Journal of Research on Archaeometry, 2021; 7 (2): 135-158

Journal of Research on Archaeometry

DOI: 10.52547/jra.7.2.135

URL: https://jra-tabriziau.ir/

Review Papers

Introducing the Non-Destructive Method of Photogrammetry in the Study and Servey of Historical Monuments

Farzaneh Rahimi Jafari [1], Fatemeh Habibi [2], Sajad Moazen [*3],

[1]. M.A. Department of Building Conservation, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, IRAN

[2]. M.A. Department of Building Conservation, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, IRAN

[3]. Assistant Professor, Department of Building Conservation, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, IRAN

Received: 19/09/2021 **Accepted: 21/12/2021**

Abstract

Cultural heritage is an invaluable asset to human beings that reflects their achievements over the centuries. The need to identify and protect cultural heritage is well understood, and experts strive to use every means possible to achieve this goal. Preservation and restoration of cultural heritage include conservation of historic buildings using all new technologies that are as effective as possible in maintaining the original condition. They are often associated with geometric surveying, surveillance, and heritage documentation. This article introduces the science of photogrammetry, types, tools, and techniques by reviewing and analyzing 20 reputable publications articles in the last five years. This article demonstrates the efficiency of this technology in the conservation, restoration, and documentation of cultural heritage by introducing some comparative examples in the present era. Documenting monuments is the first step to any intervention and planning. Architectural heritage photogrammetry is a helpful and standard process for obtaining accurate 3D data for documentation and virtualizing historical monuments. It is also one of the most recommended non-invasive methods, consisting of techniques for interpreting, measuring, and modeling objects by the basis of images obtained from them. According to studies, the science of photogrammetry is one of the most widely used, cheapest, and most available non-destructive technologies in restoration science and with the advancement of science, newer and more efficient tools and methods in this field are presented.

Keywords: Historical Building, Documentation, Roleve, Non-destructive Technique, Photogrammetry.

*Corresponding Author: sajadmoazen@iust.ac.ir

Introduction

When monuments are abandoned, their inspection and monitoring are essential steps for proper planning of conservation and restoration [1]. Documenting monuments is the first step to any intervention and planning. Cultural heritage is threatened by a variety of factors, including natural hazards, urban development, and erosion, and is likely to be eradicated at any time. Therefore, we must ensure that they are well documented, that if they are lost, we can pass the documents on to future generations or, if necessary, use them for reconstruction purposes [2]. Before starting the documentation, it is necessary to analyze the existing documents. Any new research should complement the existing review. Documentation should be planned based on the available data and the purpose of the project. Documentation generally considers the geometric properties of the building, compromise, building structure, construction period, and even pathology. These studies enable the correct identification and comprehensive knowledge of the building, which is the basis of the restoration project. Documentation in restoration work can be integrated in all stages of project implementation. Numerous findings are provided in implementation that require ongoing review to record, interpret, and justify any changes to the project. In many cases, the investigation should continue even after the intervention [3]. Thanks to technological advances, more methods and tools can be used to document cultural heritage. The documentary methods available today can often lead to excellent results in terms of accuracy, speed, completeness, and realism. This paper seeks to identify a suitable method for realizing three-dimensional models of complex structures in an easy and fast way. To achieve this goal, the first step is to build a three-dimensional model using photogrammetric modeling. Photogrammetric study of architectural cultural heritage is a very useful and standard process in order to obtain accurate three-dimensional data for documenting and visualizing historical monuments [1]. Today, photogrammetry has become very popular for research purposes due to the high performance and low cost of new digital cameras.

Discussion

Cultural heritage is increasingly using digital technologies. New 3D digital tools offer unique benefits for informing, educating and preserving historical monuments and sites. Using these tools, museums and historical sites can provide not only greater access for the general public, but also remote researchers [5]. Methods of creating three-dimensional models can be classified into two main categories based on 1) level of automation and 2) input techniques. In the first group, automatic, semi-automatic and manual methods can be mentioned, while in the second group, photogrammetric and LiDAR techniques can be mentioned [6]. Whereas the study of monuments must respect international norms of intervention in the architectural heritage; Photogrammetry is one of the most recommended surveying methods as a non-Destructive method [3,7], which consists of techniques for interpreting, measuring and modeling objects based on images [2].

Types of photogrammetry

Photogrammetry is divided into two categories:

• Interpretive photogrammetry: identifying and determining the type of objects based on photo interpretation and obtaining thematic and descriptive information. In this type of photogrammetry, color photographs are used to identify and qualitatively determine the effects.

• Metric photogrammetry: measures accurately from a photograph that produces a map [10].

Types of photogrammetry in terms of camera station (in terms of distance to the object):

• Ground photogrammetry (short range): The camera is mounted on a tripod and its distance from the object is from 1 to 200 meters.

• Aerial photogrammetry: The camera is mounted on an airplane and produces topographic maps.

• Space Photogrammetry: Carries a satellite or space camera (such as a shuttle space station) [6,8].

The various methods of digital terrestrial photogrammetry used in conservation projects and works are:

• Single-image photogrammetry (or 2D photogrammetry)

• Stereo photogrammetry (two images obtained with axes parallel to each other)

• Multi-image photogrammetry (convergence or monoscopic photogrammetry).

To obtain a three-dimensional model, the last two methods are used [3,7].

Photogrammetric techniques

• Structure from Motion (SfM), which specifies the directions and positions in which each image is taken.
• Scale-Invariant Feature Transform (SIFT), which can identify potential features for image matching [6].
• Compact stereo adaptation (DSM) (Digital Surface Model) [8].

Conclusion

Preservation and restoration of cultural heritage includes the protection of historic buildings using all new technologies that are as effective as possible in maintaining the original condition. Cultural heritage is increasingly using digital technologies in its techniques and methods. New 3D digital tools offer unique benefits for informing, educating and preserving monuments and sites. Photogrammetry is one of the techniques developed for three-dimensional digitization at various scales. However, unlike traditional scanners, photogrammetry is relatively inexpensive - both monetary and experimental. Photogrammetry makes digitization accessible to everyone compared to other techniques. Today, photogrammetry plays a significant role in documenting historical monuments in Iran and has greatly increased the work of archaeologists and restorers in its ease and accuracy. Due to the availability and cheapness of this method and the ability to combine it with other methods, it is predicted that in the future all the work of documenting and collecting cultural heritage, including historical buildings, monuments, archeological sites and others will be done by using this non-destructive technology in Iran. The results of the study indicate that the science of photogrammetry will work better in combination with other methods such as laser scanner, GPR, Lidar and other technologies.

پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۰؛ ۷(۲): ۱۳۵-۱۵۸

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.52547/jra.7.2.135

URL: http://jra-tabriziau.ir/

مقاله مروری

معرفی روش غیرمخرب فتوگرامتری در مطالعه و برداشت بناهای تاریخی

فرزانه رحیمی‌جعفری [۱]، فاطمه حبیبی [۲]، سجاد موذن*[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مرمت، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مرمت، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه مرمت، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۳۰

چکیده

میراث‌فرهنگی سرمایه‌ای بی‌بدیل برای انسان است که دستاوردهای او را طی قرن‌ها به تصویر می‌کشد. نیاز به شناسایی و حفاظت از میراث فرهنگی به‌خوبی درک شده و تلاش متخصصان این است که از هر روش ممکن برای تحقق این هدف بهره بگیرند. حفاظت و مرمت میراث‌فرهنگی شامل حفاظت از بناهای تاریخی با استفاده از تمام فناوری‌های جدید است که در حفظ وضعیت اولیه تا حد ممکن مؤثر واقع می‌شود. آن‌ها اغلب با بررسی هندسی، نظارت و مستندنگاری میراث، مرتبط هستند. این مقاله به صورت مروری و با بررسی و تحلیل ۲۰ مقالهٔ نشریات معتبر در پنج سال اخیر به معرفی علم فتوگرامتری، انواع، ابزار و تکنیک-های این علم می‌پردازد و در پایان با معرفی چند نمونه موردی، کارآمدی این فناوری را در عصر حاضر در حفاظت، مرمت و مستندنگاری میراث فرهنگی نشان می‌دهد. مستندسازی بناهای تاریخی، اولین قدم برای هرگونه مداخله و برنامه‌ریزی است. فتوگرامتری میراث معماری یک فرایند مفید و استاندارد به‌منظور دستیابی به داده‌های سه‌بعدی دقیق برای مستندسازی و تجسم مجازی بناهای تاریخی و یکی از توصیه‌شده‌ترین روش‌های غیرمزاحم (non-intrusive method) است، که متشکل از تکنیک-هایی برای تفسیر، اندازه‌گیری و مدل‌سازی اشیاء بر اساس تصاویر به‌دست‌آمده از آن‌ها است. براساس مطالعات انجام شده، علم فتوگرامتری با توجه به لزوم مستندنگاری میراث فرهنگی به عنوان یکی از پرکاربردترین، ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین فنّاوری‌های غیرمخرب در کلیهٔ علوم مرتبط با میراث فرهنگی به صورت گسترده استفاده می‌شود و با پیشرفت علم، ابزارها و روش‌های جدیدتر و کارآمدتری در این زمینه ارائه می‌شود.

واژگان کلیدی: بناهای تاریخی، مستندسازی، برداشت، روش غیرمخرب، فتوگرامتری.

* نویسنده مسئول مکاتبات: تهران، رسالت، خیابان هنگام، خیابان دانشگاه، دانشگاه علم و صنعت ایران، کد پستی: ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶

پست الکترونیکی: sajadmoazen@iust.ac.ir

۱. مقدمه

هنگامی که بناهای تاریخی متروک و مهجور مانده‌اند، بررسی و نظارت آن‌ها گام‌های اساسی برای برنامه-ریزی صحیح حفاظت و مرمت هستند [1]. مستندسازی بناهای تاریخی اولین قدم برای هرگونه مداخله و برنامه‌ریزی است. میراث فرهنگی توسط عوامل مختلفی از جمله خطرات طبیعی، توسعهٔ شهرها و فرسوده شدن تهدید می‌شود و هر لحظه احتمال از بین رفتن آن میراث وجود دارد. بنابراین باید اطمینان حاصل کنیم که آن‌ها به خوبی مستند شده‌اند، که در صورت از دست دادن آن‌ها بتوانیم اسناد و مدارک را به نسل‌های آینده منتقل کنیم یا در صورت نیاز از آن‌ها برای اهداف بازسازی استفاده کنیم [2]. قبل از شروع مستندنگاری، لازم است اسناد موجود، تجزیه و تحلیل شود. هر پژوهش جدید باید مکمل بررسی‌های موجود باشد. بر اساس داده‌های موجود و هدف پروژه، مستندنگاری باید برنامه‌ریزی شود. در مستندنگاری عموماً خصوصیات هندسی ساختمان، مصالح‌شناسی، سازهٔ بنا، دوره‌بندی ساخت و حتی آسیب‌شناسی مورد توجه قرار می‌گیرد. این مطالعات، امکان تشخیص صحیح و شناخت جامع بنا را فراهم می‌کند که اساس پروژهٔ مرمت است. مستندنگاری در کار مرمت، می‌تواند در تمام مراحل اجرای پروژه ادغام شود. یافته‌های متعددی در اجرا فراهم می‌شوند که نیاز به بررسی‌های مداوم دارند تا هرگونه تغییر در پروژه را ثبت، تفسیر و توجیه کنند. در بسیاری از موارد، بررسی باید حتی پس از مداخله ادامه یابد [3]. به یُمن پیشرفت‌های تکنولوژیکی، می‌توان از روش‌ها و ابزار بیشتری برای مستندسازی میراث فرهنگی استفاده کرد. روش‌های مستندنگاری که امروز موجود است اغلب می‌تواند به نتایج عالی از نظر دقت، سرعت، کامل‌بودن و واقع-گرایی آثار منجر شود. این مقاله، به‌دنبال شناسایی روشی مناسب برای تحقق بخشیدن به مدل‌های سه-بُعدی ساختارهای پیچیده به روش آسان و سریع است. برای دستیابی به این هدف، اولین قدم، ساختن مدل سه‌بُعدی با استفاده از مدل‌سازی فتوگرامتری است. بررسی فتوگرامتری میراث فرهنگی معماری یک فرایند بسیار مفید و استاندارد به منظور دستیابی به داده‌های سه‌بُعدی دقیق برای مستندسازی و تجسم بناهای تاریخی است [1]. امروزه فتوگرامتری برای اهداف تحقیقاتی به دلیل عملکرد بالا و ارزان بودن دوربین‌های دیجیتال جدید بسیار محبوب شده‌است.

۲. روش پژوهش

روش تحقیق مورد استفاده در این مقاله، توصیفی-تحلیلی است که برای گردآوری اطلاعات از مطالعات کتابخانه‌ای در چارچوب استفاده از منابع اینترنتی بهره گیری‌شده است. از این رهگذر، محتوای مقاله‌های منتشرشده در زمینهٔ مستندنگاری و فتوگرامتری در پنج سال اخیر به زبان انگلیسی مورد بررسی قرار گرفته است. با مطالعهٔ مقالات در ابتدا به معرفی علم فتوگرمتری به‌عنوان یک فناوری غیرمخرب در مستندنگاری میراث فرهنگی پرداخته و سپس مزایا و معایب استفاده از این روش ارائه شده است. در ادامه، به معرفی انواع فتوگرامتری، تکنیک‌ها و ابزار این فناوری پرداخته و با تحلیل یک نمونهٔ موردی، نحوهٔ کارکرد این فناوری شرح داده می‌شود. در انتها به مقایسهٔ مقاله‌های مورد بررسی از نظر هدف و موضوع پرداخته شده است.

۳. یافته‌ها

۳-۱. تاریخچهٔ علم فتوگرامتری

درگذشته، از دوربین‌های آنالوگ برای بررسی‌های فتوگرامتری استفاده می‌شد و روش‌های فتوگرامتری تک‌تصویر و استریوفتوگرامتری روش‌های غالب بودند. به‌عنوان یک وسیلهٔ ذخیره‌سازی تصاویر فتوگرامتری، از صفحات نگاتیو شیشه‌ای یا فیلم عکاسی استفاده می‌شد. دوربین‌های متریک و سایر تجهیزات، بسیار گران‌قیمت بودند و پردازش به افراد آموزش‌دیده نیاز داشت. در دههٔ ۱۹۹۰ میلادی، فتوگرامتری با ورود دوربین‌های دیجیتال، انقلابی را تجربه کرد. امروزه، تصاویری که با دوربین‌های دیجیتال گرفته می‌شوند،

اغلب با روش مؤثر سریع ساختار در حرکت (SfM) پردازش می‌شوند. ساختار در حرکت دارای زمینه‌ای در علم بینایی رایانه (Computer vision) است. روش-های بینایی رایانه‌ای در ابتدا با هدف تشخیص اشیاء، ناوبری وسایل نقلیهٔ خودران یا مدل‌سازی اشیاء انجام شد [4]. در ادامه، به تشریح کامل این فناوری پرداخته می‌شود.

۳-۲. تشریح فناوری فتوگرامتری و انواع آن

۳-۲-۱. معرفی فتوگرامتری

میراث فرهنگی به طور فزاینده‌ای از فناوری‌های دیجیتال بهره می‌برد. ابزارهای دیجیتالی سه‌بعدی جدید مزایای منحصربه‌فردی را برای اطلاع‌رسانی، آموزش و حفظ آثار و محوطه‌های تاریخی ارائه می-دهند. با استفاده از این ابزارها، موزه‌ها و اماکن تاریخی می‌توانند نه تنها دسترسی بیشتری را برای عموم مردم، بلکه دسترسی محققان از راه دور نیز ایجاد کنند [5]. روش‌های ایجاد مدل‌های سه‌بعدی را می‌توان در دو دستهٔ اصلی طبقه‌بندی کرد که بر اساس ۱. سطح اتوماسیون و ۲. تکنیک‌های ورودی است. در مورد گروه اول، می‌توان به روش‌های اتوماتیک، نیمه اتوماتیک و دستی اشاره کرد، در حالی که در گروه دوم می‌توان به تکنیک‌های فتوگرامتری و LiDAR اشاره کرد [6]. از آنجا که بررسی بناهای تاریخی باید به هنجارهای بین‌المللی مداخله در میراث معماری احترام بگذارد؛ فتوگرامتری یکی از توصیه‌شده‌ترین روش‌های بررسی به‌عنوان یک‌روش غیرمزاحم محسوب می‌شود [3, 7]، که متشکل از تکنیک‌هایی برای تفسیر، اندازه-گیری و مدل‌سازی اشیاء براساس تصاویر است [2]. فتوگرامتری مطابق ASPRS (انجمن فتوگرامتری و سنجش از دور آمریکا) (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) به شرح زیر توصیف شده است: هنر، علم و فناوری به-دست‌آوردن اطلاعات قابل اعتماد در مورد اجسام فیزیکی و محیط از طریق فرایندهای ضبط، اندازه‌گیری و تفسیر تصاویر و الگوهای انرژی الکترومغناطیسی تابشی و سایر پدیده‌های ثبت شده است. مشهورترین تکنیک مبتنی بر تصویر، فتوگرامتری است که می‌تواند ابعاد بسیار دقیقی را از نظر موقعیت و هندسهٔ عنصر واقعی از طریق دو یا چند تصویر در رابطه با یک نمای ثابت از چندین زاویه برای آن عنصر ارائه دهد [8]. فتوگرامتری یکی از تکنیک‌هایی است که برای دیجیتالی‌شدن سه‌بعدی در مقیاس‌های مختلف توسعه یافته است. بااین‌حال، برخلاف اسکنرهای سنتی، فتوگرامتری نسبتاً ارزان –چه از نظر پولی و چه از نظر تجربی– است [5]. مدل‌های دیجیتالی سه‌بعدی و نمایش‌های دوبعدی می‌توانند به‌طور مؤثر در نظارت بر وضعیت حفاظت از بناهای تاریخی کمک کنند و به یک پشتیبانی بسیار مفید برای کارهای مرمت تبدیل شوند [1]. فتوگرامتری می‌تواند ابرهای نقطه‌ای سه-بعدی را از تصاویر (اعم از فاصله کوتاه و هوایی) ایجاد کند. ابر نقطه‌ای فتوگرامتری با استفاده از جفت‌های تصویر استریو[1] و با استفاده از روشی که استریوی چندنمایه ((Multi-view stereo (MVS)نامیده می-شود، ایجاد می‌شود [6]. همچنین در محدودهٔ سرزمین، فتوگرامتری تاریخی (Historical Photogrammetry (HP)) برای نظارت بر تغییرات سرزمینی یا تجزیه و تحلیل پدیده‌های طبیعی اعمال می‌شود و تغییرات مورفولوژی یخچال‌ها، آتشفشان‌ها یا رانش زمین را برجسته می‌کند [9].

مزایای فتوگرامتری را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- سهولت در ایجاد بایگانی برای نیازهای آینده.
- ارائهٔ مقدار زیادی داده در خروجی‌ها.
- دقت بالا بسته به نیاز پروژه.
- ارائهٔ مدل‌های سه‌بعدی در طیفی وسیع، از اشیاء کوچک تا اشیاء پیچیدهٔ بزرگ مانند مکان‌های تاریخی.
- ارائه داده‌های متریک از بافت شیء به دلیل ماهیت مبتنی بر تصویر، که سبب افزایش درک کاربر می-شود.

- داده‌های جغرافیایی، که می‌تواند به طور غیرمستقیم در هر زمان و با توجه به نیاز پروژه از تصاویر استخراج شود.
- تجهیزات کم‌هزینه و قابل‌حمل.

معایب این روش عبارت هستند از:

- برای استفادهٔ کاربران غیر متخصص، سخت و پیچیده است.
- تحت‌تأثیر دقت و وضوح دوربین قرار دارد.
- کاربرد آن به دلیل کمبود نقاط مناسب برای عکاسی یا وجود مانع، محدود می‌شود. در این حالت، باید با سایر تکنیک‌ها ترکیب شود [2].

۳-۲-۲. انواع فتوگرامتری

فتوگرامتری به دو دسته تقسیم می‌شود:

- فتوگرامتری تفسیری: تشخیص و تعیین نوع اجسام بر اساس تفسیر عکس و کسب اطلاعات موضوعی و توصیفی. در این نوع از فتوگرامتری از عکس‌های رنگی استفاده می‌شود و به شناسایی و تعیین کیفی عوارض می‌پردازد.
- فتوگرامتری متریک: به اندازه‌گیری دقیق از روی عکس می‌پردازد که به تولید نقشه می‌انجامد [10].
- انواع فتوگرامتری از لحاظ ایستگاه گیرندهٔ عکس (از لحاظ فاصله تا جسم):
- فتوگرامتری زمینی (برد کوتاه): دوربین بر روی سه پایه نصب می‌شود و فاصله آن تا جسم از ۱ تا ۲۰۰متر است.
- فتوگرامتری هوایی: دوربین در هواپیما قرار می‌گیرد و نقشه‌های توپوگرافی تولید می‌کند.
- فتوگرامتری فضایی: ماهواره یا سکوی فضایی، دوربین را حمل می‌کنند (مانند ایستگاه فضایی شاتل) [6,8].
- روش‌های مختلف فتوگرامتری دیجیتال زمینی را که در پروژه‌ها و آثار حفاظت به‌کار می‌رود، عبارت هستند از:
- فتوگرامتری تک‌تصویر (یا فتوگرامتری دوبعدی)
- استریو فتوگرامتری (دو تصویر به‌دست‌آمده با محورهای موازی با یکدیگر)
- فتوگرامتری چندتصویر (همگرایی یا فتوگرامتری مونوسکوپی).
- برای به‌دست آوردن مدل سه‌بعدی، دو روش آخر مورد استفاده قرار می‌گیرند [3,7].

پانوراما

پانوراما یکی از روش‌های فتوگرامتری چندتصویر عکاسی است. تصاویر پانوراما برای اندازه‌گیری مفید هستند و اگر تنظیمات و کالیبراسیون دوربین به درستی کار کند، می‌توان از این تصاویر برای تجزیه و تحلیل ابعاد استفاده کرد. امروزه، دوربین‌های پانوراما قابلیت اطمینان این روش را افزایش داده و مشکلات مربوط به روند همپوشانی تصاویر را برطرف کرده‌اند. مهمترین مزیت این روش، قابلیت آن در ذخیره‌سازی داده‌های یک شیء بزرگ به کمک تعداد کم عکس است. هزینهٔ کم، زمان کمتر، سهولت استفاده در سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، قابلیت ارائه در صفحات وب و جذابیت زیاد برای کاربران از مزایای این روش محسوب می‌شوند و اندازهٔ بزرگ تصویر که به حافظه زیاد نیاز دارد، نیاز به نرم‌افزارهای بیننده، محدودیت در حرکت در فضاهای داخلی، محدودیت در زاویهٔ دوربین از معایب این روش است [2].

فتوگرامتری برد کوتاه (Close-range Photogrammetry)

در صورتی که فاصلهٔ شیء تا دوربین در فتوگرامتری زمینی از ۱ تا ۱۰۰۰ سانتی‌متر باشد، به‌عنوان فتوگرامتریِ از فاصله کوتاه طبقه‌بندی می‌شود. در دههٔ گذشته، فتوگرامتری در معماری، باستان‌شناسی، حفاظت از میراث، ارائهٔ مدل‌سازی سه‌بعدی شهر، فتوگرامتری مهندسی و همچنین در تولید فیلم و برنامه‌های پزشکی و بازی‌های ویدئویی استفاده شده است [8]. فتوگرامتری برد کوتاه دیجیتالی امکان دستیابی به سطوح با کیفیت بالا را از نظر داده‌های

هندسی و رادیومتری فراهم می‌کند [11]. این روش، حداقل بر اساس دو تصویر با داده‌های دارای همپوشانی است که روند مثلث‌بندی را تضمین می‌کند. هدف از فاصله‌سنجی فتوگرامتری دیجیتال، فرایند ساده و سریعتر ضبط و پردازش داده‌ها است. این روش یک روش دقیق برای مستندسازی رنگ و بافت و ارائهٔ داده‌های متریک اشیاء با اندازه و پیچیدگی متفاوت در مدت زمان نسبتاً کوتاه است. هنگامی که دسترسی به جسم محدود است یا اندازه‌گیری مستقیم روی جسم آن را تهدید می‌کند، می‌توان از این روش استفاده کرد. امروزه، اســـتفاده از دوربین‌های shelf cameras[2] با دقت بالا، استفاده از فرایند فتوگرامتری از فاصله کوتاه را آسان و مقرون‌به صرفه کرده است. به‌طورخلاصه، تولیدات فتوگرامتری را می‌توان عکس‌های اصـــلاح شـده، عکس‌های ارتو و مدل‌های سـه‌بُعدی دانسـت. اگرچه قابلیت اســـتفاده از فتوگرامتری را می‌توان با توجه به دقت و جزئیات لازم طبقه‌بندی کرد، اما به‌طورکلی می‌توان کاربرد آن را در باستان شناسی و حفاظت از میراث به شرح زیر برشمرد:

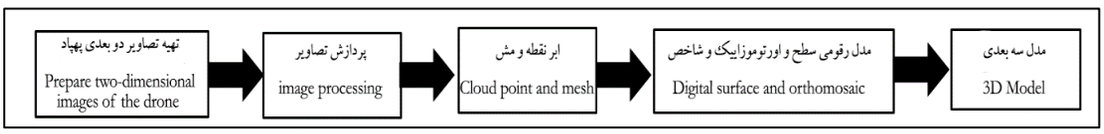
- مستندسازی بناها و اشیاء تاریخی و برداشت نماها.
- ارائهٔ داده‌های رنگ و بافت.
- اندازه‌گیری تغییر شکل ساختمان‌ها، تجزیه و تحلیل تغییرات و پیش‌بینی تغییرات آینده، به‌عنوان مثال ترک‌ها و شکاف‌ها. برای این‌منظور، باید در دوره‌های متفاوتی از زمان یک مدل نقطهٔ ابری از جسم ایجاد شود؛ تا بتوان مقایسه‌ای مداوم بین مدل‌ها انجام داد و تغییرات را تجزیه و تحلیل کرد.
- بررسی محوطه‌های باستان‌شناسی.
- مدل‌سازی سه‌بعدی شهرهای تاریخی.
- بازسازی اشیاء تخریب شده.
- ایجاد بایگانی متریک دقیق برای تجزیه و تحلیل و نیازهای آینده [2].

فتوگرامتری هوایی

در روش‌های موجود بافت‌سازی مدل‌های سه‌بعدی شهر از تصاویر عمودی استفاده می‌کنند که برای برخی از کاربردهای مدل‌های سه‌بعدی مانند شبیه‌سازی آموزشی، بازی و برنامه‌ریزی مخابراتی کافی است. با این حال، نیاز به عکس‌های واقعی، مدل‌سازی جزئیات کامل و مدل‌های سه‌بعدی دقیق هندسی در چندین زمینه، به‌ویژه در مهندسی و مستندسازی میراث فرهنگی، به سرعت در حال افزایش است. جزئیات بهتر را می‌توان در تلفیق فتوگرامتری هوایی و تصاویر زمینی به دست آورد، اما این فرایند به خصوص در پروژه‌های مدل‌سازی بزرگ بسیار وقت‌گیر است. بهبود کارایی با گرفتن تصویر از یک وسیلهٔ زمینی متحرک امکان‌پذیر است، اما اگر مدل‌سازی اولیه توسط فرایندهای فتوگرامتری هوایی با گرفتن عکس‌های مایل در کنار عکس‌های تخت انجام شده باشد، نتیجهٔ بهتری حاصل می‌شود. تصاویر هوایی Pictometry حاوی تصاویر مایل (زاویه‌دار) هستند که دید بهتر و جزئیات بیشتری را ارائه می‌دهند [12].

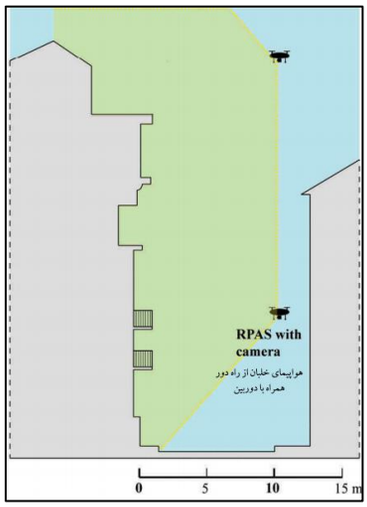
برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های مرسوم، روش‌های فتوگرامتری هواپیماهای بدون سرنشین (unmanned aerial vehicle(UAV)) مورد توجه قرار گرفته‌است. پرندهٔ هدایت‌پذیر از دور یا وسیلهٔ نقلیهٔ هوایی بدون‌سرنشین همانطور که از نام آن قابل‌تشخیص است، بدون خلبان داخل هواپیما کار می‌کند. اصطلاحات دیگر مانند (RPV) (Remotely Piloted Vehicle)، (RC-Helicopter)(Remote Controlled Helicopter)، (ROA) (Remote Operated Aircraft) سیستم‌های خودروی بدون‌سرنشین (UVS) و مدل هلیکوپتر همچنین برای این سیستم استفاده می‌شود. انواع مختلف پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور باتوجه به وزن، اندازه، مقاومت و نگرش‌پرواز دسته‌بندی می‌شوند. این سیستم برای شناسایی موقعیت و پیمایش سیستم از یک وسیله‌نقلیهٔ هوایی کم‌هزینه مانند هلی‌کوپتر کوچک، دوربین دیجیتال و سیستم‌های GNSS[3] / INS[4] (Global Navigation Satellite Systems /Inertial Navigation System) تشکیل شده‌است. انگیزهٔ اولیه برای توسعهٔ سیستم‌های پرنده هدایت‌پذیر از دور،

اهداف نظامی بود. بااین‌حال، در سال‌های اخیر، کاربرد پرنده هدایت‌پذیر از دور به‌طور قابل توجهی گسترش یافته است و برای مستندنگاری و نقشه‌برداری استفاده می‌شود. این سیستم کم‌هزینه می‌تواند جایگزین مناسبی برای فتوگرامتری سرنشین‌دار کلاسیک باشد. پرنده هدایت‌پذیر از دور مجهز به دوربین با وضوح بالا، امکان بازرسی سریع کل سازه را فراهم می‌آورد، این یک مزیت نسبت به روش‌های مرسوم است که در بخش‌های بالای سازه‌ها محدود بود، همچنین این روش، مناسب برای محوطه‌های مقیاس بزرگ و زمان‌بر است [13]. مستندسازی و مدل‌سازی سه‌بعدی و نقشه‌برداری از اماکن و بناهای تاریخی را می‌توان با استفاده از پرواز در ارتفاع کم انجام داد. با استفاده از پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور، می‌توان تصاویر پانوراما، مدل سطح دیجیتال (DSM)[5] و عکس اورتو و سه-بعدی با دقت بالا از اشیاء تولید کرد [2]. فتوگرامتری پرندهٔ هدایت‌پذیر از دور برای کاربردهای مختلف پیمایش، همچون توپوگرافی پیچیده، پل، سد، ساختمان‌های شهری بزرگ مقیاس، برج‌های برق، مکان‌های باستان‌شناسی و همچنین مطالعهٔ بناهای تاریخی قابل استفاده است [13]. یک پرندهٔ هدایت‌پذیر از دور سَبُک مجهز به دوربین دیجیتال، بهترین راه‌حل برای بررسی مناطق نمای غیرقابل‌دسترسی و پنهان از دید یک ساختمان و غلبه بر محدودیت‌های زمین است [11]. برای بازسازی یک مدل سه‌بعدی، باید تصاویر مناسبی که به‌طور کامل ساختمان را پوشانده‌اند، تهیه کرد. برای جلوگیری از ایجاد حفره در مدل سه‌بعدی، هر تصویر باید ۶۰ تا ۸۰ درصد همپوشانی داشته باشد [13].



شکل ۱: نمودار شماتیک برای ساخت یک مدل سه‌بعدی از بنا [13].

Fig. 1: Schematic diagram for constructing a three-dimensional model of a building



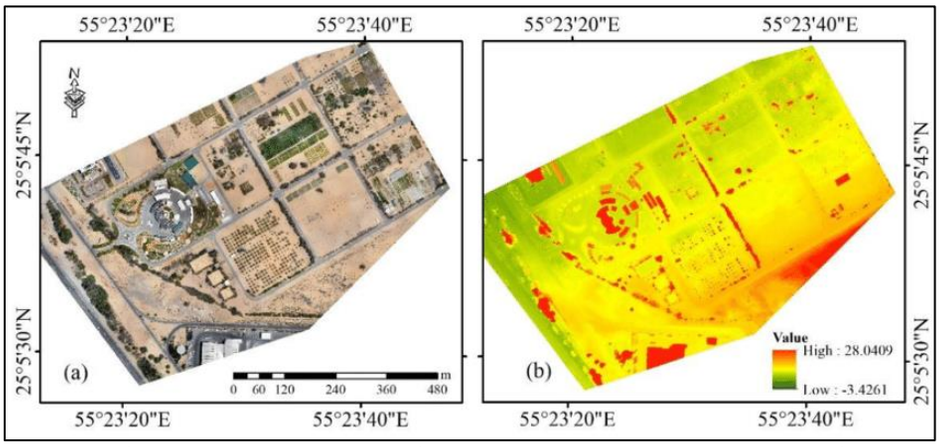
شکل۲: استفاده از پرنده هدایت‌پذیر از دور سبک جهت بررسی سه‌بعدی، که برای به‌دست‌آوردن نمای ساختمان استفاده می‌شود.

Fig. 2: Use a light drone for a three-dimensional survey, which is used to obtain a view of the building.

تصویر اورتوموزاییک (Orthomosaic) که به‌عنوان اورتوفوتو (Orthophoto) یا اورتوایمیج (Orthoimage) نیز شناخته می‌شود (گرچه اورتوموزاییک حاصل از ترکیب چند اورتوفوتو است) تصویری است که از نظر هندسی و فیزیکی اصلاحات[6] لازم باید روی آن انجام می‌شود. یک اورتو دیجیتال

(digital orthophoto)(به طور خلاصه DOP) یک تصویرسازی واقعی از بالا است که سطح زمین را نشان می‌دهد. برای برطرف کردن اعوجاج تصاویر عمودی (غیرتخت بودن تصویر) از یک مدل زمینی دیجیتال استفاده می‌شود. برای دستیابی به نتیجهٔ مطلوب، بسته به اندازهٔ پروژه، تا چندین هزار تصویر از نظر هندسی همگن می‌شوند. برای اورتوفوتوهای واقعی (true orthophotos) یک مدل سطح دیجیتال (DSM) (Digital Surface Model)(مدل رقومی سطح) که معرف سطوح افقی و مایل به صورت تخت است، برای عدم اعوجاج استفاده می‌شود. DSM معرف بازتاب سطحی درختان، بناها و دیگر عوارض بالای سطح زمین و همچنین خود سطح زمین به صورت تخت است. پس می‌توان گفت در اورتوفوتو محور عمودی عکس‌های هوایی حذف نمی‌شود، در صورتی که اورتوفوتوی واقعی، یک عکس تخت متریک است. در کل، می‌توان گفت اورتوفوتوموزائیک، اتصال تصاویر پس از تصحیح تیلت و ناهمواری سطح زمین است در حالی‌که اورتوفوتوموزائیک حقیقی اتصال تصاویر پس از تصحیح تیلت و ناهمواری سطح زمین و عوارض زمینی است.

شکل۳: مقایسه اورتوفوتوموزائیک و اورتوفوتوموزائیک حقیقی
Fig. 3: Comparison of ortho-photomosaic and true ortho-photomosaic



شکل۴: مجموعه داده مبتنی بر هواپیماهای بدون سرنشین: (الف) تصویر ارتوفوتو و (ب) DSM تولید شده.
Fig4: Drone-based dataset: (a) orthophoto image and (b) generated DSM.

استفاده از فتوگرامتری توسط UAS (Unmanned Aircraft Systems) در شرایط بحرانی مانند محیط-های سخت کوهستانی مفید است [14]. بسیاری از هواپیماهای بدون سرنشین (UAV) یا پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور، در بررسی‌های فتوگرامتری از محوطه‌های میراث فرهنگی نیاز به تولید سایر خروجی‌های باستان‌شناسی با کیفیت یکسان بافت و مش دارند. همچنین بحث‌های زیادی در مورد ضرورت ارجاع جغرافیایی به محوطه‌ها برای ادغام در سیستم-های اطلاعات جغرافیایی (GIS) صورت گرفته است. بسیاری از پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور دارای سیستم-های موقعیت‌یابی جهانی (GPS) بر روی خود هستند که در فرادادهٔ تصویر ذخیره می‌شوند [5]. فناوری GPS/IMU پارادایم جدیدی را در فتوگرامتری دیجیتال به ارمغان آورده است. شش پارامتر، مختصات ضبط GPS (X، Y، Z) و جهت ثبت IMU (امگا، فی، کاپا) (omega, phi, kappa)، را پارامتر جهت‌گیری بیرون (EO)(Exterior Orientation) می‌نامند که در فتوگرامتری موردنیاز است. در فتوگرامتری سنتی، پارامتر EO از مثلث هوایی (AT)(Aerial Triangulation) مشتق شده است. همچنین به نقاط کنترل زمینی (GCP) نیاز دارد که به طور مساوی توزیع شوند. روشی که پارامتر EO را مستقیماً از GPS/IMU ثبت می‌کرد، ژئورفرنس مستقیم نامیده می‌شود. بر اساس این توانایی، از نظر تئوری، نیازی به GCP ندارد و می‌تواند جایگزین فرایند AT شود. روش ارجاع جغرافیایی مستقیم را می‌توان به طور گسترده برای تولید اورتوفوتو مورد استفاده قرار داد [15].

اخیراً ترکیبی از بسترهای فتوگرامتری برد کوتاه و UAV به‌طور گسترده‌ای محبوب شده است، که منجر به معرفی عبارت "فتوگرامتری پرنده هدایت‌پذیر از دور" برای شناسایی چنین شرایط کاری شد [16]. به-طورخاص، ادغام فتوگرامتری بردکوتاه زمینی و فتوگرامتری سیستم‌های هواپیمای خلبان از راه دور (RPASs) امکان ایجاد مدل‌های سه‌بعدی دقیق و قابل‌اعتماد از ساختمان‌ها و نظارت بر وضعیت حفاظتی آن‌ها را می‌دهد. استفاده از RPASها در بررسی میراث فرهنگی برای اندازه‌گیری و تشخیص مناطقی که معمولاً نمی‌توان با استفاده از فتوگرامتری زمینی یا اسکنر لیزری زمینی پوشش داد، رواج بیشتری پیدا کرده است [1]. گسترده بودن سیستم‌های هواپیمای خلبان کم‌هزینه و کاربرپسند (RPAS) و دردسترس بودن انواع مختلفی از حسگرها امکان استفادهٔ بیشتر از این سیستم‌ها را برای کاربردهای فتوگرامتری در تولید مدل‌های سه‌بعدی دقیق فراهم می‌کند. در مورد محوطه‌های گسترده و باز یا بناهای تاریخی مرتفع، استفاده یکپارچهٔ تصاویر زمینی و هوایی از RPAS برای جمع‌آوری داده‌های سه‌بعدی کامل از ویژگی‌های عمودی و افقی مفید است. علاوه‌براین، ادغام تصاویر مورب، به‌دست‌آمده با RPAS، امکان ایجاد مجموعه داده‌های کامل‌تر و نماهای غیرقابل دسترس در فتوگرامتری هوایی معمولی را فراهم می‌کند. مزایای ادغام تصاویر زمینی و RPAS، با استفاده مشترک از دوربین‌های مورب، امکان دستیابی به مدل‌های بافت-دار سه‌بعدی با دقت بالا و ویژگی‌های قابل‌اعتماد را فراهم می‌کند. مدل‌های سه‌بعدی مبتنی بر واقعیت بافت تنها محصول بررسی سه‌بعدی بناهای تاریخی نیستند. از آن‌ها می‌توان برای استخراج داده‌های متریک بیشتر، مانند نقشه‌های معمولی دوبعدی و داده-های شطرنجی دوبعدی (تصاویر ارتونما) استفاده کرد. همهٔ این داده‌ها می‌توانند برای برنامه‌ریزی فعالیت‌های مرمت و نظارت (بناهای تاریخی آسیب‌دیده)، ارتقای دارایی‌های میراث ساخته‌شده (با استفاده از ابزارهای تجسم و بازسازی مجازی) و به اشتراک‌گذاری اطلاعات میراث مورد استفاده قرار گیرند [17].

مزایا و معایب پرندهٔ هدایت‌پذیر از دور

قابلیت دستیابی سریع به تصویر که آن را برای کارهای میدانی مناسب می‌کند.

مناطق کوچک را می‌توان به‌راحتی تحت پوشش این سیستم قرار داد تا تصاویر از دو طرف مختلف جسم موردنظر فراهم شود.

پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور فرصتی را برای بررسی مناطق غیرقابل دسترس و خطرناک فراهم می‌کنند که دسترسی مستقیم به آن‌ها با استفاده از سایر سیستم‌ها یا سیستم‌های هوایی خلبانی امکان‌پذیر نیست.
در مقابل، لرزش به دلیل وزن نسبتاً کم و ضربهٔ باد، حداکثر بار قابل تحمل و ادغام سنسورهای مختلف از جمله مشکلاتی است که پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور با آن‌ها روبه‌رو هستند [2].

کنترل از راه دور فعال و غیرفعال

سیستم‌های سنجش از راه دور غیرفعال (Passive remote sensing)، انرژی طبیعی موجود را اندازه‌گیری می‌کنند و به آن‌ها حسگرهای غیرفعال می گویند. به همین دلیل، حسگرهای غیرفعال می‌توانند انرژی را زمانی که انرژی خورشیدی بازتاب‌شده در طول زمان روشنایی خورشید در سطح زمین در دسترس است، تشخیص دهند. هیچ بازتابی از انرژی خورشیدی در شب وجود ندارد. نمونه‌هایی از حسگرهای غیرفعال عبارت هستند از سری Landsat، سری IRS، سری SPOT، IKONOS، Quickbird.
حسگرهای فعال منبع انرژی خود را برای ویژگی‌های مورد بررسی دارند. انرژی منعکس‌شده از هدف توسط سنسور فعال ثبت می‌شود. بنابراین، یکی از مزایای اصلی سنسورهای فعال، توانایی آن‌ها در ثبت انرژی در هر زمان، صرف نظر از زمان روز یا فصل است. به عنوان مثال، عکاسی با فلاش در مقایسه با عکاسی با نور موجود، که غیرفعال است، با سنجش از راه دور فعال کار می‌کند. حسگرهای فعال به گونه‌ای طراحی شده‌اند که می‌توان از آن‌ها برای سنجش در طول موج‌هایی استفاده کرد که به اندازهٔ کافی توسط خورشید در سطح زمین ارائه نمی‌شوند، به‌عنوان مثال امواج مایکروویو، نمونه‌هایی از سنسورهای فعال رادار دیافراگم مصنوعی (SAR) یا LiDAR هستند [18].

۳-۳. تکنیک‌های فتوگرامتری

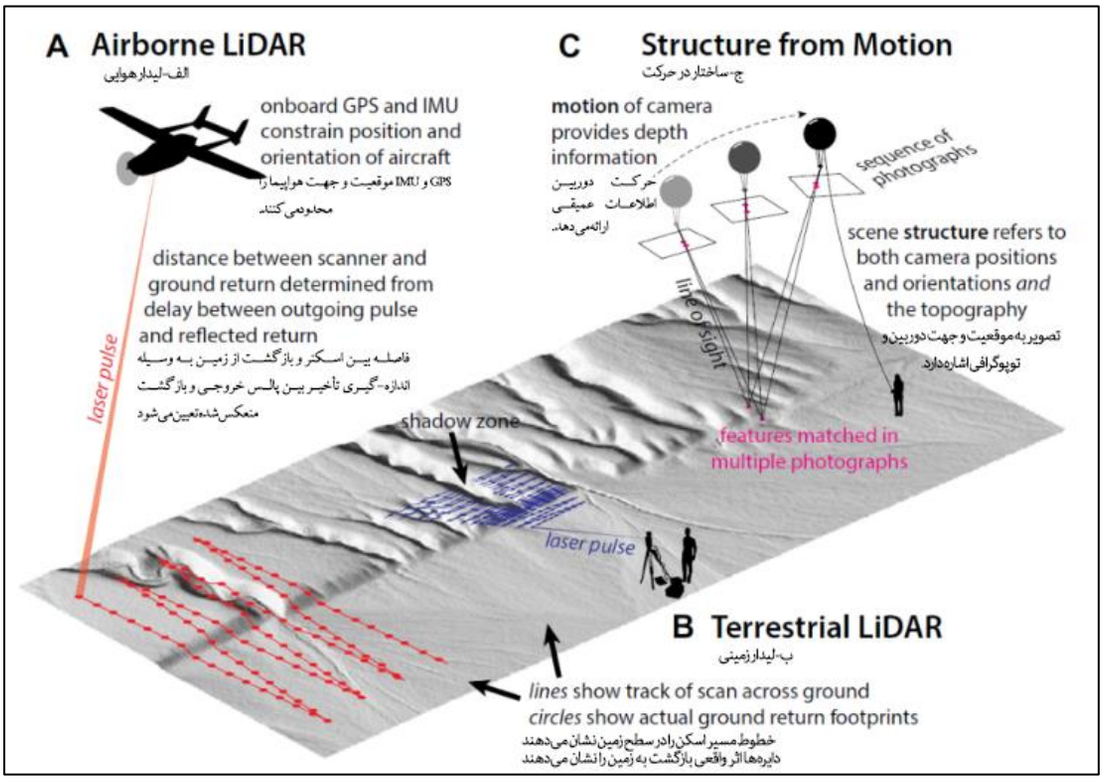
- ساختار در حرکت (SfM) (Structure from Motion) که در آن جهت‌ها و موقعیت‌هایی را که هر تصویر گرفته شده، مشخص است.
- تبدیل مقیاس ثابت (SIFT) (Scale-Invariant Feature Transform) که می‌تواند ویژگی‌های بالقوه برای تطبیق عکس‌ها را تشخیص دهد [6].
- تطبیق استریوی متراکم (DSM) (Digital Surface Model) [8].

۳-۳-۱. SfM

SfM یک روش فتوگرامتری برای ایجاد مدل‌های سه بعدی از یک شیء یا توپوگرافی است که از روی هم قرار گرفتن عکس های دوبعدی که از مکان ها و جهت‌های مختلف گرفته شده بازسازی صحنه عکاسی را انجام می‌دهد. در چارچوب تکنیک‌های فتوگرامتری مبتنی‌برتصویر، ساختار از حرکت (SfM) به دلیل انعطاف‌پذیری، سهولت استفاده و مقرون به‌صرفه بودن یکی از پرکاربردترین آن‌ها است. رویکرد SfM مسئلهٔ موقعیت‌یابی دوربین و هندسهٔ صحنه را به طور همزمان و به طور خودکار بر اساس ویژگی‌های مطابقت در چندین تصویر همپوشان و افست حل می‌کند [17]. یکی از مسائل اصلی در مورد این روش، ضرورت تدوین پروتکلی برای "هزینه کم با پاسخ بهینه" (LCOR) دیجیتالی شدن نقشه‌نگاری تاریخی است. دارندگان اسناد قدیمی، افراد ثروتمند و بسیاری از مؤسسات و مجموعه‌داران هستند که منابع آن‌ها کمتر در دسترس است [7]. کاربردهای SfM در بسیاری از زیرشاخه‌های زمین‌شناسی، باستان‌شناسی، معماری و کشاورزی گسترده هستند. SfM علاوه بر تصاویر تصحیح‌شده، مجموعه داده ابر متراکم را تولید می‌کند که از بسیاری جهات شبیه به داده‌های تولید شده توسط لیدار هوایی یا زمینی است [19].

SfM/MVS

استفاده از الگوریتم‌های MVS (Multi View Stereo) امکان متراکم‌سازی ابرنقطهٔ ایجاد شده توسط رویکرد SfM را فراهم می‌کند [1]. به‌این‌ترتیب، می‌توان ابرهای دقیق، رنگی و نقطه‌ای بسیار متراکم‌تر از ابرهای پراکندهٔ مشتق از SfM تولید کرد. ترکیبی از الگوریتم‌های SfM/MVS و تصاویر هوایی به‌دست آمده توسط UAS (سیستم‌های هوایی بدون سرنشین) در نقشه‌برداری فتوگرامتری انقلابی ایجاد کرده و امکان دستیابی به مدل‌های سه‌بعدی را از طریق جمع-آوری و پردازش داده‌های کم‌هزینه، سریع و با کیفیت بالا فراهم کرده است. رویکرد SfM/MVS برای شناسایی ساختارهای پیچیده، هم با بررسی زمینی و هم از طریق پلتفرم پرندهٔ هدایت‌پذیر از دور، با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است [16]. تکنیک‌های پرندهٔ هدایت‌پذیر از دور و ساختار از حرکت (SfM) می‌توانند نسخهٔ دیجیتالی را از محوطه‌هایی ارائه دهند که غیرقابل‌دسترس یا در معرض فرسایش و تخریب هستند [5].

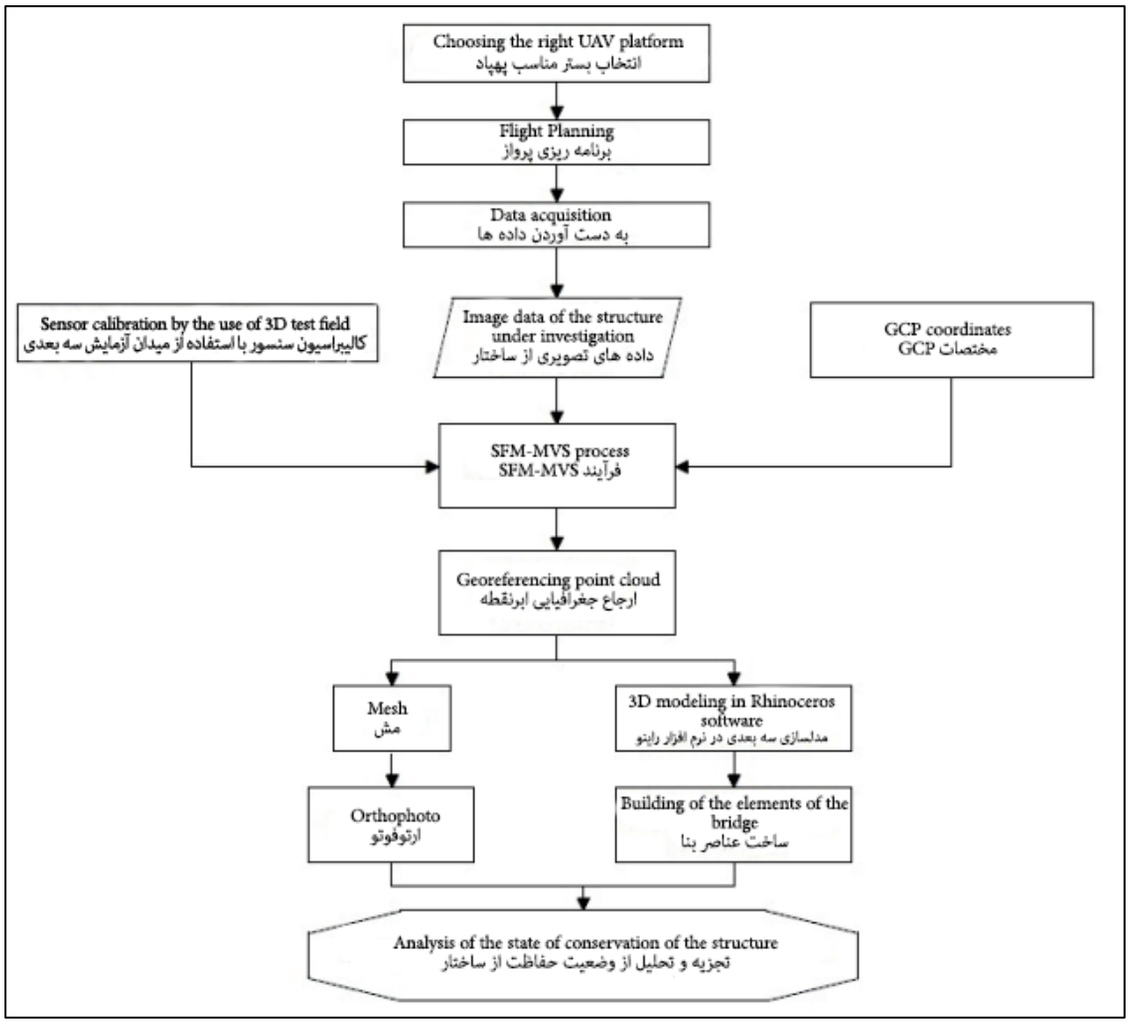


شکل ۵: مقایسه SfM با روش‌های لیدار هوایی و زمینی [17].

Fig. 5: Comparison of SfM with aerial and ground Lidar methods

توضیحات تصویر: IMU: به معنای «واحد اندازه‌گیری لختی» است

IMU سنسورهایی همانند شتاب‌سنج‌ها، ژیروسکوپ‌ها، و جاذبه‌سنج‌ها را دربرمی‌گیرد.



شکل۶: گردش کار روش توسعه یافته با ترکیبی از الگوریتم‌های SfM/MVS و پرندهٔ هدایت‌پذیر از دور [16].

Fig. 6: Workflow method developed with a combination of a combination of SfM / MVS algorithms and UAVs

روش‌کار SfM

روش SfM امکان بازسازی شیء سه‌بعدی را از مجموعه‌ای از تصاویر به‌دست‌آمده از نقاط مشاهدهٔ مختلف با استفاده از دو مرحلهٔ زیر فراهم می‌آورد: جستجوی مطابقت‌ها و مرحلهٔ بازسازی [14]. روشی که به وسیلهٔ آن مدل سه‌بُعدی از تصاویر در نرم‌افزار به‌دست آید در مراحل اصلی زیر خلاصه می‌شود:

- تراز کردن تصاویر

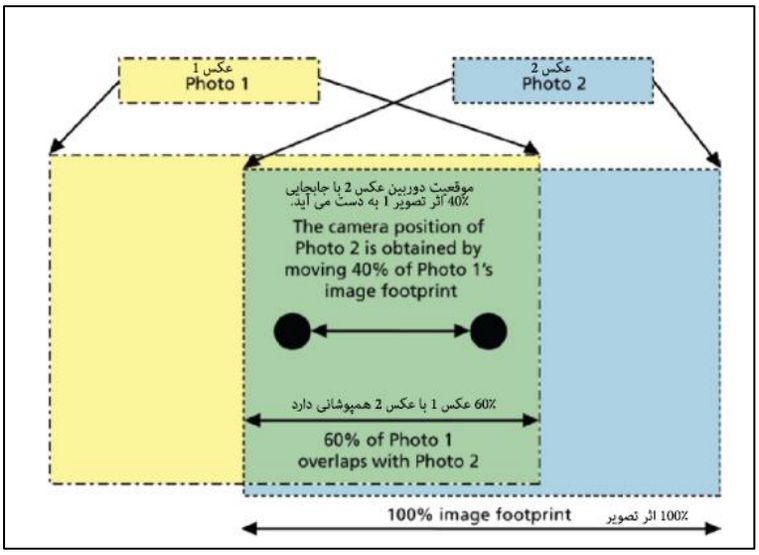
نقاط کلیدی هماهنگ، تشخیص داده می‌شوند و با تصاویر همپوشانی مطابقت می‌یابند. قبل از انجام هم‌ترازی تصویر، موضوع موردنظر باید از موارد پس‌زمینه جدا شود (به‌دلیل تغییرات در محیط اطراف در تصاویر به‌دست‌آمده به وسیلهٔ دیدهای کاملاً متفاوت، این مرحله هم سبب کاهش تلاش محاسباتی می‌شود و هم خطر خطاهای تطبیق را کاهش می‌دهد)

- ساخت ابر نقطه‌ای متراکم

نرم‌افزار یک ابرنقطه‌ای متراکم ایجاد می‌کند که به تنظیمات انتخاب شده بستگی دارد: تنظیم "فوق‌العاده بالا" به معنی پردازش تصاویر در اندازهٔ کامل است، درحالی‌که با "زیاد"، "متوسط"، "پایین" و" پایین‌ترین"، تصاویر به ترتیب ۵۰٪ ، ۲۵٪ ، ۱۲٫۵٪ و ۶٫۷۵٪ کوچک می‌شوند.

- ساخت مش

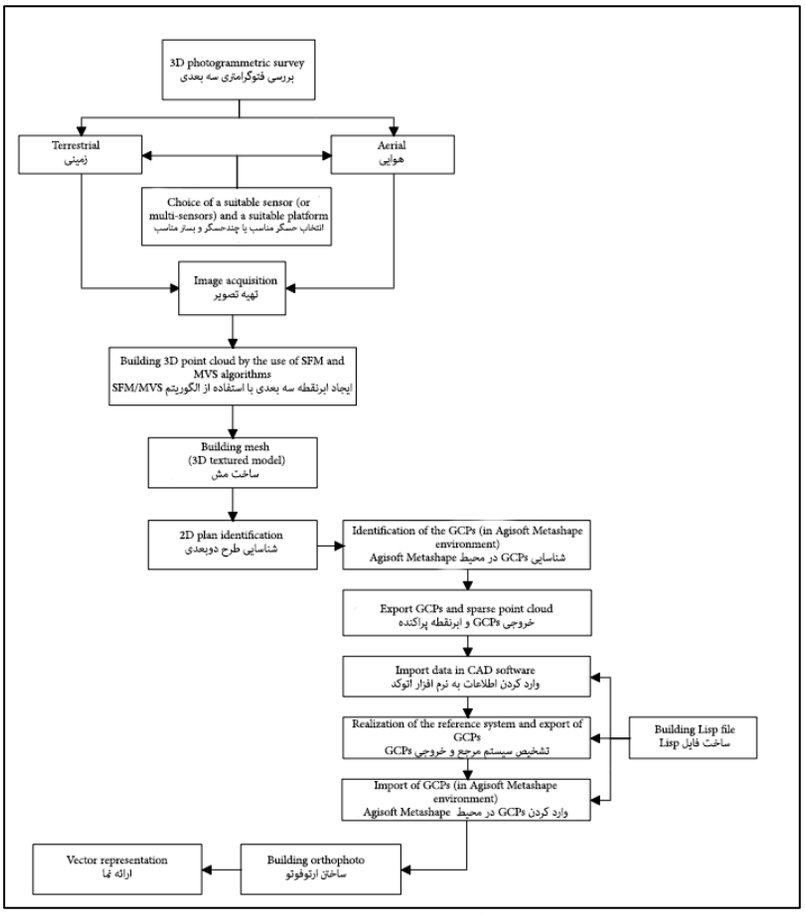
در این‌مرحله، مش‌های مثلثی بافت‌دار از ابرهای نقطه‌ای متراکم به‌دست می‌آیند [14] و [16].



شکل۷: مفهوم همپوشانی بین تصاویر [7].

Fig7: The concept of overlap between images

تصویر ارتوی تعریف شده در پایان فرایند SfM نشان‌دهندهٔ خروجی متریک است که می‌تواند در داخل یک پلتفرم CAD وارد و به عنوان تصویر مرجع برای ترسیم خطوط اصلی استفاده شود [11].



شکل۸: روش به دست آوردن مدل سه‌بعدی و نمایش دوبعدی [14].

Fig. 8: getting a 3D model and a 2D display

توضیحات نمودار شکل ۸:
Lisp: یک نوع زبان برنامه‌نویسی است که با استفاده از آن قابلیت‌های نرم افزار AutoCad به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.
GCP: نقاط کنترل زمینی.

مزایای SfM هزینهٔ پائین در مقایسه با لیدار و همچنین سهولت استفاده است. تنها تجهیزات موردنیاز یک دوربین و برای پردازش داده‌ها به کامپیوتر و نرم‌افزار نیاز است. یک وسیلهٔ هوایی مانند بالون یا هواپیمای بدون سرنشین نیز می‌تواند برای نقشه‌برداری توپوگرافی مفید باشد. یک محدودیت عمدهٔ زمان پردازش نرم‌افزار موقع تراز کردن تصاویر برای ایجاد یک مدل باید پی‌ریزی شود، که از ۱۰ دقیقه برای چند عکس تا چند روز برای ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ عکس متغیر است. از آنجا که SfM به تصاویر نوری متکی است، نمی‌تواند محصولات توپوگرافی "زمین فاقد پوشش گیاهی" را که مشتقات معمولی فناوری‌های مبتنی بر لیدار هستند تولید کند. بنابراین، SfM معمولاً برای مناطق دارای پوشش‌گیاهی محدود، مناسب است [19].

۳-٤. ابزار فتوگرامتری

بسته به برنامهٔ کاربردی و هدف بررسی، می‌توان یک دوربین را در وسایل متعدد نصب کرد تا تصاویر را برای پردازش SfM ثبت کند. این بخش، مقدمه‌ای بر وسایل مختلف ارائه می‌دهد که می‌تواند برای به‌دست‌آوردن تصاویر استفاده شود (جدول۱) [19].

جدول ۱: هزینه، مزایا و معایب پلتفرم‌های رایج SfM [19].
Table 1: Cost, advantages, and disadvantages of common SfM platforms [19]

Platform وسیله نصب دوربین	Cost قیمت	Advantages مزایا	Disadvantages معایب
Person (hand-held) شخص (دستی)	$0 صفر دلار	Cost, good for detail work (characterize specific, small-scale features), potentially more efficient for ou tcrop scale work بی‌هزینه، مناسب برای مشخص کردن ویژگی-های خاص، به طور بالقوه برای کارهای مقیاس بزرگتر کارآمدتر است.	Limited applications; not useful for areas larger than 100-200 square meters برنامه‌های کاربردی محدود؛ برای مناطق بزرگتر از ۱۰۰-۲۰۰ مترمربع مفید نیست.
Pole ستون یا تیرک	~$50-250, depending on pole height. Can purchase kits online, but building your own is often more economical. بسته به ارتفاع ستون، ۵۰ تا ۲۵۰ دلار	Cost, ease of use/ease to set up, good for certain kinds of features (slope underneath an overhang, for example) هزینه، سهولت استفاده، سهولت راه‌اندازی، برای انواع خاصی از ویژگی‌ها مناسب است (برای مثال شیب یک سرازیری)	Must build mount for camera, limitation for maximum pole height, inefficient in comparison to UAV لزوم وجود پایه برای دوربین، محدودیت حداکثر ارتفاع Pole ناکارآمد در مقایسه با پرنده هدایت‌پذیر از دور
Balloon بالون	~$300-5000 – building your own system is inexpensive, but systems on the market can be significantly more expensive because they can include video systems to view what the camera is viewing. A weather balloon is approx. $100, the picavet mount is approx. $50, kite line ~$20, and helium ~$180 for an appropriately sized tank ۳۰۰ تا ۵۰۰۰ دلار	Cost (unless you purchase a commercial version), simplicity, camera orientation (can shoot straight down, unlike many pole setups), height. Balloons are a good option for topographic mapping applications. Tether provided by the line removes legal complications associated with UAVs کم‌هزینه، ساده، جهت دوربین (امکان عکس‌برداری مستقیم به سمت پایین برخلاف بسیاری از روش‌ها)، ارتفاع. گزینه مناسب برای نقشه‌برداری توپوگرافی	Easier with 2 people rather than 1, affected by the wind, requires picavet mount (build or purchase), requires helium (a limited resource) نیاز به حضور دو نفر، تحت‌تأثیر باد، نیاز به پیکاوت (ساخت یا خرید)، نیاز به هلیوم

Kite بادبادک	Cost depends on the weight of the camera mount system. Kites can be used with v. lightweight cameras and cost around $50; kites made for aerial photography can cost $100-400. For both options, you will need to purchase or build a picavet for $50. هزینه بستگی به وزن سیستم نصب دوربین دارد. بادبادک‌ها را می‌توان با دوربین‌های سبک وزن با هزینه حدود ۵۰ دلار استفاده کرد. بادبادک‌هایی که برای عکاسی هوایی ساخته شده‌اند ۱۰۰ تا ۴۰۰ دلار هزینه دارند. برای هر دو، باید ۵۰ دلار پیکاوت بخرید یا بسازید.	Cost, height, camera orientation (can shoot straight down, unlike many pole setups), similar range to a balloon but no helium! Well suited to topographic mapping applications. Tether provided by the line removes legal complications associated with UAVs کم‌هزینه، مرتفع، جهت دوربین (بر خلاف بسیاری از ستون‌های قطبی می‌تواند مستقیماً عکسبرداری کند)، مناسب برنامه‌های نقشه-برداری توپوگرافی.	Dependent on weather, must build/purchase picavet for camera, kite line can get in the way of photographs, kite must be large/have good "lift" بسته به آب‌وهوا، باید پیکاوت برای دوربین تهیه شود، نخ بادبادک می-تواند مانع عکس‌ها شود، بادبادک باید بزرگ باشد و بالابر خوبی داشته باشد.
UAV – motorized glider, multi-rotor copter (quad-, hexa- or octa-) پرنده هدایت‌پذیر از دور، گلایدر موتوری هلی‌کوپتر چند روتور (۴، ۶ یا ۸)	Cost is highly variable; a motorized glider is around $200-300 + cost of picavet; quadcopters can range from $400$5000 or more depending on their capabilities. هزینه بسیار متغیر است؛ یک گلایدر موتوری حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ دلار + هزینه پیکاوت دارد. بسته به توانایی، کوادکوپترها بین ۴۰۰ تا ۵۰۰۰ دلار هزینه دارند.	Height, camera position may be controlled and survey flightlines can be pre-planned and automated, GNSS integration for efficiency ارتفاع، موقعیت دوربین را می‌توان کنترل کرد و خطوط پرواز را می‌توان از قبل برنامه‌ریزی و برای کارآیی ادغام شد.GNSS[1] خودکار کرد،	Cost, requires a skilled operator, length of survey depends on the charge of, may require light camera setup. Potentially dangerous if improperly operated. Legal landscape for use of UAVs for anything more than recreation is unclear, and users should consult legal counsel before operation. پرهزینه، نیاز به اپراتور ماهر، طول بررسی بستگی به هزینه دارد، ممکن است به تنظیم نور دوربین نیاز شود. در صورت عدم کارکرد صحیح خطرناک است. نیاز به هم آهنگی‌های حقوقی.

۳-٤-۱. دوربین

امروزه دوربین‌های حرفه‌ای یا نیمه‌حرفه‌ای دیجیتال تک‌لنز رفلکس (DSLR) را می‌توان با قیمت نسبتاً مناسبی خریداری کرد. در مورد شرایط روشنایی، اگر نور کافی نیست، استفاده از چراغ‌های مصنوعی کمکی (به‌عنوان مثال پانل‌های LED عکاسی) توصیه می-شود [7]. در ادامه، لیستی از دستورالعمل‌های کلی که هنگام انتخاب دوربین باید رعایت شود، به جای پیشنهاد یک دوربین خاص، ارائه شده است:

- وزنی که پلتفرم قادر به حمل آن است در نظر گرفته شود. به‌عنوان مثال، یک بادکنک بزرگ می‌تواند یک دوربین سنگین‌تر از بادبادک را حمل کند.
- نظرات در مورد مفید بودن دوربین‌های DSLR در مقابل دوربین‌های کامپکت متفاوت است. بیشتر توصیه می‌شود از DSLR یاPoint-and-Shoot [۷] که دارای سطوح ISO سریعتر از حدّ متوسط هستند، استفاده شود.
- GPS: اگر دوربینی که انتخاب می‌شود GPS ندارد، بهتر است برای کمک به پردازش داده‌ها،

یک برچسب GPS[8] خریداری شود تا ابر نقطه‌ای با موقعیت مکانی دقیق‌تر تولید شود.

- عکسبرداری: دوربین باید در فواصل معین عکس بگیرد. توصیه می‌شود از دوربین‌هایی دارای تایم-لپس (فاصله‌سنج) استفاده شود.
- وضوح دوربین: ۱۲ مگاپیکسل یا بیشتر باشد.
- فرمت تصویر: فایل‌های تصویری RAW مفید هستند.
- نوردهی و فوکوس دستی: این امر سبب می‌شود تصاویر از نوردهی مشابهی برخوردار باشند.
- از لنزهای فوق‌عریض مانند آن‌هایی که در GoPro[9] یافت می‌شوند، استفاده نشود.
- از دوربین فیلمبرداری استفاده نشود. الگوریتم‌های SfM به دلیل تفاوت در نحوهٔ عملکرد شاتر با تصاویر ضبط شده از ویدئو به خوبی کار نمی‌کنند [19].

۳-٤-۲. رایانه

از آنجا که توسعه در محیط SfM نیاز به عملکرد بالایی از رایانهٔ شخصی دارد، مشخصات فنی رایانه نقش مهمی دارد. اصلی‌ترین ویژگی رایانه مورد استفاده برای کار عبارت هستند از: CPU (واحد پردازش مرکزی): Intel Core i7 چهار هسته‌ای، سوکت LGA 1150، مادربرد با ۴ اسلات DDR3, RAM: DDR3-1600, 4 × 4 GB (16 GB total) و کارت گرافیک Nvidia GeForce GTX 980 (واحد پردازش گرافیک) [15].

۳-٤-۳. نرم‌افزار

سه نرم افزار پردازش دیجیتال فتوگرامتری Agisoft Metashape (معروف به Agisoft Photoscan قبل از نسخه ۱,۵)، BentleyContextCapture و RealityCapture است [5]. بررسی‌ها نشان می‌دهند که RC موفق‌ترین نرم‌افزار از این سه نرم‌افزار است.

٤. نمونهٔ موردی VILLA LAMPEDUSA AI COLLI

این ویلا در سال ۱۷۲۱ میلادی در پالرمو ساخته شد و یکی از مهمترین بناهای تاریخی شهر است. هدف از این پروژه، ایجاد یک مدل سه‌بعدی دقیق و قابل اعتماد از ویلا، از طریق ادغام روش‌های مختلف، به‌منظور استفاده از آن برای فعالیت‌های مرمت و حفاظت در آینده بود. یک پژوهش یکپارچه با فتوگرامتری از راه-دور و فتوگرامتری RPAS برای بازسازی مدل دیجیتالی سه‌بعدی مجموعه طراحی و اجرا شد. در پروژهٔ حفاظت و مرمت به منظور انجام تجزیه و تحلیل بیشتر، یک مدل دیجیتالی سه‌بعدی بسیار دقیق و تصاویر ارتو با وضوح بالا از نماها به دست آمد. فراتر از یک ارزیابی کاملاً متریک، مدل بافت سه‌بعدی برای ایجاد نمایش‌های دوبعدی (مفید برای اهداف مستندنگاری و برجسته‌سازی مناطق آسیب‌دیده) استفاده شد [1].

٤-۱. گرفتن تصاویر زمینی

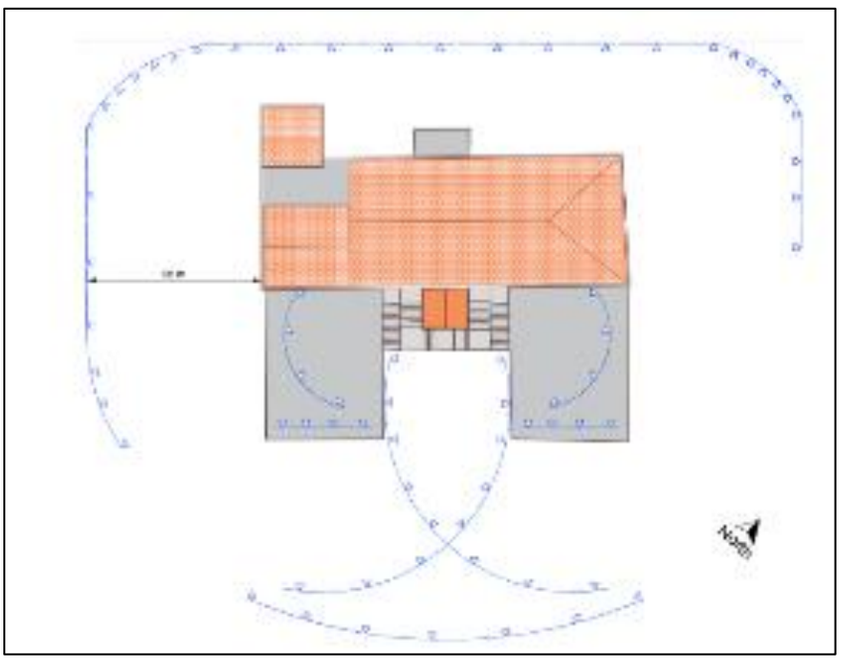
تهیهٔ تصاویر زمینی برای پوشش کامل نما و با استفاده از دوربین دیجیتال Nikon D5000 با سنسور CMOS 12.3 مگاپیکسلی ۲۳,۶ میلی‌متر در ۱۵,۸ میلی‌متر و لنز کانونی ۳۵ میلی‌متر انجام شد. تصاویر همگرا از طرف‌های شمال‌شرقی، شمال‌غربی و جنوب-غربی در فاصلهٔ حدود ۲۸ متر برای دستیابی به فاصله نمونه زمینی (GSD) ۵ میلی‌متر و به‌طورکلی ۱۷۲ تصویر زمینی تهیه شد [1].

٤-۲. گرفتن تصاویر RPAS

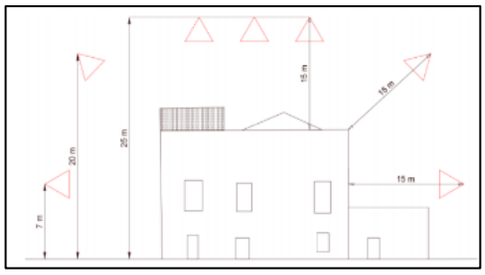
برای ایجاد یک تصویر RPAS کامل، با محورهای نوری دوربین موازی و مورب، در فواصل مختلف از ساختمان و ارتفاع متفاوت پرواز انجام شد. دستیابی به تصاویر هوایی با استفاده از RPAS NT4 Contras تولید شده توسط Airvision انجام شد. این سیستم چندحرکتی از جنس فیبر کربن است که از هشت موتورالکتریکی، تجهیزات الکترونیکی مورد نیاز برای

کنترل از راه دور و پرواز اتوماتیک تشکیل شده است. وزن آن حدود ۶۰۰ گرم و حداکثر زمان پرواز در آن حدود ۱۵ دقیقه است. این سیستم مجهز به دوربین دیجیتال Nikon Coolpix S3300 با سنسور CCD 16 مگاپیکسلی ۴/۴ میلی‌متر در ۶/۱۶ میلی‌متر است. این دوربین بر روی یک گیمبال[۱۰] نصب شده‌است که به چرخش‌های کنترل‌شده ۹۰ درجه در امتداد محور افقی اجازه می‌دهد تا تصاویر عمودی یا مورب را به‌دست آورند. به منظور دستیابی به مستندات کامل ساختمان، سه پرواز، برنامه‌ریزی‌شده بود تا تصاویری با نمای نادیرال به پشت‌بام، مایل و موازی به نما تهیه شود [1].

شکل۹: نمای اصلی ویلا لامپدوسا آی کولی
Fig. 9: Main view of Villa Lampdosa i Cooli



شکل۱۰: شبکه دوربین زمینی
Fig. 10: Ground Camera Mesh



شکل۱۱: طرح استفاده RPAS
Fig11: RPAS usage plan

٤-٣. پردازش داده‌ها

پردازش داده‌ها برای به‌دست‌آوردن یک مدل سه‌بعدی از ساختمان و تصویر ارتو و ترسیم دوبعدی نما انجام شد. جهت تصویر و بازسازی سه‌بعدی با بسته Agisoft Photoscan Professional Edition انجام شد. جهت‌گیری تصویر و بازسازی سه‌بعدی با گردش معمول Agisoft Photoscan صورت گرفت که شامل این مراحل می‌شود: جهت‌گیری خودکار تصویر با SfM، تنظیم بلوک بسته نرم‌افزاری، تطبیق تصویر متراکم برای ایجاد ابرنقطهٔ سه‌بعدی، بازسازی سه‌بعدی با مش چندضلعی، نقشه‌برداری بافت و ارتو و تولید تصویر [1].

٤-٤. محصول نهایی

برای دستیابی به اسناد بنای تاریخی، یک پروژه کامل کار شد که مجموعه دادهٔ زمینی و هوایی را ادغام کرد. یک مدل سه‌بعدی بسیار دقیق از بنا ایجاد شد. سرانجام، تولید تصاویر ارتو برای نما و سقف، امکان تولید نقشه‌های دوبعدی و نقشه‌های آسیب‌های بنا را فراهم می‌کند [1].

شکل ۱۲: مدل سه‌بعدی بافت‌دار
Fig12: Textured three-dimensional model

شکل۱۳: تصویر کاملاً عمودی که از بالا گرفته شده‌است.
Fig13: Ortho-image of Nadir

شکل۱۴: نقشه آسیب‌های قابل‌توجه در نمای جنوب‌شرقی
Fig14: Map of significant damage in the southeast view

شکل۱۵: ارتو–تصویر نمای جنوب‌شرقی
Fig15: Ortho-southeastern view image

۵. بحث و تحلیل

پیشرفت علوم مختلف مرتبط با فتوگرامتری سبب شده که توان‌مندی‌ها و قابلیت‌های این علم در عرصهٔ عمل و اجرا نیاز به به‌روزرسانی دائم داشته باشد. رجوع به مقالات علمی منتشر شده در سال‌های اخیر، یکی از روش‌مندترین شیوه‌هایی است که امکان آشنایی با جدیدترین دستاوردها را در این عرصه فراهم می‌کند. بر همین اساس، به عنوان جمع‌بندی مطالب ارائه شده

در مقاله، به بررسی ۲۰ مقالهٔ علمی معتبر از پنج سال اخیر در حوزهٔ علم فتوگرامتری به ترتیب سال انتشار پرداخته می‌شود (جدول۲).

جدول ۲: بررسی ۲۰ مقالهٔ علمی معتبر از پنج سال اخیر در حوزه علم فتوگرامتری

Table 2: Review of 20 valid scientific articles from the last five years in the field of photogrammetry

شماره	عنوان مقاله	نویسنده	سال	موضوع	هدف	نتیجه‌گیری
1	مستندسازی؛ تکنیک‌ها، پتانسیل‌ها و محدودیت‌های میراث فرهنگی	F. Hassani	2015	مستندنگاری میراث معماری	تمرکز این مقاله بر روی کاربران غیرفنی خواهد بود که نیاز به درک کلی از ابزارهای نوظهور دارند.	به‌کارگیری طیف گسترده‌ای از فناوری‌ها برای مستندنگاری متریک میراث فرهنگی، تعدد گزینه‌های مناسب را تأیید می‌کند. یک روش واحد نمی‌تواند دقت موردنظر را تضمین کند و همیشه موانع و مشکلاتی وجود دارد که توانایی‌های یک تکنیک را محدود می‌کند و ترکیبی از تکنیک‌های مختلف برای دستیابی به نتیجهٔ مطلوب لازم است.
2	راهنمای مقدماتی ساختار در حرکت	Shervais	2015	SFM	استفاده ساختار در حرکت در برنامه‌های تحقیقاتی	الگوریتم‌ها نحوهٔ استفاده از SFM را در عمل، توضیح می‌دهند.
3	فتوگرامتری و اسکن لیزری برای بازسازی و مرمت بناهای تاریخی [20]	Golovina et al.	2016	فتوگرامتری و لیزر اسکن	شرح روش‌های اسکن لیزری و فتوگرامتری با کاربرد وسیع در معماری و کاربرد آن‌ها در علم اندازه-گیری	فتوگرامتری برای مقاصدی مناسب است که دقت بالا لازم ندارد و مزیت اصلی آن امکان دریافت مدل بافت‌دار (رنگ، جنس مواد) است. اما مدل حاصل از اسکن دقت هندسی بسیار بالاتری دارد.
4	فتوگرامتری تاریخی و اسکن لیزر زمینی برای بازسازی سه بعدی مجازی ساختارهای تخریب شده: مطالعه موردی در ایتالیا، آرشیو بین‌المللی فتوگرامتری	G. Bitelli et al.	2017	فتوگرامتری تاریخی و لیزر اسکن	فتوگرامتری امکان بازیابی خصوصیات هندسی و مادی ساختارهای تخریب شده، ساخت مدل سه‌بعدی برای مستندسازی، مطالعه و حفظ آن‌ها و امکان آناستیلوز واقعی را فراهم می‌آورد.	کالیبراسیون وجهت‌گیری تصاویر با استفاده از اطلاعات هندسی به-دست آمده توسط یک بررسی اسکنرلیزر زمینی به‌دست آمده است. علی‌رغم کمیابی و کیفیت ضعیف تصاویر موجود، روش فتوگرامتری انجام شده، به لطف استفاده از ابزارهای محدودکننده هندسی ارائه شده توسط نرم‌افزار انتخاب شده، امکان بازسازی کامل را فراهم آورد.

5	تولید مدل‌های سه بعدی بصری زیبا و دقیق از شهرهای تاریخی با استفاده از اسکن لیزری و فتوگرامتری دیجیتال	Balsa et al.	2017	فتوگرامتری و لیزر اسکن	تولید مدل‌های مجازی سه بعدی شهرهای تاریخی ترکیب اسکن لیزری و تکنیک‌های فتوگرامتری به‌عنوان مکمل یکدیگر	تهیه یک مدل مجازی سه‌بعدی با دقت هندسی و بصری بالا و کامل که در یک برنامه مبتنی بر وب ادغام می‌شود. استفاده برای تبلیغات گردشگری، ناوبری، برنامه ریزی شهری، مستندسازی و حفظ میراث فرهنگی
6	مدل‌سازی و ترسیم نقشه‌های آسیب‌نگاری نما در بافت تاریخی شهری با فتوگرامتری پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور فوق‌سبک	Russo et al.	2018	برداشت نما با فتوگرامتری پرنده هدایت‌پذیر از دور	کاربرد هواپیمای بدون سرنشین بسیار کوچک و سبک وزن (کمتر از ۳۰۰ گرم) مجهز به دوربین ارزان، مناسب برای کار در فضاهای بسیار باریک	تجزیه و تحلیل نمای عظیم بنای تاریخی در بولونیا و تأیید اعتبار نتایج انجام شده توسط یک اسکنر لیزری ۳D. تهیه نقشه آسیب نگاری با روشی کم‌هزینه، سریع و آسان
7	از فوتوگرامتری معماری تا آموزش میراث معماری دیجیتال	Baik et al.	2018	فتوگرامتری	ادغام دانش مدل‌سازی و تجسم سه‌بعدی برای شناسایی، طراحی و ارزیابی یک مدل آموزشی	دانش‌آموزان در آزمایش دانشگاهی، نماها و الگوهای مجازی را بر اساس تکنیک فتوگرامتری اندازه‌گیری و مدل سازی کردند.
8	مدل‌سازی سه‌بعدی یک بنای تاریخی با استفاده از فتوگرامتری برد کوتاه و سیستم هواپیمای از راه دور (rpas)	M. Lo Brutto et al.	2018	فتوگرامتری برد کوتاه و RPAS	مستندسازی و ساخت مدل دیجیتالی سه‌بعدی یک مجموعه تاریخی با تلفیق فتوگرامتری راه دور و فتوگرامتری RPAS	استفاده از RPAS، با تصاویر کاملاً عمودی که از بالا و مورب گرفته می‌شود، امکان بررسی کامل ساختمان، از پشت‌بام تا سطح زمین را فراهم کرد.
9	فتوگرامتری برد کوتاه پرنده هدایت‌پذیر از راه دور کوچک برای بررسی معماری	L. Carnevali et al.	2018	فتوگرامتری پرنده هدایت‌پذیر از راه دور کوچک	بررسی کاربرد RPAS بسیار کوچک (کمتر از ۳۰۰ گرم)، مجهز به دوربین کم هزینه در فتوگرامتری برد کوتاه نمای یک بنای تاریخی	یک تصویر قابل اعتماد از نما با کیفیت هندسی مناسب و مدل‌های سه‌بعدی با رزولوشن بالا که برای تجزیه و تحلیل و نمایش جزئیات معماری مفید است.
10	با استفاده از فتوگرامتری دیجیتال و تجزیه‌وتحلیل سه بعدی، تکنیک‌های تشخیص آسیب در بناهای تاریخی پیشرفت می‌کند [24].	Alessia Galantucci et al.	2018	فتوگرامتری دیجیتال	ایجاد یک روش تجزیه و تحلیل و تشخیص آسیب در مدل‌های سه‌بعدی، غنی از اطلاعات در مورد عمق و حجم	استفاده از مدل‌های سه‌بعدی مانند ابرهای نقطه یا مش‌های چندضلعی برای معرفی آسیب‌ها (ترک‌ها یا ویژگی‌های ناشی از زوال مصالح)
11	فتوگرامتری: روش‌های بررسی و کاربردهای مربوط به کارهای مرمت	Genin et al.	2019	فتوگرامتری روش مستندنگاری	آسیب‌نگاری دقیق در پروژه حفاظت از طاق‌های صومعه Jerónimos	فتوگرامتری روشی سریع برای به‌دست آوردن مدل سه‌بعدی، از طریق ابر متراکم نقاط است که بیشترین استفاده را در پروژه‌های مرمت اخیر دارد.

12	فتوگرامتری معنایی (semantic photogrammetry): تقویت بازسازی سه‌بعدی مبتنی بر تصویر با برچسب‌گذاری معنایی [21].	Stathopoulou	2019	فتوگرامتری معنایی	پتانسیل استفاده از برچسب های تصویر (image labels) برای شروع بازسازی سه‌بعدی	بهبود عملکرد در کیفیت بازسازی سه‌بعدی و قابلیت انتقال نتایج برچسب زدن و به‌دست آوردن یک مدل سه‌بعدی برچسب خورده
13	فتوگرامتری SFM به عنوان یک روش غیرتهاجمی برای دیجیتالی کردن اسناد تاریخی: رویکردی انعطاف‌پذیر و کم هزینه	Brandolini et al.	2019	SFM	ارزیابی یک استراتژی کم هزینه و بسیار انعطاف‌پذیر برای دیجیتالی شدن نقشه ها و اسناد تاریخی از طریق فتوگرامتری دیجیتال با استفاده از سنسورهای تجاری ارزان قیمت	استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی سه‌بعدی روشی قابل‌اعتماد برای کنترل روند زوال اجتناب‌ناپذیر اسناد تاریخی به دلیل افزایش سن است. تنها با مستندسازی نسخه-های اصلی می‌توان خطر از دست دادن داده‌های غیرقابل تعویض را کاهش داد. یکی دیگر از کاربردهای مفیدی که با دیجیتالی شدن نقشه‌نگاری تاریخی امکان-پذیر شده است، مدیریت مجموعه داده‌ها در محیط‌های GIS است.
14	نقش روش توپوگرافی پیچیده (فوتوگرامتری و اسکن لیزر) و تحقیقات GPR در مطالعه آسیب‌پذیری صومعه سانتا ماریا ماره، جزایر ترمیتی ایتالیا [23].	Cozzolino et al.	2019	فتوگرامتری و لیزر اسکن وGPR	تعریف مداخلات مرمتی، بر اساس بررسی‌های متریک سه‌بعدی (فتوگرامتری و اسکنر لیزری) و بررسی‌های غیرتهاجمی ژئوفیزیکی (تکنیک رادار نفوذ به زمین)	استفاده از تکنیک‌های آزمایش غیرمخرب در مقیاس‌های مختلف و ابزارهای ارزیابی ویژگی‌های بنا، شناخت وضعیت حفاظت و ایمنی ساختمان را فراهم کرده است.
15	از فتوگرامتری آنالوگ تا دیجیتال: مستندسازی Padise Abbey در دو مرحله زمانی مختلف	Dlesk et al.	2020	فتوگرامتری دیجیتال	پردازش تصاویر فتوگرامتری یک آرشیو آنالوگ که در سال ۱۹۹۱ میلادی توسط دوربین متریک گرفته شد و مقایسه نتایج آن با بررسی جدید فتوگرامتری با یک دوربین دیجیتال	برداشت‌های فتوگرامتری در دوره‌های مختلف زمانی به مطالعه، بررسی و کاوش میراث فرهنگی و دوره‌بندی تاریخی کالبدی آن‌ها کمک می‌کند.
16	استفاده از فتوگرامتری هواپیماهای بدون سرنشین برای اندازه‌گیری ابعاد عناصر سازه‌ای در بناهای چوبی سنتی	Young Jeong et al.	2020	فتوگرامتری با پرندۀ هدایت‌پذیر از دور	ارزیابی کاربرد UAV در بازسازی یک مدل سه‌بعدی برای اندازه‌گیری ابعاد بناهای چوبی سنتی	اندازه‌گیری ابعاد ستون‌ها و تیرها بین روش‌های معمولی و فتوگرامتری پرنده هدایت‌پذیر از دور از ۰,۲۱ تا ۰,۹۱ درصد متغیر است.

17	تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای نرم افزار دیجیتال فتوگرامتری برای میراث فرهنگی	Kingsland	2020	نرم‌افزارهای فتوگرامتری	مقایسه سه نرم‌افزار پردازش دیجیتال فتوگرامتری: Agisoft Metashape، Bentley Context Capture و Reality Capture	مطالعه موردی دیجیتالی‌سازی اشیاء در مقیاس کوچک با استفاده از شیء و داده‌های مشابه در هر سه برنامه
18	تکنیک‌ها، ابزارها، پلتفرم‌ها و الگوریتم‌ها در فتوگرامتری برد کوتاه در ساخت مدل سه‌بعدی و دوبعدی اشیاء و بناهای پیچیده	Pepe et al.	2021	فتوگرامتری برد کوتاه	شناسایی روش مناسب برای ایجاد مدل‌های سه بعدی با وضوح بالا و عکس های دوبعدی اشیاء و بناهای تاریخی با استفاده از روش فتوگرامتری	با استفاده از یک دوربین که بالای یک پرنده هدایت‌پذیر از دور نصب شده می‌توان به تصاویری از پایه پل‌های بلند، که امکان بررسی زمینی ندارند، دست یافت.
19	یک روش متحرک با ترکیب الگوریتم‌های ai و sfm در فیلم های تاریخی [22]	F. Condorelli et al.	2021	ترکیب الگوریتم‌های SFM و AI	استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و SfM برای شناسایی فریم‌هایی از یک فیلم؛ که بنای تخریب شده در آن دیده می‌شود و مناسب برای پردازش با فتوگرامتری برای بازسازی سه‌بعدی است.	روشی که در این تحقیق آزمایش شده است یک ابزار قدرتمند در زمینهٔ میراث فرهنگی است زیرا انتخاب مواد مناسب برای فتوگرامتری را به صورت خودکار انجام می‌دهد. علاوه بر این، بینش‌های مهمی را ارائه می‌دهد که می‌تواند به بخش‌های دیگر نیز تعمیم یابد.
20	فتوگرامتری پرنده هدایت‌پذیر از دور و مدل‌سازی سه‌بعدی معماری پیچیده برای اهداف حفاظتی، مطالعه موردی پل بنایی رودخانه سل، ایتالیا	Pepe et al.	2021	فتوگرامتری پرنده هدایت‌پذیر از دور	شناسایی روشی آسان و سریع برای تولید مدل‌های سه‌بعدی از ساختارهای پیچیده	استفاده از الگوریتم‌های SfM و MVS و تصاویر تولید شده توسط دوربین ارائه شده در UAS. ایجاد ابر نقطه سه‌بعدی سازه و بازسازی هندسه هر عنصر با تولید پروفیل سه‌بعدی در نرم افزار Rhinoceros

۵. نتیجه‌گیری

حفاظت و مرمت میراث فرهنگی شامل حفاظت از بناهای تاریخی با استفاده از تمام فناوری‌های جدید است که در حفظ وضعیت اولیهٔ اثر تا حدّ ممکن مؤثر است. میراث فرهنگی به طور فزاینده‌ای از فناوری‌های دیجیتال در تکنیک‌ها و روش‌های خود استفاده می‌کند. ابزارهای دیجیتالی سه‌بعدی جدید مزایای منحصربه‌فردی را برای اطلاع‌رسانی، آموزش و حفظ آثار و محوطه‌ها ارائه می‌دهند. فتوگرامتری یکی از تکنیک‌هایی است که برای دیجیتالی‌شدن سه‌بعدی در مقیاس‌های مختلف توسعه یافته است. بااین‌حال، برخلاف اسکنرهای سنتی، فتوگرامتری نسبتاً ارزان – چه از نظر پولی و چه از نظر تجربی– است. فتوگرامتری سبب می‌شود که دیجیتالی شدن در مقایسه با سایر تکنیک‌ها برای همه قابل‌دسترسی باشد. امروزه فتوگرامتری نقش پررنگی را در مستندسازی بناهای تاریخی در ایران ایفا می‌کند و کار باستان‌شناسان و مرمتگران را تا حدّ زیادی آسان کرده و دقت آن را افزایش داده است. با توجه به در دسترس و ارزان بودن

این روش و قابلیت ترکیب آن با سایر روش‌ها پیش-بینی می‌شود که درآینده، تمامی کارهای مستندسازی و برداشت میراث فرهنگی اعم از ابنیه تاریخی، آثار، محوطه‌های باستان‌شناسی و موارد دیگر در ایران با استفاده از این فناوری غیرمخرب و تکنیک‌های نوظهور آن انجام شود. آن‌چه که از مطالعهٔ مقالات برآمد، بیانگر این موضوع است که علم فتوگرامتری در ترکیب با سایر روش‌ها از جمله Laser scanner، GPR، Lidar و سایر فناوری‌ها عملکرد بهتری خواهد داشت.

با پیشرفت این علم، در آینده می‌توان شاهد پژوهش-هایی در مقیاس کلان سرزمینی برای فهم یک مجموعهٔ گسترده و دارای تنوع زیستی و آثار فرهنگی به صورت یکپارچه و پیوسته بود. استفاده از فتوگرامتری هوایی و ترکیب آن با تکنولوژی‌های برداشت دیگر برای به دست‌آوردن وجوه غیرقابل‌دسترس و ناشناخته این آثار (از جمله قنات‌ها و سازه‌های وابسته به آن‌ها و رودخانه‌ها و سکونت‌گاه‌هایی که شکل می‌دهند) دارای اهمیت فراوان است.

پی نوشت ها

۱. نوعی تصویر برجسته‌نما که طراحی آن به گونه‌ای است که خطای دید در مغز انسان ایجاد می‌کند تا وی تصویر دوبعدی را به صورت سه‌بعدی ببیند.

۲. دوربین‌های دیجیتال تجاری ارزان و آسان برای استفاده هستند، که اگر تصاویر با فرمت خام گرفته و پردازش شوند تا بتوان رابطه خطی با درخشندگی صحنه را حفظ کرد، می توان از آن‌ها برای کسب اطلاعات کمی علمی استفاده کرد.

۳. از سیگنال‌های ماهواره‌های در حال گردش برای محاسبه موقعیت، زمان و سرعت استفاده می‌کند.

۴. از اطلاعات چرخش و شتاب از یک واحد اندازه‌گیری اینرسی سیستم ناوبری اینرسی، برای محاسبه موقعیت نسبی در طول زمان استفاده می‌کند.

۵. مدل رقومی سطح، در واقع معرف بازتاب سطحی درختان، ساختمان‌ها و دیگر عوارض بالای سطح زمین و همچنین خود سطح زمین است.

۶. برخلاف عکس‌های هوایی تصحیح‌نشده، می‌توان از یک عکس اورتو برای اندازه‌گیری فواصل واقعی استفاده کرد، زیرا نمایش دقیقی از سطح زمین است که بر اساس توپوگرافی، اعوجاج لنز و شیب دوربین اصلاح شده است. یک گردش کار هدایت شده با چهار مرحله از پیش تنظیم شده برای ایجاد یک تصویر تصحیح شدهٔ فتوگرامتری عبارت هستند از: ۱- قائمه‌سازی تصاویر ۲-متعادل‌کننده رنگ ۳-ایجاد خطوط اتصال ۴-تنظیمات ارتوموزائیک.

۷. دوربین point-and-shot (یا کامپکت) یک دوربین کوچک با کاربرد آسان است که دارای یک لنز داخلی است.

۸. برچسب‌های جی‌پی‌اس خیلی‌کوچک هستند. برچسب‌های جی‌پی‌اس، شبکه‌های ردیابی دارند. این شبکه‌ها امکان ردیابی وسایلی را می‌دهد که مجهز به این برچسب‌ها هستند و این دستگاه مجهز به سیگنال‌هایی است که تا ۷ کیلومتر را پوشش می‌دهد.

۹. گوپرو (به انگلیسی: GoPro) نام شرکت آمریکایی است که به توسعه و تولید دوربین‌های شخصی ورزشی (اکشن) کیفیت‌بالا و نرم‌افزارهای ویرایش تصویر و برنامه‌های موبایل می‌پردازد.

۱۰. gimbal گیمبال ابزاری است که از موتورها و حسگرهای هوشمند برای پشتیبانی و تثبیت دوربین استفاده می‌کند.

References

[1] M. Lo Brutto, D. Ebolese, G. Dardanelli, 2018, 3d modelling of a historical building using close-range photogrammetry and remotely piloted aircraft system (rpas), ISPRS TC II Mid-term Symposium "Towards Photogrammetry 2020", 4–7 June 2018, Riva del Garda, Italy.

[2] F. Hassani, 2015, documentation of cultural heritage techniques, potentials and constraints, 25th International CIPA Symposium 2015, 31 August – 04 September 2015, Taipei, Taiwan.

[3] Genin, Soraya M., 2019, photogrammetry: methods of survey and applications on restoration works, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and

Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W11.

[4] Dlesk, Adam & Uueni, Andres & Vach, Karel & Pärtna, Jüri, 2020, From Analogue to Digital Photogrammetry: Documentation of Padise Abbey in Two Different Time Stages, Applied Sciences, 10.

[5] Kingsland, Kaitlyn, 2020, Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage, Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage.

[6] Balsa-Barreiro, José & Fritsch, Dieter, 2017, Generation of visually aesthetic and detailed 3D models of historical cities by using laser scanning and digital photogrammetry, Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage.

[7] Brandolini, Filippo & Patrucco, Giacomo, 2019, Structure-from-Motion (SFM) Photogrammetry as a Non-Invasive Methodology to Digitalize Historical Documents: A Highly Flexible and Low-Cost Approach?, Heritage 2019, 2.

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

[9] G. Bitelli, M. Dellapasqua, V.A. Girelli, S. Sbaraglia, M.A. Tinia, 2017, historical photogrammetry and terrestrial laser scanning for the 3d virtual reconstruction of destroyed structures: a case study in Italy, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-5/W1.

[10] Aghili, Mohammad Hadi, 2008, Photogramettry, Geomatic Learning. (In Persian)

[11] Russo, Michele & Carnevali, Laura & Russo, Valentina & Savastano, Davide & Taddia, Yuri, 2018, Modeling and deterioration mapping of façades in historical urban context by close-range ultra-lightweight UAVs photogrammetry, International Journal of Architectural Heritage Conservation, Analysis, and Restoration.

[12] Hamruni, Ahmed Mohamed (2010) The use of oblique and vertical images for 3D urban modelling. PhD thesis, University of Nottingham.

[13] Young Jeong, Gi & No Nguyen, Tan & Khai Tran, Dang & Huyen Hoang, Thi Bich, 2020, Applying unmanned aerial vehicle photogrammetry for measuring dimension of structural elements in traditional timber building, Elsevier, Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO).

[14] Pepe, Massimiliano & Costantino, Domenica, 2021, UAV Photogrammetry and 3D Modelling of Complex Architecture for Maintenance Purposes: the Case Study of the Masonry Bridge on the Sele River, Italy, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 65(1), pp. 191–203.

[15] Aldino Rizaldy, Wildan Firdaus, 2012, direct georeferencing : a new standard in photogrammetry for high accuracy mapping, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

[16] Pepe, Massimiliano & Costantino, Domenica, 2021, Techniques, Tools, Platforms and Algorithms in Close Range Photogrammetry in Building 3D Model and 2D Representation of Objects and Complex Architectures, Computer-Aided Design & Applications, 18(1).

[17] L. Carnevali, E. Ippoliti, F. Lanfranchi, S. Menconero, M. Russo, V. Russo, 2018, close-range mini-uavs photogrammetry for architecture survey, ISPRS TC II Mid-term Symposium "Towards Photogrammetry 2020", 4–7 June 2018, Riva del Garda, Italy.

[18] Sandeep Gupta, 2018, Active and Passive Remote Sensing, Remote Sensing & GIS Applications in Environmental Sciences.

[19] Shervais, Katherine, 2015, Structure from Motion Introductory Guide, Questions or comments please contact

education AT unavco.org. Version Oct 22, 2015.

[20] Golovina, Svetlana & Kanyukova, Svetlana, 2016, Photogrammetry and Laser Scanning for Reconstruction and Restoration of Historical Buildings, MATEC Web of Conferences 73,01008.

[21] Stathopoulou, Elisavet (Ellie) K., 2019, semantic photogrammetry: boosting image-based 3d reconstruction with semantic labeling, 8th Intl. Workshop 3D-ARCH "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", 6–8 February 2019, Bergamo, Italy.

[22] F. Condorelli, F. Rinaudo, F. Salvadore, S. Tagliaventi, 2021, a match-moving method combining ai and sfm algorithms in historical film footage, international archives of the photogrammetry, remote

[23] sensing and spatial information sciences. - issn 2194-9034. - elettronico. - (2020), pp. 813-820.

[24] Cozzolino, Marilena & Di Meo, Andrea & Gentile, Vincenzo, 2019, the contribution of indirect topographic surveys (photogrammetry and laser scanner) and gpr investigations in the study of the vulnerability of the abbey of santa maria a mare, tremiti islands (Italy), annals of geophysics, 62.

[25] Alessia Galantucci, Rosella & Fatiguso, Fabio, 2018, Advances damage detection techniques in historical buildings using digital photogrammetry and 3D surface analysis, Journal of Cultural Heritage.