صفحات ۶۱ - ۷۳ (علمی-پژوهشی)
نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی ● دوره ۲۶ ● شماره ۴ ● زمستان ۱۴۰۰

# مدل‌سازی سه‌بُعدی میراث معماری با به‌کارگیری فتوگرامتری پهپاد؛ نمونهٔ موردی: کاروانسرای دیرگچین

**مریم زینال‌پور اصل[۱]، فرهاد صمدزادگان[۲]، فرزانه دادرس جوان[۳]، محمدحسن طالبیان[*۴]**

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مرمت و احیای ابنیه و بافت‌های تاریخی گرایش میراث معماری، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

[۲]استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

[۳]استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

[۴]دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۱، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۹/۲۴)

## چکیده

**مدل‌سازی سه‌بُعدی میراث معماری، به دلیل تعدد، پیچیدگی، گستردگی و یا محدودیت دسترسی این آثار، نیازمند به‌کارگیری ابزارهای توانمند و منعطف و روش‌هایی سریع و مقرون‌به‌صرفه در اخذ و ثبت دقیق اطلاعات است. فتوگرامتری پهپاد یکی از روش‌های نوینی است که با پیشرفت تکنولوژی در دهه‌های اخیر، به‌صورت منفرد یا در ترکیب با روش‌های دیگر، به‌طور گسترده‌ای در مدل‌سازی سه‌بُعدی میراث‌فرهنگی غیرمنقول استفاده می‌شود. این پژوهش کاربردی با هدف ارزیابی توانایی فتوگرامتری پهپاد در مدل‌سازی سه‌بُعدی میراث معماری انجام گرفته است. نمونه موردی پژوهش حاضر کاروانسرای دیرگچین، به‌عنوان یکی از آثار زنجیره‌ای پروندهٔ ارسال‌شده برای ثبت در فهرست میراث جهانی یونسکو می‌باشد. برای انجام این پژوهش ابتدا طراحی اخذ داده صورت گرفت و طبق آن تصاویر هوایی با استفاده از پهپاد و تصاویر زمینی به‌طور مستقیم اخذ گردید و کنترل کیفیت داده‌ها انجام شد. سپس وضعیت سه‌بُعدی تصاویر طی پردازشی فتوگرامتریک تعیین و ابرنقطهٔ متراکم ایجاد شد. از اعمال بافت روی شبکه‌های هوایی و زمینی تولیدشده، که توسط نقاط شاخص مشترک باهم یکپارچه شدند، مدل سه‌بُعدی کاروانسرای دیرگچین با بافت واقعی و مقیاس ۱:۲۰۰ به دست آمد. ارزیابی نتایج تدقیق شده توسط نقاط کنترل زمینی، بیانگر توانایی بالای فتوگرامتری پهپاد به‌عنوان روشی سریع در مستندنگاری و مدل‌سازی سه‌بُعدی خارجی میراث معماری با دقت زمینی بهتر از دو سانتی‌متر است.**

**واژه‌های کلیدی**
**فتوگرامتری بناهای تاریخی، مدل‌سازی میراث‌فرهنگی، مستندنگاری سه‌بُعدی، پهپاد، کاروانسرای ایرانی.**

* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۲۴۲۸۰۲۲، نمابر: ۶۶۰۸۴۵۷۷-۰۲۱، E-mail: mh.talebian@ut.ac.ir .

## مقدمه

بافت‌های شهری، محوطه‌ها، عناصر و یادمان‌های باستانی و تاریخی واجد ارزش که توسط یونسکو در دستهٔ آثار ملموس و غیرقابل انتقال (غیرمنقول) قرارگرفته‌اند، بخش عظیمی از میراث‌فرهنگی را تشکیل می‌دهند و در زمرهٔ دست‌ساخته‌هایی قرار می‌گیرند که اجزای آنها، شواهدی بر فرهنگ‌های سازندهٔ آنها و به‌طورکلی نشان‌دهندهٔ دانشّ و سنت معماری، ساختار اجتماعی، پیشرفت دانش، توسعهٔ اقتصادی و نحوه معیشت یک جامعه است (Bakirman, et al., 2020; Di Benedetto, et al., 2020 & Matini, Andaroodi, & Onoc, 2018, 1). لذا حفاظت از این آثار و منابع تاریخی- فرهنگی، نیازمند شناخت کامل و دقیق جنبه‌های مختلف، از جمله مشخصه‌های کالبدی و ارزش‌های معنوی نهفته در این آثار و مستندنگاری وضعیت آنها پیش از هرگونه اقدام و دخالتی است (Ramírez, Carridondo, Paneque, & Vega, 2019; Cuperschmid , Fabricio , & Franco Jr. , 2019).

مستندنگاری میراث‌فرهنگی غیرمنقول، دارای ابزار و روش‌های متنوعی است (Malinverni, et al., 2016). این ابراز و روش‌ها، بسته به شرایط و ویژگی‌های اثر و هم‌چنین صحت و دقت مورد نیاز، به کار گرفته می‌شوند و هرکدام نیازمند برنامه‌ریزی مناسب برای کسب بهترین نتایج از عملیات برداشت هستند (Balletti & Guerra, 2015, 116). روش‌های سنتی مانند اندازه‌گیری مستقیم، ترسیم دست آزاد (روش‌های گرافیکی)، قالب‌برداری و غیره، از روش‌های ابتدایی و اولیه در مستندنگاری این آثار هستند و ابزارهایی ساده دارند که کاربرد آنها آسان اما محدود و وابسته به عملکرد اپراتور است. مستندسازی با استفاده ازاین‌روش‌ها دارای عملیات گسترده و زمان‌بر بوده و نیاز به نیروی انسانی زیادی دارد و مستندنگاری فرم‌های منحنی یا پیچیده با جزئیات زیاد از این طریق امکان‌پذیر نیست (Hassani, 2015, 207). ناکارآمدی روش‌های سنتی در مستندسازی سه‌بُعدی و یکپارچهٔ آثار میراث‌فرهنگی از یک‌سو و پیشرفت علوم و تکنولوژی اخذ داده رقومی (Gagliolo, et al., 2017)، از سوی دیگر محققین را بر آن داشت که درصدد یافتن روش‌هایی سریع، غیرمخرب و کم‌هزینه و ابزارهایی متناسب با ویژگی‌های این آثار برآیند تا از آنها برای اخذ و ذخیره دیجیتالی اطلاعات دقیق و صحیح و مدیریت پایدار مستندات استفاده کنند (Campana, Sordini, & Remondino, 2007; Eisenbeiss, 2009). ازاین‌رو، امروزه مستندنگاری میراث‌فرهنگی با طیف وسیعی از تکنولوژی‌های نوین روبه‌رو است؛ به‌طوری‌که در دهه‌های اخیر ابزارهای جدیدی از جمله لیزر اسکن[1]، واقعیت مجازی[2]، تصویربرداری پهپاد[3] و غیره پدیدار گشته‌اند (Grussenmeyer, Landes, Doneus, & Lermat, 2018, 305).

در میان فناوری‌های سه‌بُعدی پیشرفته که امروزه برای اخذ داده از میراث معماری مورد استفاده قرار می‌گیرند، لیزراسکنرها[4] (مسافت پایه)، فتوگرامتری دیجیتال بردکوتاه (تصویر پایه) و پلتفرم‌های هوایی بدون سرنشین (پهپادها) رایج‌ترین آنها هستند و به‌علت انعطاف، سرعت و دقت بالا در اخذ و پردازش اطلاعات، به‌طور گسترده‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرند (Malinverni et al., 2016, 1149). هرکدام ازاین‌روش‌ها و ابزارهای مذکور دارای نقاط قوت و ضعف مختص خود هستند که روش بهینه مورد نیاز، بایستی با توجه به فاکتورهای: هزینه و زمان، موقعیت و ویژگی‌های اثر، وسعت عملیات، دقت و جزئیات مطلوب و کاربری مستندات (معرفی، تفسیر، تحلیل یا پایش اثر) انتخاب شود (Haddad, 2011, 109). در روش فتوگرامتری از سنجنده‌های غیرفعال مانند دوربین‌های نانمتریک در اخذ داده استفاده می‌شود که نسبت به لیزر اسکنرها (سنجنده فعال) ارزان‌تر و قابل دسترس‌تر هستند. پردازش داده‌های تصویری اخذشده توسط این سنجنده‌ها - برای تولید مدل سه‌بُعدی در نرم‌افزارهای فتوگرامتریک- نیازمند زمان کم‌تری نسبت به پردازش‌های طولانی‌مدت نقطه‌های اخذشده توسط لیزر اسکنرها هستند (Rizzi, Voltolini, Remondino, Girardi, & Gonzo, 2007). نرم‌افزارهای فتوگرامتریک قابلیت تعیین موقعیت و اندازه‌گیری اتوماتیک، تولید اطلاعات سه‌بُعدی برداری، ارتوتصاویر دیجیتالی و مدل دیجیتالی سطح (Yastikli, 2007) با بافت‌واقعی را دارند (Haddad, 2011) و این باعث شده تا اخذ و پردازش فتوگرامتریک برای مستندنگاری میراث معماری ازلحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد. مدل‌های سه‌بُعدی تولیدشده به روش فتوگرامتری بافت باکیفیت‌تری نسبت به مدل‌های سه‌بُعدی حاصل از لیزراسکنرها داشته و اطلاعات طیفی مطلوب‌تری از اثر مورد مطالعه به دست می‌دهند (Kadobayashi, Kochi, Otani, & Furukawa, 2004). بااین‌که لیزراسکنرها (برخلاف سنجنده‌های غیرفعال) قادرند در فضاهای داخلی (معادن، غارها و غیره) و کم نور نیز اسکن بافت‌دار انجام دهند (Haddad, 2011) ولی توانایی اسکن کردن و اخذ داده از برخی مصالح مانند مرمر، آینه، آب و سطوح صیقلی، شیشه‌ای و کریستالی را ندارند (Mulahusić, Tuno, Gajski , & Topoljak, 2018, 1). ازطرفی‌دیگر لیزر اسکنرهای زمینی و به‌طورکلی پلتفرم‌های زمینی برای استفاده در اخذ داده از آثار مرتفع و عمودی، نماهای بلند، بام‌های غیرمسطح (Hoon Jo & Hong, 2019, 2) و سایت‌هایی با محدودیت دسترسی روشی بهینه و منعطف نمی‌باشد (Kadobayashi, Kochi, Otani, & Furukawa, 2004)، ازاین‌رو در اکثر پژوهش‌ها برای اخذ داده از آثار مرتفع با فرمی پیچیده یا آثاری که قسمت‌هایی از آنها به علت وجود موانع مصنوع یا طبیعی و یا رخداد سوانح مخرب و خطرناک (Alicandro & Rotilio 2019)، محدودیت دسترسی دارند از ادغام روش‌های لیزراسکن و فتوگرامتری هوایی استفاده شده است. در میان پلتفرم‌های هوایی نیز، پهپادها (پرنده‌های هدایت‌پذیر از راه دور) شناخته‌شده‌ترین پلتفرم یکپارچهٔ اخذ تصاویر هوایی با سنسورهای مرئی، نزدیک مادون قرمز یا حرارتی هستند؛ چراکه سایر تکنیک‌های سنجش از راه دور مانند ماهواره و هواپیماهای سرنشین‌دار با این‌که روش‌هایی غیرمخرب هستند اما پرهزینه و زمان‌بر بوده و به تجهیزاتی گران‌بها (مانند هواپیما) و دانش تخصصی و نیروی متخصص نیاز دارند (D. Stek, 2016).

بنابر آن‌چه گفته شد به‌کارگیری فتوگرامتری پهپاد در زمینهٔ مستندنگاری میراث معماری، امکان ثبت موقعیت، اندازه و شکل، هم‌چنین تولید مدل‌های سه‌بُعدی بسیار دقیق و واقع‌گرایانه را از نظر هندسه و بافت‌های مورد نیاز را با سرعت، دقت و صحت مطلوب فراهم می‌کند (Historic England, 2018). در فتوگرامتری پهپاد، از مدل سه‌بُعدی به‌دست‌آمده می‌توان ارتوفتو[5] و مدل رقومی ارتفاعی[6] تولید کرد. بااستفاده از ارتوفتو می‌توان به نقشه‌ای با امکان نمایش جزئیات بالا، مقیاس یکنواخت و هندسهٔ واقعی دست‌یافته و برای اندازه‌گیری فاصلهٔ واقعی ویژگی‌ها بکار برد. با توجه به این‌که، ارتوفتوها،

نقشه‌هایی با رنگ واقعی تولید می‌کنند، تشخیص و تفسیر عناصر موجود، از روی رنگ و ظاهر آسان‌تر خواهد بود (Widartono B. S. & Fitri A., 2016, 189). مدل‌های رقومی ارتفاعی که اطلاعات ارتفاعی تمامی عارضه‌های محدوده را در دسترس قرار می‌دهد، معمولاً در پایش و حفاظت بلندمدت میراث معماری مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین ترتیب که با به دست آوردن مدل ارتفاعی در بازه‌های زمانی متفاوت می‌توان به تغییرات ایجادشده در آثار میراث‌فرهنگی غیرمنقول در طول گذر زمان پی‌برد (Tache, A. V., Sandu, I. C. A., Popescu, O. C., & Petrisor, A. I. 2018). در نهایت مدل‌های سه‌بُعدی بافت‌دار حاصل از فتوگرامتری پهپاد، برای شناسایی، مطالعه، مستندنگاری، شناخت، حفاظت، پایش، مدیریت بحران، تاب‌آوری میراث فرهنگی غیرمنقول و یا به‌کارگیری در گردشگری فرهنگی مجازی توسط متخصصین حوزهٔ میراث‌فرهنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Balletti & Guerra, 2015; Templin & Popielarczyk, 2020).

در پژوهش حاضر هدف تبیین کاربرد و ارزیابی توانایی فتوگرامتری پهپاد به‌عنوان روشی سریع، مطمئن و کم‌هزینه برای اخذ داده و تولید مدل سه‌بُعدی دقیق و صحیح از میراث‌فرهنگی غیرمنقول است. کاروانسرای دیرگچین به‌عنوان میراث معماری واجد ارزش ملی و بین‌المللی برای پیاده‌سازی تکنیک فتوگرامتری پهپاد انتخاب شد. چراکه اخذ داده از این اثر با استفاده از روش‌های سنجش مستقیم و پلتفرم‌های زمینی، به‌علت آسیب‌پذیری کالبدی، محدودیت دسترسی و فرم پیچیدهٔ سقف آن، به‌راحتی امکان‌پذیر نبود. برای انجام این پژوهش ابتدا تاریخچهٔ و مستندات مربوط به نمونه موردی جمع‌آوری شد و پس از مرور پیشینهٔ استفاده از فتوگرامتری پهپاد در مستندسازی سه‌بُعدی میراث‌فرهنگی غیرمنقول، روش پژوهش ارائه شد. در ادامه ابزارهای پژوهش معرفی‌شده و پس از تشریح روند طراحی اخذ، اخذ و پردازش دادهٔ این اثر، مدل سه‌بُعدی خارجی آن ارائه شده است.

## ۱- روش پژوهش

این پژوهش کاربردی در سه فاز مطالعاتی، میدانی و دفتری صورت گرفت. ساختار کلی روش پیشنهادی به‌منظور مدل‌سازی سه‌بُعدی کاروانسرای دیرگچین به‌عنوان نمونه موردی طبق تصویر (۱) می‌باشد. در ادامه مراحل پژوهش به‌صورت اجمالی شرح داده شده است.

### ۲-۱. فاز مطالعاتی

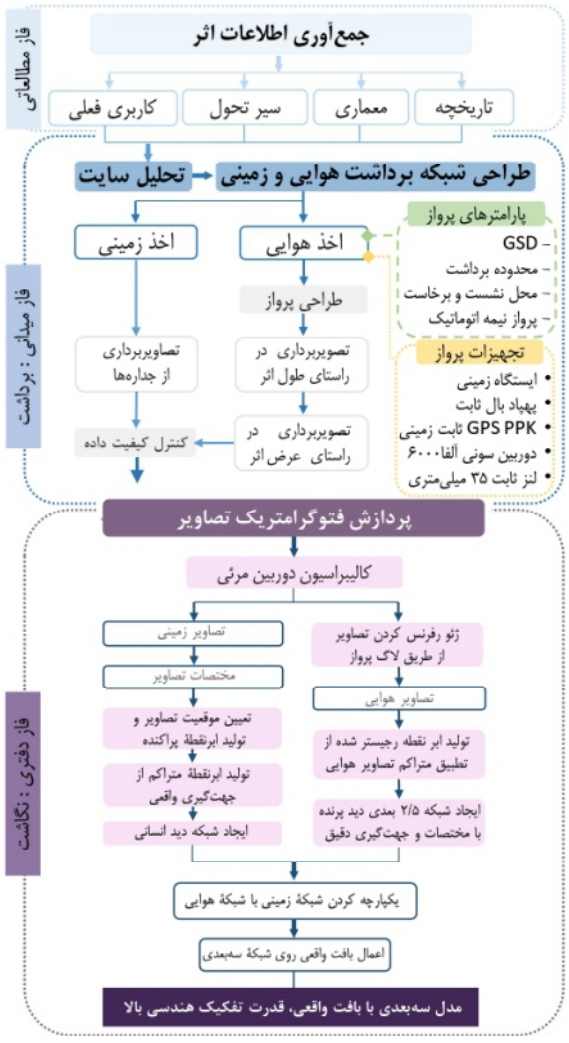
در فاز کتابخانه‌ای اطلاعات در مورد تاریخچه، معماری و سیر تحول کاروانسرای دیرگچین جمع‌آوری شد. پس از کسب اطلاعات از وضعیت کنونی و شرایط ثبتی اثر، از طریق مصاحبه با مسئولین و متصدیان فعلی آن، مجوز برداشت اخذ شد. سپس موقعیت و همسایگی‌های اثر مورد بررسی قرار گرفت و طرح اولیه اخذ، قبل از مراجعه حضوری به سایت اثر آماده شد.

### ۲- ۲. فاز میدانی

در فاز میدانی پژوهش، پس از بررسی‌های تکمیلی سایت، با در نظر گرفتن پارامترهای پرواز و تجهیزات موجود، طرح نهایی اخذ تصاویر آماده شد. عملیات برداشت طبق روش پیشنهادی طی مراحل: طراحی اخذ تصاویر هوایی و زمینی، اخذ تصاویر هوایی توسط پهپاد، قرائت و تطبیق تصاویر اخذشده و سپس اخذ تصاویر زمینی به‌صورت مستقیم انجام شد. پس از کنترل و حصول اطمینان از کیفیت و همپوشانی کافی تصاویر، عملیات میدانی یک‌روزه خاتمه یافت.

### ۲-۳. فاز دفتری

در فاز دفتری پژوهش عملیات نگاشت با انتقال تصاویر شروع شد. این تصاویر قبل از پردازش به‌منظور کنترل کیفیت و حذف تصاویر تکراری مورد بازبینی قرار گرفتند. پس از ژئوتگ‌شدن تصاویر هوایی، تصاویر هوایی و زمینی به‌صورت جداگانه به محیط نرم‌افزار وارد گردیدند. سپس مراحل کالیبراسیون دوربین، تعیین موقعیت تصاویر، محاسبات ریاضی به‌منظور استخراج اطلاعات سه‌بُعدی از تصاویر توسط نرم‌افزار انجام شد.




تصویر ۱- ساختار کلی روش پیشنهادی برای مدل‌سازی میراث معماری با بکارگیری فتوگرامتری پهپاد .

## ۲- پیشینهٔ پژوهش

استفاده از تصاویر هوایی، به‌عنوان روشی برای مستندنگاری میراث‌فرهنگی، ابتدا در زمینه باستان‌شناسی مطرح شد و سپس در سایر حوزه‌ها نیز گسترش یافت (Capper, 1907; King, 1978; Hampton, 1974; King, 1978, cited in Moreno, et al., 2016 & Whittelsey, 1970 cited in Eisenbeiss, 2009). از نخستین تلاش‌های استفاده از پهپادها (از نوع هلی‌کوپتر) به‌منظور اخذ تصاویر هوایی، برای استفاده در فتوگرامتری معماری می‌توان به پروژه تصویربرداری راه‌آهن معلق شهر ووپتال آلمان[۷] در سال ۱۹۸۰م اشاره کرد (Wester Ebbinghau, 1980) که طی آن امکان استفاده از هلی‌کوپتر هدایت از راه دور (با استفاده از ارتباط رادیویی) برای حمل دوربین و اخذ تصاویر هوایی ثابت شد (Wester Ebbinghau, 1980; Eisenbeiss, 2004). این روش در سال ۲۰۰۰ برای مستندسازی و مدل‌سازی سه‌بُعدی یک آسیاب تاریخی، در شهر اگینبورگ شمال‌شرق استرالیا و برطرف کردن نواقص اطلاعاتی اخذ زمینی (مانند تصاویر بام)، مورد استفاده قرار گرفت. این پروژه که در آن مدل‌های حاصل از تصاویر هوایی و زمینی اخذشده (دوبُعدی) برای مدل‌سازی سه‌بُعدی، باهم شبکه و یکپارچه شدند، از نخستین نمونه‌های استفاده از پهپاد در فتوگرامتری معماری به شمار می‌آید (Zischinsky , Dorffner, & Rottensteiner, 2000). در همان سال «موسسه باستان‌شناسی میاتسوکا»[۸] ژاپن که از سال ۱۹۹۷ در حال انجام مطالعاتی در مورد پنجمین تمدن جهان (یانگ‌تسه) بود، تصاویری با کیفیت بالا، از سایت باستانی در حواشی رود «یانگ‌تسه»[۹] در کشور چین، اخذ کرد. محققین ژاپنی پهپاد (هلی‌کوپتر کنترل از راه دور) را جهت تصویربرداری هوایی سایت با استفاده از دوربین‌های متریک و نانمتریک به کاربردند. این تصاویر بعدها در مدل‌سازی سه‌بُعدی و ساخت انیمیشن قلعه مورد استفاده گرفت (Yasuda & Miyatsuka, 2001; Eisenbeiss, 2004).

در سال ۲۰۰۴ آیزنبایس[۱۰] با نوشتن مقاله‌ای به کاربرد پهپاد در فتوگرامتری و مستندنگاری میراث‌فرهنگی پرداخت و با همکاری موسسه باستان‌شناسی آلمان، روند اخذ تصاویر هوایی سکونت‌گاه قدیمی پیچانگو آلتو[۱۱] در شهرک «پالپا» کشور پرو را، با استفاده از پهپادی(هلی‌کوپتر) که مجهز به حسگر *INS/GPS* و پایدارکننده[۱۲] بود، توضیح داد. سپس در سال ۲۰۰۵ استفاده از پهپادها را به‌عنوان روشی نوین برای اخذ و مستندنگاری فتوگرامتریک سایت‌های باستان‌شناسی معرفی کرد (Eisenbeiss, Lambers, Sauer-bier, & Li, 2005; Eisenbeiss, Lambers, & Sauerbier, 2005). وی در سال ۲۰۰۷ مقاله‌ای[۱۳] در مورد شبکه و ترکیب‌کردن اطلاعات و تصاویر اخذشده از طریق لیزر اسکن و فتوگرامتری پهپاد جهت مستندنگاری و مدل‌سازی همان سایت را با همکاری متخصصین آلمانی منتشر کرد و در نتیجهٔ این پژوهش، ترکیب ابزارهای پهپاد و لیزاسکنرهای زمینی مجهز به دوربین را روشی دقیق و صحیح برای مستندنگاری دانست (Lambers, et al., 2007).

فتوگرامتری پهپاد در سال ۲۰۱۱، به‌عنوان ابزاری سریع با کاربری آسان، در مستندسازی بخشی از میراث جهانی فرهنگ «پازیریک» در منطقه کوهستان‌های آلتای روسیه[۱۴] برای اخذ عکس‌های استریوسکوپی به‌کار گرفته شد و محققین نهایتاً استفاده ازاین‌روش را در مستندنگاری میراث‌فرهنگی موفقیت‌آمیز قلمداد کردند (Hendrickx, et al., 2011). در سال ۲۰۱۵، پهپادها و نرم‌افزارهایی که اطلاعات حاصل از تصویربرداری آنها را پردازش کرده و مدل سه‌بُعدی یا ابرنقطهٔ حجیم تولید می‌کنند، به‌عنوان ابزاری مرسوم و گسترده در زمینه معماری برای مدل‌سازی زمین‌ها و شهرها یا آثار تاریخی و مجسمه معرفی شدند که قادر به تولید مدل‌های پیچیده هستند (Balletti & Guerra, 2015). نتیجهٔ پژوهشی در سال ۲۰۱۶ که هدف از آن، ارزیابی امکان اخذ و تولید تصاویر هوایی مایل[۱۵] برای بازسازی سه‌بُعدی بنای تاریخی و تحقق برداشت معماری با جزئیات بالا، توسط پهپاد و دوربین‌های رقومی بود، نشان داد که استفاده از پهپاد، برای برداشت آثار میراث‌فرهنگی که محدودیت دسترسی دارند، یا برداشت آنها سرعت و جزئیات بیشتری نیاز دارد و زمانی که بودجه محدود است، ابزاری مناسب می‌باشد و هم‌چنین این روش به علت این‌که از فاصلهٔ دور (غیرمستقیم) و بدون تماس با اثر به اخذ داده می‌پردازد، روشی کاملاً غیرمخرب شناخته شد (Aicardi I. et al., 2016). در سال ۲۰۱۸ از پهپاد برای اخذ تصاویر هوایی و فتوگرامتری کوتاه برد زمینی، برای مدل‌سازی سه‌بُعدی کاخ «تسوودی»[۱۶]، معروف‌ترین اثرِ سایت میراث جهانی «چان چان» در پرو و برداشت کامل منطقه استفاده شد (Pierdicca, 2018). از پژوهش‌های اخیر در این زمینه می‌توان به پژوهش «فتوگرامتری پهپاد برای حفاظت از «میراث‌فرهنگی: مدل‌سازی و نقشه‌برداری دیوار ونیسی برگامو»[۱۷] اشاره کرد که در آن فتوگرامتری پهپاد، به‌عنوان روشی مناسب در برداشت آثار فرهنگی، به‌منظور جمع‌آوری تمامی اطلاعات هندسی و مصالح و هم‌چنین آسیب‌شناسی اثر، که برای تدارک اقدامات حفاظتی مورد نیاز است، معرفی شده است؛ این روش به اندازه‌ای سریع است که محققین آن را، برای استفاده در پیمایش‌های مکرر آثار مناسب دانسته‌اند (Azzola, Cardaci, Roberti, & Nannei, 2019). هم‌چنین در پژوهٔ حفاظت از پلی آجری بر روی رود سله در ایتالیا، فتوگرامتری پهپاد به‌عنوان روشی مناسب برای مدل‌سازی سه‌بُعدی آثار معماری پیچیده با دسترسی محدود معرفی شده است (Pepe & Costantino, 2021).

## ۳- مبانی نظری پژوهش

### ۳- ۱. مدل‌سازی سه‌بُعدی کاروانسرای دیر گچین با به‌کارگیری فتوگرامتری پهپاد

#### ۳- ۱- ۱. معرفی کاروانسرای دیرگچین

موقعیت سوق‌الجیشی ایران به‌علت قرار گرفتن در شاهراه تجاری شرقی-غربی (از چین تا دریای مدیترانه) در ساخت و ایجاد راه‌های نظامی، تجاری و ساختمان‌های وابسته به آن نقش بازری ایفا کرده است (صبوری زالوآبی، ۱۳۹۲). الگوی اولیه کاروانسراها یعنی چاپارخانه‌ها از

بناهای کهن ایران هستند که بنا به نیازهای نظامی از دوران ماد و هخامنشی احداث شده و در طول سالیان به دلایل نظامی اقتصادی و سیاسی توسعه یافته‌اند (صبوری زالوآبی، ۱۳۹۲، ۱۴۷). این بناها در ابتدای پیدایش، جنبهٔ نظامی داشتند و ایستگاه‌های دولتی برای استراحت و یا تعویض اسب چاپارها و نظامیان بودند و نقشی اساسی در تأمین ارتباط بین ایالات داشتند (احسانی،۱۳۸۱). در دوره‌های بُعدی این توقفگاه‌ها برای استراحت مسافران و کاروان‌ها در بین شهر تکامل یافته و مورد استفاده قرار گرفتند (پیرنیا،۱۳۸۱).

کاروانسرای دیرگچین از نخستین و بزرگ‌ترین کاروانسراهایی است که در دورهٔ ساسانی و با ورود اقتصاد کشور به مرحله‌ای نوین، در امتداد جاده ابریشم (در جاده تاریخی ری به قم) احداث شد (کیانی و کلایس، ۱۳۶۲). اگرچه نویسندگانی نظیر یاقوت حموی[۱۸]، این بنا را به اردشیر اول نسبت داده و از آن با نام ساسانی « کردشیر» یادکرده‌اند، ولی نویسندگان دیگری من‌جمله قمی[۱۹]، آن را منسوب به خسرو انوشیروان اول دانسته‌اند. بنابراین به نظر می‌رسد این بنا متعلق به اوایل دوره ساسانی بوده و در زمان انوشیروان مرمت شده است. وجه تسمیهٔ کاروانسرای دیرگچین به نقل از محمد قیس رازی[۲۰]، به‌علت وجود گنبدی گچی بود که امروزه اثری از آن به‌جا نمانده است (Shokoohy, 1983).

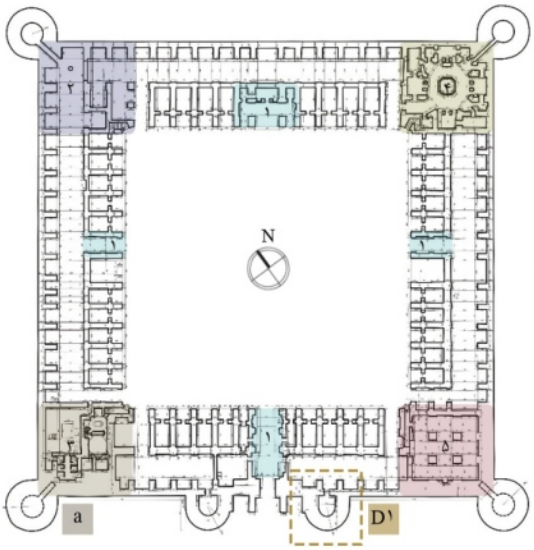
این کاروانسرا در دورهٔ اسلامی حداقل دوبار دچار تغییرات و بازسازی اساسی شده است. اولین تغییرات ایجادشده در دورهٔ سلطان سنجر سلجوقی و توسط ابونصر کاشی ایجاد شد. در آن زمان، بسیاری از طاق‌های قدیمی که با آجرهای بزرگ ساسانی به ابعاد ۳۶×۳۶×۸ سانتی‌متر ساخته شده بودند برچیده شدند و طاق‌های جدید با آجرهای کوچک به ابعاد ۲۵×۲۵×۵ سانتی‌متر بر روی دیوارهای قدیمی ساخته شدند. بسیاری از آجرهای ساسانی برچیده شده از بنا در محوطهٔ اثر به‌جا ماند که بعدها در ساخت بناهای مجاور مورد استفاده قرار گرفتند (Shokoohy, 1983) (تصویر ۲).

پلان این کاروانسرا که اصطخری[۲۱] و ابن حوقل[۲۲] از آن به‌عنوان «بنایی مستحکم» و ساخته شده از آجرهای پخته و گچ یاد کرده‌اند، مربع شکل و دارای حیاط مرکزی است (Shokoohy, 1983) (تصویر ۳). گونه‌بندی پلان این کاروانسرا چهار ایوانی است که این ایوان‌ها معمولاً کاربردی مشابه گنجه داشته‌اند (شماره ۱ در پلان). در چهار گوشهٔ کاروانسرا برج‌هایی دایره‌ای وجود دارند که سقف‌های گنبدی آنها مقطعی بیضی‌شکل داشتند. گنبدهای برج‌های ورودی نیز، پلانی نیمه بیضی‌شکل دارند که یک ویژگی کم‌نظیر در معماری ایران است (شکوهی, ۱۳۸۶) (تصویر ۴).

یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد معماری کاروانسرای دیرگچین این است که هر گوشه از کاروانسرا با پلانی متفاوت و عملکرد خاص خود ساخته شده است. در گوشهٔ شمال‌غربی آسیاب (شماره ۲) و در گوشهٔ جنوب‌غربی یک حیاط کوچک با حمام و آشپزخانه وجود دارد (شماره ۳). گوشهٔ شمال‌شرقی شبیه یک آپارتمان خصوصی در اطراف یک حیاط کوچک ساخته شده است که مورد استفادهٔ مقامات رسمی و اشرافین

**تصویر ۲- آجرهای مربوط به دورهٔ ساسانی و اسلامی در محوطهٔ اثر.**
**مأخذ:** (Shokoohy, 1983)

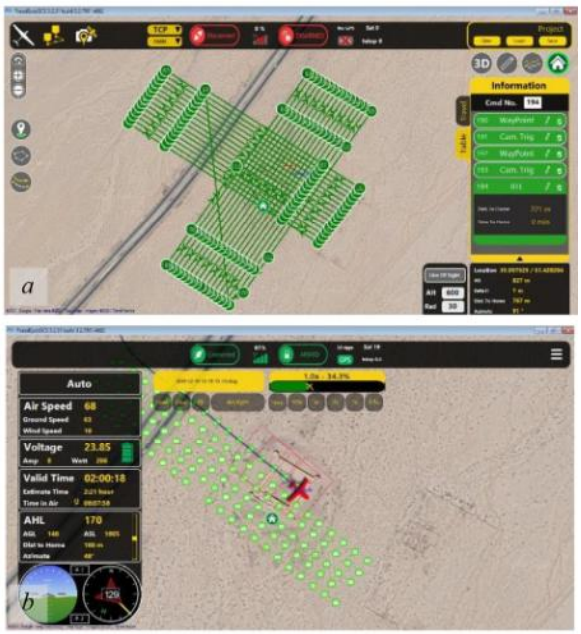
**تصویر ۴- پهپاد بال ثابت مورد استفاده قرارگرفته در اخذ هوایی.**



**تصویر ۳- a: پلان کاروانسرای دیرگچین، مقیاس: ۱:۲۵۰. ماخذ: (سازمان میراث فرهنگی، ۱۳۸۷) D1: عکس هوایی از برج شرقی ورودی اصلی با پلان نیمه‌بیضی.**

قرار می‌گرفت (شکوهی، ۱۳۸۶) (شماره ۴). در زمان شاه‌اسماعیل اول در گوشهٔ جنوب‌شرقی این کاروانسرا مسجدی احداث شد. پلان این مسجد مربعی است و در وسط صحن آن چهار پایهٔ قطور از آجرهای ساسانی وجود دارد که به شکل چهارطاقی قرار گرفته‌اند. سقف اصلی آن همانند مابقی سازه، با طاق‌های متأخر اسلامی جایگزین شده است. اما به احتمال زیاد، این مسجد در محل آتشکدهٔ ساسانی که گنبدی بر روی چهارطاقی داشت، ایجاد شده است (Shokoohy, 1983) (تصویر ۵).

کاروانسرای دیرگچین، اساس بسیاری از کاروانسراهای دورهٔ اسلامی بخصوص دورهٔ صفوی بوده است، ازاین‌رو آن را «مادر کاروانسراهای ایران» می‌دانند (کیانی و کلایس، ۱۳۶۲). این بنا تا اواسط دورهٔ قاجار با کاربری اصلی خود مورد استفاده قرار می‌گرفت، بعدها با تغییر مسیر جاده ری به قم در سال ۱۲۶۴ه.ق، به‌تدریج متروک شد (ریاضی، ۱۳۷۱، ۴۸). مالکیت این اثر که در سال ۱۳۸۲ با شماره ثبت ۱۰۴۰۸ در فهرست آثار ملی ثبت شد (پروندهٔ ثبتی، ۱۳۸۲) امروزه متعلق به وزارت میراث‌فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی است. این کاروانسرا در نوع خود بی‌نظیر و واجد ارزش ملی و بین‌المللی بوده و یکی از آثار زنجیره‌ای پرونده «کاروانسراهای ایران» است که برای ثبت در فهرست میراث جهانی یونسکو ارسال شده است. این کاروانسرا طی اقدامات حفاظتی مختلفی که توسط معاونت میراث‌فرهنگی این وزارت در دو دهه گذشته صورت گرفت، وضعیت کالبدی با ثبات‌تری نسبت به گذشته پیدا کرده و به دلیل خصیصه‌های کالبدی بی‌نظیر بیشتر کاربری موزه‌ای- گردشگری یافته است.




**تصویر ۵- طراحی پرواز و موقعیت اخذ تصاویر. a: طراحی پرواز صورت‌گرفته برای اخذ هوایی در نرم‌افزا ParadEyes GCS، b: موقعیت اخذ تصاویر درلاگ پرواز.**

### ۳- ۱- ۲. تجهیزات اخذ تصاویر

در این پژوهش از پهپاد بال ثابت (تصویر ۲) با محمولهٔ اپتیکی دوربین سونی آلفا[۲۳] ۶۰۰۰ (جدول ۱) و لنز زئیس ثابت ۳۵ میلی‌متری برای اخذ تصاویر هوایی استفاده شد. تصاویر زمینی نیز توسط اپراتور و به‌صورت دستی با استفاده از همان دوربین اخذ گردید.

### ۳- ۱- ۳. اخذ تصاویر

برای اخذ داده از کاروانسرای دیرگچین به‌منظور مدل‌سازی سه‌بُعدی آن، اتود اولیه طراحی اخذ، از پیش تهیه شده بود. پس از مراجعت تیم برداشت به سایت و بررسی و تحلیل آن، پلان اخذ ویرایش شده و تصمیم بر آن شد که اطلاعات مربوط به سایت پلان اثر با استفاده از پهپاد و داده‌های مربوطه به جداره‌های خارجی و حیاط مرکزی آن، به روش زمینی و مستقیم اخذ گردد. فرآیند بررسی سایت، استقرار ایستگاه زمینی، طراحی و اخذ تصاویر هوایی و زمینی، و به‌طورکلی برداشت میدانی با یک بار مراجعت و طی ۶ ساعت انجام شد. این عملیات میدانی توسط نیروی تخصصی متشکل از خلبان، اپراتور فنی و اویونیک پهپاد[۲۴] و کمک خلبان (اپراتور طراحی، هدایت و کنترل)، کارشناس میراث معماری و سه کارشناس فتوگرامتری برای اخذ تصاویر زمینی صورت گرفت.

### ۳- ۱- ۴. طراحی شبکه برداشت هوایی

طبق آن‌چه پیش‌تر ذکر شد، برای اخذ دادهٔ هدفمند از یک اثر، ابتدا بایستی طراحی اخذ صورت گیرد. پارامترهای مؤثردر طراحی اخذ هوایی پهپاد، عبارت‌اند از: شرایط و ویژگی‌های محدودهٔ اخذ داده، مدل سنجنده (دوربین) و پارامترهای آن، مقایس مدنظر تصاویر، هم‌پوشانی طولی و عرضی تصاویر، مدت، جهت، سرعت و ارتفاع پرواز، سیستم مختصات‌یابی تصاویر (SuziedelyteVisockiene, Puziene, Stanionis, & Tumeliene, 2016, 4).

برای طراحی، هدایت و کنترل پرواز در این پژوهش، از نرم‌افزار

**جدول ۱- مشخصات پهپاد و دوربین به‌کار گرفته‌شده در پژوهش.**

| مشخصات پهپاد | | مشخصات سنجنده | |
|---|---|---|---|
| **نوع پهپاد** | بال ثابت | **نوع سنجنده** | مرئی (*Sony Alpha ILCE-6000*) |
| **توانایی حمل** | حداکثر ۷۰۰ گرم | **وزن** | ۳۴۴ گرم (به انضمام باتری و کارت حافظه) |
| **GPS** | PPK و ناوبری(جداگانه) | **GPS** | ندارد |
| **سرعت پرواز** | ۶۵ کیلومتر بر ساعت | **مدت سینک فلش** | ۱.۱۶ ثانیه |
| **مداومت پرواز** | ۳ ساعت | **مداومت باتری** | بالای ۳۶۰ شات |
| **حالت برخاست** | دست پرتاب و خودکار - نیمه‌اتوماتیک | **سایز پیکسل** | ۴.۰۴ میکرومتر |
| **حالت نشست** | سینه‌مال-نیمه اتوماتیک | **تعداد پیکسل** | ۲۴/۳ مگاپیکسل |

سفارشی و اختصاصی ParadEyes GCS، استفاده شد. برای طراحی پرواز در نرم‌افزار مذکور پس از انتخاب نوع پهپاد، به‌عنوان اولین مرحله، محدودهٔ پرواز تعیین شد. در مرحلهٔ بُعدی با توجه به نوع پهپاد مورد استفاده که از نوع بال ثابت با سرعت پرواز ۶۵ کیلومتر بر ساعت و مجهز به سیستم موقعیت‌یابی جهانی[۲۵] (GPS) و کینماتیک پساپردازشی[۲۶] (PPK) بود، تنظیمات پرواز و مشخصات دوربین و لنز مورد استفاده، در نرم‌افزار وارد شد. بدین‌ترتیب با در نظر گرفتن سرعت پرواز پهپاد و سرعت تصویربرداری دوربین، مقادیر هم‌پوشانی طولی[۲۷] و عرضی[۲۸] اخذ تصاویر به ترتیب ۵۰٪ و ۸۰٪ تعیین شد. با توجه به مقیاس مستندنگاری (۱:۲۰۰) و فاصله نمونه‌برداری زمینی (معادل فاصله بین دو مرکز پیکسل متوالی بر روی زمین) ۲ سانتی‌متر[۲۹]، ارتفاع پرواز با استفاده از رابطهٔ (۱)، که در آن فاصله نمونه‌برداری زمینی با GSD، فاصلهٔ کانونی لنز با F و ارتفاع پرواز با h نشان داده شده، ۱۷۰ متر تعیین شد.

$$h = \frac{F \times GSD}{pixel\ size}$$ رابطه (۱)

با توجه به مداومت و سرعت پهپاد و هم‌چنین مساحت محدوده تعیین‌شده برای تصویربرداری، دو مرحلهٔ جداگانه برای تصویربرداری هوایی در نظر گرفته شد. هم‌چنین برای تضمین استحکام شبکه اخذ تصاویر و به حداقل رساندن نواحی پنهان، پرواز در دو مسیر عمود برهم در جهت شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و شمال‌شرقی-جنوب‌غربی طراحی شد (تصویر a-۵). پس از کنترل چک‌لیست عملیاتی مکانیکی- اپتیکی قبل پرواز، پلان پرواز روی حافظهٔ پهپاد توسط نرم‌افزار ذخیره شد. پرواز پهپاد مورد استفاده نیمه اتوماتیک بوده و برخاست آن به‌صورت دست‌پرتاب صورت گرفت. در طول پرواز و حین اخذ تصاویر توسط پهپاد، اپراتور کنترل و هدایت پرواز در محل ایستگاه زمینی، به‌صورت مداوم ارتباط پهپاد با ایستگاه، پارامترهای پرواز پهپاد، الگوی پرواز و نقاط اخذ تصاویر را توسط نرم‌افزار مذکور تحت کنترل و نظارت قرارداد و چک‌لیست عملیاتی حین پرواز کنترل شد (تصویر ۵-a).

پس از پیمایش مسیرهای طراحی‌شده و اخذ تصاویر در نقاط تعیین‌شده، پهپاد به‌صورت سینه‌مال توسط خلبان فرود آورده شد و چک‌لیست عملیاتی بعد از پرواز کنترل شد. پس از اتمام مرحلهٔ اول تصویربرداری هوایی، کیفیت تصاویر اخذشده در ایستگاه زمینی مورد بررسی قرار گرفت و تغییرات لازم در تنظیمات دوربین برای مرحلهٔ بعدی صورت گرفت. مرحلهٔ دوم نیز طی اقدامات مذکور انجام شد و نهایتاً طی این تصویربرداری دومرحله‌ای هوایی ۵۱۰ عکس هوایی با کیفیت مطلوب و با موقعیت جغرافیایی مشخص ثبت شد (تصویر ۶).

تصویر ۶- نمونه‌ای از تصویر هوایی پهپاد از سردر کاروانسرا با بزرگنمایی ۱:۱.

### ۳- ۱- ۵. طراحی شبکه برداشت زمینی

طراحی اخذ زمینی داده از نماهای خارجی شامل برج‌ها و سردر کاروانسرا و حیاط مرکزی شامل فضاهای نیمه‌باز مانند ایوان‌های اصلی و ورودی حجره‌ها، طبق تصویر (۸) در دو مرحله صورت گرفت. مراحل اول برداشت با فاصله‌ی ۱۵ متری از نماهای خارجی و ۵ متری از نماهای حیاط مرکزی (به‌منظور استحکام شبکه) و مراحل دوم با فاصله‌های ۵ متر از نماهای خارجی و ۳ متری از نماهای حیاط مرکزی (به‌منظور بهبود دقت شبکه) و با هم‌پوشانی تقریبی ۸۰٪ صورت گرفت. برای ثبت مختصات تصاویر اخذشده، سیستم جی‌پی‌اس کینماتیک پساپردازشی به دوربین سونی آلفا ۶۰۰۰ مجهز به لنز ثابت ۳۵ میلی‌متری الحاق شد. برای اخذ تصاویر زمینی با توجه به شرایط آب‌وهوایی، پارامترهای دوربین روی مقدار ایزو: ۲۰۰، سرعت شاتر ۱/۲۵۰ و فکوس دستی تنظیم شد و تصویربرداری زمینی به‌صورت هم‌زمان توسط اپراتورها طی سه ساعت و با رعایت هم‌پوشانی تقریبی ۸۰ درصدی و در جهت حرکت عکس ساعت، انجام گرفت (تصویر ۷). از برداشت زمینی این کاروانسرا ۱۰۸۸ تصویر به دست آمد.

### ۳- ۲. پردازش فتوگرامتریک تصاویر

برای پردازش فتوگرامتریک تصاویر اخذشده در این پژوهش، از نرم‌افزار Agisoft Metashape ، به‌عنوان نرم‌افزاری قابل اطمینان که به‌صورت گسترده در پژوهش‌های مشابه برای تولید مدل‌های سه‌بُعدی دقیق و صحیح به‌کار گرفته شده است (Pepe & Costantino, 2021, 195)، استفاده شد. این نرم‌افزار یک پکیج مدل‌سازی سه‌بُعدی پیشرفتهٔ تصویرپایه است (Li, Chen, Zhang, & Jiaa, 2016) و از فناوری بازسازی سه‌بُعدی چندوجهی بنام «ساختار ناشی از حرکت (SFM)»[۳۰]

تصویر ۷- نمونه‌ای از تصویر زمینی اخذ مستقیم با بزرگنمایی ۱:۱.

برای پردازش تصاویر استفاده می‌کند. روش SFM، به‌علت پیچیدگی، نیازمند سیستم پردازشگر (رایانه) با عملکرد بالا است و مشخصات فنی رایانه نقش مهمی در زمان پردازش تصاویر دارد. مشخصات اصلی رایانهٔ به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش عبارت‌اند از: پردازشگر (CPU): Intel Core i9-9900K، سرعت پردازشگر: 3.6 GHz، پردازشگر گرافیکی (GPU): Nvidia GeForce RTX 2080 و RAM: 64 GB.

از لحاظ نظری برای این‌که این نرم‌افزار قادر به بازسازی آثار از روی تصاویر اخذشده از هر موقعیتی باشد، بایستی اثر مورد بازسازی حداقل در دو تصویر دیده شود. این در حالی است که نرم‌افزار پردازش مورد استفاده برای تضمین حصول نتایج خوب از پردازش، کاربران را به استفاده تصاویر بیشتر توصیه می‌کند (Maharani, M., Charienin-na, A., & Nugroho, H. 2020). بنابراین کاربران این نرم‌افزار معمولاً تعداد زیادی تصویر با هم‌پوشانی کلی ۹۰-۹۵٪ برای پردازش در نرم‌افزار بارگذاری می‌کنند که ممکن است باعث طولانی‌شدن فرایند پردازش و حجیم‌بودن فایل خروجی شود. علاوه‌بر این ممکن است در صورت کم‌بودن تعداد تصاویر دقت مدل حاصل‌شده به میزان قابل توجهی افت کرده و خطاها افزایش یابند.

روند تولید مدل سه‌بُعدی از تصاویر توسط نرم‌افزار در مراحل هم‌ترازی[۳۱] تصاویر تولید ابرنقطهٔ متراکم[۳۲] تولید شبکه[۳۳] خلاصه می‌شود. این نرم‌افزار پس از بارگیری تصاویر، در مرحلهٔ تنظیم (هم‌ترازی) تصاویر، ابتدا نقاط همسان را تصاویر دارای هم‌پوشانی تشخیص و تطبیق می‌دهد. سپس موقعیت دوربین را هنگام اخذ هر تصویر محاسبه و تعیین و پارامترهای کالیبراسیون دوربین را اصلاح می‌کند. در نتیجهٔ این عملیات، یک ابرنقطهٔ پراکنده ایجاد می‌شود که موقعیت‌های دوربین را نشان می‌دهد. در مرحلهٔ بعدی براساس موقعیت‌های دوربین برآورد شده، نرم‌افزار یک ابرنقطهٔ متراکم تولید می‌کند. در آخر برپایهٔ ابرنقطهٔ متراکم حاصل از محاسبات اندازه‌های اخذشده از سطح اثر تصویربرداری شده، یک شبکهٔ چندضلعی سه‌بُعدی بازسازی می‌کند. سپس با اعمال بافت استخراج‌شده از تصاویر روی شبکهٔ سه‌بُعدی ایجاد شده، مدل سه‌بُعدی اثر با بافت واقعی به دست می‌آید.

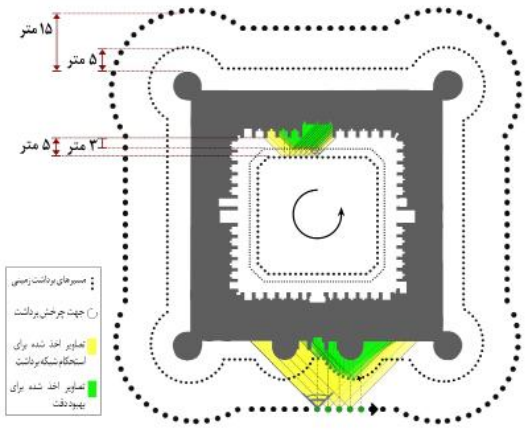
با توجه به این‌که تصویربرداری در این پژوهش در چندین مرحلهٔ متفاوت و از پلتفرم‌هایی با کد ارتفاعی متفاوت صورت گرفته بود، ابتدا تصاویر اخذشده در هر مرحله به‌صورت جداگانه پردازش شده و در نهایت با استفاده از نقاط شاخص مشترک به یکدیگر متصل و یکپارچه شده و مدل سه‌بُعدی نهایی را تولید کردند. تیم پردازش متشکل از یک کارشناس میراث معماری و یک کارشناس فتوگرامتری بوده و روند کلی پردازش به مدت ۶ ساعت به طول انجامید. در ادامه مراحل و جزئیات این پردازش ارائه می‌گردد.

### ۳-۲-۱. پردازش تصاویر هوایی

تصاویر هوایی اخذشده قبل از پردازش، با استفاده از اطلاعات پرواز[۳۴]، زمین مرجع[۳۵] شدند. این تصاویر قبل از بارگذاری در نرم‌افزار پردازش به‌صورت دستی مورد بررسی قرار گرفتند تا تصاویر تار و فاقد کیفیت مطلوب وارد فرایند پردازش نشوند. از ۵۱۰ تصاویر هوایی ۲۱۱ تصویر در محیط نرم‌افزار بارگذاری شد، سپس فوتواسکن موقعیت دوربین و جهت هر تصویر را تشخیص داده[۳۶] و نقاط گره[۳۷] به‌صورت خودکار شناسایی و استخراج شد. بر اساس موقعیت تخمین‌زده شدهٔ دوربین و تصاویر، یک مدل ابرنقطه پراکنده ایجاد شد. در تصویر (۹-a)، موقعیت و مرکز تصاویر (خطوط مشکی) و ابرنقطهٔ پراکندهٔ[۳۸] ایجاد شده قابل مشاهده است. در مرحلهٔ بعد ابر نقطهٔ متراکم تولید شد (تصویر ۹-b) و پس از آن با اجرای دستور ساخت شبکه[۳۹] در نرم‌افزار، مدل۲/۵ بُعدی دید پرندهٔ کاروانسرای دیرگچین بدون بافت به دست آمد.

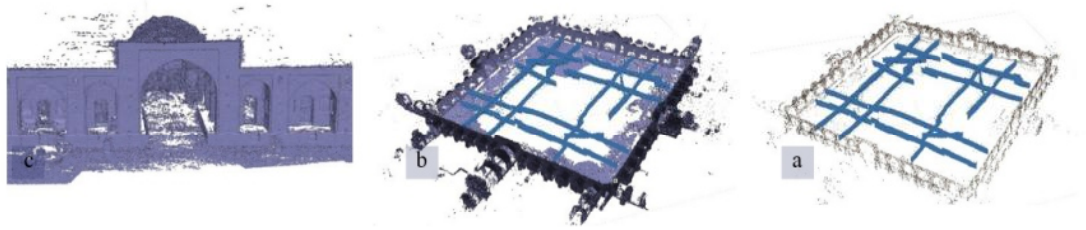
### ۳-۲-۲. پردازش تصاویر زمینی

برای پردازش تصاویر زمینی، ابتدا تصاویر در نرم‌افزار بارگذاری شدند. سپس مختصات نقاط اخذ تصاویر که قبلاً از روی جی‌پی‌اس کینماتیک پساپردازشی، قرائت شده بودند، در محیط نرم‌افزار وارد شدند. قبل از شروع تشخیص موقعیت تصاویر، تصاویر اضافی توسط اپراتور به‌صورت



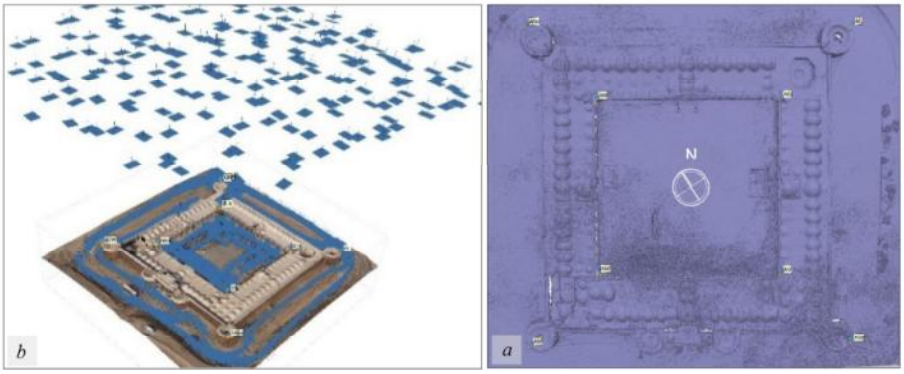

**تصویر ۸- طراحی شبکه برداشت.**

**تصویر ۹- روند پردازش تصاویر هوایی a: تعیین موقعیت تصاویر هوایی و تولید ابرنقطهٔ پراکنده، b: ابرنقطهٔ متراکم تولیدشده بدون بافت.**




**تصویر ۱۰- روند پردازش تصاویر هوایی a: تعیین موقعیت تصاویر هوایی و تولید ابرنقطهٔ پراکنده، b: ابرنقطهٔ متراکم تولیدشده بدون بافت.**

**تصویر ۱۱- پردازش داده‌های مربوطه به جدارهٔ خارجی اثر، a: تعیین موقعیت تصاویر و تولید ابرنقطهٔ پراکنده، b : تولید ابرنقطهٔ متراکم، c: ابرنقطهٔ متراکم، دید از سردر ورودی.**




**تصویر ۱۲- یکپارچه‌سازی شبکه‌ها و تولید مدل سه‌بُعدی، a: ادغام شبکه‌های زمینی و هوایی بر اساس نقاط مشترک شاخص، b: موقعیت تصاویر پس از ادغام شبکه‌ها و تولید مدل سه‌بُعدی.**

دستی حذف گردید. تصاویر نماهای بیرونی و حیاط مرکزی به‌صورت جداگانه طی مراحل تعیین موقعیت تصاویر (تولید ابرنقطهٔ پراکنده)، تولید ابرنقطهٔ متراکم و ایجاد شبکه پردازش شدند (تصویر ۱۰و۱۱) و از این طریق مدل‌های دید انسانی از نماهای خارجی و حیاط مرکزی کاروانسرا به‌صورت جداگانه به دست آمدند.

### ۳-۲-۳. پردازش هم‌زمان شبکه‌های هوایی و زمینی

به‌منظور ایجاد مدل یکپارچهٔ سه‌بُعدی از کاروانسرای دیرگچین، مدل‌های نماهای خارجی، حیاط مرکزی و مدل ۲/۵بُعدی دید پرنده با یکدیگر یکپارچه شدند. بدین‌صورت که در قسمت‌هایی از تصاویر هوایی و تصاویر جداره‌های خارجی و حیاط مرکزی، که دارای بخش‌هایی مشترک و شاخص بودند، ۸ نقطه تعیین گردید؛ سپس طبق این نقاط شاخص مشترک ایجاد شده، مدل‌های زمینی و هوایی به هم متصل شدند (تصویر ۱۲-a). پس

**تصویر ۱۳- خروجی مدل سه‌بُعدی کاروانسرای دیرگچین با بافت واقعی. a: دید ایوان شرقی از حیاط مرکزی دیرگچین b: دید پرنده از ضلع شمالی مدل سه‌بُعدی اثر.**

از ادغام لایه‌ها و تعیین موقعیت تمامی تصاویر پردازش شده (تصویر ۱۲-b)، مدل سه‌بُعدی اثر تولید شد. در مرحلهٔ نهایی پردازش بافت واقعی از روی تصاویر بر روی مدل اعمال شد و مدل سه‌بُعدی اثر با بافت واقعی به دست آمد (تصویر ۱۳).

## ۳- ۳. ارزیابی نتایج

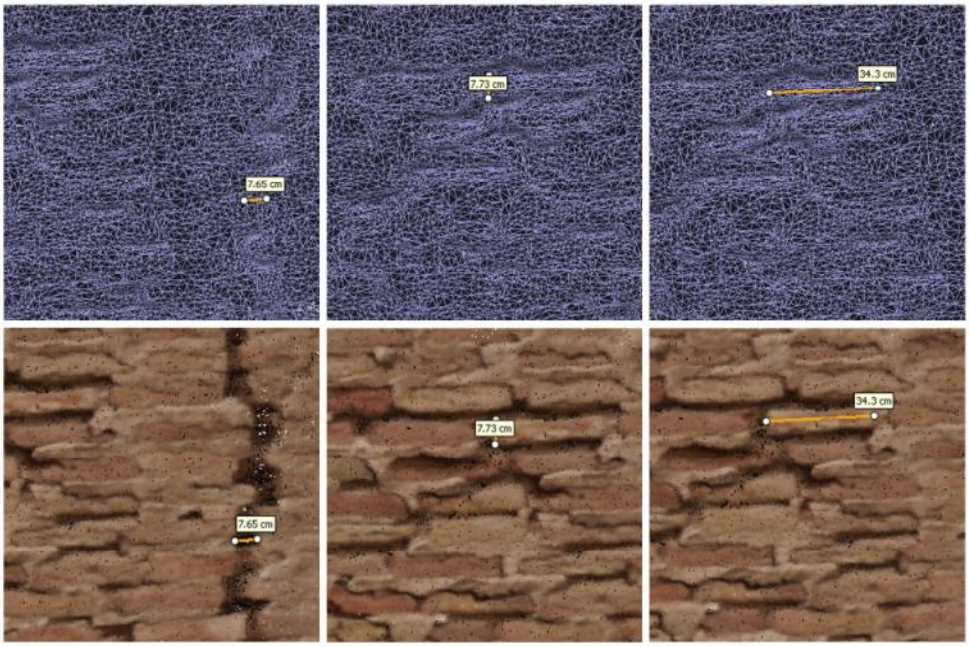
به‌منظور ارزیابی دقت مدل به‌دست‌آمده، ۸ نقطهٔ کنترل زمینی، طبق تصویر (۱۳) مورد استفاده قرار گرفت. جای‌گذاری نقاط مذکور به گونه‌ای انجام شد که هم به‌صورت مستقیم و هم از روی مدل سه‌بُعدی (تصویر ۱۴)، قابل خوانش باشند. جدول (۲) نشان‌دهندهٔ میزان اختلاف بین مقادیری است که به‌صورت مستقیم قرائت شده و از روی مدل سه‌بُعدی به دست آمده‌اند. همان‌گونه که قابل مشاهده است بیشینه خطا حول محورهای طولی، عرضی و ارتفاعی به ترتیب ۰/۸۵، ۰/۹ و ۱/۲ سانتی‌متر است. برای محاسبهٔ مجذور خطای مربعی متوسط در هر سه جهت، از رابطهٔ (۲) استفاده شد و مقادیر ۱/۴، ۰/۵ و ۱/۴ در راستای محور طولی، عرضی و ارتفاعی به دست آمد. در این رابطه، تعداد نقاط کنترل زمینی (تصویر ۱۵) با N، مقادیری که به‌صورت مستقیم قرائت شده‌اند با $(x, y, z)_i$ و مقادیر به‌دست‌آمده از مدل سه‌بُعدی $(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)$ با نشان داده شده است. طبق محاسبات انجام گرفته خطای مسطحاتی (حاصل از مجموع مجذور خطای مربعی متوسط محور x و y) برابر با ۱/۹ سانتی‌متر و خطای ارتفاعی ۱/۴ سانتی‌متر می‌باشد.

تصویر ۱۵- موقعیت نقاط کنترل زمینی .

**جدول۲- تعیین خطاهای مسطحاتی و ارتفاعی**

| نقاط کنترل زمینی | خطا X (cm) | خطا Y (cm) | خطا Z (cm) |
|---|---|---|---|
| ۰۱ | ۲/۸ | −۱/۸ | ۰/۲ |
| ۰۲ | ۱/۳ | ۱ | ۲/۹ |
| ۰۳ | ۱/۱ | ۱/۶ | ۲/۶ |
| ۰۴ | −۱/۹ | ۰/۸ | ۱/۲ |
| ۰۵ | −۰/۳ | ۰/۶ | ۲/۸ |
| ۰۶ | ۰/۷ | ۰/۹ | ۲ |
| ۰۷ | −۰/۴ | −۰/۳ | −۱/۵ |
| ۰۸ | −۰/۶ | ۰/۱ | ۲/۳ |
| میانگین خطا | ۰/۸۵ | ۰/۹ | ۱/۲ |
| $RMSE^{۴۰}$ | ۱/۹ | | ۱/۴ |

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \hat{x}_i)^2}{N}}$$ رابطهٔ (۲)




تصویر ۱۴- بزرگنمایی آجرکاری برج جنوب‌شرقی مدل سه‌بُعدی دیرگچین. a-۱: عرض ترک برج در حالت وایرفریم، a-۲: اندازه‌گذاری ترک برج، b-۱: ارتفاع آجر در حالت وایرفریم، b-۲: اندازه‌گذاری ارتفاع آجر، c-۱: طول آجر در حالت وایرفریم، c-۲: اندازه‌گذاری طول آجر.

## نتیجه

در این پژوهش که به‌منظور ارزیابی توانایی فتوگرامتری پهپاد در مدل‌سازی سه‌بُعدی میراث معماری صورت گرفت، از پهپاد بال ثابت مجهز به دوربین مرئی در اخذ داده‌های هوایی استفاده شد و تصاویر تکمیلی زمینی به‌صورت مستقیم اخذ گردید. از پردازش فتوگرامتریک جداگانهٔ این تصاویر مدل‌های زمینی (دید انسانی نماهای خارجی و حیاط مرکزی) و هم‌چنین مدل ۲/۵بُعدی هوایی (دید پرنده) بدون بافت واقعی حاصل شد. از یکپارچه‌سازی مدل‌های هوایی و زمینی و سپس اعمال بافت روی آن، مدل سه‌بُعدی خارجی کاروانسرای دیر گچین با بافت واقعی، مقیاس ۱:۲۰۰ و دقت زمینی بهتر از دو سانتی‌متر به دست آمد. این در حالی است که در اکثر پژوهش‌هایی که تاکنون در زمینهٔ معماری انجام شده است، معمولاً فتوگرامتری پهپاد به‌صورت محدود و صرفاً با هدف به دست آوردن مدل قسمتی از آثار، نماها و یا مدل‌های ۲/۵بُعدی هوایی، مورد استفاده واقع شده است. نتایج نشان می‌دهد، با استفاده از پهپاد و بسته به ویژگی‌های تجهیزات به کارگرفته‌شده در اخذ داده و ارتفاع پرواز، می‌توان مستندات صحیح متریک از آثار میراث فرهنگی غیرمنقول به‌دست آورد؛ به‌طوری‌که مدل سه‌بُعدی ایجاد شده، دربردارندهٔ تمامی اطلاعات هندسی، طیفی و بافتی اثر باشد. اخذ سریع، کم‌هزینهٔ و غیرمخرب داده از آثار پیچیده، گسترده و دارای محدودیت دسترسی، اصلی‌ترین نقطه قوت این روش است. ازاین‌رو می‌توان فتوگرامتری پهپاد را به‌عنوان روشی مناسب و مطمئن برای به‌کارگیری در مستندنگاری سه‌بُعدی میراث معماری ارزیابی کرد. از محدودیت‌های استفاده از فتوگرامتری پهپاد در حوزهٔ میراث‌فرهنگی می‌توان به تأثیرپذیری از شرایط جوی و دانش، مهارت و تخصص استفاده از آن و محدودیت در اخذ داده از فضاهای سرپوشیده با نور کم اشاره کرد. اگرچه نتایج به‌دست‌آمده نشانگر توانایی فتوگرامتری پهپاد در مدل‌سازی سه‌بُعدی میراث معماری است، محدودیت‌های پروژهٔ حاضر در اخذ داده‌های فضای داخلی نیز بیانگر نیاز ترکیب این روش با روش‌های مکمل مانند لیزراسکن سه‌بُعدی است. چالش‌های به وجود آمده در یکپارچه‌سازی مدل‌های هوایی و زمینی، نیز نیاز به اخذ تصاویر مورب از فصل مشترک سقف و نماهای داخلی و خارجی- برای سهولت و بالابردن دقت- در پژوهش‌های آتی را محرز ساخته است.

### پی‌نوشت‌ها

1. Laser Scanning. 2. Drone Photography .
3. Augmented and Virtual Reality.
4. Terrestrial Laser Scanner (Tls) .
5. Orthophoto.
6. Dem: Digital Elevation Model.
7. Wuppertal.
8. The Japan Miyatsuka Institute of Archaeology.
9. Yangtze. 10. Hennry Eisenbeiss.
11. Pinchango Alto. 12. Stabilizer.
13. Combining Photogrammetry and Laser Scanning for The Recording and Modelling of the Late .Intermediate Period Site of Pinchango Alto, Palpa, Peru.
14. Tuekta Burial Mounds in The Russian Altai.
15. Oblique Images. 16. Tschudi.
17. Venetian Walls Of Bergamo.
18. Yaqit Hamawi, Mu'jam Al-Buldan, Leipzig, 1867, 690.

۱۹. حسن بن محمد بن حسن قمی از بزرگان امامیه بود. تنها اثر او کتاب تاریخ قم است که به زبان عربی و در (۳۲۶–۳۸۵ هق) نوشته شده است و مدتی بعد توسط حسن بن علی بن حسن بن عبدالملک قمی ترجمه شده است.

20. Šams-al-Dīn Moḥammad b. Qays Rāzī, al-Moʿjam fī maʿayīr aš ʿār al-ʿajam, ed. M. Qazvīnī, Leiden and London, 1909; 2nd ed., ed. M.-T. Modarres Rażawī, Tehran, 1336 Š./1957.
21. Istakhri, al-Masalik wal-mamalik, Cairo, 1961, 134.
22. Ibn Hauqal, al-Masalik wal-mamalik, Leiden, 1873, 189-91.
23. Sony Alpha ILCE-6000, 12.13 OZ (With battery and media).

۲۴. الکترونیک هوانوردی (Avionics).

25. INS: Inertial Navigation System.
26. Post-processed kinematic.
27. Longitudinal Overlapping (Overlap).
28. Transverse Overlapping (Sidelap).

۲۹. GSD دو سانتی‌متر نشان‌دهنده این است که ابعاد یک پیکسل از تصویر، معادل دو سانتی‌متر بر روی زمین است.

30. Structure from Motion. 31.Alignment of the Images.
32. Building the Dense Cloud.
33. Building the Mesh. 34. Flight Log.
35. Geotag. 36. Image Orientation.
37. Tie Points. 38. Build Dense Cloud.
39. Build Mesh.
40. Root Mean Square Deviation (مجذور خطای مربعی متوسط).

### فهرست منابع

احسانی، محمدتقی (۱۳۸۱)، *یادی از کاروانسراها، رباط‌ها و کاروان‌ها*، تهران: امیرکبیر.
پرونده ثبتی کاروانسرای دیرگچین (۱۳۸۲)، سازمان میراث فرهنگی کشور.
پیرنیا، حسن (۱۳۸۱)، *ایران باستان با تاریخ مفصل ایران قدیم*، ۲ جلد، تهران: انتشارات زرین و نگارستان.
ریاضی، محمدرضا (۱۳۷۱)، کاروانسرای دیر گچین، *اثر*، صص ۴۸-۶۵.
شکوهی، مهرداد (۱۳۸۶)، دیرگچین: کاروانسرایی ساسانی در جنوب سرزمین ری، مجله *باستان‌شناسی و تاریخ*، صص ۶۷-۸۱.
صبوری زالوآبی، آرش (۱۳۹۲)، تاریخچه کاروانسرا، *تاریخ‌پژوهی*، صص ۱۴۵- ۱۸۲.
کیانی، محمد یوسف، و ولفرام کلایس (۱۳۶۲)، *فهرست کاروانسراهای ایران*،

تهران: وزارت فرهنگ و آموزش عالی و سازمان حفاظت آثار باستانی ایران.

Aicardi, I., Chiabrando , F., Grasso, N., Lingua , A. M., Noardo , F., & Spanò , A. (2016), UAV photogrammetry with oblique images: First analysis on data acquisition and processing, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (pp. 835-842), Prague, Czech Republic: ISPRS.

Alicandro, M., & Rotilio , M. (2019), Uav Photogrammetry For Resilience Management in Reconstruction Plan of Urban Historical Centres After Seismic Events, A Case Study, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 55-61.

Azzola, P., Cardaci, A., Roberti, G. M., & Nannei , V. M. (2019), Uav photogrammetry for cultural heritage preservation modeling and mapping Venetian Walls of Bergamo, *''3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures* (pp. 45-50). Bergamo, Italy: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

Bakirman, T., Bayram, B., Akpinar, B., Karabulut, M. F., Bayrak, O. C., Yigitoglu, A., & Seker, D. Z. (2020), Implementation of ultra-light UAV systems for cultural heritage documentation, *Journal of Cultural Heritage*, *44*, pp. 174-184.

Balletti, C., & Guerra, F. (2015), The survey of cultural heritage: a long story, *Rendiconti Lincei*, 115-125.

Campana, S., Sordini, M., & Remondino, F. (2007), Integration of geomatics techniques for digital documantation of heritahe areas, *1st International EARSeL Workshop* (pp. 309-312), Rome: Aracne.

Capper, J. (1907), Photographs of Stonehenge, as seen from a War Balloon, *Archeologia*.

Cuperschmid , A., Fabricio , M. M., & Franco Jr. , J. (2019), HBIM Development of A Brazilian Modern Architecture Icon: Glass House by Lina Bo Bardi, *Heritage*, pp. 1928-1940.

Di Benedetto, C., Gautiero, A., Guarino, V., Allocca, V., De Vita, P., Morra, V., ... & Calcaterra, D. (2020), Knowledge-based model for geomaterials in the Ancient Centre of Naples (Italy): Towards an integrated approach to cultural heritage, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *18*, e00146.

D. Stek, T. (2016), Drones over Mediterranean landscapes, The potential of small UAV`s(drones) for site detection and heritage managment in archeological survey projects: A case study from Le Pianelle in the Tappino Valley, Molise (Italy), *Journal of Cultural Heritage*, pp. 1066-1071.

Eisenbeiss, H. (2004), *A Mini Unmanned Aerial Vehicle (Uav): System Overview And Image Acquisition,* Pitsanulok, Thailand: International workshop on Processing and visualization using High-Resolution Imagery.

Eisenbeiss, H. (2009), *UAV Photogrammetry,* Zürich: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule.

Eisenbeiss, H., Lambers, K., & Sauerbier, M. (2005), Photogrammetric recording of the archaeological site of Pinchango Alto (Palpa, Peru) using a mini helicopter (UAV), *The world is in your eyes*.

Eisenbeiss, H., Lambers, K., Sauerbier, M., & Li, Z. (2005), Photogrammetric Documentation of an Archeological (Palpa, Peru) Using an Autonomous Model Helicopter, *CIPA 2005 XX International Symposium,* Torino, Italy.

Gagliolo, S., Fagandini, R., Federici, B., Ferrando, I., Passoni, D., Pagliari, D., . . . Sguerso, D. (2017), Use of Uas for the Conservation of Historical Buildings in Case of Emergencies, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 81-88.

Grussenmeyer, P., Landes, T., Doneus, M., & Lermat, J.-L. (2018), Basics of range-based modelling techniques in Cultural Heritage, In E. Stylianidis, & F. Remondino, *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage* (pp. 305-368), Whittles Publishing.

Haddad, N. (2011), From ground surveying to 3D laser sacanner: A review of techniques used for spatial documentation of histioric sites, *Journal of King Saud University*, pp. 109-118.

Hampton, J. (1974), An experiment in multispectral airphotography for archaeological research, *The photogrammetric record*, pp. 37-64.

Hassani, F. (2015), Documentation of cultural heritage techniques, potentials and constraints, *25th International CIPA Symposium* (pp. 207-214), Taipei, Taiwan: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing ans Spatial Information Sciences.

Hampton, J. (1974), An experiment in multispectral airphotography for archaeological research, *The photogrammetric record*, 37-64.

Hendrickx, M., Gheyle, W., Bonne, J., Bourgeois, J., Wulf, A. D., & Goossens, R. (2011), The use of stereoscopic images taken from a microdrone for the documentation of heritage – An example from the Tuekta burial mounds in the Russian Altay, *Journal of Archaeological Science*, pp. 2968-2978.

*Historic England.* (2018, February 8), Retrieved from: https://historicengland.org.uk/images-books/publications/3d-laser-scanning-heritage/

Hoon Jo, Y., & Hong, S. (2019). Three-Dimensional Digital Documentation of Cultural Heritage Site Based on the Convergence of Terrestrial Laser Scanning and Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetr. *ISPRS International Journal of Geo-information.*

Kadobayashi, R., Kochi, N., Otani, H., & Furukawa, R. (2004), Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of cultural heritage, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

King, T. (1978), *The Archaeological Survey: Methods and Uses,* Washington : U.S, Department of the Interior .

Lambers, K., Eisenbeiss, H., Sauerbier , M., Kupferschmidt, D., Gaisecker, T., Sotoodeh, S., & Hanusch , T. (2007), Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Per, *Journal of Archaeological Science*, pp. 1702-

L. (2007), Optical measurement techniques for the digital preservation, documentation and analysis of cultural heritage, *Conference on Optical 3D Measurement Techniques*, (pp. 16-24).

Shokoohy, M., (1983). The Sasanian Caravanserai of Dayr-i Gachīn, South of Ray, Iran, *BSOAS* 46, 1983, pp. 445-61. available online at https://www.iranicaonline.org/articles/dayr-e-gacin (accessed on 26 January 2021).

Shokoohy, M., (1983), The Sasanian caravanserai of Dayr-i Gachin, south of Ray, Iran, *BSOAS*, XLVI, iii, 1983, pp. 445-61. available online at http://shokoohy.com/iranian_studies_2_16.html (accessed on 27 January 2021).

SuziedelyteVisockiene, J., Puziene, R., Stanionis, A., & Tumeliene, E. (2016), Unmanned Aerial Vehicles for Photogrammetry: Analysis of Orthophoto Images over the Territory of Lithuania, *International Journal of Aerospace Engineering*, 1-9.

Tache, A. V., Sandu, I. C. A., Popescu, O. C., & Petrişor, A. I. (2018), Uav Solutions for the Protection And Management Of Cultural Heritage, Case Study: Halmyris Archaeological Site, *International Journal of Conservation Science*, *9*(4).

Templin, T., & Popielarczyk, D. (2020), The use of low-cost unmanned aerial vehicles in the process of building models for cultural tourism, 3D web and augmented/mixed reality applications, *Sensors (Switzerland), 20*(19), pp. 1-26.

Wester Ebbinghau, W. (1980), *Aerial Photography by RadioControled Model Helicopter,* London: Phorogrammefric Record.

Widartono, B. S., & Fitri, A. (2016, November), Utilization of Orthophoto Imagery for Mapping The Cultural Heritage Area (Ijo Temple Complex, District Prambanan, Yogyakarta), In *lst International Conference on Geography and Education (ICGE 2016)* (pp. 189-192). Atlantis Press.

Yastikli, n. (2007), Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning, *Journal of Cultural Heritage*, pp. 423-437.

Yasuda, Y., & Miyatsuka, Y. (2001), Archaeological 3D visualization for Chinese fortress sites, *Recreating the Past - Visualization and Animation of Cultural Heritage*, Ayutthaya, Thailand: ISPRS Workshop Commission 5.

Zischinsky , T., Dorffner, L., & Rottensteiner, F. (2000), Application of a new model helicopter system in architectural photogrammetry, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, pp.177-183.

1712.

Maharani, M., Charieninna, A., & Nugroho, H. (2020, June), Identification of photo number effect for 3D modeling in Agisoft software, In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 500, No. 1, p. 012073), IOP Publishing.

Malinverni , E., Conati Barbaro, C., Pierdicca, R., Bozzi, C., & Tassetti, A. (2016), Uav Surveying for a Complete Mapping and Documentation of Archaeological Findings, the Early Neolithic Site of Portonovo, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 1149-1155.

Matini, M., Andaroodi, E., & Onoc, K. (2018), A 3D approach to reconstitution of the adobe citadel of Bam after earthquake: a complementary interpretation of architectural heritage knowledge, aerial photogrammetry, and heterogeneous data, *Internatioanl Journal of Architectural Heritage*, pp. 1-19.

Moreno, C., Gordo, J., López, E., Blanco, A., López, F., & López , I. (2016), From point cloud to BIM: an integrated workflow for documentation, research and modelling of architectural heritag, *Survey Review*, pp. 212-231.

Mulahusić, A., Tuno, N., Gajski , D., & Topoljak, J. (2018), Comparison and analysis of results of 3D modelling of complex cultural and historical objects using different types of terrestrial laser scanner, *Survey Review*, pp. 1-8.

Pepe, M., & Costantino, D. (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), 191-203.

Pierdicca, R. (2018), Mapping Chimu's settlements for conservation purposesusing UAV and close range photogrammetry, The virtual reconstruction of Palacio Tschudi, Chan Chan, Peru, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 27-34.

quan Li, X., an Chen, Z., ting Zhang, L., & Jia, D. (2016), Construction and accuracy test of a 3D model of non-metric camera images using Agisoft PhotoScan, Procedia Environmental Sciences, 36, pp. 184-190.

Ramírez, C., Carridondo, P., Paneque, L., & Vega, F. (2019), Uav Photogrammetry and Hbim for the Virtual Reconstruction of Heritage, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 271-278.

Rizzi, A., Voltolini, F., Remondino, F., Girardi, S., & Gonzo,

# 3D Modeling of Architectural Heritage Using UAV Photogrammetry; Case Study: Deir-e Gachin Caravansary

*Maryam Zeynalpoor Asl[1], Farhad Samadzadegan[2], Farzaneh Dadras Javan[3], Mohammad Hassan Talebian[*4]*

[1]Master Student of Restoration and Conservation of Architectural Heritage, Department of Restoration of Historic Buildings and Textures, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.
[2]Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Surveying and Spatial Information Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
[3]Assistant Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Surveying and Spatial Information Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
[4]Associate Professor, Department of Architecture, School of Architecture,College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.

(Received: 11 Apr 2020, Accepted: 16 Jun 2020)

Traditional survey and 3D documentation methods of Architectural Heritage are challenging, tedious, time-consuming, and error-prone due to the spatial geometry, ornament, and texture complexity in most of these structures. Recent developments in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) photogrammetry technology have provided a precise, rapid, and cost-effective method to generate accurate 3D models of Architectural Heritage for documentation and conservation operations, individually or in combination other methodologies. This study aims to evaluate the ability of UAV photogrammetry to produce a 3D model of a relatively complex Architectural Heritage. Deir-e Gachin Caravansary is one of the 56 Caravanserais in the Persian Caravanserais file -nominated in the UNESCO World Heritage List- which has specific architectural features chosen for this study. This caravansary is situated on the ancient route from Ray to Isfahan, located in the center of the Kavir National Park. This building bears several structural interventions during the past centuries and witnesses historical phases, from its construction in the Sasanian era to its abandonment and negligence in the late Qajar era, right up to the 21st century, when restored and adaptively reused as a tourism destination. The general workflow of this study contains three steps. The first step involves drawing data acquiring plans. Considering the features and complex characteristics of Deir-e Gachin and the possible presence of obstacles at this site to be surveyed is decided to employ aerial and terrestrial platforms to gathering photogrammetric images. In order to acquire complete documentation of the caravansary for photogrammetric purposes, two right cross flights with a ground sampling distance (GSD) of 2 cm are planned. On the other hand, four epochs are determined to acquire terrestrial photogrammetric images. At the second step, the aerial data acquisition of the rooftop and site plan is carried out by a fixed-wing UAV equipped with a non-metric camera. Afterward, two terrestrial photogrammetric processes are applied to acquiring the exterior and central courtyard facades pictures. To be able to record the exact geographic positions of the images, a post-process kinetic (PPK) GPS is attached to the camera during the terrestrial photogrammetric survey. The captured Aerial images are geotagged using the flight logs. The third step is the photogrammetric process to create an integrated and textured 3D model. In this step, aerial and terrestrial images are aligned separately by the software. The outputs of this process were two individual sparse points clouds. Then each aerial and terrestrial dense points clouds are created. Eventually, the aerial and terrestrial meshed surfaces aligned and merged to create an integrated coarse 3D model. After applying texture to the beforehand produced 3D model, the caravansary`s textured model is created. Accuracy evaluation of the result using GCPs shows an accuracy of ±2 cm in the 1:200 scaled 3D model of Deir-e Gachin caravansary. This study demonstrates the high potential of UAV photogrammetry as a fast, accurate, and reliable data acquisition method in producing a detailed exterior 3D model of Architectural Heritage structures, containing high resolution spatial, spectral, and textural information.

**Keywords**
Cultural Heritage 3D Modeling, Point Cloud, Structure-From-Motion, Iranian Caravansary, Architectural Heritage Uav Photogrammetry.

[*]Corresponding Author: Tel: (+98-912) 4248022, Fax: (+98-21) 66084577, E-mail: mh.talebian@ut.ac.ir