نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.22034/ats.2026.2094789.1062

فصلنامه پژوهش‌های معماری نوین
دوره ٦، شماره ١، پیاپی ١٩
بهار ١٤٠٥
صص ٣٧-٧

Architectural Technologies
Studies Journal
Vol. 6, Issue. 1, Serial No. 19
Spring 2026
Pages 7-37

مناظر میراثی آینده در بستر سیستم‌های محاسباتی: از داده به تصمیم[1]

پری‌چهر گودرزی*[1]، سعیده کلانتری[2]، مهدی زندیه[3]

١–دانش‌آموخته دکتری معماری منظر، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. (نویسنده مسئول)
p.goodarzi@modares.ac.ir
٢– دانش‌آموخته دکتری معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
saeedeh.kalantari@modares.ac.ir
٣– استاد، گروه معماری منظر، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.
zandieh@arc.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت: [١٤٠٥/١/١٦] تاریخ پذیرش: [١٤٠٥/٣/٢٧]

چکیده

تحولات شتابان فناوری‌های محاسباتی و گسترش هوش مصنوعی، پارادایم‌های رایج شناخت، طراحی، مدیریت و حفاظت از مناظر میراثی را دگرگون ساخته و تصور مناظر میراثی آینده را با چالش‌ها و فرصت‌های نوینی مواجه کرده است. در این شرایط، داده به یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های تصمیم‌گیری تبدیل شده و گذار از تصمیم‌گیری مبتنی بر شهود به تصمیم‌گیری داده‌محور، به‌عنوان رویکردی نوین در معماری منظر و مدیریت میراث فرهنگی مطرح شده است. هدف این پژوهش، تبیین نقش سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در این گذار پارادایمی و بررسی ظرفیت آن‌ها در تبدیل داده به دانش و تصمیم در مناظر میراثی آینده است. بدین منظور، ابتدا جایگاه داده، داده‌کاوی و فناوری‌های محاسباتی در فرآیند شناخت و تصمیم‌گیری تحلیل شده و سپس با مقایسه روش‌های مختلف برداشت داده در حوزه منظر و میراث فرهنگی، فناوری پهپاد–فتوگرامتری به‌عنوان روشی کارآمد برای تولید داده‌های دقیق، چندلایه و قابل تحلیل از باغ‌های تاریخی ایران، به‌عنوان نمونه‌ای از مناظر میراثی، معرفی شده است. در ادامه، قابلیت‌های یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری توسعه‌یافته بر پایه این داده‌ها در یکپارچه‌سازی داده‌ها، تحلیل اطلاعات، استخراج دانش و پشتیبانی از تصمیم‌گیری تشریح می‌شود. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، صرفاً ابزارهایی برای پردازش اطلاعات نیستند، بلکه به‌عنوان بستری برای تغییر پارادایم در طراحی، مدیریت و حفاظت از مناظر میراثی عمل می‌کنند. این سیستم‌ها با تبدیل داده به دانش و دانش به تصمیم، امکان حفظ، انتقال و بازتولید خرد اکولوژیکی و دانش ضمنی و صریح نهفته در مناظر میراثی را فراهم ساخته و زمینه را برای شکل‌گیری مناظر میراثی، پویا و مبتنی بر شواهد مهیا می‌کنند.

واژگان کلیدی: مناظر میراثی، سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری، طراحی محاسباتی، داده‌کاوی، پهپاد–فتوگرامتری.

١– مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری نگارنده اول با عنوان «سیستم های پشتیبان تصمیم گیری احیایی– تطبیقی مبتنی بر دیتای کم ابزا انتقال ژن فرهنگی در مناظر میراثی(باغ ایرانی)» می باشد، که سال (١٤٠٢) در دانشگاه (تربیت مدرس) ارائه شده است.

۱-مقدمه

تحولات علمی همواره با تغییر پارادایم‌هایی همراه بوده‌اند که شیوه شناخت، تولید دانش و حل مسئله را دگرگون کرده‌اند. توماس کوهن (Kuhn, 1962, 1979)، این دگرگونی‌ها را در قالب «انقلاب‌های علمی» توصیف می‌کند. تسلط محاسبات و الگوریتم‌ها، بر جهان کنونی و رشد سریع آن‌ها مصداقی از توصیف کوهن است (Kurzweil, 2005). همگرایی روزافزون فناوری‌های دیجیتال، نقش داده و الگوریتم‌ها را در شکل‌دهی آینده جوامع و محیط‌های انسان‌ساخت به‌طور چشمگیری افزایش داده است. در معماری منظر، این تغییر پارادایم بیش از هر چیز در گذار از طراحی و تصمیم‌گیری مبتنی بر شهود به طراحی و تصمیم‌گیری داده‌محور نمود یافته است؛ پارادایمی که در آن کیفیت تصمیم‌ها بیش از گذشته به کیفیت داده، فناوری‌های برداشت داده و قابلیت تبدیل آن‌ها به اطلاعات و دانش قابل استفاده برای تصمیم‌گیری وابسته است. این گذار پارادایمی، طراحی را از یک فعالیت صرفاً مبتنی بر تجربه به فرایندی محاسباتی، دانش‌بنیان و مبتنی بر داده سوق داده است. در این گذار، انقلاب چهارم صنعتی (Elghaish et al., 2022; Xu et al., 2018)، مبتنی بر داده‌های بزرگ، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، حسگرهای هوشمند، واقعیت مجازی، رباتیک و فناوری‌های نوین برداشت داده (Melendez et al., 2020)، شیوه شناخت، تحلیل و تصمیم‌گیری درباره محیط را متحول کرده است.

اگرچه فناوری‌های انقلاب‌های محاسباتی نسل سوم یعنی عصر اختراع رایانه‌های شخصی و اینترنت مشهور به عصر دیجیتال، عمدتاً در خدمت تولید ابزارهای دیجیتال در یک بستر محاسباتی برای ارتقاء شیوه‌های بازنمایی، مستندسازی و مدل‌سازی در طراحی معماری و معماری منظر بودند، فناوری‌های نوین علاوه بر تولید داده، امکان تحلیل، پیش‌بینی، شبیه‌سازی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری را نیز فراهم می‌کنند؛ بنابراین این سؤال که چگونه می‌توان داده‌های تولیدشده توسط این فناوری‌ها را به اطلاعات، دانش و تصمیم‌های مؤثر برای طراحی و مدیریت محیط‌های انسان‌ساخت تبدیل کرد و مناظر میراثی آینده را در بستر داده و فناوری‌های نو باز تعریف نمود، سؤالات بسیار اساسی است که جهت تحقیقات آینده معماری منظر را مشخص می‌کند. مناظر میراثی سیستم‌هایی پویا، پیچیده و چندلایه‌اند (Goodarzi et al., 2025) که ارزش‌های تاریخی، فرهنگی، اکولوژیکی، اجتماعی و کالبدی را به‌صورت هم‌زمان در خود جای داده‌اند. حفاظت، مدیریت و طراحی این مناظر مستلزم شناخت روابط میان این لایه‌های مختلف و پیش‌بینی پیامدهای تصمیم‌های امروز بر آینده آن‌هاست. اگرچه با ظهور انقلاب‌های دیجیتال دهه ۱۹۶۰ بنیان رویکردهایی همچون طراحی اکولوژیک و طراحی احیایی، با تکیه بر تفکر سیستمی و آثار ایان مک‌هارگ و جان تی لایل (Hyun et al., 2020)، شکل گرفت و محققان (Cole, 2012; Dias, 2015; du Plessis, 2012; Hyun et al., 2020; Plaut et al., 2012)، چارچوبی ارزشمند برای شناخت این پیچیدگی‌ها فراهم کرده‌اند؛ اما پیچیدگی روزافزون مناظر میراثی متأثر از تولید داده‌های بزرگ و رشد شتابنده فناوری‌های دیجیتال، ضرورت بازاندیشی در ابزارهای شناخت و تصمیم‌گیری را آشکار ساخته است. در چنین شرایطی، چالش اصلی تنها حفاظت از میراث نیست، بلکه تبدیل داده‌های چندمنبعی به دانشی است که بتواند تصمیم‌های آینده را به‌صورت هوشمندانه پشتیبانی کند چراکه در جهان کنونی و آینده جهان با بحران تصمیم‌گیری برای طراحی اکولوژیک (Murphy, 2016)، و انعکاس ردپای خردهای اکولوژیکی نهفته در مناظر میراثی به نسل آینده طراحی/انسان مواجه است.

در این میان، فناوری‌های برداشت داده، از جمله سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور، اسکن لیزری، فتوگرامتری و پهپادها، به یکی از ارکان اصلی شناخت مناظر میراثی تبدیل شده‌اند. اهمیت این فناوری‌ها تنها در افزایش دقت و سرعت مستندسازی نیست، بلکه در تولید داده‌های دقیق، چندمقیاسی و چندلایه‌ای است که امکان یکپارچه‌سازی اطلاعات، استخراج دانش و تحلیل سناریوهای مختلف را فراهم می‌کنند. این داده‌ها زیربنای سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری را تشکیل می‌دهند؛ سیستم‌هایی که با تبدیل داده به اطلاعات و دانش، امکان تحلیل، ارزیابی و مقایسه گزینه‌های مختلف را فراهم کرده و تصمیم‌گیری را از اتکا به شهود فردی به فرایندی نظام‌مند، شفاف و مبتنی بر شواهد سوق می‌دهند. از این‌رو، استفاده از ابزارهای محاسباتی که بتوانند داده‌های چندلایه را تحلیل، سازمان‌دهی و به دانش قابل استفاده تبدیل کنند، ضرورتی اساسی برای مدیریت مناظر میراثی آینده به شمار می‌رود.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های متعددی به توسعه طراحی محاسباتی و مولد (Claghorn, 2018; Serdar & Kaya, 2019)، استخراج دانش و رویکردهای داده‌محور در مناظر میراثی (Min & Lee, 2019)، سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری برای حفاظت و مدیریت میراث (Di Matteo et al., 2021; Egusquiza et al., 2022; Lucchi, 2023) و نیز کاربرد هوش مصنوعی و سیستم‌های خبره در حوزه میراث فرهنگی (Salingaros & Mehaffy, 2015; Lavdas et al., 2023; Zavoleas et al., 2023; Previtali & Barazzetti, 2023; Rahaman, 2024) پرداخته‌اند، اما همچنان شکاف قابل‌توجهی میان تولید و یکپارچه‌سازی داده‌های چندمنبعی، استخراج دانش و تبدیل آن به دانش‌های قابل استفاده برای تصمیم‌های طراحی و مدیریتی در مناظر میراثی وجود دارد. افزون بر این، مطالعات موجود (Wang et al., 2023; López Sánchez et al., 2020; Rędzińska et al., 2022). عمدتاً بر توسعه ابزارهای فنی، مدل‌های اثبات مفهوم یا تحلیل داده متمرکز بوده‌اند و چارچوبی یکپارچه، مقیاس‌پذیر و مبتنی بر سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری که بتواند دانش‌های سنتی، ژن‌های فرهنگی (Goodarzi et al, 2023a) و زبان‌های الگوی مناظر میراثی را در قالب فرآیندهای طراحی احیایی–تکاملی به تصمیم‌های آینده‌نگر منتقل کند، ارائه نکرده‌اند. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، چارچوبی داده‌محور و مبتنی بر سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری ارائه می‌دهد که داده‌های مکانی، سه‌بعدی و محیطی را به دانش قابل‌استفاده برای پشتیبانی از طراحی تکاملی و مدیریت مناظر میراثی آینده تبدیل می‌کند. لذا پژوهش حاضر ابتدا اهمیت داده و انواع داده‌ها و فناوری‌های برداشت آن‌ها در مناظر میراثی را مرور می‌کند و فناوری پهپاد–فتوگرامتری را به‌عنوان نمونه‌ای کارآمد برای مستندسازی باغ‌های تاریخی ایران معرفی می‌کند. در ادامه، با معرفی چارچوب سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری توسعه‌یافته به این سؤال پژوهش که چگونه داده‌های حاصل از این فناوری‌ها می‌توانند در یکپارچه‌سازی اطلاعات، استخراج دانش، پشتیبانی از تصمیم‌گیری و انتقال دانش و خرد اکولوژیکی مناظر میراثی ازجمله باغ‌های تاریخی ایران، به نسل‌های آینده به کار گرفته شوند، پاسخ می‌دهد.

بدین ترتیب نوآوری پژوهش حاضر در دو سطح قابل تبیین است: در سطح روش‌شناختی، این پژوهش جز اولین پژوهش‌هایی است که با تلفیقِ سه حوزه «برداشت داده با پهپاد–فتوگرامتری»، «استخراج ویژگی‌های هندسی–اقلیمی» و «یادگیری ماشین پراکنده چارچوبی خودکار برای شناساییِ ژن‌های ساختاری مناظر میراثی ارائه می‌دهد. در سطح کاربردی–مفهومی، نوآوری در گذار از حفاظتِ ایستا به طراحیِ دانش‌بنیان برای مناظر میراثی آینده است.

۲–مرور مبانی نظری و پیشینه

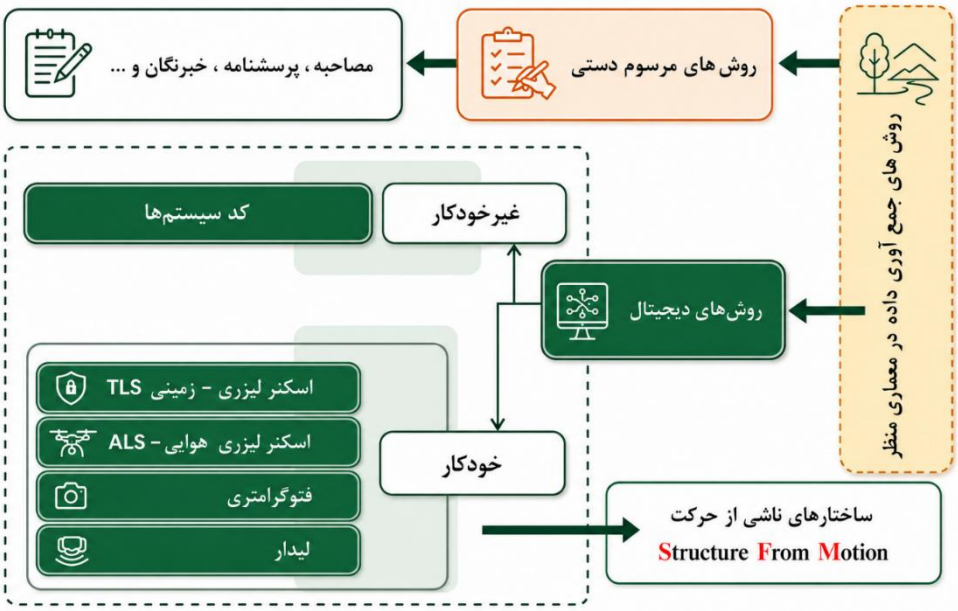
۲–۱–از داده تا دانش: نقش داده‌کاوی در طراحی منظرِ مبتنی بر دانش

در عصر سیستم‌های محاسباتی و پارادایم داده محور، مناظر میراثی صرفاً به‌عنوان یک پدیده کالبدی مطالعه نمی‌شود، بلکه به‌عنوان مجموعه‌ای از داده‌های چندلایه و دانش نهفته در نظر گرفته می‌شود که می‌توان آن را مستندسازی، تحلیل و در فرآیندهای تصمیم‌گیری به کار گرفت. در این پارادایم، داده صرفاً یک محصول جانبی نیست، بلکه سرمایه‌ای راهبردی برای تولید دانش، هدایت تصمیم‌گیری و آشکارسازی ابعاد پنهان و ناملموس منظر به شمار می‌آید (Karandinou, 2018) بهره‌گیری از داده، علاوه بر افزایش دقت تحلیل‌ها، امکان پیش‌بینی پیامدهای طراحی، ارتقای یادگیری، تقویت شهود حرفه‌ای و در نهایت اتخاذ تصمیم‌های آگاهانه‌تر را فراهم می‌کند (Deutsch, 2015). اگرچه گسترش فناوری‌های دیجیتال، داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی، نقش داده را در طراحی بیش از گذشته برجسته کرده است، اما استفاده از داده در معماری، معماری منظر و برنامه‌ریزی شهری پدیده‌ای جدید نیست. داده همواره، به‌صورت آگاهانه یا ضمنی، بخشی از فرآیند طراحی بوده است (Melendez et al., 2020). آنچه امروز تغییر کرده، ظرفیت فناوری‌های نوین برای تولید، کمی‌سازی، ذخیره، یکپارچه‌سازی و تحلیل حجم عظیمی از داده‌ها در مقیاس‌ها و قالب‌های مختلف است (Deutsch, 2015). به موازات آن، مفهوم «داده» به طور فزآینده‌ای در مطالعات مکانی، خلاقانه و مطالعات فرهنگی، فرآیندها، روش‌ها و کلمات وام گرفته از علوم دیگر با آن مواجه می‌شوند؛ مورد بحث قرار می‌گیرند و بهینه‌سازی می‌شوند و زمینه‌های

بین‌رشته‌ای جدیدی پدیدار می‌شود. این تحول، مفهوم داده را به یکی از مفاهیم محوری مطالعات میان‌رشته‌ای تبدیل کرده و زمینه شکل‌گیری رویکردهای نوینی را در شناخت و طراحی منظر فراهم ساخته است .بااین‌حال، ارزش داده صرفاً به گردآوری آن محدود نمی‌شود، بلکه به نحوه پردازش، تحلیل و تفسیر آن وابسته است. در این میان، داده‌کاوی نقش واسط میان داده‌های خام و دانش قابل استفاده را ایفا می‌کند. داده‌کاوی با شناسایی الگوها، روابط و همبستگی‌های پنهان، داده‌های خام را به اطلاعات و سپس به دانشی تبدیل می‌کند که می‌تواند برای پیش‌بینی، ارزیابی و مقایسه سناریوهای مختلف طراحی مورد استفاده قرار گیرد (Melendez et al., 2020). از این رو رویکردهای مختلف داده‌کاوی در حوزه‌ی معماری منظر روند تحقیقات را ارتقاء داده است (Ran et al., 2018)، اما بهبود هر چه بیشتر آن وابسته به گام اول تولید دانش، یعنی چگونگی جمع‌آوری داده و منابع آن است که ادامه به آن خواهیم پرداخت.

۲-۲- روش‌های جمع‌آوری داده در منظر

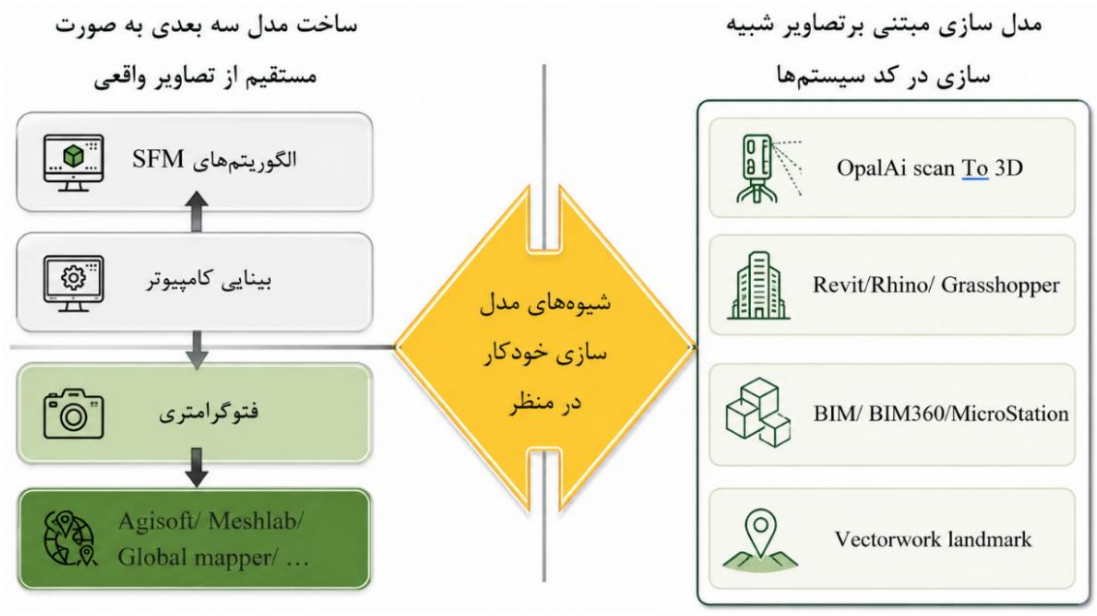
داده، زیربنای هر فرآیند تحلیل و تصمیم‌گیری است؛ از این‌رو، انتخاب روش مناسب برای برداشت، نمونه‌برداری و یکپارچه‌سازی داده‌ها، نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت اطلاعات و دانش تولیدشده دارد (Janowicz et al., 2020). امروزه پیشرفت فناوری‌های دیجیتال در دهه‌های اخیر، شیوه‌های برداشت و مدل‌سازی داده را در معماری منظر (Bai, 2020) و به‌ویژه در مناظر میراثی دگرگون کرده است (Lin et al., 2021). متاثر از این پیشرفت‌ها در دهه اخیر، پژوهش‌های متعددی از جمله (George & Park, 2020; Özdemir et al., 2021; Schlickman, 2020; Wu & Yan, 2021)، بر توسعه فناوری‌های دیجیتال برای برداشت و بازسازی سه‌بعدی مناظر مبتنی بر تصویر در متمرکز بوده‌اند بااین‌حال، در بسیاری از مطالعات، همچنان از روش‌های متداولی مانند پرسشنامه، مصاحبه و نظر خبرگان برای گردآوری داده استفاده می‌شود. اگرچه این روش‌ها در ثبت ابعاد ادراکی و اجتماعی منظر ارزشمند هستند اما در مستندسازی دقیق ویژگی‌های کالبدی و فضایی، محدودیت‌هایی دارند (Schlickman, 2020). در مقابل رویکردهای متکی بر تکنیک‌های دیجیتالی مانند تحلیل فضایی، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و کد سیستم‌ها (Urech, 2021)، روش‌های مبتنی بر سنجش از راه دور و پرنده‌های بدون سرنشین (شکل ۱)، امکان تولید داده‌های دقیق، چندلایه و چندمقیاسی را فراهم کرده‌اند. این فناوری‌ها علاوه بر افزایش دقت و سرعت برداشت داده، ظرفیت یکپارچه‌سازی داده‌های مکانی با سایر اطلاعات محیطی، تاریخی و فرهنگی را نیز فراهم می‌کنند و به همین دلیل، به یکی از مهم‌ترین منابع داده واقعی برای سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در مناظر میراثی تبدیل شده‌اند.



شکل ۱: روش‌های مختلف جمع‌آوری داده در معماری منظر، ماخذ: نگارنده

۲-۳-شیوه‌های مدل‌سازی سه بعدی مبتنی بر داده واقعی در معماری منظر

شیوه‌های مدل‌سازی سه بعدی در منظر را می‌توان به دو دسته کلی یعنی ساخت مدل‌سازی مبتنی بر تصاویر و داده های واقعی و مدل‌سازی مبتنی بر کد سیستم‌ها (شکل ۲)، تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های مبتنی بر کد، عناصر صحنه به‌صورت دستی و بر اساس هندسه‌های از پیش تعریف‌شده در محیط مدل‌سازی بازسازی می‌شوند. اگرچه این روش‌ها سال‌ها ابزار اصلی بازنمایی پروژه‌های معماری منظر بوده‌اند، اما محدودیت‌های متعددی از جمله زمان‌بر فرآیند مدل‌سازی لزوم تفسیر و بازسازی دستی ویژگی‌های سایت بوده دارند. افزون بر این، بازنمایی عناصری مانند پوشش گیاهی، توپوگرافی و سایر اجزای طبیعی معمولاً با ساده‌سازی هندسی انجام می‌شود؛ بنابراین موقعیت، فرم، ابعاد و ویژگی‌های واقعی عناصر منظر به‌طور کامل بازتولید نمی‌شود و مدل حاصل بیشتر تفسیری از محیط است تا بازنمایی دقیق آن. این ساده‌سازی هندسی موجب کاهش دقت مدل‌های سه‌بعدی در اندازه‌گیری، تحلیل و توسعه طراحی شده و مناظر بازسازی‌شده را گاه مصنوعی، تکراری یا انتزاعی جلوه می‌دهد (Trebuňa et al., 2018). این محدودیت‌ها گزینه‌های استفاده از هندسه بازسازی شده را به عنوان منبعی برای طراحی منظر محدود می‌کند. همچنین مدل‌های بازسازی شده ارزش کمی برای درک تحلیلی و زیبایی‌شناختی در طراحی منظر دارند. نقش آن‌ها در طراحی منظر معمولاً محدود به شبیه‌سازی زمینه‌ای است که یک پروژه در آن با جایگزینی سایت موجود ایجاد می‌شود. از سوی دیگر، مدل‌های جامع اطلاعات ساختمان نیز معمولاً برای جزئیات و ساخت استفاده می‌شوند و بنابراین پس از انجام طراحی ساخته می‌شوند. آن‌ها اغلب بسیار سفت و سخت و پیچیده هستند که نمی‌توانند به طور مؤثر در توسعه طراحی مشارکت کنند (Urech, 2021). بدین ترتیب اخیرا گرایش‌ها به سوی تولید مدل‌های سه‌بعدی از تصاویر واقعی به طور مستقیم، سوق یافته اند. همچنین در سال‌های اخیر تکنولوژی‌های دیجیتال مبتنی بر تصاویر و داده‌های واقعی از جمله روش‌های سنجش از راه دور[1]، فتوگرامتری[2] و بینایی کامپیوتر[3] به ابزارهایی قدرتمند برای بازنمایی و تفسیر معماری، منظر و میراث فرهنگی شده‌اند.



شکل ۲: شیوه‌های مدل‌سازی سه بعدی در معماری منظر، ماخذ: نگارندگان

1 Remote sensing
2 Photogrammetry
3 Computer vision

۲-٤-برداشت داده و مدل‌سازی سه‌بعدی مبتنی بر روش‌های مختلف اسکن سنجش از راه دور در معماری منظر

پیشرفت فناوری‌های بینایی کامپیوتر[1] و سنجش از دور، تحول چشمگیری در برداشت داده و مدل‌سازی سه‌بعدی مناظر ایجاد کرده است. یکی از مهم‌ترین این روش‌ها، ساختار از حرکت (Structure from Motion; SfM)، است که با استفاده از مجموعه‌ای از تصاویر دوبعدی هم‌پوشان ساختار هندسی سه‌بعدی صحنه را به‌صورت خودکار بازسازی می‌کند (Ham et al., 2019; Szeliski, 2022). مبنای این روش از نحوه ادراک عمق توسط بینایی انسان الهام گرفته شده است؛ به‌گونه‌ای که با تطبیق نقاط متناظر در تصاویر متعدد، موقعیت سه‌بعدی اجسام بازسازی می‌شود (Do & Nguyen, 2019). همین اصل، پایه توسعه بسیاری از روش‌های نوین فتوگرامتری دیجیتال را تشکیل داده و امکان تولید مدل‌های سه‌بعدی دقیق از محیط را تنها با استفاده از تصاویر فراهم کرده است. امروزه SfM به یکی از پرکاربردترین تکنیک‌های سنجش از راه دور[2] (Shervais, 2016)، در مستندسازی، تحلیل و مدل‌سازی معماری، مناظر و میراث فرهنگی تبدیل شده است.

۲-٤-۱-فتوگرامتری-ساختار ناشی از حرکت (SfM)

سابقه تولید فتوگرامتری به دهه‌های قبل از ۱٤۸۰ برمی‌گردد اما فتوگرامتری دیجیتال به عنوان تکنیک‌های توسعه یافته جدید برای بازسازی مدل‌های سه بعدی با ظهور تصاویر دیجیتال و متاثر از جریان‌های محاسباتی و الگوریتم‌های بینایی کامپیوتر در دهه ۱۹۹۰ احیا شد (Aicardi et al., 2018). در سال‌های اخیر، با وقوع انقلاب‌های محاسباتی، پیشرفت پردازش تصویر و الگوریتم‌های ساختار ناشی از حرکت در بینایی کامپیوتر و ادغام آن با فتوگرامتری، منجر به توسعه یک روش جدید و کاملاً خودکار فتوگرامتری برای تولید داده‌های مدل‌های سه بعدی یا دوقلوهای دیجیتال شده است (Javernick et al., 2014). ادغام این دو حوزه‌ی قدرتمند در قالب رویکرد فتوگرامتری ساختار ناشی از حرکت (Luhmann, 2006)، منجر به تبدیل وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین[3] به یک ابزار مهم جمع‌آوری داده در معماری (Tal & Altschuld, 2021) و معماری منظر (George & Park, 2020; Tal & Altschuld, 2021; C. Zhang et al., 2020)، شده است. سیستم‌های هوایی بدون سرنشین که در محاوره پهپاد نیز گفته می‌شود، با فراهم کردن پتانسیل‌های مهمی برای جمع‌آوری داده، امکان اندازه‌گیری‌های دقیق و مستندنگاری‌های دقیق و علمی مناظر موجود مبتنی بر ابرنقطه‌ای سه بعدی متراکم[4]، به وضوح بر تکامل تئوری و روش طراحی در معماری منظر تاثیر گذاشته است (Kullmann, 2018; Ortiz-Cordero & Fernández, 2017). علیرغم وجود طیف وسیعی از امکانات، آنالیز فضایی-بصری در معماری منظر مبتنی بر روش‌ها و ابزارهای پیشرفته نقشه‌برداری مدل‌های سه بعدی ابرنقطه‌ای (تولید شده با نرم‌افزارهای فتوگرامتری)، هنوز چندان رایج نیست (Liu & Nijhuis, 2021). محققان با اشاره به افزایش پیچیدگی و مقیاس پروژه‌های منظر و بررسی ابزارهای تکنولوژیک جمع‌آوری داده، مدل‌سازی سه بعدی در معماری منظر مبتنی بر کد سیستم‌ها، جی‌ای‌اس و واقعیت مجازی[5] را مورد نقد قرار داده و بر لزوم به کارگیری متدهای فتوگرامتری برای تجسم داده‌ها و مدل‌سازی (George et al., 2022)، تاکید می‌کنند. در این پژوهش نیز، پهپاد–فتوگرامتری صرفاً یک فناوری برداشت داده تلقی نمی‌شود، بلکه به‌عنوان ابزاری برای تولید داده‌های دقیق، چندلایه و قابل تحلیل معرفی می‌شود که می‌تواند ورودی سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری را فراهم سازد. از این منظر، ارزش اصلی این فناوری تنها در تولید مدل‌های سه‌بعدی واقع‌گرایانه نیست، بلکه در تبدیل داده‌های خام محیطی به اطلاعات و دانش قابل استفاده برای تحلیل، مدیریت و تصمیم‌گیری درباره آینده مناظر میراثی است. پهپاد–فتوگرامتری به منظور ثبت داده‌های رودخانه برای ایجاد ابرنقاط و مدل‌سازی سه بعدی در مقیاس وسیع (Lin & Girot, 2014)، جمع‌آوری داده در سایت‌هایی با شرایط سیال (Milling, 2019)، مدل‌سازی و نقشه‌برداری از سایت‌ها و

1 Computer vision
2 remote sensing technique
3 Unmanned aerial vehicles UAVs
4 dense 3d point cloud data
5 Virtual reality

محیط‌های شهری (Barth, 2017)، عکس‌برداری از مناظر با دسترسی دشوار (Rekittke et al 2013)، اندازه‌گیری دقیق و مستندنگاری سایت‌های تاریخی (Park, 2019)، مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-٤-۲-اسکن لیزری در معماری منظر

اسکن لیزری (LiDAR) یکی از دقیق‌ترین فناوری‌های برداشت داده برای استخراج خودکار هندسه محیط و تولید مدل‌های سه‌بعدی است که طی سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای در معماری منظر یافته است[1] (Yunsheng Wang et al., 2019)، این فناوری شامل دو دسته کلی اسکن لیزری زمینی[2] و اسکن لیزری هوابرد[3] (Aziz et al., 2012)، در سال‌های اخیر به عنوان منبع دقیق اطلاعات برای تجزیه‌وتحلیل و مدل‌سازی سه بعدی توسعه یافته است. این دسته‌بندی مبتنی بر اندازه‌گیری فاصله از سکو معمولاً براساس زمان استفاده شده توسط پرتو لیزر برای رفتن و برگشتن جهت جمع‌آوری داده انجام می‌شود. داده‌های اسکن شده با لیزر از بازگشت اندازه‌های سطوح بصری[4] حاصل می‌شود (Trebuňa et al., 2018).

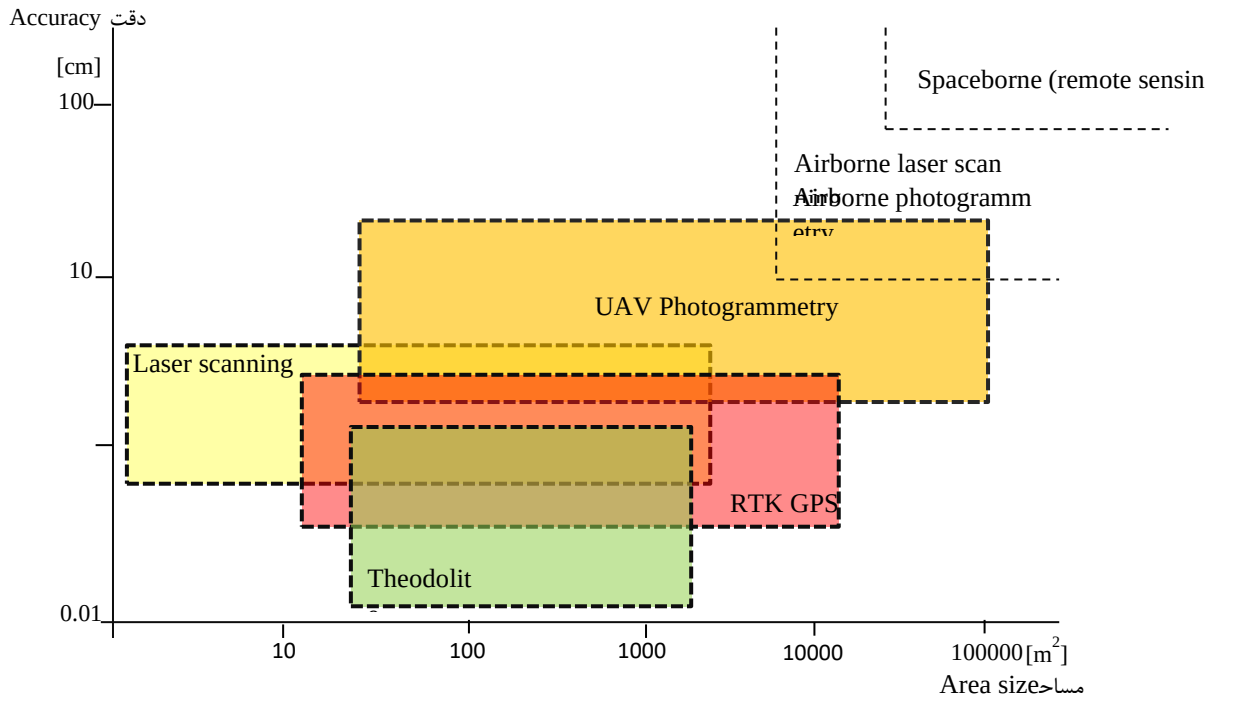
دیتاهای اسکن شده با لیزر یا همان مدل‌های ابرنقطه با موقعیت مکانی مرجع[5] می‌تواند برای دست‌یابی به ویژگی‌های فرمال منظر توسط طراحان مورد استفاده قرار گیرد (Urech, 2020). اخیراً استفاده از اسکن لیزری زمینی در شبیه‌سازی منظر مورد استقبال قرار گرفته است (Herrero-Tejedor et al., 2020; Starek et al., 2011). همچنین در حوزه‌ی میراث فرهنگی در ترکیب با فتوگرامتری برای برداشت سایت‌های تاریخی (Jo & Hong, 2019; Lercari, 2016; Megarry et al., 2016)، برداشت داده از باغ‌های تاریخی جایی که تاج درختان و برخی موانع فیزیکی باعث ایجاد نقاط کور در مدل‌سازی سه‌بعدی از محیط می‌شدند، از جمله باغ‌های تاریخی ژاپنی (Kumazaki & Kunii, 2015)، باغ‌های کلاسیک چینی (Liang et al., 2018)، جهت مستند نگاری مورد استفاده قرار داده‌اند. همچنین استفاده از اسکن‌های لیزری موبایلی[6] نیز به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته و اخیراً نیز برای برداشت سایت‌ها و باغ‌های تاریخی (Del Duca & Machado, 2023)، استفاده شده است. ترکیب این فناوری‌ها امکان تولید داده‌های سه‌بعدی دقیق‌تر، کاهش نقاط کور و غنی‌تر شدن داده‌های ورودی سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند و ظرفیت تحلیل و مدیریت مناظر میراثی را افزایش می‌دهد.

۲-۵-مقایسه روش‌های جمع‌آوری داده خودکار؛ اسکنر لیزری، فتوگرامتری و لیدار برای ساخت مدل سه بعدی بر اساس فاصله و مقیاس

فناوری‌های سنجش از دور، شامل فتوگرامتری، اسکن لیزری و لیدار، امروزه از مهم‌ترین روش‌های تولید مدل‌های سه‌بعدی داده‌محور در معماری منظر به شمار می‌روند. توسعه پهپادها نیز امکان برداشت سریع، کم‌هزینه و انعطاف‌پذیر داده‌ها را فراهم کرده و کاربرد این فناوری‌ها را در مستندسازی و مدل‌سازی مناظر به‌طور چشمگیری گسترش داده است (Klepárník & Sedláček, 2021). انتخاب هر یک از این روش‌ها به مقیاس پروژه، دقت مورد نیاز، ویژگی‌های سایت و نوع داده‌های موردنیاز بستگی دارد (شکل ۳). پهپادها می‌توانند به حسگرهای مختلفی از جمله دوربین‌های RGB، اسکنرهای لیزری، لیدار و حسگرهای چندطیفی و فراطیفی مجهز شوند (Puliti et al., 2020; Salamí et al., 2014). این فناوری‌ها از نظر تراکم ابرنقاط، دقت، پیچیدگی پردازش و هزینه تفاوت دارند فتوگرامتری مبتنی بر تصویر با تولید ابرنقاط رنگی و متراکم، روشی سریع و اقتصادی برای مستندسازی سه‌بعدی محسوب می‌شود و در بسیاری از کاربردها دقتی قابل مقایسه با اسکن لیزری ارائه می‌دهد (Shervais, 2016). در مقابل، لیدار و اسکن لیزری به شرایط نوری وابسته نیستند و امکان برداشت دقیق هندسه محیط را فراهم می‌کنند (Dino et al., 2020)، اما هزینه تجهیزات، پیچیدگی

1 LiDAR
2 Terrestrial Laser Scanning (TLS)
3 Airborne Laser Scanning (ALS) by airplane or helicopter
4 optical
5 georeferenced point cloud model
6 mobile laser scanning

پردازش و نیاز به تخصص بیشتر، استفاده گسترده از آن‌ها را محدود کرده است (Golparvar-Fard et al., 2011). تفاوت دیگر این دو روش، تراکم مدل‌های ابرنقطه‌ای تولید شده در تکنیک‌های مبتنی بر تصویر است. تکنیک‌های مبتنی بر تصویر ثابت کرده‌اند که جایگزین قوی برای لیدار هستند و اخیراً منجر به مدل‌هایی شده‌اند که از نظر دقت با لیدار قابل مقایسه هستند (Strecha et al., 2008). مطالعات نشان می‌دهند که فتوگرامتری و اسکن لیزری بیش از آنکه رقیب یکدیگر باشند، فناوری‌های مکمل محسوب می‌شوند. ادغام داده‌های حاصل از این دو روش می‌تواند مدل‌های سه‌بعدی کامل‌تر و دقیق‌تری تولید کرده و زمینه را برای تحلیل‌های پیشرفته‌تر و توسعه کاربردهای جدید فراهم سازد (Lato et al., 2015).



شکل ۳: روش و ابزار جمع‌آوری داده در منظر بر اساس مقیاس، ماخذ: نگارنده

۲-۶-جمع‌آوری داده در سایت‌ها و مناظر میراثی-تاریخی با استفاده از پهپاد-فتوگرامتری

مطالعات نشان می‌دهد که مدل‌های سه بعدی مبتنی بر تصویر و ژئورفرنس در حال حاضر به عنوان یک پایگاه دانش اولیه مهم برای پروژه‌های میراث (Pérez-Martín et al 2021: Cazzani et al 2019: Liang et al 2018)، از جمله مناظر فرهنگی مورد تقاضا هستند که به لطف ادغام حوزه‌های ذکر شده رخ داده است.

در دهه‌های اخیر استفاده از پهپادها به عنوان یکی از روش‌های جمع‌آوری خودکار داده دیجیتال ارزان قیمت، سریع و دقیق در مقایسه با روش‌های سنتی، با اهداف مستندنگاری در زمینه‌های باستان‌شناسی محوطه‌های تاریخی (Adamopoulos & Rinaudo, 2020; Campana, 2017; Cowley et al., 2017; Fernández-Hernandez et al., 2015; Lin et al., 2021; Risbøl & Gustavsen, 2018; Stek, 2016)، مطالعه‌ی رفتار سازه‌ای بناهای تاریخی و دقت بیشتر در اندازه‌گیری تغییر شکل ساختاری (Kutlu & Soyluk, 2023; Kutlu et al., 2023) و مدل‌سازی جامع اطلاعات ساختمان‌های میراثی[1] (Alshawabkeh & Baik, 2023; Dore et al., 2015; Martínez-Carricondo et al., 2021; Yang et al., 2020) توسعه چشمگیری داشته است. همچنین پیشرفت‌های امیدوار کننده‌ای در کاربرد آن‌ها برای جمع‌آوری داده و مستند نگاری مناظر باغ‌های تاریخی (Cazzani et al., 2019; Herrero-Tejedor et al.,

1 Historic building information modelling

2020; Jia et al., 2022; Kumazaki & Kunii, 2015; Liang et al., 2018)، وجود دارد. در جدیدترین مطالعات مربوط به باغ‌های کلاسیک تاریخی و بناهای باستانی (Hess & Ferreyra, 2021; Perfetti et al., 2023)، فتوگرامتری با اسکنرلیزری موبایلی برای ساخت مدل‌های سه بعدی ادغام شده است. ترکیب این روش‌ها می‌تواند به طور امیدوار کننده‌ای حوزه‌ی تحقیقات مناظر میراثی و باغ‌های تاریخی را بهبود بخشد؛ تصاویر به دست آمده از فتوگرامتری به دلیل داشتن نویز کمتر در داده‌ها ارزشمند است اما در برداشت داده پایین‌تر از تاج درختان دارای ضعف عملکردی است جایی که روش اسکنر لیزری به لطف زمان مورد نیاز کمتر برای برداشت، قابلیت حرکت آسان در فضا همچنین قابلیت عبور لیزر از موانع و پوشش درختان، قابل حل است. گرایش‌های فعلی برای جمع‌آوری داده و بازسازی مدل‌های سه بعدی در حوزه‌ی میراث، فتوگرامتری و اسکنر لیزری یا ترکیبی از این دو است که براساس موقعیت و میزان پیچیدگی مورفولوژی سایت، زمان، هزینه، میزان جزییات و دقت مورد نیاز از یک یا ترکیبی از این ابزارها استفاده می‌شود.

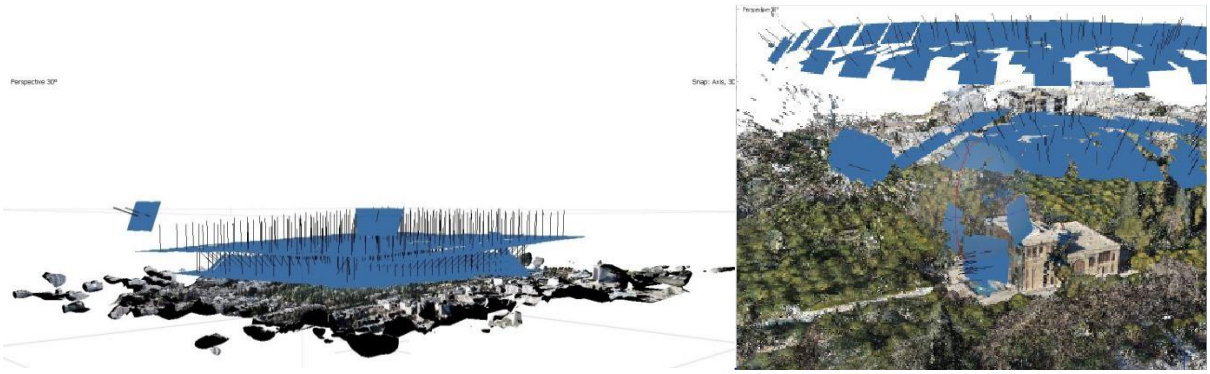
۲-۷-روش‌های پردازش داده‌های پهپاد-فتوگرامتری و تولید مدل‌های ابرنقطه

پردازش داده‌های پهپاد—فتوگرامتری برای تولید مدل‌های سه‌بعدی، عمدتاً بر پایه الگوریتم ساختار از حرکت (SfM) انجام می‌شود. در این روش، مجموعه‌ای از تصاویر هم‌پوشان (معمولاً بیش از ۷۰ درصد هم‌پوشانی) (شکل ٤)، از طریق تطبیق نقاط مشترک پردازش شده و مدل‌های سه‌بعدی، ابرنقاط و سایر محصولات رقومی تولید می‌شوند. امروزه دو رویکرد اصلی، یعنی بینایی کامپیوتر و نرم‌افزارهای فتوگرامتری، برای پردازش تصاویر و تولید ابرنقاط به‌کار می‌روند که هر دو بر الگوریتم‌های SfM استوارند ابرنقاط حاصل از پردازش رویکردهای مختلف پردازش تصویر در حوزه بینایی کامپیوتر از دقت کمتری برخوردار بوده و فرآیند دشوارتر و زمان بر تری را طی می‌کنند.

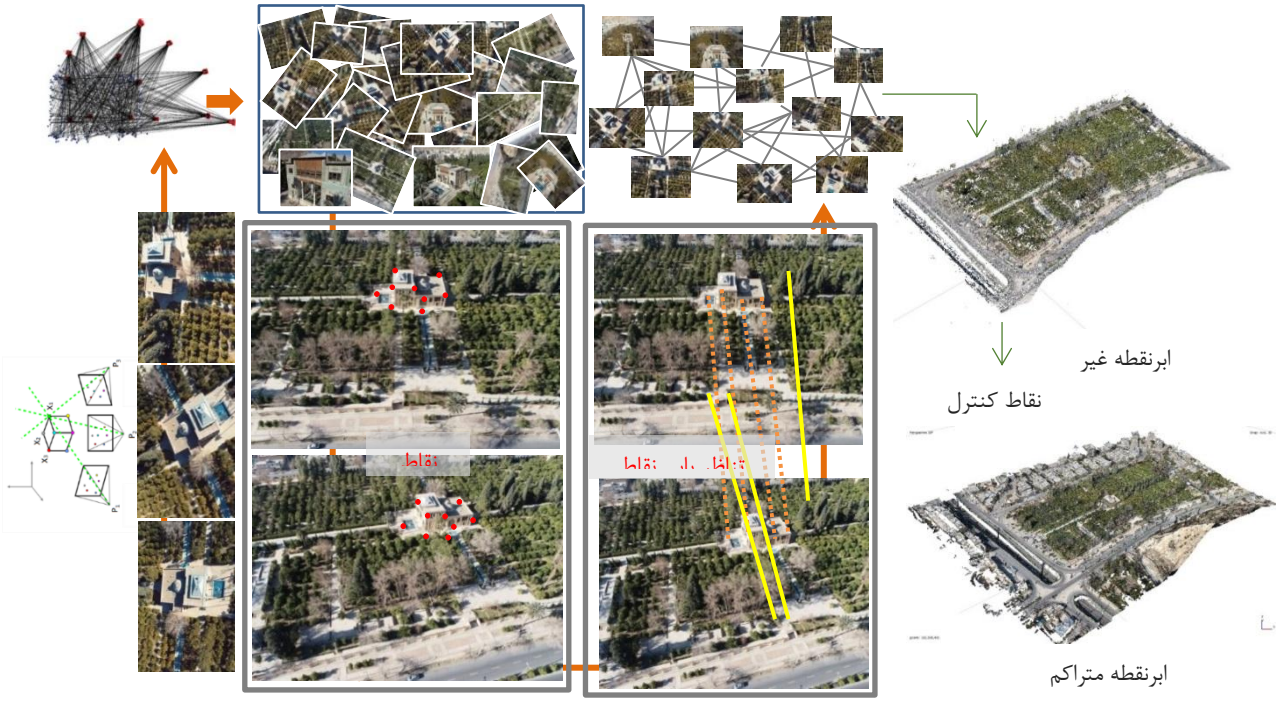
با این حال، فتوگرامتری به دلیل رویکرد متریک، امکان تولید مدل‌های سه‌بعدی دقیق و قابل اندازه‌گیری را فراهم می‌کند، در حالی که بینایی کامپیوتر بیشتر بر بازسازی و نمایش خودکار مدل تمرکز دارد. با ادغام این دو حوزه، مرز میان آن‌ها تا حد زیادی از بین رفته و امکان تولید مدل‌های هندسی دقیق با سطح بالایی از اتوماسیون فراهم شده است (Lucieer et al., 2014). دقت مدل‌های تولیدشده به عوامل مختلفی از جمله کیفیت دوربین، اعوجاج عدسی، میزان هم‌پوشانی تصاویر و دقت تعیین موقعیت وابسته است.

پهپادها موقعیت تقریبی تصاویر را با استفاده از GPS ثبت می‌کنند، اما به دلیل محدودیت دقت ارتفاعی (Tal & Altschuld, 2021)، برای ژئورفرنس دقیق مدل و بهبود موقعیت و مقیاس آن، استفاده از نقاط کنترل زمینی[1] (GCPs) ضروری است (Nex & Rinaudo, 2011). فرآیند پردازش در نرم‌افزارهای فتوگرامتری از جمله Agisoft، از تعیین موقعیت تقریبی تصاویر و همتراز شدن[2] آن‌ها آغاز می‌شود. سپس با عملیات تناظریابی[3] و توجیه نسبی خودکار نقاط مشترک، ابرنقاط غیرمتراکم تولید شده و پس از اعمال نقاط کنترل زمینی، ابرنقاط متراکم، مدل سه‌بعدی با بافت واقعی و محصولات مشتق‌شده‌ای مانند مدل‌های رقومی ارتفاعی و نقشه‌های سه‌بعدی ایجاد می‌شوند (شکل ٤). این محصولات، داده‌های پایه و قابل اعتماد برای تحلیل‌های فضایی و ورودی سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در مدیریت و طراحی مناظر میراثی را فراهم می‌کنند.

1 Ground control point
2 aligned
3 matching



شکل ٤: تصویر برداری هوایی از باغ ارم (سمت راست) و باغ دلگشا (سمت چپ)، موقعیت و همپوشانی تصاویر متعدد در ارتفاع‌های مختلف پرواز پهپاد، ماخذ: نگارنده



شکل ٥: شناسایی و تطبیق نقاط کلیدی جهت تولید ابرنقاط از تصاویر پهپاد، ماخذ: نگارندگان

۲-۸-کاربرد مدل‌های ابرنقطه سه بعدی در تحقیقات مناظر میراثی

روش‌های دیجیتال سنجش از راه دور از جمله پهپاد-فتوگرامتری و اسکنر لیزری صرفاً به فرآیند ایجاد مدل‌های سه بعدی محدود نمی‌شود. مدل‌های ابرنقطه‌ای در تجسم پویا (Nebiker et al., 2010)، تشخیص تغییرات فضایی (Richter et al., 2013)، شناسایی توده مورفولوژیکی (Urech, 2020)، ارزیابی ویژگی‌های منظر (Sedláček et al., 2020) و پشتیبانی از فرآیند طراحی و مدیریت مناظر (Aydin, 2014; Klepárník & Sedláček, 2021; Sedláček et al., 2020)، کاربرد گسترده‌ای یافته اند. همچنین، ادغام این داده‌ها با فناوری‌هایی مانند GIS، مدل‌سازی اطلاعات میراث (HBIM) و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، چشم‌اندازهای جدیدی را برای امکان توسعه پایگاه‌های داده هوشمند و سیستم‌های یکپارچه مدیریت اطلاعات میراث را فراهم کرده است (Lercari et al., 2021). در سال‌های اخیر، مدل‌های ابرنقطه به‌عنوان داده‌های پایه در توسعه سامانه‌های HBIM برای حفاظت، بازسازی (Biagini et al., 2016; Fryskowska & Stachelek, 2018; Grazianova & Mesaros, 2023; Oreni et al., 2013; Quattrini et al., 2015)، مدیریت و

پشتیبانی از تصمیم‌گیری در میراث فرهنگی (Croce et al., 2021; Godinho et al., 2020) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین، مطالعاتی مانند پروژه Cisterscapes (Hess & Ferreyra, 2021)، نشان داده‌اند که تلفیق فتوگرامتری و اسکن لیزری موبایلی می‌تواند چارچوب‌های مؤثری برای تصمیم‌گیری حفاظتی در باغ‌های تاریخی و پوشش گیاهی و بناهای میراثی آن فراهم کند. افزون بر این، مدل‌های سه‌بعدی در توسعه تورهای مجازی، مدیریت دیجیتال باغ‌های تاریخی، مستندسازی میراث و پشتیبانی از گردشگری فرهنگی (Rodríguez Sáchez et al., 2023) و مدیریت و ساماندهی فضای میراثی باغ‌های تاریخی (Malinverni et al., 2019)، نیز به‌کار گرفته شده است. با گسترش داده‌های سه بعدی[1]، این مدل‌ها به بستری ارزشمند برای پژوهش‌های بینایی کامپیوتر (Chen & Xue, 2022)، یادگیری ماشین (Rahimian et al., 2020) و مطالعات میراث فرهنگی (Mora et al., 2021) تبدیل شده‌اند. اگرچه موضوع تداوم تکاملی گونه‌های مختلف فضاهای و مناظر میراثی در پژوهش متعددی مطرح شده است اما، اغلب پژوهش‌های موجود مشابه بر مستندسازی، حفاظت و مدیریت میراث (Min & Lee, 2019b) متمرکز بوده‌اند و ظرفیت این داده‌ها برای انتقال دانش و هدایت تصمیم‌گیری درباره آینده مناظر میراثی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، مدل‌های سه‌بعدی و دوقلوهای دیجیتال صرفاً ابزار بازنمایی محیط تلقی نمی‌شوند، بلکه به‌عنوان منبع تولید دانش در سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری معرفی می‌شوند؛ سامانه‌هایی که می‌توانند دانش، الگوها و خرد اکولوژیکی نهفته در مناظر میراثی را به نسل‌های آینده منتقل کرده و از تصمیم‌گیری آگاهانه در طراحی و مدیریت مناظر آینده پشتیبانی کنند.

۳-روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نوع پژوهش طراحی علم (Design Science Research)، با ماهیت توسعه ای-کابردی و رویکرد کمّی-تحلیلی است که با هدف توسعه و ارزیابی یک دستاورد فناورانه (سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری) در بستر مطالعه موردی ۱۳ باغ‌های تاریخی ایران انجام شده است. پژوهش در پنج گام اصلی به‌صورت متوالی یعنی:

گام اول: برداشت داده‌های میدانی با استفاده از پهپاد-فتوگرامتری. گام دوم: پردازش تصاویر و تولید مدل‌های سه‌بعدی؛ ابرنقطه. گام سوم: استخراج ویژگی و تولید پایگاه داده. گام چهارم: انتخاب ویژگی و پیاده‌سازی یادگیری ماشین؛ گام پنجم: ارزیابی و اعتبارسنجی مدل و استخراج ژن‌های ساختاری، اجرا شده است. تحلیل داده‌ها در دو سطح: سطح اول (تحلیل کمی-آماری) و سطح دوم تحلیل مبتنی بر یادگیری ماشین انجام شده است که در بخش‌های آتی مقاله به آن پرداخته می‌شود.

۴-یافته‌ها

۴-۱-روش برداشت داده از نمونه‌های مورد مطالعه پژوهش (باغ‌های تاریخی ایران)

برداشت داده از باغ‌های تاریخی ایران با چالش‌هایی مانند کمبود داده‌های دقیق و به‌روز، هزینه بالای مستندسازی و محدودیت روش‌های سنتی مواجه است. روش‌هایی مانند عکاسی، برداشت میدانی و ترسیم دستی، اگرچه در مطالعات گذشته کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند، اما از نظر دقت، سرعت و بازنمایی سه‌بعدی، پاسخگوی نیاز پژوهش‌های نوین حفاظت و مدیریت مناظر میراثی نیستند (Lerma et al., 2010). در میان فناوری‌های سنجش از دور، پهپاد—فتوگرامتری به دلیل دقت مناسب، سرعت، هزینه نسبتاً پایین و قابلیت تولید مدل‌های سه‌بعدی واقع‌گرایانه، یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای مستندسازی باغ‌های تاریخی محسوب می‌شود. همچنین، با توجه به محدودیت دسترسی به سامانه‌های اسکن لیزری هوابرد در ایران، این فناوری راهکاری عملی و کارآمد برای تولید داده‌های دقیق از مناظر میراثی است.بر این اساس، در پژوهش حاضر از پهپاد—فتوگرامتری به‌عنوان روش اصلی برداشت داده استفاده

[1] 3D reconstruction

شده است. داده‌های حاصل، علاوه بر مستندسازی دقیق باغ‌های تاریخی، ورودی لازم برای تولید مدل‌های سه‌بعدی و تغذیه سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در تحلیل و مدیریت مناظر میراثی آینده را فراهم می‌کنند

۴-۲-ابزارهای جمع‌آوری داده از باغ‌های تاریخی ایران با استفاده از پهپاد-فتوگرامتری

داده‌های مکانی و تصاویر با وضوح بالا برای مدل‌سازی سه‌بعدی باغ‌های تاریخی با استفاده از پهپاد phantom 4 pro v2 با و سامانه RTK-GPS شمیم به‌منظور برداشت نقاط کنترل زمینی جمع‌آوری شدند. ترکیب این تجهیزات، امکان تولید داده‌های دقیق و ژئورفرنس‌شده را برای مستندسازی و مدل‌سازی سه‌بعدی باغ‌های تاریخی فراهم کرد. مشخصات فنی تجهیزات مورد استفاده در جدول ۱، ارائه شده است. با توجه به پراکندگی جغرافیایی باغ‌های مورد مطالعه و محدودیت‌های ناشی از همه‌گیری کووید-۱۹، فرایند اخذ مجوزها، برداشت میدانی و پردازش داده‌ها در مجموع حدود ۹ ماه به طول انجامید. تمامی تصویربرداری‌ها در شرایط جوی مناسب و در بازه زمانی تقریباً یکسان (۱۰ تا ۱۵) بین سپتامبر ۲۰۲۱ تا مارس ۲۰۲۲ انجام شد تا یکنواختی داده‌های برداشت‌شده حفظ شود.

جدول ۱: تجهیزات برداشت داده از باغ‌های تاریخی ایران و مشخصات کلی پروازها، ماخذ: نگارنده

	RGB Flight
UAV	DJI Phantom4,FC63105
Camera	20MB
Resolution (px)	12Mpx (4000x3000 px)
Flight height (m)	See section 3.3
GSD (cm)	1cm
Passes and images	Passes 5, images: depended on case
Overlap (forward & pass)	F 80% & P 70%
Bands	RGB (3 bands)

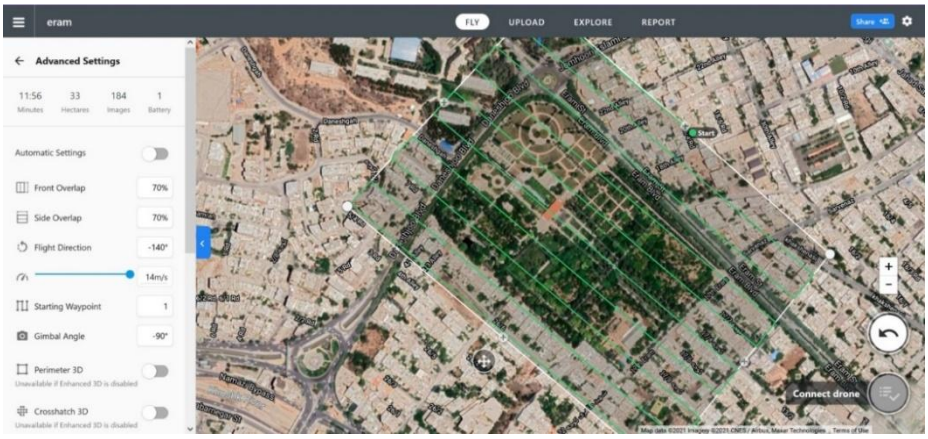
phantom 4 pro v2

۴-۳-روش جمع‌آوری داده از باغ‌های تاریخی ایران با استفاده از پهپاد-فتوگرامتری

پیش از برداشت داده، برای هر باغ تاریخی ویژگی‌های مورفولوژیکی، ابعاد و محدوده سایت، موانع فیزیکی و شرایط محیطی به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین راهبرد برداشت داده و طراحی مسیرهای پرواز ارزیابی شد. جزئیات متدولوژی طراحی پرواز، معیارهای انتخاب ارتفاع، مسیرهای پروازی و مراحل برداشت داده در پژوهش پیشین نویسندگان به‌طور کامل ارائه شده است (Goodarzi et al., 2023)، به‌طور خلاصه، با توجه به محدودیت دسترسی به اسکن لیزری هوابرد و چالش‌های اسکن لیزری زمینی در باغ‌های تاریخی، از جمله انسداد ناشی از تاج درختان (Bauwens et al., 2016; Gollob et al., 2019)، راهبرد برداشت داده بر پایه طراحی پروازهای چندگانه در ارتفاع‌های مختلف توسعه یافت. این راهبرد با هدف افزایش پوشش داده‌ها، کاهش نواحی کور و بهبود کیفیت مدل‌های سه‌بعدی تدوین شد. برای اجرای مأموریت‌های پروازی از نرم‌افزارهای D⁴Pix، DroneDeploy و Hammer استفاده شد و پس از برنامه‌ریزی مسیرهای پرواز، برداشت داده‌ها مطابق سه مرحله اصلی معرفی‌شده در پژوهش پیشین (Goodarzi et al., 2023a) انجام گرفت و به صورت خلاصه در زیر آمده است:

٤-۳-۱-پرواز برد بلند به منظور تهیه اطلاعات نقشه‌ای و کیفی از محدوده بلافصل

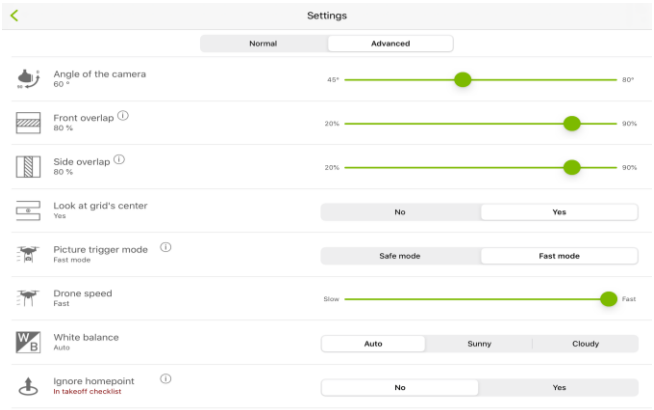
در این پرواز، ارتفاع ۱۲۰ متر، همپوشانی تصاویر ۷۰ درصد و زاویه دوربین ° ۹۰ در نظر گرفته شده است (شکل ٦).



شکل ٦: مسیر پرواز پهپاد در ارتفاع ١٢٠ متری در یک شبکه عمود بر هم جهت برداشت تصاویر دو بعدی از باغ ارم شیراز، ماخذ: نگارنده

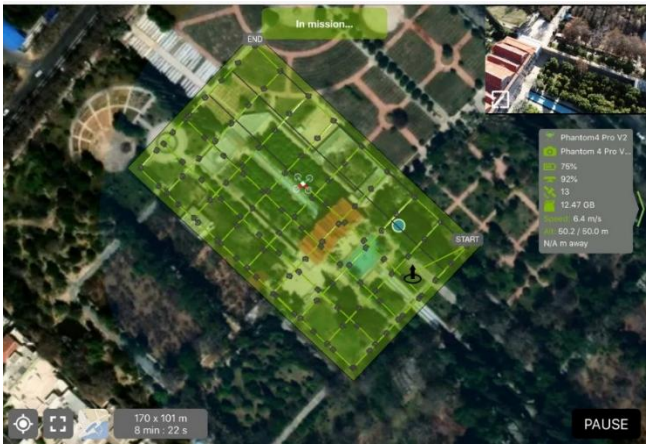
٤-٣-٢-پرواز برد کوتاه به منظور پیش‌زمینهٔ مدل‌سازی سه بعدی: شامل سه مرحله متوالی

الف - پرواز به صورت شبکه‌بندی عمود بر هم در ارتفاعی ما بین ٦٠-٨٠ متر (شکل ٧)



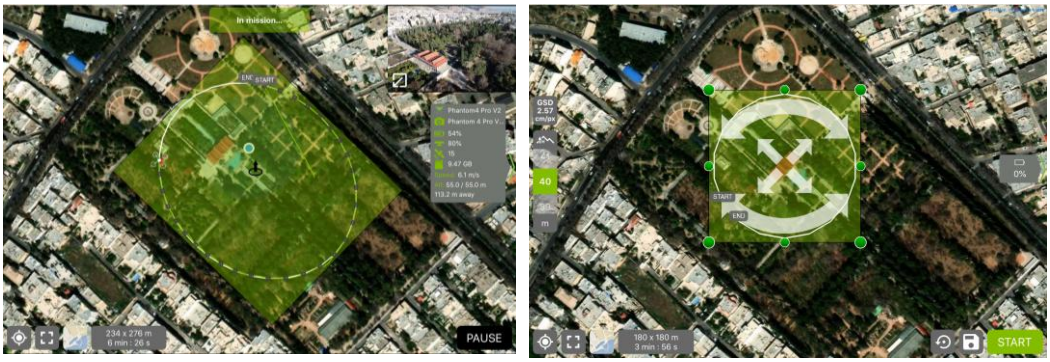
شکل ٧: جزییات پرواز پهپاد در ارتفاع ٦٠-٨٠ متر بدون تمرکز بر نقطه مرکزی، باغ ارم شیراز، ماخذ: نگارنده

ب- پرواز به صورت شبکه‌بندی عمود بر هم در ارتفاع ما بین ٥٠-٧٠ متر (شکل ٨).



شکل ٨: پرواز سه بعدی به صورت شبکه‌بندی عمود بر هم تمرکز دوربین‌ها به سمت نقطه مرکزی، باغ ارم شیراز، ماخذ: نگارنده

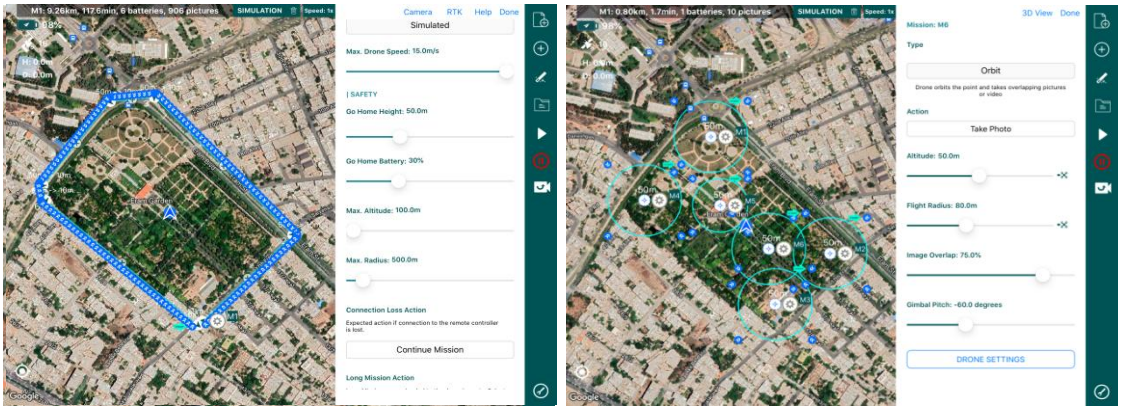
ج- پرواز پرنده به صورت دایره با توجه به مساحت باغ در پایین‌ترین ارتفاع ممکن به نسبت تاج درختان و سازه‌های معماری پیرامونی با همپوشانی ۷۵ درصد و زاویه دوربین ° ۶۰ (شکل ۹).



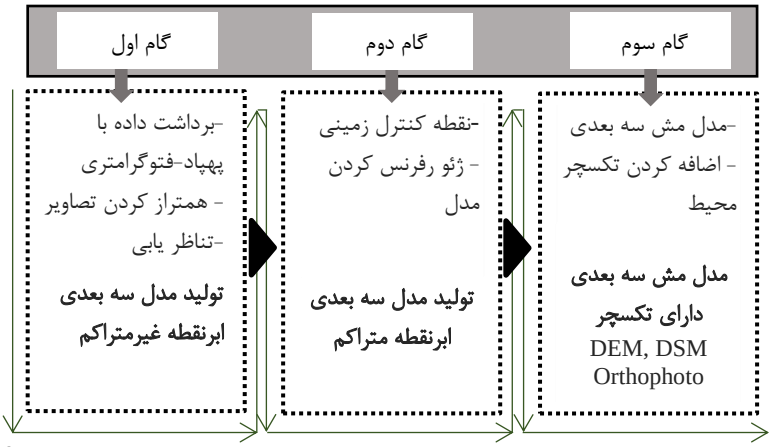
شکل ۹: پرواز دایره‌ای پیرامون کوشک به عنوان یک عنصر مرکزی در ارتفاع‌های مختلف، باغ ارم شیراز، ماخذ: نگارنده

٤-۳-۳-پرواز سه‌بعدی اضلاع باغ به صورت خطی و دایره‌ای

پرواز به صورت دایره‌ای و خطی در سه ارتفاع مختلف به منظور شناخت جداره‌ها و خط آسمان با تمرکز بر جداره‌ها و با توجه به ارتفاع درختان و دیوار محدوده باغ در دو ارتفاع ۱۵، ۲۵ متر با همپوشانی ۷۵ درصدی تصاویر، زاویه دوربین ۵۰ درجه و ارتفاع ٤۰ متر با زاویه دوربین ° ۷۵ انجام شده است (شکل ۱۰)



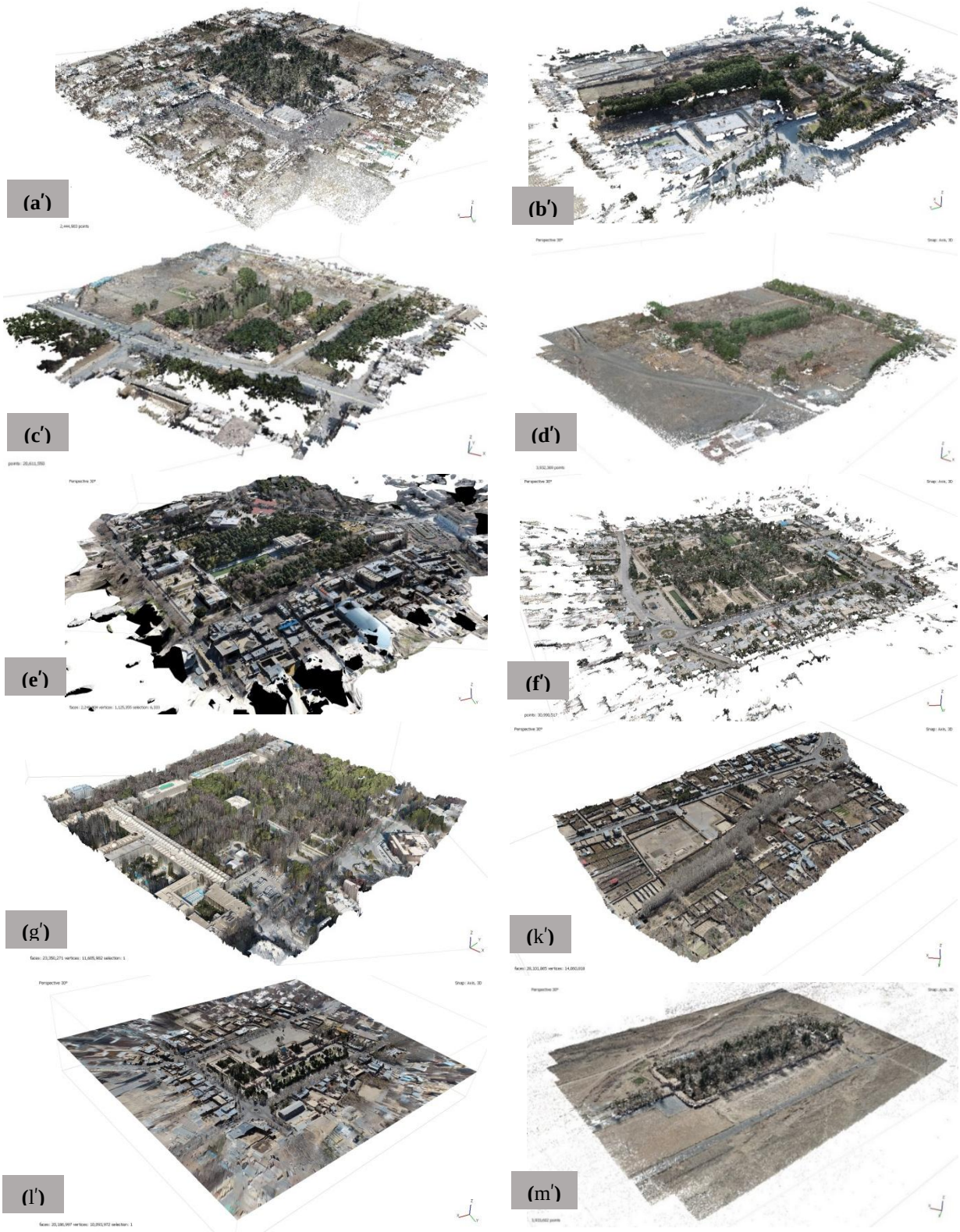
شکل ۱۰: پروازهای دایره‌ای در گوشه‌های مختلف باغ ارم در ارتفاع‌های مختلف و پایین‌تر از تاج درختان، تصویر سمت راست، پرواز خطی سه بعدی در اطراف باغ ارم با تمرکز بر فضاهای داخل باغ در ارتفاع پایین‌تر از تاج درختان، تصویر سمت چپ، ماخذ: نگارنده

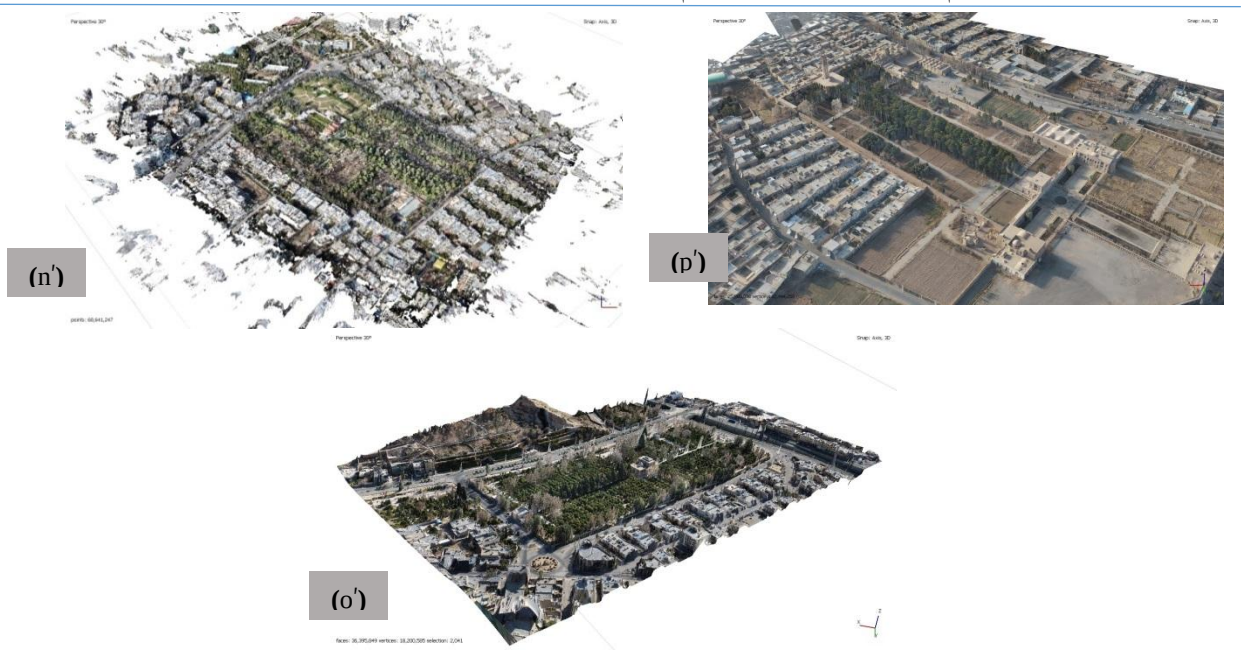


شکل ۱۱: فرآیند پردازش تصاویر برداشت شده از باغ‌های تاریخی ایران با استفاده از پهپاد در نرم‌افزار **Agisoft Metashape** 1.8.4، برای تولید مدل‌های ابرنطقه سه بعدی، ماخذ: نگارنده

۴-۴-روش پردازش تصاویر حاصل از پهپاد-فتوگرامتری

تصاویر برداشت‌شده با پهپاد با استفاده از نرم‌افزار Agisoft Metashape 1.8.4 و بر پایه الگوریتم‌های(Structure from Motion (SfM ، پردازش شدند. جزئیات کامل مراحل پردازش و تولید مدل‌های ابرنقطه در پژوهش پیشین نویسندگان ارائه شده است (Goodarzi et al., 2023a). این فرآیند (شکل ۱۱) برای ۱۳ باغ تاریخی ایران تکرار و در (شکل ۱۲) ارائه شده است.





شکل ۱۲: مدل سه بعدی نمونه‌های مورد مطالعه: باغ‌های (**a'**): هشت بهشت؛ (**b'**): اکبریه؛ (**c'**): رحیم‌آباد؛ (**d'**): شوکت آباد؛ (**e'**): چهل‌ستون؛ (**f'**) گلشن طبس؛ (**g'**): فین؛ (**k'**): پهلوان پور؛ (**l'**) شاه نعمت الله ولی؛ (**m'**): شازده؛ (**n'**): دولت آباد؛ (**p'**): ارم؛ (**o'**): دلگشا، ماخذ: نگارنده

۴-۵-داده‌های ورودی و استخراج ویژگی در سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مناظر میراثی

ابزار پیشنهادی داده‌های موردنیاز خود را از سه منبع اصلی دریافت می‌کند: مدل‌های سه‌بعدی ابرنقطه باغ‌های تاریخی با فرمت LAS که از پردازش داده‌های پهپاد–فتوگرامتری به دست آمده‌اند. در فرایند مدل‌سازی، سه نوع خروجی شامل ابرنقطه غیرمتراکم، ابرنقطه متراکم و مدل مش سه‌بعدی تولید شد. با توجه به حجم بالای داده‌ها، در پیاده‌سازی ابزار از مدل‌های ابرنقطه غیرمتراکم استفاده شد، با این حال ساختار سیستم امکان استفاده از سایر مدل‌های سه‌بعدی را نیز فراهم می‌کند. داده‌های اقلیمی هر باغ با فرمت CSV که از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی استخراج و پس از میان‌یابی در نرم‌افزار Meteonorm 7.2، برای استفاده در محیط برنامه‌نویسی آماده‌سازی شدند. مدل‌های سه‌بعدی ابرنقطه مناظر غیر از باغ ایرانی با فرمت PLY که به‌عنوان نمونه‌های منفی برای آموزش و ارزیابی مدل از منابع موجود در وب گردآوری شدند (Goodarzi et al.,2023b). این داده‌ها به دلیل تفاوت در ساختار اطلاعات و نبود کانال رنگ، نیازمند پیش‌پردازش و همسان‌سازی با داده‌های باغ‌های تاریخی بودند. در ادامه، با استفاده از یک مدل استخراج ویژگی (Feature Extraction Model) مبتنی بر SLM، ویژگی‌های هندسی و فضایی از مدل‌های ابرنقطه استخراج و به مجموعه داده ای برای آموزش الگوریتم‌های یادگیری ماشین تبدیل شدند. فرایند استخراج ویژگی به‌صورت نیمه‌خودکار و در چهار مرحله شامل انتخاب محدوده، استخراج ویژگی، انتخاب ویژگی و طبقه‌بندی انجام شد. در این فرایند، متخصص معماری منظر با استفاده از جعبه مرزی (Bounding Box)، محدوده عناصر مورد نظر را در مدل سه‌بعدی مشخص می‌کند و نرم‌افزار به‌طور خودکار ویژگی‌های هندسی و مکانی آن‌ها را استخراج می‌کند. مختصات X، Y و Z هر عنصر، مبنای محاسبه ابعاد، مرکز هندسی، موقعیت نسبی و جهت‌گیری فضایی آن در مقیاس کل باغ قرار می‌گیرد. بدین‌ترتیب، سیستم قادر است ویژگی‌های کالبدی و روابط فضایی عناصر مختلف منظر را شناسایی کرده و آن‌ها را به داده‌های قابل استفاده برای تحلیل و تصمیم‌گیری تبدیل کند.

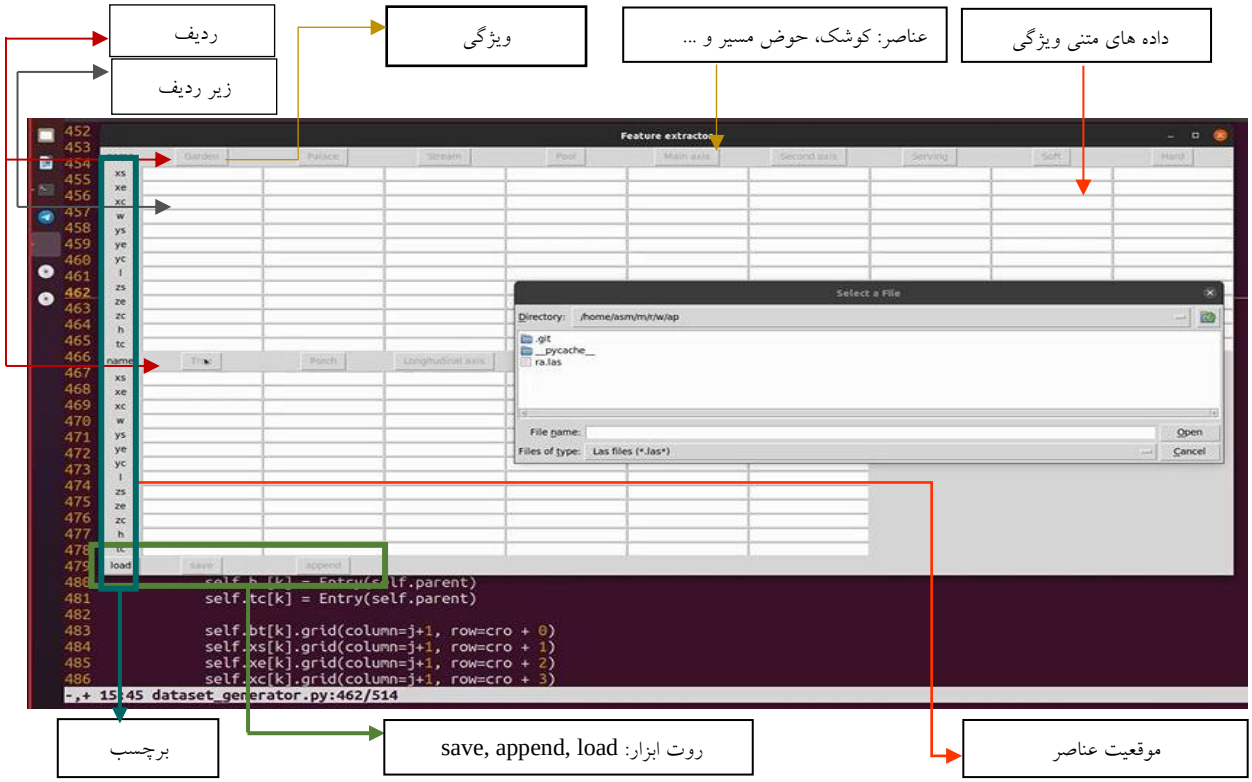
۴-۶-معرفی ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری

ابزار پیشنهادی با استفاده از Python 3.7 در محیط Ubuntu 20.04 توسعه یافت. این محیط به دلیل سازگاری با کتابخانه‌های موردنیاز برای پردازش داده‌های ابرنقطه، توسعه رابط کاربری و پیاده‌سازی الگوریتم‌های پردازشی انتخاب شد. به‌منظور تسهیل تعامل کاربر با داده‌ها، یک رابط کاربری گرافیکی (GUI) توسعه داده شد که امکان بارگذاری مدل‌های سه‌بعدی ابرنقطه، نمایش و پردازش داده‌ها،

استخراج ویژگی‌ها و تولید مجموعه‌داده را فراهم می‌کند. در پیاده‌سازی ابزار از کتابخانه‌های متن‌باز پایتون برای مدیریت فایل‌ها، پردازش و نمایش ابرنقطه، خواندن فایل‌های LAS و PLY و توسعه رابط کاربری استفاده شده است. مهم‌ترین کتابخانه‌های مورد استفاده در توسعه ابزار در جدول ۲ ارائه شده‌اند. رابط کاربری توسعه‌یافته به پژوهشگر امکان می‌دهد عناصر مختلف منظر را انتخاب کرده، ویژگی‌های هندسی و مکانی آن‌ها را استخراج و داده‌های مورد نیاز را برای مراحل بعدی تحلیل، یادگیری ماشین و پشتیبانی از تصمیم‌گیری تولید کند (شکل ۱۳).

جدول ۲: مهم‌ترین ماژول‌های پایتون برای تولید ابزار تشخیص‌گر پشتیبان تصمیم‌گیری، ماخذ: نگارندگان

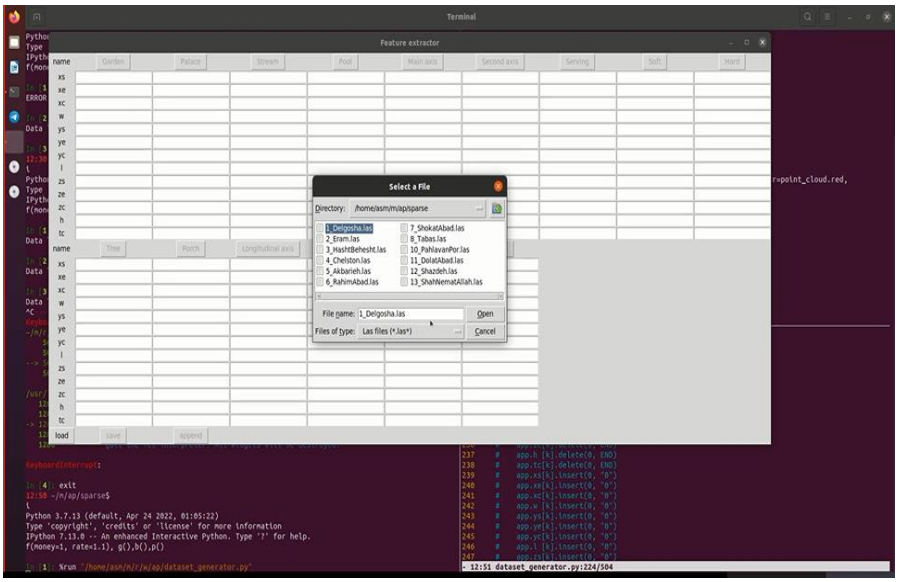
کاربرد	کتابخانه
ایجاد رابط کاربر گرافیکی	from tkinter import *
فراخوانی فایل‌ها	from tkinter import filedialog
اماکن تعامل کاربر با سیستم عامل	import os
ویژوالیزیشن و پردازش مدل سه بعدی ابرنقاط	import pptk
تعیین تعداد مشخصی از پارامترهای یک تابع برای ساخت توابع جدید	from functools import partial import numpy as np
فراخوانی داده با پسوند LAS	import laspy as lp import plyfile as ply



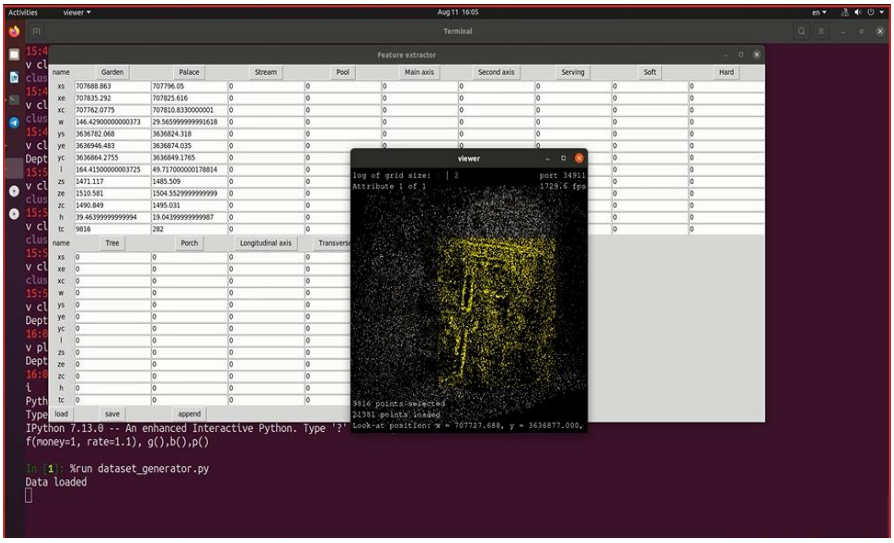
شکل ۱۳: معرفی ویجت‌های ابزار تشخیص‌گر پشتیبان تصمیم‌گیری، ماخذ: نگارنده

کاربر پس از بارگذاری مدل سه‌بعدی، می‌تواند عناصر مختلف منظر مانند کوشک، استخر، محورها و سایر اجزای کالبدی را به‌صورت تعاملی انتخاب و برای هر عنصر یک ابرنقطه فرعی ایجاد کند. این ابرنقطه‌های فرعی، داده‌های خام را به ساختارهای داده معنادار تبدیل کرده و مبنای استخراج ویژگی‌ها و آموزش الگوریتم‌های یادگیری ماشین قرار می‌گیرند (شکل‌های ١٤ و ١٥). ابزار به‌گونه‌ای طراحی شده است که علاوه بر امکان کاهش حجم ابرنقطه‌های متراکم بدون از دست رفتن اطلاعات ضروری، قابلیت افزودن عناصر

جدید منظر را نیز بدون نیاز به تغییرات پیچیده در کدنویسی فراهم می‌کند. این ویژگی، انعطاف‌پذیری ابزار را برای کاربرد در مناظر میراثی مختلف افزایش می‌دهد.



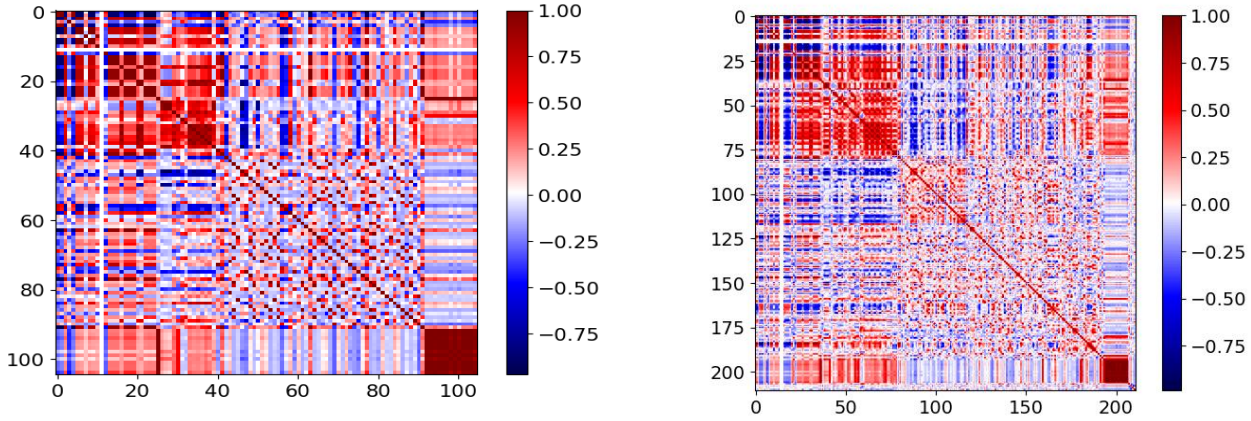
شکل ۱۴: فراخوانی داده ابر نطقه‌ای باغ دلگشا در ابزار تشخیص‌گر پشتیبان تصمیم‌گیری، ماخذ: نگارنده



شکل ۱۵: بازنمایی مدل سه بعدی ابرنقطه باغ دلگشا به بازنمایی محاسباتی (ماتریس چند بعدی)، ماخذ: نگارنده

۴-۷-بحث و تفسیر

جعبه مرزی (Bounding Box) به‌عنوان ابزار اصلی انتخاب تعاملی نواحی مختلف مدل ابرنقطه، برای استخراج ویژگی‌های عناصر منظر در ابزار توسعه داده‌شده پیاده‌سازی شد. در این فرآیند، کاربر عناصر مختلف منظر را انتخاب کرده و ابزار به‌صورت خودکار موقعیت، ابعاد و ویژگی‌های هندسی هر عنصر را نسبت به کل باغ محاسبه و نرمال‌سازی می‌کند. داده‌های استخراج‌شده در قالب ماتریس‌های چندبعدی ذخیره و در نهایت برای هر باغ به‌صورت فایل CSV تولید می‌شوند. همچنین ابزار به‌گونه‌ای طراحی شده است که در صورت تعریف عناصر جدید توسط کاربر، ساختار داده‌ها به‌صورت خودکار به‌روزرسانی شود. پس از استخراج داده‌ها، مجموعه ویژگی‌های حاصل برای آموزش و ارزیابی



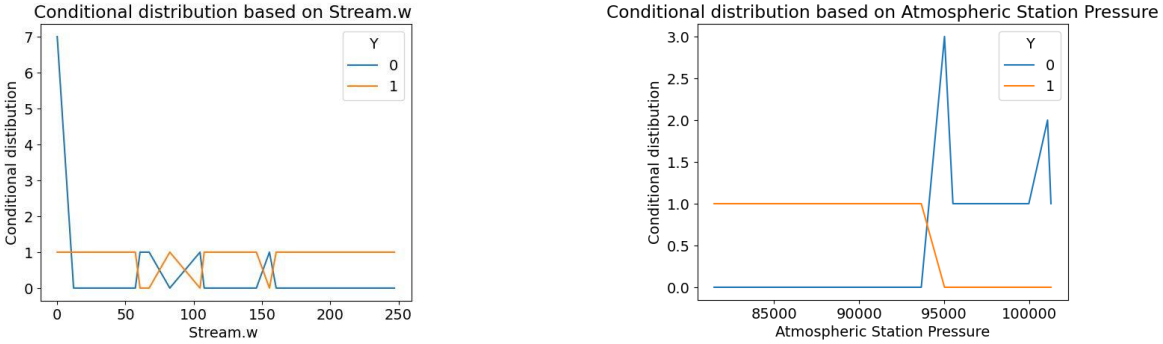
شکل ١٦: همبستگی بین ویژگی‌ها در دیتاست باغ ایرانی. (به دلیل تعداد زیاد، ویژگی‌ها روی شکل‌ها نمایش داده نشده است)، شکل سمت راست ماخذ: نگارنده. **شکل ١٧** همبستگی بین ویژگی‌ها در مجموعه ویژگی‌های فرعی باغ‌های تاریخی ایران. (به دلیل تعداد زیاد، ویژگی‌ها روی شکل‌ها نمایش داده نشده است) شکل سمت چپ، ماخذ: نگارنده

مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده قرار گرفت و داده‌های مربوط به مناظر غیر از باغ ایرانی نیز به‌عنوان داده‌های آزمون به کار گرفته شد. در مجموع، ٢٣٠ ویژگی هندسی و اقلیمی از مدل‌های سه‌بعدی و داده‌های آب‌وهوایی استخراج شد. با توجه به محدود بودن حجم داده‌های آموزشی، رویکرد یادگیری پراکنده (Sparse Learning) انتخاب شد. برای کاهش ابعاد داده‌ها و انتخاب مؤثرترین ویژگی‌ها، از روش Wrapper مبتنی بر حذف متوالی روبه عقب[1] (SBE) به عنوان یک روش سیستماتیک برای انتخاب ویژگی استفاده شد. در این فرآیند، ویژگی‌هایی که سهم کمتری در عملکرد مدل داشتند به‌تدریج حذف شدند و در نهایت تعداد ویژگی‌های ورودی از ٢٣٠ به ١٠٥ ویژگی کاهش یافت که مبنای آموزش مدل یادگیری ماشین قرار گرفت (شکل ١٦ و ١٧).

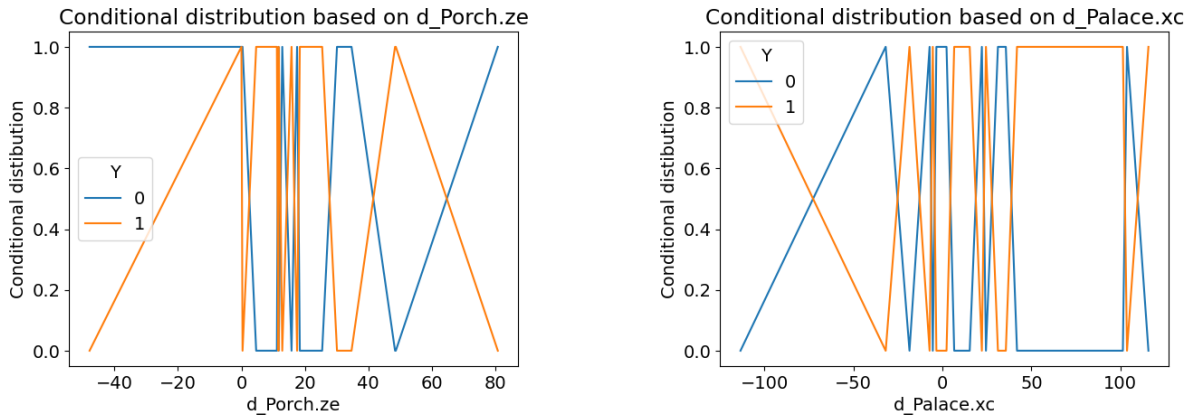
با توجه به ضریب ویژگی در مدل آموزش‌دیده که به بازه مقادیر ویژگی نرمال شده بدست آمده و میزان تاثیر گذاری ویژگی در عملکرد تشخیص گر را نشان می‌دهد، ویژگی‌هایی شامل فشار اتمسفر (شکل ١٨ راست)، عرض و طول محور اصلی آب (شکل ١٨ چپ) و نحوه قرارگیری درختان، طول و ارتفاع ایوان (شکل ١٩ چپ)، طول و عرض و موقعیت حوض (شکل ١٩ راست)، جهت باد (شکل ٤-٣٤ چپ)، رطوبت نسبی (شکل ٢٠ راست)، ارتفاع بنا به عنوان بخش مهمی از سخت منظر باغ (شکل ٢٠ چپ) و ارتفاع کوشک (شکل ٢١) به عنوان ویژگی‌های کلیدی یا ژن‌های اصلی ساختار فضا، بیشترین تأثیر را بر تمایز و تشخیص باغ‌های تاریخی ایران داشته‌اند. نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که در باغ‌هایی مانند باغ فین (دوره صفوی – قرن یازدهم میلادی) که در منطقه‌ای با فشار اتمسفر بالا قرار دارد، درختان برگ‌ریز کمتری کاشته شده است، در حالی که در باغ‌هایی مانند باغ‌های شازده (دوره قاجار تا نوزدهم میلادی)، در منطقه‌ای با فشار اتمسفر کم قرار دارد، درختان برگریز بیشتری کاشته شده است. این موضوع که چه ارتباطی بین فشار هوا و انتخاب گونه‌های گیاهی وجود در باغ‌های تاریخی وجود دارد، موضوعی است که نیاز به تحقیقات بین‌رشته‌ای و تخصصی دارد. نکته جالب توجه این است که عوامل اقلیمی جز پارامترهای کلیدی و ژن ساختاری منظر میراثی تاریخی ایران تشخیص داده شد، این در حالی است که غالب مطالعات داخلی بر بی تاثیر بودن اقلیم در شکل‌گیری نوع ساختار باغ‌ها تاکید داشته‌اند. از سوی دیگر در مطالعات باغ ایرانی، همواره کوشک و محور اصلی جز عناصر اصلی شکل دهنده باغ ایرانی مورد تاکید بوده است. یافته‌های این تحقیق در کشف ژن ساختاری فضا، به این دو پارامتر مهم به صورت مستقیم اشاره‌ای ندارد. این در حالی است که طول ایوان به عنوان نظرگاه که جز اساسی کوشک است و مخروط دید از کوشک به محور اصلی را تعریف می‌کند جز ژن‌های اصلی فضا تشخیص داده شد. همچنین محور اصلی به واسطه نحوه گیری درختان و نحوه قرارگیری حوض جز ژن‌های اصلی

[1] Sequential Backward Elimination

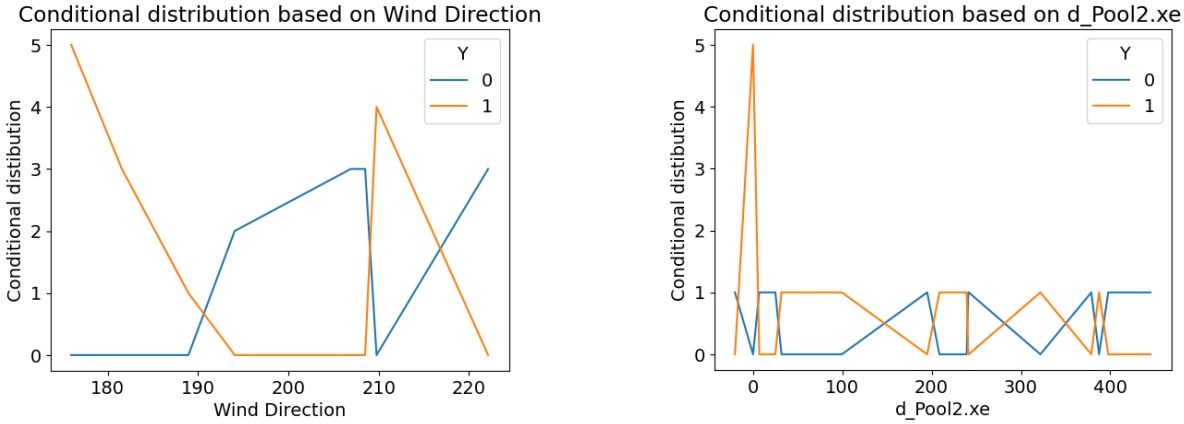
شناخته شد. در نگرش سیستمی آنچه مهم است روابط بین اجزا و تعامل بین آن‌ها است و مبتنی بر چنین نگرشی در رویکرد ژن فرهنگی علاوه بر اجزا روابط بین آن‌ها نیز جز ژن‌های ساختاری فضا- مکان به حساب می‌آید که انتقال معنا را همراه با تحول در مکان تداوم می‌بخشد.



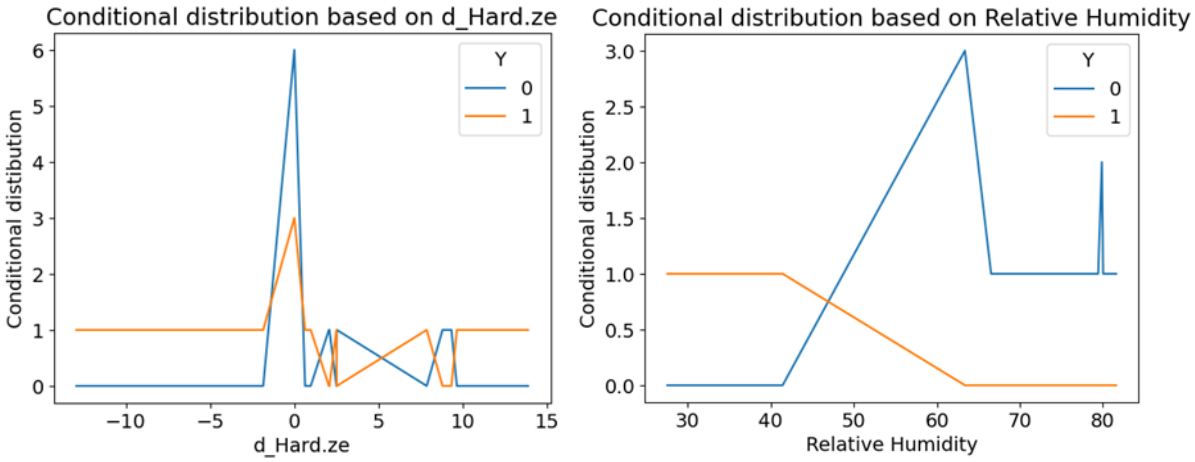
شکل ۱۸: توزیع احتمالی فشار هوا (سمت راست) و جریان آب در محور اصلی (سمت چپ) در آنالیز پارامترهای کلیدی ساختار فضای باغ ایرانی، ماخذ: نگارنده



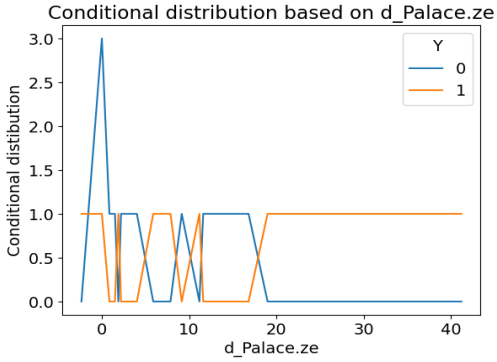
شکل ۱۹: توزیع احتمالی محل قرارگیری کوشک (سمت راست) و ایوان (سمت چپ) در آنالیز پارامترهای کلیدی ساختار فضای باغ ایرانی، ماخذ: نگارنده



شکل ۲۰: توزیع احتمالی رطوبت نسبی (سمت راست) و ارتفاع سخت منظر یا بناها (سمت چپ) در آنالیز پارامترهای کلیدی ساختار فضای باغ ایرانی، ماخذ: نگارنده



شکل ۲۱: توزیع احتمالی محل قرارگیری حوض (سمت راست) و جهت باد (سمت چپ) در آنالیز پارامترهای کلیدی ساختار فضای باغ ایرانی، ماخذ: نگارنده



شکل۲۲: توزیع احتمالی ارتفاع کوشک در آنالیز پارامترهای کلیدی ساختار فضای باغ ایرانی، ماخذ: نگارنده

یافته‌های این پژوهش نشان داد که سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مبتنی بر یادگیری ماشین پراکنده، قادر است ژن‌های ساختاری باغ‌های تاریخی ایران را از میان ۲۳۰ ویژگیِ هندسی، فضایی و اقلیمی شناسایی کرده و آن‌ها را به دانشی قابل‌تعمیم برای طراحی مناظر آینده تبدیل کند. در این بخش، یافته‌ها در سه سطح با پژوهش‌های پیشین مقایسه شده و دلایل شباهت‌ها و تفاوت‌ها تبیین می‌گردد.

۴-۸-مقایسه با رویکردهای پیشین در تحلیل باغ ایرانی

پژوهش‌های پیشین در حوزه شناخت باغ ایرانی، عمدتاً بر دو دسته روش متمرکز بوده‌اند :رویکردهای تفسیری-تاریخی که بر اساس متون، نگاره‌ها و تحلیل‌های کیفی به شناسایی اصول طراحی پرداخته‌اند و رویکردهای تحلیلی-کمی مبتنی بر نحو فضا (Space Syntax) که روابط فضایی را از طریق شاخص‌هایی نظیر هم پیوندی (Integration) و عمق (Depth) اندازه‌گیری می‌کنند. از جمله، مطالعه (Goodarzi et al., 2023)، با استفاده از نرم‌افزار DepthMap10 بر روی شش باغ تاریخی ایران نشان داد که این فضاها از الگوهای ریاضی قابل‌تولید پیروی می‌کنند و دروازه ورودی، فضاهای عمومی و محور اصلی در مکان‌هایی با هم پیوندی بالا و کوشک در عمق بیشتری قرار دارد. یافته‌های پژوهش حاضر، با این مطالعات هم‌سو است، زیرا نشان داد که طول ایوان (به‌عنوان جزئی از کوشک که مخروط دید از کوشک به محور اصلی را تعریف می‌کند) و نحوهٔ قرارگیری درختان و حوض در امتداد محور اصلی، جزو ژن‌های اصلی ساختار فضایی هستند. این موضوع تأیید می‌کند که محور اصلی و کوشک، همچنان که در ادبیات باغ ایرانی نیز مطرح است، عناصر بنیادین سازمان فضایی هستند. با این حال، رویکرد نحو فضا عمدتاً بر روابط توپولوژیک (همجواری‌ها و

اتصالات) متمرکز است و به ویژگی‌های هندسیِ دقیق (ابعاد، نسبت‌ها، موقعیت مکانی) و داده‌های اقلیمی توجهی ندارد. در مقابل، رویکرد این پژوهش با ترکیب ویژگی‌های هندسی کمّی (مانند طول، عرض، ارتفاع و موقعیت نسبی عناصر) و داده‌های اقلیمی (فشار اتمسفر، دما، رطوبت و جهت باد)، امکان‌یابی دقیق‌تری از روابط چندلایه میان کالبد، اقلیم و سازمان فضایی فراهم می‌کند که در رویکردهای پیشین مغفول مانده بود.

۴-۹-تأیید و بسط نقش اقلیم در شکل‌گیری باغ ایرانی

یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش، شناسایی عوامل اقلیمی (به‌ویژه فشار اتمسفر، رطوبت نسبی و جهت باد) به‌عنوان ژن‌های ساختاری مؤثر بر تمایز و تشخیص باغ‌های تاریخی ایران بود. این یافته با پژوهش‌هایی که بر نقش اقلیم در طراحی باغ ایرانی تأکید داشته‌اند، هم‌سو است. به‌عنوان مثال، مطالعات پیشین نشان داده‌اند که طراحی باغ ایرانی همواره با اصول اکولوژیکی و اقلیمی نظیر احترام به اکوسیستم، بهبود شرایط زیستی و بهینه‌سازی مصرف انرژی همراه بوده است (Goodarzi et al., 2023). همچنین پژوهش‌هایی که به بررسی پارامترهای اقلیمی در طراحی کوشک‌های باغ‌های تاریخی در اقلیم گرم و خشک پرداخته‌اند، بر تأثیر عواملی نظیر تابش خورشید، جهت‌گیری باد و مصالح با ظرفیت حرارتی بالا تأکید کرده‌اند (Kumazaki & Kunii, 2015; Liang et al., 2018). تفاوت این پژوهش با مطالعات پیشین در این است که پژوهش‌های مذکور عمدتاً از روش‌های کیفی-تطبیقی یا شبیه‌سازی‌های اقلیمی استفاده کرده‌اند، در حالی که پژوهش حاضر برای نخستین بار اهمیتِ کمّیِ هر عامل اقلیمی را در قالب ضریب ویژگی در یک مدل یادگیری ماشین اندازه‌گیری کرده و نشان داده است که فشار اتمسفر و رطوبت نسبی، از جمله تأثیرگذارترین عوامل در تمایز ساختار فضایی باغ‌ها هستند. این دستاورد، امکان پیش‌بینی الگوی طراحی بر اساس شرایط اقلیمی را فراهم می‌کند و رویکردی کمی برای انتقال خرد اکولوژیکی از باغ‌های تاریخی به طراحی مناظر آینده ارائه می‌دهد. نکتهٔ جالب‌توجه این است که پژوهش حاضر نشان داد عوامل اقلیمی جزو ژن‌های اصلی ساختار فضایی باغ‌های تاریخی ایران هستند، در حالی که غالب مطالعات داخلیِ پیشین بر پایه تحلیل‌های کیفی، عمدتاً بر تأثیر اقلیم در شکل‌گیری باغ‌ها تأکید نداشته‌اند یا آن را نادیده گرفته‌اند. این تناقض را می‌توان به دو دلیل تبیین کرد :نخست، بسیاری از پژوهش‌های پیشین بر اساس تحلیل‌های تاریخی-متن‌محور انجام شده‌اند که داده‌های اقلیمیِ دقیق و کمّی در آن‌ها به‌کار گرفته نشده است؛ دوم، رویکردهای سنتی غالباً بر شکل و هندسه باغ متمرکز بوده‌اند و به تعاملِ پویای باغ با شرایط محیطی پیرامون توجه کمتری داشته‌اند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که اقلیم نه‌تنها در سطح خرداقلیم (سایه‌اندازی، جریان آب و ...)، بلکه در سطح کلان (فشار اتمسفر، رطوبت نسبی و الگوی بادهای غالب) بر انتخاب گونه‌های گیاهی، جهت‌گیری محورها و حتی ارتفاع و موقعیت کوشک تأثیرگذار بوده است، موضوعی که در پژوهش‌های پیشین کمتر به‌صورت کمّی و سیستماتیک بررسی شده است.

۴-۱۰-نوآوری در چارچوب تصمیم‌گیری در مقایسه با سیستم‌های موجود

در حوزهٔ سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری برای مناظر میراثی، پژوهش‌های متعددی بر پایهٔ سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) توسعه یافته‌اند. همچنین سیستم‌های تصمیم‌گیری مشارکتی مبتنی بر دوقلوی دیجیتال برای باززنده‌سازی پایدار سایت‌های میراثی پیشنهاد شده‌اند (Lercari et al., 2021).

با وجود این پیشرفت‌ها، اغلب سیستم‌های موجود فاقد قابلیت استخراج خودکارِ قواعد پنهان و انتقال دانش به فرآیند طراحیِ آینده هستند و عمدتاً به مدیریت و حفاظتِ وضع موجود محدود می‌شوند. در مقابل، سیستم توسعه‌یافته در این پژوهش با بهره‌گیری از یادگیری ماشین پراکنده (Sparse Learning)، و روش حذف متوالی روبه‌عقب (SBE)، گامی فراتر از مستندسازی برداشته و دانشِ صریحِ قابل‌تعمیم را از داده‌های خام استخراج می‌کند. این سیستم، برخلاف رویکردهای پیشین که برای شناسایی الگوها به‌شدت به تفسیر متخصص وابسته بودند، فرآیندی خودکار و کمّی برای کشف روابط پنهان (نظیر تأثیر فشار اتمسفر بر انتخاب گونه‌های گیاهی) ارائه می‌دهد. به‌عبارت دیگر، در حالی که پژوهش‌های پیشین بر رویکرد ژن فرهنگی تأکید داشته‌اند (Goodarzi et al., 2023)

و به شناسایی الگوهای قابل‌تولید در باغ‌های ایرانی پرداخته‌اند، پژوهش حاضر با توسعه یک ابزار عملیاتی، این الگوها را به قوانین کمّی تبدیل کرده و آن‌ها را در قالب یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری در دسترس طراحان و مدیران قرار می‌دهد. این نوآوری، به‌ویژه در مواجهه با چالش داده‌های محدود (Few-shot problem) که در حوزه میراث فرهنگی امری رایج است، با بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری پراکنده، راهکاری مؤثر ارائه می‌دهد.

۴-۱۱-جمع‌بندی بحث

به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری مبتنی بر یادگیری ماشین، نه تنها ابزارهایی برای پردازش داده هستند، بلکه بستری برای تغییر پارادایم در طراحی و مدیریت مناظر میراثی فراهم می‌کنند. این سیستم‌ها با کمّی‌سازی روابط میان عناصر کالبدی، شرایط اقلیمی و سازمان فضایی، امکان انتقال خرد اکولوژیکی از مناظر تاریخی به طراحی مناظر آینده را مهیا می‌سازند و بدین‌ترتیب، به پلی میان «میراثِ گذشته» و «طراحیِ آینده» تبدیل می‌شوند. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر حجم محدود داده‌های آموزشی (۱۳ باغ) و وابستگی به دقت مدل‌های ابرنقطه، ضرورت پژوهش‌های آتی با نمونه‌های بیشتر و روش‌های یادگیری عمیق را آشکار می‌سازد.

۵-بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارائه و ارزیابی چارچوبی داده‌محور برای سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری در مناظر میراثی انجام شد. یافته‌ها نشان داد که تلفیق داده‌های سه‌بعدی حاصل از پهپاد-فتوگرامتری با اطلاعات اقلیمی و فضایی، در چارچوب یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مبتنی بر یادگیری ماشین پراکنده، امکان شناسایی خودکارِ ژن‌های ساختاری مناظر تاریخی را فراهم می‌کند. از میان ۲۳۰ ویژگیِ استخراج‌شده، ۱۰۵ ویژگی پس از اعمال روش حذف متوالی روبه‌عقب (SBE) به‌عنوان ورودی مدل انتخاب شدند و ویژگی‌هایی نظیر فشار اتمسفر، طول و عرض محور اصلی آب، طول ایوان، موقعیت و ابعاد حوض، جهت باد، رطوبت نسبی، ارتفاع سخت‌منظر و ارتفاع کوشک، به‌عنوان تأثیرگذارترین عوامل در تمایز و تشخیص باغ‌های تاریخی ایران شناسایی گردیدند. این یافته‌ها تأیید می‌کند که سازمان فضایی باغ‌های ایرانی نه‌تنها تابعی از قواعد هندسی و کالبدی، بلکه متأثر از عوامل اقلیمی و محیطی است و این روابط چندلایه را می‌توان به‌صورت کمّی و قابل‌تعمیم استخراج و در طراحی مناظر آینده به‌کار گرفت. **در پاسخ به سوال تحقیق** مشخص شد که سیستم توسعه‌یافته، برخلاف رویکردهای سنتی که صرفاً بر مستندسازی وضع موجود متمرکز هستند، قادر است دانشِ ضمنی و خرد اکولوژیکیِ نهفته در مناظر تاریخی را به قوانین صریح و قابل‌انتقال برای نسل‌های آینده تبدیل کند. لذا سیستم پشتیبان توسعه داده شده با یکپارچه‌سازی اطلاعات، بستری را برای تحلیل داده ها فراهم کرده است که مبتنی بر تحلیل‌ها و دانش‌های استخراج شده از آن می‌تواند پشتیبانی برای تصمیم‌گیری و انتقال دانش و خرد اکولوژیکی مناظر میراثی ازجمله باغ‌های تاریخی ایران، به نسل‌های آینده طراحی باشد

۵-۱-محدودیت‌های پژوهش

پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی مواجه بوده است که باید در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرد. نخست، حجم نمونه‌های مورد مطالعه (۱۳ باغ تاریخی) اگرچه از تنوع مورفولوژیکی و اقلیمی قابل‌قبولی برخوردار است، اما برای آموزش مدل‌های یادگیری عمیق و تعمیم‌پذیریِ گسترده‌تر، کافی نیست و رویکرد یادگیری پراکنده (Sparse Learning) به‌عنوان راهکاری برای مواجهه با این چالش انتخاب شد. دوم، دقت مدل‌های سه‌بعدی تولیدشده با پهپاد-فتوگرامتری به عواملی نظیر کیفیت تصاویر، شرایط نوری، تراکم نقاط کنترل زمینی و نیز پوشش تاج درختان (که باعث ایجاد نقاط کور در برخی نواحی باغ‌ها می‌شود) وابسته است و این موضوع می‌تواند بر دقت استخراج ویژگی‌های هندسی تأثیر بگذارد .سوم، داده‌های اقلیمیِ استفاده‌شده مبتنی بر میان‌یابی از نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی بوده و داده‌های خرداقلیمِ درون هر باغ به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری نشده است. چهارم، رویکرد انتخاب ویژگی با روش SBEاگرچه مؤثر بوده، اما به‌دلیل وابستگی به مجموعه داده‌ٔ آموزشیِ محدود، ممکن است برخی ویژگی‌های مهمِ دیگر که در این

نمونه‌ها کمتر نمایان بوده‌اند، از فرآیند انتخاب حذف شده باشند .پنجم، این پژوهش بر باغ‌های تاریخی ایران متمرکز بوده و تعمیم‌پذیریِ چارچوب پیشنهادی به سایر گونه‌های مناظر میراثی (مانند مناظر شهری، محوطه‌های باستان‌شناسی یا مناظر طبیعی–فرهنگی) نیازمند مطالعات تکمیلی است.

۵-۲- پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده

بر اساس یافته‌ها و محدودیت‌های ذکرشده، چندین جهت برای پژوهش‌های آتی قابل‌تعریف است:

اول، توسعه مجموعه داده‌های آموزشی با نمونه‌های بیشتر از باغ‌ها و مناظر میراثی در اقلیم‌ها و دوره‌های تاریخی متنوع‌تر، به‌منظور افزایش تعمیم‌پذیری مدل‌ها و کاهش وابستگی به رویکردهای یادگیری با داده‌های محدود. دوم، به‌کارگیری روش‌های یادگیری عمیق (مانند شبکه‌های عصبی بازگشتی یا شبکه‌های توجه) برای استخراج خودکارِ ویژگی‌های سطح بالاتر از ابرنقاط و کاهش دخالت انسانی در فرآیند انتخاب و برچسب‌زنی عناصر منظر. سوم، ادغام داده‌های حسگرهای چندمنظوره (نظیر تصاویر فراطیفی، اسکن لیزری موبایلی و داده‌های اینترنت اشیا) با مدل‌های سه‌بعدی برای غنی‌سازی پایگاه داده و افزایش دقت تحلیل‌های اقلیمی و اکولوژیکی. چهارم، توسعه رابط‌های کاربریِ مبتنی بر واقعیت افزوده و واقعیت مجازی برای تسهیل تعامل طراحان و مدیران با سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری و امکان شبیه‌سازیِ سناریوهای مختلف طراحی در بستر مدل‌های سه‌بعدی. پنجم، انجام پژوهش‌های تطبیقی برای ارزیابی کاراییِ چارچوب پیشنهادی در سایر گونه‌های مناظر میراثی (مانند مناظر شهری تاریخی، محوطه‌های باستان‌شناسی و مناظر طبیعی–فرهنگی) و همچنین در بسترهای فرهنگی متفاوت (غیر از باغ ایرانی) به‌منظور آزمون تعمیم‌پذیریِ روش. ششم، بررسیِ امکانِ استفاده از سیستم پشتیبان تصمیم‌گیریِ توسعه‌یافته در فرآیندهای مشارکتیِ تصمیم‌گیری، با مشارکت ذی‌نفعان محلی و متخصصان حوزه‌های مختلف (معماری منظر، شهرسازی، بوم‌شناسی و میراث‌شناسی) تا بتوان علاوه بر جنبه‌های فنی، ابعاد اجتماعی–فرهنگیِ مدیریت مناظر میراثی آینده را نیز پوشش داد.

۶-تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافعی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

۷-مشارکت نویسندگان

مقاله حاضر برگرفته از پایان نامه دکتری نگارنده اول با عنوان «سیستم های پشتیبان تصمیم‌گیری احیایی- تطبیقی مبتنی بر دیتای کم ابزار انتقال ژن فرهنگی در مناظر میراثی (باغ ایرانی)» است که در سال (۱۴۰۲) در دانشگاه (تربیت مدرس) ارائه شده است. نویسنده دوم مسئول تحلیل و تفسیر یافته‌ها و نگارش بخش نتایج بود. نویسنده سوم بازنگری علمی مقاله، ویرایش نهایی و نظارت بر فرآیند پژوهش را بر عهده داشت. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را تأیید کرده و مسئولیت صحت و اصالت محتوای آن را پذیرفته‌اند.

۸-بیانیه استفاده از هوش مصنوعی

در تهیه این مقاله از ChatGPT (OpenAI) صرفاً برای کمک در ویرایش نگارشی، بهبود ساختار متن و اصلاحات زبانی استفاده شده است. تمامی تحلیل‌های علمی، تفسیر نتایج، نتیجه‌گیری‌ها و مسئولیت کامل محتوای مقاله بر عهده نویسندگان بوده و نسخه نهایی مقاله توسط آنان به‌طور کامل بازبینی و تأیید شده است.

۹-منابع

1. Adamopoulos, E., & Rinaudo, F. (2020). UAS-based archaeological remote sensing: Review, meta-analysis and state of the art. *Drones*, *4*(3), 46. **https://doi.org/10.3390/drones4030046**

2. Aicardi, I., Chiabrando, F., Lingua, A. M., & Noardo, F. (2018). Recent trends in cultural heritage 3D survey: The photogrammetric computer vision approach. *Journal of Cultural Heritage, 32*, 257–266. **https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.010**
3. Alshawabkeh, Y., & Baik, A. (2023). Integration of photogrammetry and laser scanning for enhancing scan-to-HBIM modeling of AlUla heritage site. *Heritage Science, 11*(1), 147. **https://doi.org/10.1186/s40494-023-00988-7**
4. Aydin, C. C. (2014). Designing building façades for the urban rebuilt environment with integration of digital close-range photogrammetry and geographical information systems. *Automation in Construction, 43*, 38–48. **https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.03.010**
5. Aziz, W. A. W., Syahmi, M. Z., Anuar, A., & Khairul, N. T. (2012). Terrain slope analyses between terrestrial laser scanner and airborne laser scanning. In *2012 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium* (pp. 1–6). IEEE. **https://doi.org/10.1109/ICSGRC.2012.6287149**
6. Bai, X. (2020). Virtual garden landscape planning based on FPGA and GIS platform. *Microprocessors and Microsystems, 79*, 103314. **https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103314**
7. Bauwens, S., Bartholomeus, H., Calders, K., & Lejeune, P. (2016). Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. *Forests, 7*(6), 127. **https://doi.org/10.3390/f7060127**
8. Biagini, C., Capone, P., Donato, V., & Facchini, N. (2016). Towards the BIM implementation for historical building restoration sites. *Automation in Construction, 71*, 74–86. **https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.008**
9. Campana, S. (2017). Drones in archaeology: State of the art and future perspectives. *Archaeological Prospection, 24*(4), 275–296. **https://doi.org/10.1002/arp.1569**
10. Cazzani, A., Brumana, R., & Zerbi, C. (2019). Management plans and Web GIS software applications as active and dynamic tools to conserve and valorize historic public gardens. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W15*, 291–298. **https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-291-2019**
11. Chen, K., & Xue, F. (2022). The renaissance of augmented reality in construction: History, present status and future directions. *Smart and Sustainable Built Environment, 11*(3), 575–592. **https://doi.org/10.1108/SASBE-10-2021-0176**
12. Claghorn, J. (2018). Algorithmic landscapes: computational methods for the mediation of form, information, and performance in landscape architecture.
13. Cole, R. J. (2012). Regenerative design and development: Current theory and practice. *Building Research & Information, 40*(1), 1–6. **https://doi.org/10.1080/09613218.2012.617516**
14. Cowley, D. C., Moriarty, C., Geddes, G., Brown, G. L., Wade, T., & Nichol, C. J. (2017). UAVs in context: Archaeological airborne recording in a national body of survey and record. *Drones, 2*(1), 2. **https://doi.org/10.3390/drones2010002**
15. Croce, V., Bevilacqua, M. G., Caroti, G., & Piemonte, A. (2021). Connecting geometry and semantics via artificial intelligence: From 3D classification of heritage data to H-BIM representations. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2021*, 145–152. **https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-145-2021**
16. Del Chiaro, R., Bagdanov, A. D., & Del Bimbo, A. (2019). Webly supervised zero-shot learning for artwork instance recognition. *Pattern Recognition Letters, 128*, 420–426. **https://doi.org/10.1016/j.patrec.2019.09.027**
17. Del Duca, G., & Machado, C. (2023). Assessing the quality of the Leica BLK2GO mobile laser scanner versus the Focus3D S120 static terrestrial laser scanner for a preliminary study of garden digital surveying. *Heritage, 6*(2), 1007–1027. **https://doi.org/10.3390/heritage6020057**
18. Deutsch, R. (2015). *Data-driven design and construction: 25 strategies for capturing, analyzing, and applying building data*. John Wiley & Sons. **https://doi.org/10.1002/9781119172886**
19. Di Matteo, E., Roma, P., Zafonte, S., Panniello, U., & Abbate, L. (2021). Development of a Decision Support System Framework for Cultural Heritage Management. Sustainability, 13.
20. Dias, B. D. (2015). Beyond sustainability: Biophilic and regenerative design in architecture. *European Scientific Journal, 11*(9), 147–158.
21. Dino, I. G., Sari, A. E., Iseri, O. K., Akin, S., Kalfaoglu, E., Erdogan, B., ... Alatan, A. A. (2020). Image-based construction of building energy models using computer vision. *Automation in Construction, 116*, 103231. **https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103231**
22. Do, P. N. B., & Nguyen, Q. C. (2019). A review of stereo photogrammetry method for 3D reconstruction in computer vision. In *2019 19th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*. **https://doi.org/10.1109/ISCIT.2019.8905248**
23. Dore, C., Murphy, M., McCarthy, S., Brechin, F., Casidy, C., & Dirix, E. (2015). Structural simulations and conservation analysis: Historic Building Information Modelling (HBIM). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W7*, 351–357. **https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-351-2015**

24. du Plessis, C. (2012). Towards a regenerative paradigm for the built environment. *Building Research & Information, 40*(1), 7–22. **https://doi.org/10.1080/09613218.2012.628548**
25. Egusquiza, A., Brostrom, T., & Izkara, J. L. (2022). Incremental decision making for historic urban areas' energy retrofitting: EFFESUS DSS. Journal of Cultural Heritage, 54, 68-78.
26. Elghaish, F., Matarneh, S. T., Edwards, D. J., Rahimian, F. P., El Gohary, H., & Ejohwomu, O. (2022). Applications of Industry 4.0 digital technologies towards a construction circular economy: Gap analysis and conceptual framework. *Construction Innovation, 22*(3), 647–670. **https://doi.org/10.1108/CI-12-2020-0195**
27. Fernández-Hernández, J., González-Aguilera, D., Rodríguez-González, P., & Mancera-Taboada, J. (2015). Image-based modelling from unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry: An effective, low-cost tool for archaeological applications. *Archaeometry, 57*(1), 128–145. **https://doi.org/10.1111/arcm.12075**
28. Fryskowska, A., & Stachelek, J. (2018). A no-reference method of geometric content quality analysis of 3D models generated from laser scanning point clouds for HBIM. *Journal of Cultural Heritage, 34*, 95–108. **https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.012**
29. George, B. H., & Park, K. (2020). Flying high: A case study of the integration of drones into a landscape architecture curriculum. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 246–255.
30. George, B. H., Fernandez, J., & Summerlin, P. (2022). The impact of virtual reality on student design decisions: Assessing density and proximity when designing in virtual reality versus traditional analog processes. *Landscape Journal, 41*(1), 31–44. **https://doi.org/10.3368/lj.41.1.31**
31. Godinho, M., Machete, R., Ponte, M., Falcão, A. P., Gonçalves, A. B., & Bento, R. (2020). BIM as a resource in heritage management: An application for the National Palace of Sintra, Portugal. *Journal of Cultural Heritage, 43*, 153–162. **https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.11.010**
32. Gollob, C., Ritter, T., Wassermann, C., & Nothdurft, A. (2019). Influence of scanner position and plot size on the accuracy of tree detection and diameter estimation using terrestrial laser scanning on forest inventory plots. *Remote Sensing, 11*(13), 1602. **https://doi.org/10.3390/rs11131602**
33. Golparvar-Fard, M., Bohn, J., Teizer, J., Savarese, S., & Peña-Mora, F. (2011). Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. *Automation in Construction, 20*(8), 1143–1155. **https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.016**
34. Goodarzi, P., Ansari, M., Mahdavinejad, M., Russo, A., Haghighatbin, M., & Pour Rahimian, F. (2023a). Morphological analysis of historical landscapes based on cultural DNA approach. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. Volume 30, p e00277.
35. Goodarzi, P., Ansari, M., Pour Rahimian, F., Mahdavinejad, M., & Park, C. (2023b). Incorporating sparse model machine learning in designing cultural heritage landscapes. Automation in Construction. , Volume 155, 105058.
36. Goodarzi, P., Heidari, F., Zolotovsky, K., Mahdavinejad, M.(2025). Cognitive Nests: Nested Data-Driven Decision Support System in Regenerative Design from Biology to Ecology. 3D Printing and Additive Manufacturing, Volume 12(2), p 192-198.
37. Grazianova, M., & Mesaros, P. (2023). HBIM: The digital transformation of cultural and existing heritage. *MATEC Web of Conferences*. **https://doi.org/10.1051/matecconf/202338400076**
38. Ham, H., Wesley, J., & Hendra, H. (2019). Computer vision-based 3D reconstruction: A review. *International Journal of Electrical and Computer Engineering, 9*(4), 2394–2402. **https://doi.org/10.11591/ijece.v9i4.pp2394-2402**
39. Herrero-Tejedor, T. R., Arques-Soler, F., López-Cuervo Medina, S., de la O Cabrera, M. R., & Martin-Romero, J. L. (2020). Documenting a cultural landscape using point cloud 3D models obtained with geomatic integration techniques: The case of the El Encín atomic garden, Madrid (Spain). *PLOS ONE, 15*(6), e0235169. **https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235169**
40. Hess, M., & Ferreyra, C. (2021). Recording and comparing historic garden architecture: Value of SLAM-based recording for research on cultural landscapes in connection with heritage conservation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-M-1*, 301–308. **https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-301-2021**
41. Hyun, J., Delgado, A., Reinert, F., Brannen, E., Carlos, B., Miller, J., Ojeda, U., & Tsang, C. (2020). *John T. Lyle & the Future of Regenerative Design.*
42. Janowicz, K., Gao, S., McKenzie, G., Hu, Y., & Bhaduri, B. (2020). GeoAI: Spatially explicit artificial intelligence techniques for geographic knowledge discovery and beyond. *International Journal of Geographical Information Science, 34*(4), 625–636. **https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1684500**
43. Javernick, L., Brasington, J., & Caruso, B. (2014). Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure from Motion photogrammetry. *Geomorphology, 213*, 166–182. **https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.006**
44. Jia, S., Liao, Y., Xiao, Y., Zhang, B., Meng, X., & Qin, K. (2022). Methods of conserving and managing cultural heritage in classical Chinese royal gardens based on 3D digitalization. *Sustainability, 14*(7), 4108. **https://doi.org/10.3390/su14074108**

45. Jo, Y. H., & Hong, S. (2019). Three-dimensional digital documentation of cultural heritage sites based on the convergence of terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 8*(2), 53. **https://doi.org/10.3390/ijgi8020053**
46. Karandinou, A. (2018). *Data, architecture and the experience of place*. Routledge. **https://doi.org/10.4324/9781315277336**
47. Klepárník, R., & Sedláček, J. (2021). UAV photogrammetry, LiDAR or WebGL? A comparison of spatial data sources for landscape architecture. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 220–229.
48. Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press.
49. Kuhn, T. S. (1979). Metaphor in science. In A. Ortony (Ed.), *Metaphor and thought* (pp. 533–542). Cambridge University Press. **https://doi.org/10.1017/CBO9781139173865.028**
50. Kullmann, K. (2018). The drone's eye: Applications and implications for landscape architecture. *Landscape Research, 43*(7), 906–921. **https://doi.org/10.1080/01426397.2018.1453144**
51. Kumazaki, R., & Kunii, Y. (2015). Drawing and landscape simulation for Japanese gardens by using terrestrial laser scanning. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W7*, 233–238. **https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-233-2015**
52. Kurzweil, R. (2005). The singularity is near. In *Ethics and Emerging Technologies* (pp. 393–406). Springer. **https://doi.org/10.1007/978-1-349-24515-8_27**
53. Kutlu, I., & Soyluk, A. (2023). A comparative approach to using photogrammetry in the structural analysis of historical buildings. *Ain Shams Engineering Journal*, 102298. **https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102298**
54. Kutlu, I., Soyluk, A., & Aydin, S. (2023). A review of the usability of photogrammetry technique for studying the structural behavior of historical buildings. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences, 22*(1), 43–48.
55. Lato, M. J., Hutchinson, D. J., Gauthier, D., Edwards, T., & Ondercin, M. (2015). Comparison of airborne laser scanning, terrestrial laser scanning, and terrestrial photogrammetry for mapping differential slope change in mountainous terrain. *Canadian Geotechnical Journal, 52*(2), 129–140. **https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0036**
56. Lavdas, A. A., Mehaffy, M. W., & Salingaros, N. A. (2023). AI, the beauty of places, and the metaverse: beyond “geometrical fundamentalism”. Architectural Intelligence, 2 (1), 8.
57. Lercari, N. (2016). Terrestrial laser scanning in the age of sensing. In *Sensing the Past* (pp. 123–145). Springer. **https://doi.org/10.1007/978-3-319-27702-8_6**
58. Lercari, N., Jaffke, D., Campiani, A., Guillem, A., McAvoy, S., Delgado, G. J., & Bevk-Neeb, A. (2021). Building cultural heritage resilience through remote sensing: An integrated approach using multi-temporal site monitoring, datafication, and WebGL visualization. *Remote Sensing, 13*(20), 4130. **https://doi.org/10.3390/rs13204130**
59. Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V. (2010). Terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry for 3D archaeological documentation: The Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science, 37*(3), 499–507. **https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.10.008**
60. Liang, H., Li, W., Lai, S., Zhu, L., Jiang, W., & Zhang, Q. (2018). The integration of terrestrial laser scanning and terrestrial and unmanned aerial vehicle digital photogrammetry for the documentation of Chinese classical gardens: A case study of Huanxiu Shanzhuang, Suzhou, China. *Journal of Cultural Heritage, 33*, 222–230. **https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.002**
61. Lin, E., & Girot, C. (2014). Point cloud components: Tools for the representation of large-scale landscape architectural projects. *Peer-Reviewed Proceedings of Digital Landscape Architecture*, 208–218.
62. Lin, G., Giordano, A., & Sang, K. (2021). From site survey to HBIM model for the documentation of historic buildings: The case study of Hexinwu Village in China. *Conservation Science in Cultural Heritage, 20*(1), 111–123. **https://doi.org/10.6092/issn.1973-9494/12793**
63. Liu, M., & Nijhuis, S. (2021). The application of advanced mapping methods and tools for spatial-visual analysis in landscape design practice. *Sustainability, 13*(14), 7952. **https://doi.org/10.3390/su13147952**
64. López Sánchez, M., Tejedor Cabrera, A., & Linares Gómez Del Pulgar, M. (2020). Guidelines from the heritage field for the integration of landscape and heritage planning: A systematic literature review. Landscape and Urban Planning, 204, 103931.
65. Lucchi, E. (2023). Regenerative Design of Archaeological Sites: A Pedagogical Approach to Boost Environmental Sustainability and Social Engagement. Sustainability, 15.
66. Lucieer, A., de Jong, S. M., & Turner, D. (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography, 38*(1), 97–116. **https://doi.org/10.1177/0309133313515293**
67. Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2006). *Close range photogrammetry: Principles, methods and applications*. Whittles Publishing.
68. Machado, C., & Del Duca, G. (2023). Mobile laser scanning technologies for heritage landscape documentation. *Heritage, 6*(5), 4123–4145. **https://doi.org/10.3390/heritage6050217**
69. Megarry, W., Wright, D., & Taylor, J. (2016). Integrating terrestrial laser scanning and photogrammetry for cultural heritage documentation. *Journal of Archaeological Science: Reports, 10*, 653–662. **https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.11.012**

70. Meléndez, L., Fernández, J., & Pérez, A. (2020). Artificial intelligence and digital technologies in landscape architecture: Current trends and future perspectives. *Landscape Research, 45*(8), 1045–1061. **https://doi.org/10.1080/01426397.2020.1802337**
71. Mikhail, E. M., Bethel, J. S., & McGlone, J. C. (2001). *Introduction to modern photogrammetry*. John Wiley & Sons.
72. Min, A., & Lee, J.-H. (2019). A conceptual framework for the externalization of ecological wisdom: The case of traditional Korean gardens. Sustainability, 11 (19), 5298 .
73. Murphy, M. (2016). Historic Building Information Modelling (HBIM): Digital representation of architectural heritage. *Historic Environment: Policy & Practice, 7*(2–3), 311–327. **https://doi.org/10.1080/17567505.2016.1172470**
74. Noardo, F., Arroyo Ohori, K., Biljecki, F., Ellul, C., Harrie, L., Krijnen, T., ... & Stoter, J. (2019). GeoBIM benchmark 2019: Design and initial results. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-4/W8*, 133–140. **https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W8-133-2019**
75. Park, C. (2019). Digital representation of landscape heritage using UAV-based photogrammetry. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 210–221.
76. Plaut, J. M., Dunbar, B., Wackerman, A., & Hodgin, K. (2012). Regenerative design: The LENSES framework for buildings and communities. *Building Research & Information, 40*(1), 112–122. **https://doi.org/10.1080/09613218.2012.628577**
77. Previtali, M., & Barazzetti, L. (2023). Automation in heritage documentation: challenges and perspectives. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLVIII-M-2-2023*, 125–132. **https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-125-2023**
78. Puliti, S., Ørka, H. O., Gobakken, T., & Næsset, E. (2020). Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing, 7*(8), 9632–9654. **https://doi.org/10.3390/rs70809632**
79. Rahaman, H. (2024). Digital heritage and artificial intelligence: A review of opportunities and challenges. *Heritage Science*, 12 (1), 45. **https://doi.org/10.1186/s40494-024-01234-4**
80. Ran, J., Li, G., & Wang, Z. (2018). Data mining techniques in landscape planning and design. *Sustainable Cities and Society, 39*, 720–729. **https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.021**
81. Rędzińska, K., Szulczewska, B., & Wolski, P. (2022). The landscape thresholds analysis as an integrated approach to landscape interpretation for planning purposes. Land Use Policy, 119, 106141.
82. Rekittke, J., Paar, P., & Eisenberg, B. (2013). UAV applications in landscape architecture: A case study. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 145–154.
83. Salingaros, N. A., & Mehaffy, M. W. (2015). Design for a Living Planet: Settlement, Science, and the Human Future .
84. Schlickman, C. (2020). *GIS and environmental decision-making*. CRC Press.
85. Serdar, S. E., & Kaya, M. E. (2019). Generative Landscape Modeling in Urban Open Space Design: An Experimental Approach .
86. Shervais, K. (2016). Structure from Motion (SfM) photogrammetry for cultural heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, 6*(4), 405–420. **https://doi.org/10.1108/JCHMSD-04-2016-0018**
87. Starek, M. J., Slatton, K. C., & Custer, S. G. (2011). Terrestrial laser scanning for landscape and geomorphological modelling. *Geomorphology, 128*(1–2), 1–14. **https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.12.009**
88. Szeliski, R. (2022). *Computer vision: Algorithms and applications* (2nd ed.). Springer. **https://doi.org/10.1007/978-3-030-34372-9**
89. Tal, A., & Altschuld, J. (2021). Applications of unmanned aerial vehicles in landscape architecture and heritage documentation. *Journal of Digital Landscape Architecture, 6*, 187–198.
90. Trebuňa, P., Fiľo, M., Pekarčíková, M., Kliment, M., & Trojan, J. (2018). Digital technologies for three-dimensional landscape modelling and visualization. *Advances in Science and Technology Research Journal, 12*(4), 185–194. **https://doi.org/10.12913/22998624/99631**
91. Urech, P. R. W. (2020). Digital landscape representation: Computational methods and visualisation approaches. *Journal of Digital Landscape Architecture, 5*, 72–83.
92. Urech, P. R. W. (2021). Landscape information modelling: Integrating computational workflows into landscape architecture. *Journal of Digital Landscape Architecture, 6*, 356–367.
93. Wang, C., Cho, Y. K., & Kim, C. (2015). Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications. *Automation in Construction, 56*, 1–13. **https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.001**
94. Wang, Y., Chen, Z., & Li, H. (2023). Transfer learning for point cloud semantic segmentation in cultural heritage contexts. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 198, 234–248. **https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.03.012**
95. Wang, Y., Li, Z., & Zhang, X. (2019). Applications of terrestrial laser scanning in landscape architecture and heritage documentation. *Remote Sensing, 11*(18), 2148. **https://doi.org/10.3390/rs11182148**

96. Wu, B., & Yan, Y. (2021). Artificial intelligence and image-based reconstruction in cultural heritage documentation. *Automation in Construction, 127*, 103703. **https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103703**
97. Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2018). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems, 61*, 530–535. **https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006**
98. Zavoleas, Y., Stevens, P. R., Johnstone, J., and Davidová, M. (2023). More-Than-Human Perspective in Indigenous Cultures: Holistic Systems Informing Computational Models in Architecture, Urban and Landscape Design towards the Post-Anthropocene Epoch. Buildings, 13 (1).

Research Paper

Future Heritage Landscapes in the Context of Computational Systems: From Data to Decision[1]

Parichehr Goodarzi*[1], Saeedeh Kalantari[2], Mahdi zandieh[3]

1-Ph.D. Graduate, Department of Landscape Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (Corresponding Author)

p.goodarzi@modares.ac.ir

2- PhD Graduate in Architecture, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

saeedeh.kalantari@modares.ac.ir

3-professor, Department of Landscape Architecture Department, Imam Khomeini International University, Faculty of Architecture and Urban Planning Qazvin, Iran.

zandieh@arc.ikiu.ac.ir

Extended Abstract

Aims: The rapid advancement of computational technologies and artificial intelligence has fundamentally transformed conventional paradigms for documenting, analyzing, designing, and conserving heritage landscapes. As the volume and complexity of spatial data continue to grow, traditional intuition-based decision-making is gradually being replaced by evidence-based, data-driven approaches. Consequently, the concept of Future Heritage Landscapes has emerged as a new research paradigm in which heritage conservation extends beyond preserving existing physical characteristics toward predicting future conditions, supporting adaptive management, and enabling intelligent planning through computational systems. Heritage landscapes represent complex socio-ecological systems integrating tangible and intangible values, spatial configurations, ecological processes, and accumulated indigenous knowledge. Historic Persian gardens, recognized as one of the most significant cultural landscape typologies worldwide, embody centuries of environmental wisdom, hydraulic engineering, climatic adaptation, and symbolic spatial organization. However, conventional documentation techniques often fail to capture the multidimensional relationships embedded within these landscapes or to support comprehensive decision-making processes. Literature Background: Recent developments in UAV photogrammetry, computer vision, machine learning, and Decision Support Systems (DSSs) have introduced new opportunities for collecting high-resolution spatial data and transforming them into actionable knowledge. Rather than serving merely as computational tools for data processing, intelligent DSSs provide integrated frameworks capable of organizing heterogeneous datasets, extracting hidden knowledge, simulating alternative scenarios, and supporting evidence-based decisions. Computational technologies have thus become an essential foundation for developing adaptive and resilient future heritage landscapes. This study investigates the role of computational Decision Support Systems in facilitating the transition from intuition-based to data-driven decision-making within landscape architecture and cultural heritage management. Specifically, the research aims to explain how advanced data acquisition technologies—particularly UAV-based photogrammetry—can provide the spatial information required for intelligent decision-making processes. Furthermore, the study proposes a conceptual framework illustrating the transformation of raw data into information, information into knowledge, and knowledge into informed decisions through computational systems, with particular attention to integrating artificial intelligence into each stage.

Materials & Methods: The research adopts a descriptive–analytical and developmental methodology. Initially, an extensive literature review was conducted concerning computational design, AI, data mining, spatial analysis, and DSSs. Subsequently, various landscape data acquisition methods were comparatively evaluated, and UAV photogrammetry was identified as the most appropriate technique for documenting historic Persian gardens due to its ability to generate dense, accurate, and high-resolution spatial datasets while maintaining relatively low operational costs. Image datasets acquired by UAVs were processed using Structure from Motion and Multi-View Stereo

[1] This paper extracted from the Dissertation of the first author titled "Regenerative-adaptive Decision support systems, as a tool for Heritage Landscape's Cultural DNA transfer (Persian Garden)", in 2023, which was Presented in the Tarbiat Modares university.

algorithms to produce dense point clouds, orthophotos, digital elevation models, textured meshes, and complete three-dimensional representations of heritage landscapes. The resulting datasets were subsequently integrated into a Decision Support System specifically developed for heritage landscape analysis, comprising multiple computational layers including data management, spatial analysis, information processing, knowledge extraction, and intelligent decision support.

Findings: The findings demonstrate that UAV photogrammetry provides highly accurate, multi-dimensional, and information-rich datasets that substantially enhance the documentation and analysis of heritage landscapes. Beyond geometric reconstruction, the generated datasets facilitate the extraction of valuable information concerning vegetation distribution, irrigation networks, topography, spatial hierarchy, architectural structures, and environmental characteristics. The study further reveals that the true value of spatial data emerges only after systematic integration within an intelligent Decision Support System. Through the integration of spatial, historical, ecological, and visual information, the developed DSS transforms heterogeneous datasets into meaningful information and subsequently into actionable knowledge. AI algorithms identify hidden spatial relationships, recognize recurring landscape patterns, classify environmental conditions, detect anomalies, monitor temporal changes, and support predictive analyses that would be difficult to accomplish using conventional analytical approaches.

Conclusion: The proposed framework demonstrates that decision-making in heritage landscape management can be conceptualized as a hierarchical computational process composed of four successive stages: Data → Information → Knowledge → Decision. Unlike traditional conservation practices that often rely primarily on expert intuition and qualitative assessments, AI-driven Decision Support Systems provide transparent, reproducible, and evidence-based recommendations supported by quantitative analyses. Moreover, the integration of historical documentation, remote sensing, three-dimensional models, and environmental monitoring enables continuous evaluation of landscape conditions and facilitates dynamic management strategies capable of responding to future changes. From a broader theoretical perspective, the research suggests that computational systems redefine heritage conservation by shifting emphasis from static documentation toward continuous knowledge generation, significantly enhancing the capacity of landscape architects and heritage managers to understand complex interactions between cultural values, ecological processes, and spatial organization. This study demonstrates that computational Decision Support Systems constitute a transformative framework for the future of heritage landscape conservation and management. Rather than functioning solely as analytical software, AI-enabled DSSs integrate diverse datasets, extract meaningful knowledge, simulate future scenarios, and support evidence-based decision-making throughout the entire heritage management process. UAV photogrammetry emerges as one of the most efficient methods for generating accurate, comprehensive, and analytically valuable three-dimensional datasets of historic landscapes. When combined with AI, computer vision, and data mining algorithms, these datasets become the foundation for intelligent decision-making frameworks capable of supporting conservation, restoration, planning, and adaptive management. The proposed computational workflow provides a comprehensive paradigm for developing Future Heritage Landscapes by preserving, transferring, and regenerating both explicit and tacit ecological knowledge embedded within historic Persian gardens. Ultimately, this research argues that the future of cultural landscape conservation lies in establishing intelligent computational ecosystems capable of continuously learning from heritage data, supporting multidisciplinary collaboration, and facilitating informed decision-making. The proposed framework offers a transferable model for integrating AI, computational design, spatial data science, and landscape architecture into heritage conservation practices.

Keywords: Heritage Landscapes; Decision Support Systems; Computational Design; Data Mining; UAV Photogrammetry.

This Journal is an open access Journal Licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License

(CC BY 4.0)