگرامتری پهپاد است. این فتوگرامتری تلفیقی از فتوگرامتری هوایی و برد کوتاه است که در آن یک سنجنده اخذ داده که می تواند دوربین متریک یا غیرمتریک و یا هر وسیله اخذ داده دیگری باشد، بر روی یک سکوی پرواز بدون سرنشین (UAV- Unmanned Arial Vehicle) نصب شده و از ارتفاع کم داده ها اخذ می شود. ارتفاع پایین پرواز سبب اخذ تصویر با قدرت تفکیک مکانی و کیفیت محتوی تصویر بالاتر می شود [۳۶]. با استفاده از پرند ه های هدایت پذیر از راه دور می توان تصاویر پانوراما، مدل رقومی از سطح (DSM - Digital Surface Model)، و عکس اورتو و سه بعدی با دقت بالا تولید کرد [۱۶]. این موارد بستر لازم برای دستیابی به بخش مهمی از اطلاعات مورد اشاره در منشور صوفیه، یعنی شکل کالبدی و وضعیت آثار، بناها و محوطه های تاریخی در زمانی معین [۳۷] را فراهم می آورد.

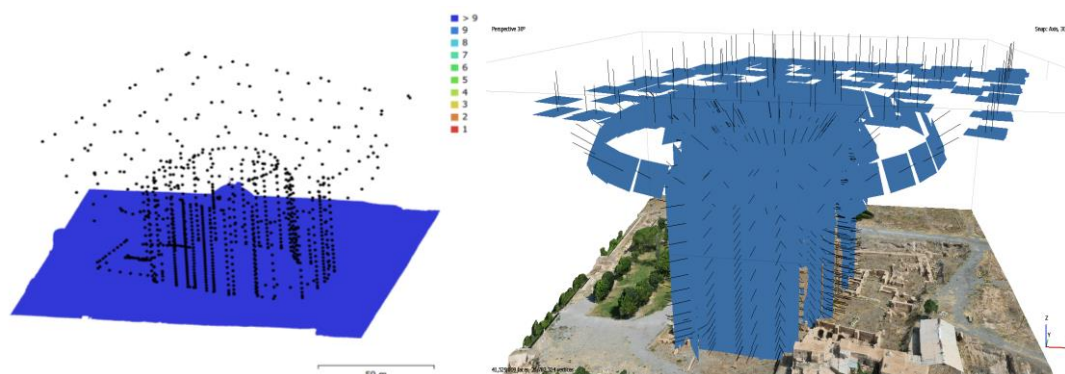
روش پژوهش

این پژوهش از نوع کاربردی و موردپژوهی است که متکی بر روش فتوگرامتری زوج عکس یا استریوفتوگرامتری و با کمک فتوگرامتری هوایی و زمینی و با ابزار پهپاد انجام شده است. به این منظور از پهپاد - پرند ه هدایت پذیر از راه دور - دی جی آی (DJI) از نوع «ایر ۲ اس - Air 2S» که دوربینی با سنجنده سائز یک اینچ را حمل می کند، استفاده

جدول ۱: اطلاعات مربوط به پهپاد و سنجنده

Table 1: Information Related to the Drone and Sensor

مشخصات سنجنده Sensor Specifications		مشخصات پهپاد Drone Specifications		تصویر پهپاد و سنجنده Drone and Sensor
دوربین دی جی آی DJI Camera	نوع سنجنده Sensor Type	مولتی روتور Multirotor	نوع پهپاد Drone Type	
یک اینچ One inch	ابعاد سنجنده Sensor Size	ناوبری Navigation	جی پی اس GPS	
۲/۸ 2.8	فاصله کانونی Focal Length	حداکثر ۶ متر بر ثانیه Maximum 6 m/s	سرعت پرواز Flight Speed	
۲/۴ میکرومتر 2.4 μm	اندازه پیکسل Pixel Size	۳۱ دقیقه 31 min	مداومت پرواز Flight Endurance	
۲۰ مگاپیکسل 20 megapixels	تعداد پیکسل Number of Pixels	۵۹۵ گرم 595 g	وزن Weight	



شکل ۲: موقعیت قرارگیری دوربین ها برای برداشت تصاویر از گنبد سلطانیه
Fig. 2: Camera Positioning for Image Acquisition of the Soltaniyeh Dome

ساخت و آبادانی شهرها و بناها رو به فزونی گذاشت. از جمله اقدامات عمرانی مهم دوره ایلخانی، انجام عملیات ساختمانی در همین شهر سلطانیه است که طرح کلی آن را به خواجه رشیدالدین فضل‌الله نسبت می‌دهند. شاخص‌ترین بنای ساخته‌شده در این دوران، گنبد سلطانیه است [۲۵].

بنای گنبد سلطانیه در دوران اولجایتو (سلطان محمد خدابنده) در مدت حدود نه سال (از ۷۰۴ تا ۷۱۳ هجری قمری) احداث شده است. این گنبد با قطر داخلی دهانه‌ای در حدود ۲۵/۵ متر و ارتفاع ۴۸/۵ متر، بنایی هشت ضلعی با طول اضلاع ۱۷ متری است. بنا هشت مناره داشته و از سه بخش گنبدخانه، تربت‌خانه و سرداب تشکیل شده است [۲۵]. این بنای آرامگاهی دوره اسلامی ایران در سال ۱۳۱۰ شمسی (۱۵ اسفندماه) در فهرست آثار ملی ایران و در سال ۲۰۰۵ میلادی به عنوان هفتمین اثر جهانی ایران در فهرست یونسکو قرار گرفته است [۲۶].

تزئینات گنبد سلطانیه که با مواد و مصالح و تکنیک‌های گوناگونی از قبیل کاشی‌کاری، گچ‌بری، نقاشی روی گچ، آجرکاری و تزئینات سنگی به اجرا درآمده است، تقریباً در تمامی قسمت‌های بنا وجود دارد. تزئینات نمای بیرونی عمدتاً شامل کاشی‌کاری‌هایی با تکنیک معرق، لعاب‌پران، معقلی و کاشی‌تکرنگ است و گاه با تزئینات آجرکاری تلفیق شده است. گچ‌بری‌ها نیز در سردر ورودی شمالی، پشت بغل، اسپر و کتیبه بالای سردر قرار دارد (شکل ۳) [۲۵].

یافته‌های پژوهش و ارزیابی نتایج

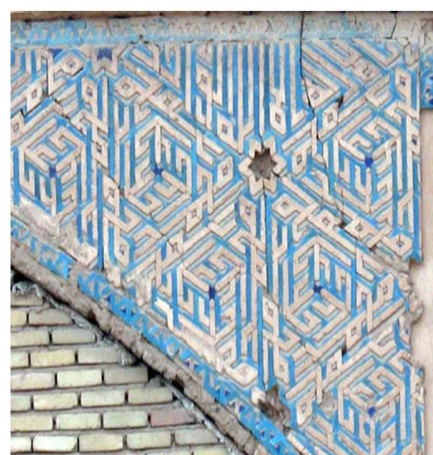
مروری بر فرایند مستندنگاری رقومی گنبد سلطانیه از طریق فتوگرامتری پهپاد مشتمل بر چگونگی اخذ تصاویر تا چگونگی پردازش داده‌ها و تولید مدل در این قسمت شرح داده شده است تا ضمن فراهم کردن بستر حصول به اهداف پژوهش حاضر، امکان ارزیابی نتایج بدست‌آمده نیز ممکن شود.

رویکرد پژوهش در تصحیح عکس‌ها نیز ترکیب روش پارامتریک و غیرپارامتریک بوده است. یعنی علاوه بر مولفه‌های توجیه درونی و بیرونی، نقاط کنترل نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۴۲].

در یک صورت‌بندی کلی، در این پژوهش، اخذ داده تا استخراج اسناد و اطلاعات، در قالب سه فاز مطالعاتی، میدانی و دفتری انجام گرفته است. در فاز مطالعاتی، اطلاعات مورد نیاز گنبد سلطانیه (نمونه مورد مطالعه)، اعم از تاریخچه، مشخصات معماری اثر، سیر تحول آن به روش اسنادی جمع‌آوری شد. اطلاعات لازم در ارتباط با مستندنگاری رقومی آثار منقول فرهنگی نیز با همین روش گردآوری و مورد استفاده قرار گرفت. در فاز میدانی، پس از هماهنگی با مسئولین سایت ثبت جهانی و اداره کل میراث استان، پارامترهای پرواز و تجهیزات مورد نیاز تعیین و طرح پرواز و اخذ تصاویر تعریف شد. لازم به ذکر است پیش از پرواز، شبکه پیمایش زمینی علامت‌گذاری و نقاط شبکه برداشت شد. با بررسی کیفیت تصاویر اخذ شده، مجوز شروع فاز دفتری و پردازش داده‌ها صادر شد. در این فاز با فراخوانی تصاویر به محیط نرم‌افزار، پردازش و تولید مدل سه‌بعدی در مراحل هم‌ترازی تصاویر (Alignment of the Images)، تولید ابرنقطه متراکم (Building the Dense Cloud)، و تولید شبکه (Building the Mesh) صورت گرفت. نرم‌افزار مورد استفاده از فناوری بازسازی سه‌بعدی چندوجهی بنام «ساختار ناشی از حرکت (From Motion Structure)» برای پردازش تصاویر استفاده می‌کند. روش SFM به علت پیچیدگی نیازمند رایانه با عملکرد بالا است.

محدوده مطالعه: گنبد سلطانیه

شهر سلطانیه در محدوده جغرافیایی استان زنجان به فاصله ۳۸ کیلومتری جنوب شرقی زنجان با ارتفاع ۱۸۸۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است و وسعت آن ۹۴۰ کیلومتر مربع است [۲۶]. با تغییر شیوه معیشت مغولان از بیابان‌گردی و کوچندگی و تبدیل آن به یکجانشینی و همچنین علاقه و حمایت ایلخانان ایران و وزیران آنان اقدامات عمرانی



شکل ۳: تزئینات نمای بیرونی، از راست به چپ، پشت بغل و حاشیه نمای شرقی گنبد، مفرنس‌های کاشی‌کاری‌شده، و کتیبه گچ‌بری نمای شمالی گنبد [۲۵]
Fig. 3: Exterior decorative elements of the dome: from right to left, the spandrel and border of the eastern façade, tiled muqarnas, and the spandrel and stucco inscription of the northern façade [25]

الف- طراحی شبکه پرواز و اخذ داده:

تصاویر همانند شبکه پیشین، با پوشش طولی و عرضی ۸۰ درصدی اخذ شدند. این مرحله از برداشت برخلاف مرحله قبل، به صورت نیمه اتوماتیک، با هدایت دستی پهپاد و اخذ تصاویر در فاصله زمانی تعریف شده سه ثانیه‌ای، انجام شد. در مجموع ۷۹۰ تصویر بدست آمد که پس از کنترل کیفیت آنها، ۷۸۴ مورد برای ورود به مرحله پردازش انتخاب شد.

سایر تصاویر مورد نیاز نیز با توجه به هندسه اثر، پراکندگی نقاط کور و گپ‌های تصاویر بدست آمده در دو مرحله قبل، با کمک پهپاد و به صورت مایل اخذ شد. در این برداشت که در دو فاصله ۵ و ۱۰ متری از اثر انجام گرفت، زاویه گیمبال دوربین ۴۵ درجه تعیین شد. این عملیات نیز که به صورت نیمه اتوماتیک و با همپوشانی طولی و عرضی ۸۰ درصد صورت گرفت در مجموع ۱۲۷ تصویر در اختیار گذاشت.

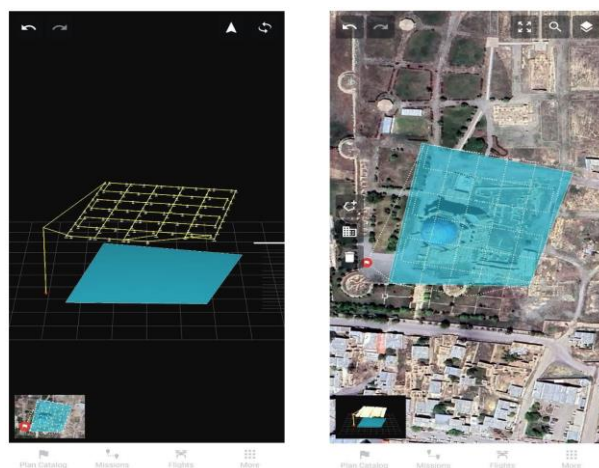
ب- زمین مرجع کردن مدل سه بعدی

به منظور زمین مرجع کردن مدل، و کاهش خطا در فرایند رقومی سازی، در بخش‌های مختلف بنا از نقاط کنترل و چک استفاده شد. چهار نقطه برای کنترل زمینی در سطوح مختلف بنا انتخاب شد و موقعیت آنها در سامانه شمیم قرائت شد. یک نقطه نیز به عنوان نقطه چک در نظر گرفته شد. توزیع نقاط کنترل در سطوح ارتفاعی مختلف بنا انجام گرفت، علاوه بر این الگوی پراکندگی به نحوی طراحی شد که نقاط در یک امتداد قرار نگیرند و در کل بخش‌های بنا پخش شده باشند (شکل ۶).

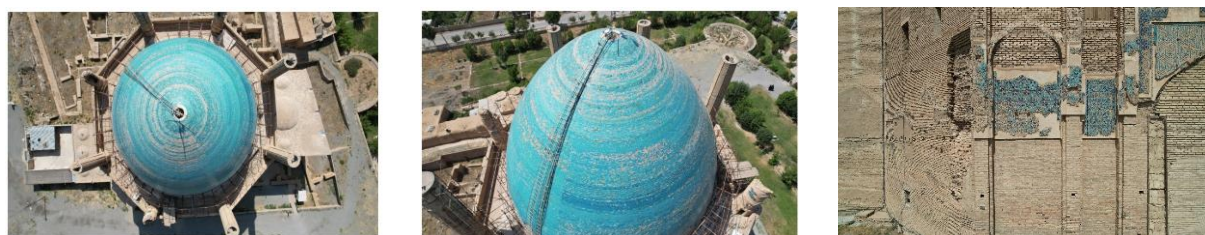
در این پروژه از چند سکوی پروازی (Flight Platform) با ارتفاع پرواز متفاوت استفاده شده است. در پرواز هوایی، طراحی شبکه با نرم افزار Drone Harmony که مختص پروازهای اتوماتیک بوده و با پرندۀ مورد استفاده در مطالعه حاضر نیز هماهنگ است، استفاده شد. ارتفاع پرواز بر اساس GSD (Ground Sampling Distance) که ۲/۲ سانتی متر مدنظر بود، تعیین و به میزان ۷۰ متر محاسبه شد. با عنایت به وجود زمان کافی و منابع لازم، شبکه با همپوشانی ۸۰ درصدی در هر دو راستای طولی و عرضی تعریف شد. علت انتخاب این میزان همپوشانی جلوگیری از ایجاد حفره در مدل سه بعدی با توجه به تاکید مطالعه [۴۳] بر الزام رعایت ۶۰ الی ۸۰ درصد همپوشانی در تصویربرداری بود. سرعت پرواز نیز چهار متر بر ثانیه منظور گردید.

با عنایت به هدف پژوهش که تولید مدل سه بعدی نمونه مورد مطالعه بود، شبکه پرواز به صورت متقاطع و متعامد طراحی شد تا داده‌های بیشتری از اثر اخذ شود. در مجموع در این مرحله بالغ بر ۹۲ عکس برداشت شد که در نتیجه بررسی کیفیت تصاویر، یک عکس از چرخه کار خارج شد (شکل ۴).

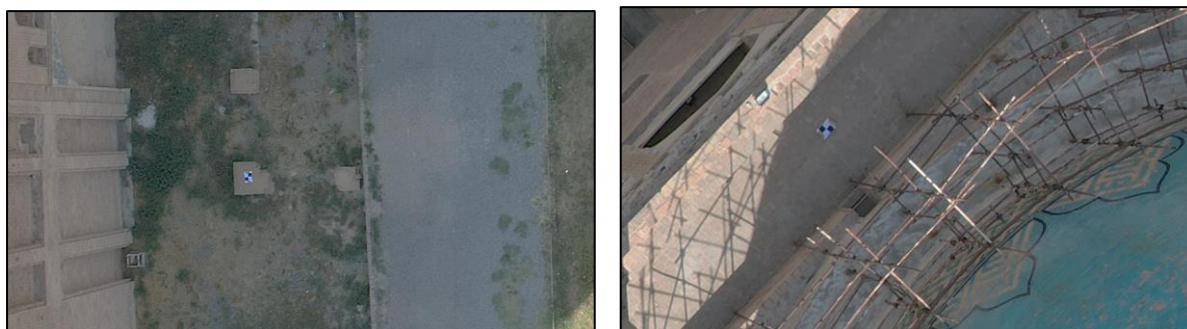
به منظور تکمیل داده‌های مورد نیاز مدل سازی، همچنین با توجه به هندسه جداره‌های اثر که علاوه بر تزیینات از ایوان و طاق نما تشکیل شده است، در دو حالت موازی جداره و مایل نیز اخذ تصاویر ادامه یافت (شکل ۵). بدین منظور جداره با زاویه ۹۰ درجه گیمبال پهپاد تصویربرداری شد. فاصله پرندۀ تا جداره سه متر در نظر گرفته شد و



شکل ۴: طراحی پرواز عکس برداری هوایی در نرم افزار Drone Hrmoney
Fig. 4: Aerial Photogrammetry Flight Planning in Drone Harmony application



شکل ۵: نمونه تصاویر برداشت شده به ترتیب از چپ به راست با زاویه قائم بر زمین، ۴۵ درجه و قائم بر جداره
Fig. 5: Sample Captured Images, from Left to Right: Nadir (Vertical), 45-Degree Oblique, and Facade-Orthogonal Views



شکل ۶: تصویر علامت زمینی دو مورد از نقاط کنترل بر روی تصاویر اخذ شده هوایی
Fig. 6: Ground Markers of Two Control Points Shown on the Acquired Aerial Images

کنترل زمینی)، $(x, y, z)_i$ مقادیری که به صورت مستقیم قرائت شده‌اند و $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})_i$ مقادیر بدست آمده از مدل سه‌بعدی است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}}$$

ارزیابی نتایج تدقیق شده توسط نقاط کنترل زمینی، بیانگر توانایی بالای فتوگرامتری پهپاد به عنوان روشی سریع در مستندنگاری و مدل سازی سه‌بعدی آثار با دقت زمینی حدود دو سانتی متر و دقت ارتفاعی زیر یک سانتی متر است. موضوعی که پیش‌تر نیز در مطالعه [۱] به آن تاکید شده است. اما محدودیت‌های این نوع فتوگرامتری و چگونگی کنترل آن‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این محدودیت‌ها، سبک بودن وزن، منبع تغذیه محدود، محدودیت در حمل سنجنده‌های دقیق و بزرگ، و نیاز به زمان کافی برای عکسبرداری است [۳۶]. در این مطالعه با طراحی یک شبکه مناسب برای برداشت، شامل شبکه‌ای متعامد از نوارهای پرواز (رن) که عمود بر عارضه از بالای اثر به اخذ داده پرداخته است؛ به همراه شبکه مایل تصویربرداری و شبکه عمود بر جداره، بخشی از این محدودیت‌ها را کاهش داد. علاوه بر آن انتخاب زمان مناسب برداشت (چه از نظر حداقل وزش باد و چه روشنایی) و همپوشانی ۸۰ درصدی تصاویر در طول و عرض، نیز در کاهش خطا و به حداقل رساندن داده‌های از دست رفته تاثیر بسزایی داشت (شکل ۱۲).

ج- پردازش فتوگرامتریک تصاویر

تصاویر اخذ شده پیش از پردازش، با استفاده از اطلاعات پرواز (Flight Log)، زمین مرجع (Geotag) شدند. پس از زمین مرجع شدن تصاویر اخذ شده، نرم‌افزار موقعیت دوربین (شکل ۱) و جهت هر تصویر را تشخیص داده و نقاط گره‌ای به صورت خودکار شناسایی و استخراج شد. براساس تخمین موقعیت دوربین، مدل ابرنقطه نامتراکم ایجاد شد (شکل ۷). پس از آن ابر نقطه متراکم با رفع خطاها و طی مراحل چهارگانه بدست آمد (شکل ۸) و در نهایت با اجرای دستور ساخت شبکه، مدل سه‌بعدی بافت‌دار گنبد سلطانه تولید شد (شکل ۹).

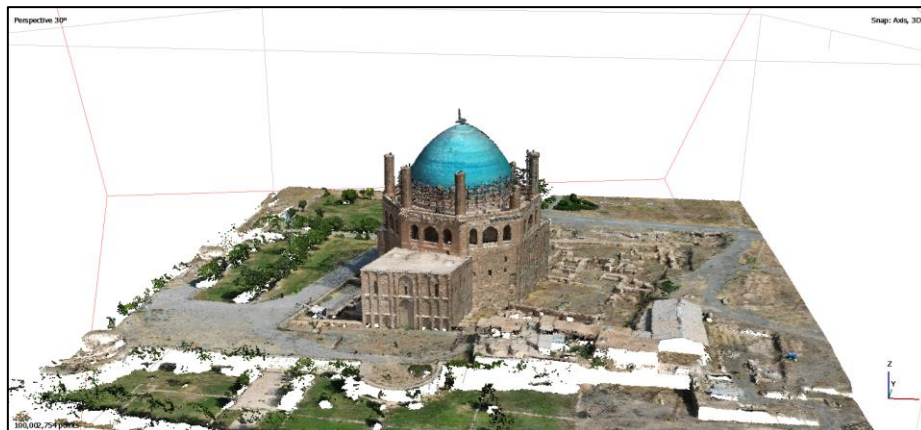
د- ارزیابی نتایج و محاسبه خطاها

همانگونه که گفته شد، به منظور ارزیابی دقت مدل بدست آمده، چهار نقطه کنترل زمینی و یک نقطه چک، طبق شکل ۱۰ مورد استفاده قرار گرفت. انتخاب نقاط مذکور به گونه‌ای صورت گرفت تا به طور مستقیم و از روی مدل سه‌بعدی قابل خواندن باشند. اختلاف میان قرائت مستقیم نقاط و اندازه آن‌ها بر روی مدل، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مجذور خطای مربعی متوسط در هر سه جهت به ترتیب ۰/۷۸، ۱/۴، ۰/۸۳ بدست آمده است. در نتیجه خطای مسطحاتی - که از حاصل جمع مجذور خطای مربعی متوسط محور X و Y بدست می‌آید - برابر با ۲/۲ سانتی متر و خطای ارتفاعی ۰/۸۳ سانتی متر است (جدول ۲).

محاسبه مجذور خطای مربعی متوسط (Root Mean Square Deviation) از رابطه زیر محاسبه شده است که در آن N تعداد نقاط



شکل ۷: ابرنقاط نامتراکم از مدل
Fig. 7: Sparse Point Cloud of the Model



شکل ۸: ابرنقاط متراکم تولید شده در نرم افزار پس از اصلاح نقاط

Fig. 8: Dense Point Cloud Generated in the Software After Point Refinement



شکل ۹: مدل سه بعدی بافتدار از گنبد سلطانیه زنجان

Fig. 9: Textured 3D Model of the Soltaniyeh Dome, Zanzan

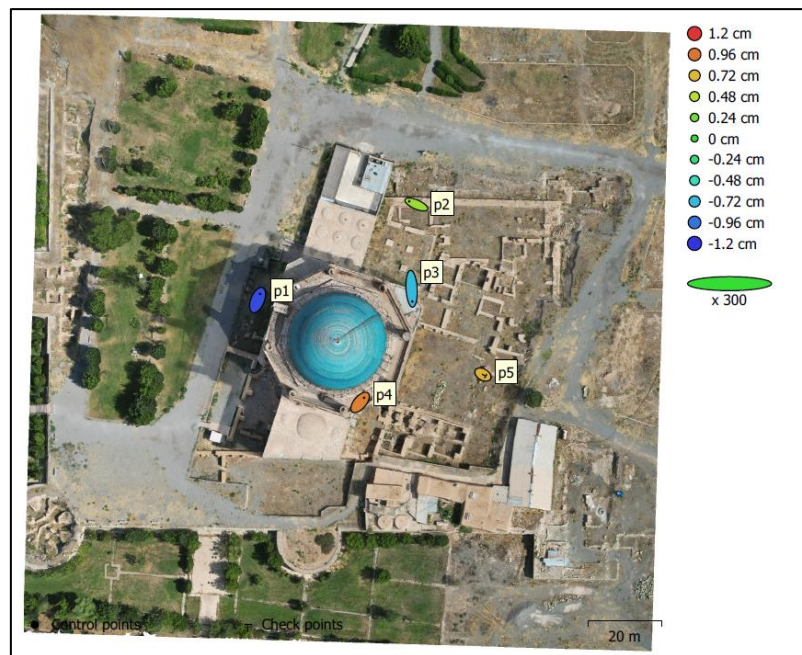


شکل ۱۰: موقعیت قرار گیری نقاط کنترل و چک بر روی بنا

نقاط P1، P2، P3، P4 به عنوان نقاط کنترل و نقطه P5 به عنوان نقطه چک تعیین شده است.

Fig. 10: Locations of Control and Check Points on the Structure

Points P1, P2, P3, and P4 were designated as control points, and point P5 was designated as the check point.



شکل ۱۱: موقعیت نقاط کنترل و چک بر روی بنا و میزان تخمین خطای هر نقطه

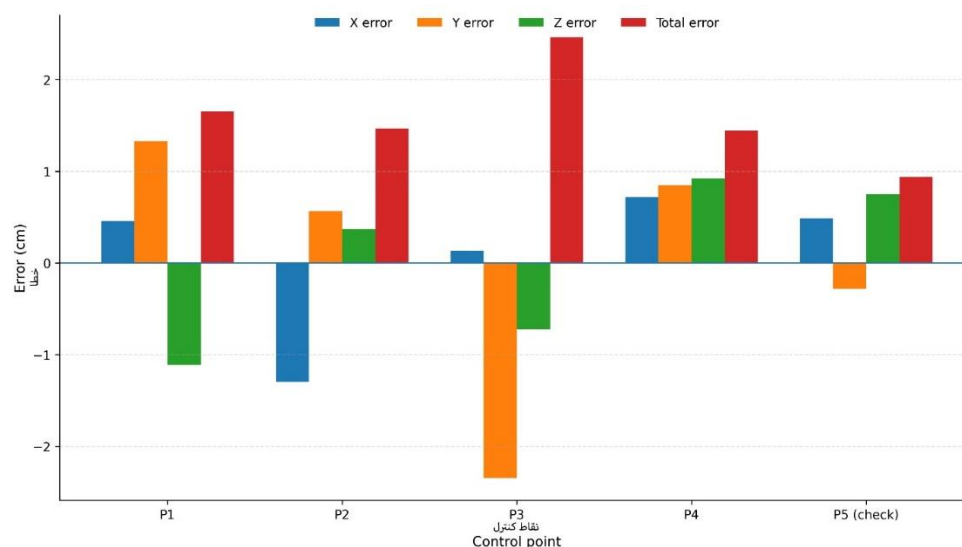
خطای Z با رنگ بیضی و خطاهای X و Y با شکل بیضی نمایش داده می‌شوند.

Fig. 11: Locations of Control and Check Points on the Structure and the Estimated Error for Each Point
Z errors are represented by colored ellipses, while X and Y errors are shown as ellipses.

جدول ۲: خطاهای مسطحاتی و ارتفاعی نقاط کنترل

Table 2: Planimetric and Elevation Errors of Control Points

خطای تصویر (پیکسل) Image Error (pixels)	خطای کل (cm) Total Error (cm)	خطای Z (cm) Z Error (cm)	خطای Y (cm) Y Error (cm)	خطای X (cm) X Error (cm)	نقاط کنترل زمینی Ground Control Points (GCPs)
۱/۲۸۱ (۱۸)	۱/۶۵۰	-۱/۱۱۳	۱/۱۲۹	۰/۴۵۷	P1
۱/۵۷۵ (۲۶)	۱/۴۶۵	۰/۳۷۰	۰/۵۶۶	-۱/۲۹۹	P2
۲/۱۰۱ (۱۴)	۲/۴۶۱	-۰/۷۲۵	-۲/۳۴۸	۰/۱۳۴	P3
۲/۴۰۵ (۱۳)	۱/۴۴۴	۰/۹۲۳	۰/۸۴۸	۰/۷۱۸	P4
۱/۸۰۴	۱/۸۰۳	۰/۸۲۹	۱/۳۹۹	۰/۷۷۹	مجدور خطای مربعی (RMSE)
۱/۳۶۵ (۳۳)	۰/۹۳۷	۰/۷۵۰	-۰/۲۸۲	۰/۴۸۵	P5 (نقطه چک - Check Point)



شکل ۱۲: نمودار خطاهای مسطحاتی و ارتفاعی نقاط کنترل

Fig. 12: Bar Chart of Planimetric and Elevation Errors of Control Points

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

آن با سایر روش‌های مستندنگاری، انتظار می‌رود استفاده از این روش غیرمخرب و غیرتماسی دیر یا زود گسترشی چشم‌گیر داشته باشد. طبیعتاً ارتباط و تعامل بیشتر متخصصین معماری، مرمت و علوم ژئوماتیک، به کاربست اصولی و درست این روش و بدست آمدن اسناد صحیح و دقیق کمک خواهد کرد. مطالبه رقومی‌سازی میراث از سوی نهاد متولی حفاظت در کشور یعنی وزارت میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری از طریق الزام آن در دستورالعمل‌های اجرایی تهیه پرونده‌های ثبتی آثار و پروژه‌های مرمتی در سرتاسر کشور نیز به تسریع توجه به چنین ابزارهای مفیدی در مستندنگاری میراث خواهد انجامید.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها توسط نویسنده دوم و تنظیم و تدوین اولیه مقاله توسط نویسنده اول صورت گرفته است. همچنین ایده پردازی و طرح پژوهش و تدوین و نگارش نهایی مقاله بصورت مشترک توسط هر دو نویسنده انجام شده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از پایگاه میراث فرهنگی سلطانیه و همچنین مدیر وقت پایگاه جناب آقای عالی ابراز می‌دارند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

در این پژوهش توانایی فتوگرامتری پهپاد در مستندنگاری رقومی یک اثر ثبت جهانی، مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت. نتایج از دقت و صحت اسناد و خروجی‌های بدست آمده از فرایند رقومی‌سازی اثر حکایت می‌کند. به عبارتی دیگر با این روش می‌توان از آثار غیرمنقول میراثی، مستندات صحیح متریک بدست آورد. سرعت، هزینه پایین، برداشت غیرمخرب بدون نیاز به تماس با اثر از مهمترین نقاط قوت این تجربه در مستندنگاری گنبد سلطانیه به‌شمار می‌آید. همچنین خروجی‌هایی نظیر عکس‌های اورتوفوتو که می‌توانند به نقشه‌های دقیق رقومی تبدیل شوند از مزیت‌های این روش است (شکل ۱۳). اگرچه نمی‌توان به تاثیر شرایط جوی، کیفیت تجهیزات، مهارت عوامل برداشت و پردازش، و مسئله نور به‌عنوان عوامل میانجی در حصول به نتیجه مطلوب اشاره نکرد. فتوگرامتری پهپاد که از علوم ژئوماتیک به گستره گفتمانی حفاظت وارد شده است، از جمله فناوری‌های نوین در مستندنگاری میراث است که هنوز نسبتاً نوپا بوده و باید بیش از پیش در فرایند حفاظت از آثار تاریخی از شناخت تا برنامه‌ریزی و نظارت مورد استفاده قرار گیرد. این مطالعه با تشریح روش و فرایند رقومی‌سازی میراث جهانی زنجان، تلاش کرد الگویی را برای مستندنگاری دیگر آثار تاریخی کشور پیش رو قرار دهد و گسترش استفاده از فتوگرامتری پهپاد را برای تولید اسناد متریک و مدل‌های رقومی توصیه کند. باید توجه داشت که توسعه رقومی‌سازی میراث، مزایای منحصر به فردی را برای اطلاع‌رسانی، آموزش و حفظ آثار در کشور فراهم می‌آورد. به همین خاطر و با توجه به دردسترس و ارزان بودن روش فتوگرامتری و همچنین قابلیت ترکیب



شکل ۱۳: تصویر اورتوفوتو جبهه شرقی گنبد سلطانیه - تصاویر اورتوفوتو می‌توانند در تهیه نقشه‌های رقومی مورد استفاده قرار گیرند.

Fig. 13: Orthophoto of the Eastern Facade of the Soltaniyeh Dome – Orthophotos can be used for creating digital maps.

منابع و مأخذ

- [12] Jafarzadeh H. The connection of photogrammetry with archeology and architecture and its application. The International Conference on Human, Architecture, Civil Engineering and City (ICOHACC 2015): 2015: Tabriz, Iran. [In Persian]
- [13] Sadeghian S, Sedighpoor D. Documenting historical monuments using UAV images to restore and determine buffer zones, case study: DolatAbad Castle. 1st National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2018: Tehran, Iran. [In Persian]
- [14] Farrokhi S, Sadeghi V, Tahmouresi R. Documenting Rural Architectural Heritage Using Close-Range Photogrammetry (Case Study: Sorkhay House Entrance, Ushtabin Village, East Azerbaijan). JHRE. 2021; 40 (175): 63-78. [In Persian] Doi:10.22034/40.175.63.
- [15] Sargazi H, Malian A. The application of geospatial information engineering in documenting for national and global registration (case study: shahr-e-sookhteh). 1st National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2018: Tehran, Iran. [In Persian]
- [16] Rahimi Jafari F, Habibi F, Moazen S. Introducing the Non-Destructive Method of Photogrammetry in the Study and Survey of Historical Monuments. JRA. 2021; 7(2): 135-158. [In Persian] Doi:10.52547/jra.7.2.135
- [17] Hojatpanah Sh, Vafae Baneh B, Forsatkar E, Vafae Baneh K. Application of photogrammetry, virtual tour and information modeling for documenting cultural heritage (Taq Bostan case study). 3rd International Conference on Building Information Modeling (BIM): 2020: Tehran, Iran. [In Persian]
- [18] Sadeghian, S., Rajabi, A., & Sedighpoor, D. 3D modeling for documentation, restoration and determination of the area of Dolatabad Castle in Qom using UAV images. JGST . 2021; 10 (3): 229-241. [In Persian]
- [19] Shirvani M, Zareiyan Jahromi S. Damage Map of Rostam and Ashkboos Relief in Divan Khaneh Building Using Photogrammetry, Based on Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns. KCR. 2022; 5(4): 12-19. URL: [In Persian]
- [20] Asadpoor A. Application of mobile photogrammetry in architectural documentation (studied example: Shiraz Koran gate tiling). National Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Development and Horizons of Islamic Art in the Second Step Statement of the Revolution: 2021: Tabriz, Iran. [In Persian]
- [21] Moazezi Mehr-e-Tehran, A. M. Photogrammetry, modern technology in cultural heritage documentation: A systematic review of related research in Iran. Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research, 2024; 3(1): 103-118. [In Persian] Doi: 10.22061/jrsgr.2025.11559.1087.
- [22] Asgharian jeddi, A. Kolliyāti dar rābete bā Gonbad-e Soltāniyeh (General issues regarding the Soltaniyeh Dome). Farhang-e Memāri-ye Irān. 1976; 2-3 (Spring). [In Persian]
- [1] Zeynalpoor Asl M, Samadzadegan F, Dadras Javan F, Talebian M. H. 3D Modeling of Architectural Heritage Using UAV Photogrammetry. Case Study: Deir-e Gachin caravansary. Journal of Fine Arts: Architecture & Urban Planning. 2022; 26(4): 61-73. [In Persian] doi: 10.22059/jfaup.2021.325822.672644
- [2] Razani M, Namani Kiyavi, L, ranjbari A, amiri A. A new reproduction of the Urartian cuneiform inscription of Seqindel, Varzghan, East Azerbaijan, Iran. Language Studies. 2024; 15(1): 57-80. [In Persian] https://doi.org/10.30465/lis.2023.47346.2164.
- [3] Xing Y, Yang S, Fahy C, Harwood T, Shell J. Capturing the Past, Shaping the Future: A Scoping Review of Photogrammetry in Cultural Building Heritage. Electronics. 2025; 14, 3666. https://doi.org/10.3390/electronics14183666
- [4] Adl S, Karimi A. A look at the numerical (digital) and photogrammetric views of Zozen and Bastam. Athar. 1998; 19(29, 30): 90-120. [In Persian]
- [5] Alitajer S, Afshariazad, S. Investigating the Role of Geomatics Engineering in the Applications of Cultural Heritage, Archeology and Architecture. pazhoheshha-ye Bastan shenasi Iran. 2014; 3(5): 169-195. [In Persian]
- [6] Enayati H. Protection of Cultural Works Using Digital Photogrammetry Methods. Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR). 1999; 8(32): 39-42. [In Persian]
- [7] Malian A. Photogrammetry in cultural heritage registration. Journal of Surveying. 2000; 43 (2 and 3). [In Persian]
- [8] Sabzekar H, Sadeghian S, Javadi M. Geomatics in modern researches of cultural heritage; Background, capabilities, and challenges. 2nd National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2019: Tehran, Iran. [In Persian]
- [9] Andaroodi E, Koulabadi A, Mehdizadeh Seradj F. Recognizing Decorative Elements Taken from the West in Qajar Period Façades Using Close-Range Photogrammetric Technology: the Case of Window-Pediments in the Ahmad Shahi Pavilion. Soffeh. 2023; 33(1): 119-137. Doi:10.52547/sofeh 33.1.11 [In Persian] https://doi.org/10.52547/sofeh 33.1.11
- [10] Farsimadan M, Hajizadeh Bastani K, Shahbazi Shiran H, Alizadeh Sola M. The Application of Photogrammetry in Documentation of Inscriptions on Historical Monuments; New Photogrammetry Project in Allah Allah Dome in Sheikh Safi Al-Din Shrine Complex. JRA. 2020; 6(2): 57-73. [In Persian] Doi: 10.52547/jra.6.2.57
- [11] Sadeghian S, Khoshboresh Masooleh M. Evaluation of geometric processing of semi-automatic close-range photogrammetric images for accurately documenting historical objects with complex structure. 1st National Conference on the Documentation of Natural & Cultural Heritage: 2018: Tehran, Iran. [In Persian]

Scientific Tool in Archaeology: Worldwide Research Trends. Sustainability. 2021; 13, 5319.

<https://doi.org/10.3390/su13095319>

[36] Hemmatimandjin Z, Ebadi H, Hosseini Noveh A, Esmaeili F. Application of drone-based photogrammetry in 3D modeling of ancient sites. In: Proceedings of the 2nd National Conference on Spatial Information Technology Engineering; Khajeh Nasir al-Din Toosi University of Technology; Tehran, Iran. 2016. [In Persian]

[37] ICOMOS. Principles for the Recording of Monuments, Groups of Buildings and Sites. Ratified by the 11th ICOMOS General Assembly; Sofia, Bulgaria. 1996.

[38] Stek TD. Drones over Mediterranean landscapes: the potential of small UAVs for site detection and heritage management in archaeological survey projects: a case study from Le Pianelle in the Tappino Valley, Molise (Italy). Journal of Cultural Heritage. 2016:1066–1071.

[39] Li X, Chen Z, Zhang L, Jia D. Construction and accuracy test of a 3D model of non-metric camera images using Agisoft PhotoScan. Procedia Environmental Sciences. 2016; 36:184–190.

[40] Haddad N. From ground surveying to 3D laser scanner: a review of techniques used for spatial documentation of historic sites. Journal of King Saud University. 2011:109–118.

[41] Yastikli N. Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. Journal of Cultural Heritage. 2007:423–437.

[42] Hemmleb M, Wiedemann A. Digital rectification and generation of orthoimages in architectural photogrammetry. In: Proceedings of the CIPA International Symposium; Göteborg, Sweden. 1997:261–267.

[43] Jeong GY, Tan NNO, Dang KT, Hoang TBH. Applying unmanned aerial vehicle photogrammetry for measuring dimensions of structural elements in traditional timber buildings. Measurement (IMEKO). 2020.

[23] Sobuti H. Memāri-ye Soltāniyeh dar Gozargāh-e Honar (Architecture of Soltaniyeh in the Passage of Art). Tehran: Pazhineh Publishing; 2001. 128 p. ISBN: 964-5722-25-X. [In Persian]

[24] Babayi N, Rahimi M, Ghiasvand J. Enduring values in Iranian domes with emphasis on Soltaniyeh Dome. In: Proceedings of the 2nd National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management. 2014. [In Persian]

[25] Salehi Kakhki, A., Taghavi-nejad, B. Introduction and Typology of Geometric Decorations in the Architectural Ornaments of the Dome of Sultaniyya. Journal of Iranian Architecture Studies, 2022; 9(17): 165-178. [In Persian] Doi: 10.22052/9.17.165.

[26] Mohebbi A. Prefabricated decorations in the Soltaniyeh Dome in the 8th century AH. Armānshahr Journal of Architecture and Urban Planning. 2008;(1):76-87. [In Persian]

[27] Panahi, D. H., behboodi, D. D., zolghadr, H., zolghadr, A. The Effect Quality of Tourism Product on Tourists' Satisfaction (Case Study Soltanieh Dome). Geography and Territorial Spatial Arrangement, 2015; 5(15): 101-116. [In Persian] Doi: 10.22111/gaij.2015.2074.

[28] Ranjbar M, Karami M. Feasibility study and management of international tourism attraction opportunities (Case study: Soltaniyeh Dome, Zanjan Province). Human Settlement Planning Studies. 2012;7(18):Spring. [In Persian]

[29] Hejazi M, Mirghaderi R. Seismic analysis of Iranian domes. Technical Faculty Journal. 2005;38(6): Esfand. [In Persian]

[30] Mirhoseini F., Shabanisamghabadi R., Saeedi M., Khamseh H. The place of fluid engineering in the tallest brick dome in the world (Soltanieh dome). Islamic Art Studies, 2022; 19(47): 596-619. [In Persian] Doi: 10.22034/ias.2021.271897.1536.

[31] Raziqi A, Pirbabayi MT, Nadimi H. Causes of social conflicts in the conservation of architectural heritage (Case study: the World Heritage complex of Soltaniyeh Dome and Citadel). Iranian-Islamic Urban Studies Journal. 2013;(13):45-54. [In Persian]

[32] Baik A, Alitany A. From architectural photogrammetry toward digital architectural heritage education. In: ISPRS TC II Mid-term Symposium "Towards Photogrammetry 2020"; 2018 Jun 4–7; Riva del Garda, Italy. 2018.

[33] Asadpour A. [Application of Historical Photos Photogrammetry in Documenting Destroyed Buildings (Case Study: Saadieh Historical Mansion)]. Pazhoheshha-ye Bastan Shenasi Iran. 2023; 13(36): 355-383. [In Persian] <https://dx.doi.org/10.22084/NB.2022.25574.2444>

[34] Mosaddegh, Badr al-Molk. Introductory Photogrammetry. Tehran: Iran Textbook Publishing Company; 2000. [In Persian]

[35] Marín-Buzón C, Pérez-Romero A, López-Castro J.L, Ben Jerbania I, Manzano-Agugliaro F. Photogrammetry as a New

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



امیرمحمد معزری مهرطهران استادیار گروه مرمت و احیاء بناهای تاریخی در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) است. دکتری تخصصی خود را در رشته مرمت ابنیه و بافت‌های تاریخی از دانشگاه هنر اصفهان در سال ۱۳۹۵ دریافت

کرده است. ایشان دارای دو مدرک کارشناسی ارشد در رشته‌های مرمت بناها و بافت‌های تاریخی، گرایش میراث معماری و شهرسازی، گرایش برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای است که به ترتیب از دانشگاه‌های تهران و هنر اصفهان اخذ کرده است. حوزه‌های تخصصی، پژوهشی و اجرایی وی بیشتر بر محور موضوعاتی چون باززنده‌سازی



معتبر داخلی و خارجی شده است. ایشان علاوه بر فعالیت در حوزه تخصصی خود، به صورت حرفه ای در حوزه فتوگرامتری با پهباد مشغول به فعالیت است. حوزه های تخصصی ایشان مدیریت میراث فرهنگی، میراث جهانی، مستند سازی آثار تاریخی و فتوگرامتری با پهباد می باشد.

Mahmoodi Ghouzhd, M.R., Assistant Professor at the Department of Architectural Heritage Conservation, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

✉ m.mahmoodi@arc.ikiu.ac.ir

میراث معماری و شهری، مدیریت میراث فرهنگی، و مستندنگاری دیجیتال میراث متمرکز است.

Moazezi Mehr-e-Tehran, A. M., Assistant Professor at the Department of Architectural Heritage Conservation, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

✉ a.moazezi@arc.ikiu.ac.ir

محمدرضا محمودی قوژدی استادیار گروه مرمت و احیاء بناهای تاریخی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) دارای مدرک دکتری تخصصی از دانشگاه تهران در رشته مرمت و احیای بناها و بافت های تاریخی است. ایشان تاکنون موفق به چاپ مقالات متعدد در مجلات

Citation (Vancouver): Moazezi Mehr-e-Tehran A.M, Mahmoodi Ghouzhd M.R. [Digital documentation of immovable cultural heritage using drone photogrammetry: The dome of soltaniyeh, zanzan, as a case study]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2026; 4(1): 213-226

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2026.113081.1127>



COPYRIGHTS

© 2026 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)