Investigation and Analysis of the Technical Methodologies Employed in Creating Stone Reliefs at the Persepolis World Heritage Site Through 3D Modeling and Image Processing

Mohammad Reza Rokni [1*], Hamid Fadaei [2], Marjan Keyfargir [3]

1. Research Associate, Research Institute of Archaeology, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, Research Centre for Conservation and Restoration of Cultural Relics, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism,Tehran, Iran.

3. Conservation and Restoration Specialist.

Abstract

Persepolis, as one of Iran's most prominent archaeological sites, symbolizes the grandeur of the Achaemenid Empire's culture and art. The stone carving art and architectural ornaments of this era, drawing from the experiences and knowledge of various cultures, created a novel and artistic style that is evident in the stone reliefs of Persepolis. Due to the delicacy and precision of these reliefs, they have attracted the attention of many researchers, raising questions about their artistic values and execution methods. This study aims to analyze the execution techniques of Persepolis' reliefs by documenting examples of these reliefs on the eastern staircase of Apadana Palace and the northern staircase of the Treasury Palace. To document and create 3D models of the reliefs, advanced photogrammetry methods, with a particular emphasis on photo-scanning technology, were employed. Images were processed using specialized software such as Agisoft, 3D Zephyr, and Reality Capture. The results of this study reveal a part of the creation process of these artworks that has been less explored until now. Furthermore, the effectiveness of the photogrammetry-based documentation method in extracting precise technical and artistic data is confirmed. This method not only enables a more detailed analysis of the reliefs' intricacies and geometric proportions but also contributes to a deeper understanding of their artistic values and their place in the history of art. This approach can serve as a valuable model for future research in the field of documenting and extracting technical and artistic data from historical stone reliefs.

Keywords: Documentation, Photogrammetry, Image processing, Technology, Stone reliefs, Persepolis.

Knowledge of Conservation and Restoration

Vol. 7(2) No.20
September 2024

https://kcr.richt.ir

Pages: 97 to 114

Corresponding Author

Mohammad Reza Rokni

Research Associate, Research Institute of Archaeology, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, Tehran, Iran.

Email

mrrokni@gmail.com

Copyright © 2020,Knowledge of Conservation and Restoration. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-noncommercial 4.0. International License which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited.

مطالعه و تحلیل فنون اجرایی نقوش برجسته در محوطه میراث جهانی تخت‌جمشید با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و پردازش تصویر

محمدرضا رکنی[1*]، حمید فدایی[2]، مرجان کیفرگیر[3]

۱. کارشناس پژوهشی پژوهشکده باستان‌شناسی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، ایران.

۲. استادیار پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی–فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، ایران.

۳. کارشناس حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی – فرهنگی.

چکیده

تخت‌جمشید به‌عنوان یکی از برجسته‌ترین محوطه‌های باستان‌شناختی ایران، نماد عظمت فرهنگی و هنری دوره هخامنشی است. هنر حجاری و آرایه‌های معماری این دوره با بهره‌گیری از تجربیات و دانش فرهنگ‌های گوناگون، شیوه‌ای نوین و هنرمندانه را خلق کرده است که در نقوش برجسته سنگی تخت‌جمشید نمود یافته‌اند. این نقوش به دلیل ظرافت و دقت اجرا، توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده و پرسش‌هایی در خصوص ارزش‌های هنری و روش‌های اجرایی آن‌ها مطرح ساخته‌است. این پژوهش با هدف تحلیل فنون اجرایی نقوش برجسته تخت‌جمشید، به مستندسازی نمونه‌هایی از این نقوش در پلکان شرقی کاخ آپادانا و پلکان شمالی کاخ شورا پرداخته است. برای مستندسازی و تهیه مدل‌های سه‌بعدی نقوش برجسته، از روش‌های پیشرفته فتوگرامتری، با تأکید ویژه بر فناوری فتواسکن، استفاده شد و تصاویر به‌وسیله نرم‌افزارهای تخصصی Agisoft، 3D Zephyr و Reality Capture پردازش گردید. نتایج این پژوهش بخشی از فرایند خلق این آثار هنری را آشکار می‌کند که تاکنون کمتر به آن پرداخته شده است. همچنین، کارایی روش مستندسازی مبتنی بر فتوگرامتری در استخراج داده‌های دقیق فنی و هنری مورد تأیید قرار گرفت. این روش نه‌تنها امکان تحلیل دقیق‌تر جزئیات نقوش برجسته و تناسبات هندسی آن‌ها را فراهم می‌سازد، بلکه به درک عمیق‌تری از ارزش‌های هنری این آثار و جایگاه آن‌ها در تاریخ هنر کمک می‌کند. این رویکرد می‌تواند الگویی ارزشمند برای پژوهش‌های آینده در زمینه مستندسازی و استحصال داده‌های فنی و هنری نقوش برجسته تاریخی باشد.

واژگان کلیدی: مستندسازی، فتوگرامتری، پردازش تصویر، فن‌شناسی، نقوش‌برجسته سنگی، تخت‌جمشید.

فصل‌نامه دانش حفاظت و مرمت

سال هفتم، شماره ۲
شماره پیاپی ۲۰، تابستان ۱۴۰۳

https://kcr.richt.ir

صفحات: ۹۷ تا ۱۱۴

نویسنده مسئول

محمدرضا رکنی

کارشناس پژوهشی پژوهشکده باستان‌شناسی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، ایران.

رایانامه

mrrokni@gmail.com

دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

مقدمه

محوطه تاریخی تخت‌جمشید یکی از مهم‌ترین و شاخص‌ترین محوطه‌های باستان‌شناختی ایران است که در دل استان فارس یعنی میهن هخامنشیان به‌عنوان یکی از مراکز اداری و آیینی بزرگ‌ترین امپراتوری آن دوران عمل می‌کرد. بخش عمده ساختمان‌های تخت‌جمشید، این شاهکار برجسته معماری هخامنشی، در دوران داریوش بزرگ و فرزندش خشایارشا ساخته شد. این بناها نه‌تنها به‌عنوان نمادهای اقتدار و هنر شاهنشاهی هخامنشی شناخته می‌شوند، بلکه نشان‌دهنده تعهد این سلسله به معماری پایدار و جزئیات دقیق است. اردشیر یکم برخی از این بناها را به پایان رساند و اردشیر سوم نیز به نظر می‌رسد که تعمیرات و افزوده‌هایی در این مجموعه انجام داده باشد (Shahbazi, 2004). این محوطه با هنر معماری و حجاری منحصر به فرد، نشان‌دهنده عظمت و شکوه امپراتوری هخامنشیان است. در طول روند ساخت تخت‌جمشید، بسیاری از آرایه‌های معماری و حجاری سنگ با دقت و ظرافت بالا طراحی شدند که در آن زمان در جهان شناخته شده و مرسوم بود. این تزئینات و نقوش سنگی که در کاخ‌ها و دروازه‌ها به چشم می‌خورند، علاوه بر زیبایی بصری، نشانگر ارتباطات فرهنگی و هنری هخامنشیان با دیگر تمدن‌های هم‌جوار هستند. این ارتباطات شامل تأثیرات فرهنگی یونان، مصر و بین‌النهرین است که به‌طور مستقیم بر توسعه و خلق آثار هنری در تخت‌جمشید تأثیر گذاشتند. کشف بایگانی‌های ارزشمند تخت‌جمشید شامل بایگان‌های بارو و خزانه نقش اساسی در پژوهش در مورد موضوعات گوناگون هخامنشی دارد و از جمله دریچه جدیدی را برای پژوهش در مورد هنرمندان و تخصص‌های هنری این دوره گشوده است (Zehbari, 2024).

امروزه اهمیت مستندسازی میراث فرهنگی به‌خوبی شناخته شده است و فشارهای فزاینده‌ای در سطح ملی و بین‌المللی برای ثبت و مستندسازی میراث فرهنگی وجود دارد (Patinas, 2006). ابزارهای مستندسازی با پیشرفت فناوری در سال‌های اخیر دستخوش تحولات اساسی شده‌اند. روش‌ها و فناوری‌های نوین برای جمع‌آوری داده‌ها، پردازش آن‌ها و ارائه و تحلیل نتایج، منجر به ایجاد رویکردها و دستاوردهای جدیدی در مستندسازی شده‌اند. استفاده از ابزارهای دیجیتال در این فرآیند نیازمند آگاهی از نحوه کاربری صحیح و بهره‌برداری مؤثر از آن‌هاست. برای درک نقش فناوری‌های دیجیتال در مستندسازی میراث فرهنگی، ضروری است که میزان و کیفیت اطلاعات تولیدشده با این ابزار به‌دقت بررسی شود. همچنین، مهم است که تلاش‌هایی که برای مستندسازی صورت می‌گیرد، با نیازهای واقعی پروژه و ارزش و اهمیت موضوع موردتوجه، هماهنگی داشته باشد تا مستندسازی به‌طور دقیق و هدفمند انجام شود.

یکی از روش‌های اصلی مستندسازی مبتنی بر ثبت نوری آثار، استفاده از حسگرهای ثبت اطلاعات است که در حوزه میراث فرهنگی کاربرد گسترده‌ای یافته است. این روش‌ها شامل روش‌های عکس‌محور (Image-based methods) مانند فتوگرامتری و عکاسی پانوراما می‌شوند. این روش‌ها به‌طور وسیعی برای بازسازی سه‌بعدی، مدل‌سازی دقیق عوارض و مدل‌سازی اشیای پیچیده با استفاده از دوربین‌های دیجیتال مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این شیوه، تصاویر به‌عنوان مبنای استخراج داده از سوژه عمل می‌کنند و مختصات نقاط پس از پردازش داده‌های اولیه از روی تصاویر قابل دسترسی است. تصاویر ثبت‌شده اطلاعاتی درباره جزئیات سطوح ارائه می‌دهند که تشخیص و تفسیر نقشه‌ها را ساده‌تر کرده و اطلاعات فنی دقیقی در مورد وضعیت موجود اثر در اختیار می‌گذارند (Baik & Alitany, 2018).

در روش‌های عکس‌محور، کل محدوده مورد عکاسی به‌طور کامل و نقطه‌به‌نقطه پوشش داده می‌شود و عملیات فیلتر کردن برای استخراج نقاط موردنیاز در مراحل بعدی انجام می‌گیرد. در روش عکاسی سنتی به دلیل نبود مرجع مختصاتی در فرمت‌های آنالوگ، این فرآیند زمان‌بر بوده و اطلاعات دقیقی ارائه نمی‌دهد (Agosto et al., 2005). این محدودیت‌ها با استفاده از تصاویر دیجیتال برطرف شده‌اند. در این روش، اطلاعات موردنیاز برداشت شده و با استفاده از ابزارهای

پیشرفته، اپراتور می‌تواند حجم بالایی از داده‌های پیوسته را به‌سرعت دریافت کند. علاوه بر سرعت بالای پردازش، اطلاعات به‌صورت دقیق و منسجم در دسترس قرار می‌گیرند (Luhmann et al., 2006).

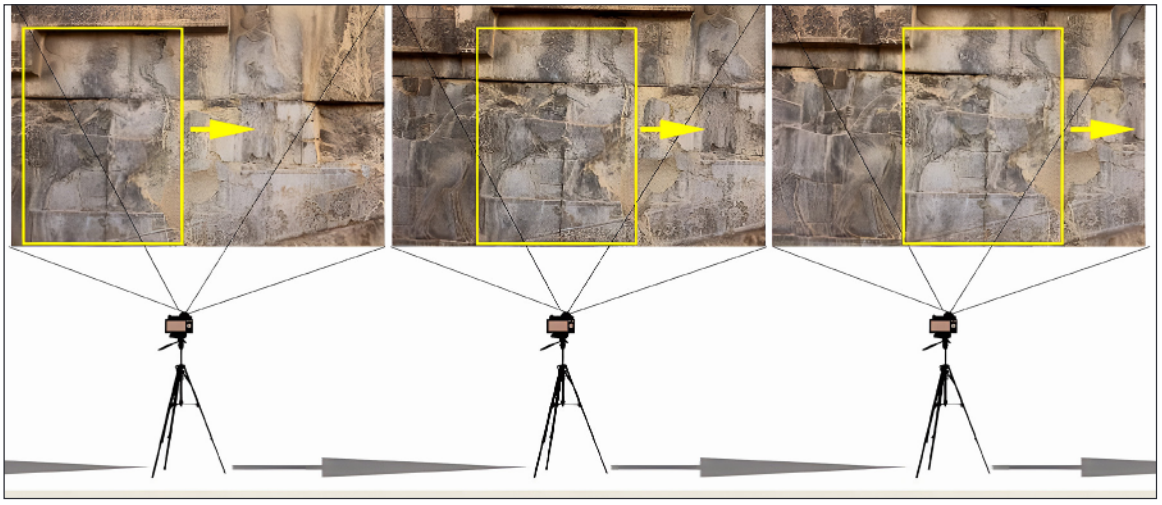
توانایی انسان در تشخیص عمق، اساس علم و فناوری فتوگرامتری است. به‌طور ساده، فتوگرامتری به معنای انجام عملیات اندازه‌گیری بر روی عکس است که شامل عکسبرداری از اشیا، اندازه‌گیری تصاویر اشیا روی عکس و تبدیل این اندازه‌ها به شکلی قابل استفاده (مانند نقشه‌های توپوگرافی) است. امروزه فتوگرامتری به‌عنوان یک روش کاملاً مستقل در مستندسازی شناخته می‌شود و به دلیل توانایی آن در ارائه اطلاعات سه‌بعدی دقیق، به‌ویژه برای سوژه‌های پیچیده و بزرگ، مورد توجه قرار گرفته است. این روش به زمان کمی برای برداشت میدانی نیاز داشته و یک فناوری قدرتمند، انعطاف‌پذیر و همه‌کاره به شمار می‌رود. روش فتوگرامتری ارتباط عمیقی با جنبه‌های گرافیکی و علم عکاسی دارد و شامل کاربردهایی همچون پردازش تصاویر دیجیتال، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و کارتوگرافی می‌شود (Luhmann et al., 2006). هدف اصلی این روش بازسازی سه‌بعدی یک جسم به‌صورت دیجیتال (مختصات و عناصر هندسی) یا گرافیکی (تصاویر، ترسیمات و نقشه‌ها) است. در فتوگرامتری دیجیتال، با ارائه حجم زیادی از اطلاعات عمق و حجم، پردازش‌های سه‌بعدی انجام شده و شیوه‌های تشخیصی و تحلیل‌های مرتبط با بناهای تاریخی بهبود یافته است (Alessia Galantucci, 2018). این روش امکان تولید مدل‌های سه‌بعدی دقیق را فراهم می‌کند. در مقایسه با روش‌های برداشت دستی، فتوگرامتری قادر است حجم زیادی از داده‌های اولیه را در زمان کوتاهی تولید کند. علاوه بر این، به دلیل ماهیت غیرتماسی آن، ایمنی بیشتری نسبت به روش‌های سنتی برداشت دستی دارد (Manea & Calin, 2006).

هدف از این پژوهش بررسی کاربرد مدل‌سازی سه‌بعدی و پردازش تصویر در مستندسازی نمونه‌هایی از نقوش برجسته موجود در کاخ‌های آپادانا و شورا در تخت‌جمشید است. این نقوش که از مهم‌ترین آثار هنری این دوره به شمار می‌روند، بیانگر ابعاد مختلف سیاسی، اجتماعی و دینی هخامنشیان هستند و با دقت بالا ایجاد شده‌اند. در این پژوهش تلاش بر آن است که به تحلیل و مستندسازی بخشی از این نقوش پرداخته شود تا ضمن حفظ و ثبت این آثار، اطلاعاتی دقیق‌تر از روش‌های اجرایی آن‌ها به‌دست آید. این اطلاعات می‌تواند در آینده از دیدگاه هنری نقوش و مفاهیم نهفته در آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

روش کار

در این پژوهش، از روش مستندسازی سه‌بعدی به‌منظور ایجاد مدل‌های دیجیتال با دقت میلی‌متری استفاده شده است. این مدل‌ها شامل مختصات افقی، عمودی و ارتفاعی بوده و هدف آن‌ها ثبت و تحلیل دقیق نقوش تاریخی است. برای تهیه هر مدل سه‌بعدی، از روش‌های رایج فتوگرامتری با تأکید خاص بر شیوه فتواسکن، بهره برده شد. مبنای فتواسکن، عکاسی از اثر و استفاده از تصاویر چندگانه در زوایای مختلف برای ساخت مدل‌های سه‌بعدی است؛ بنابراین برای ایجاد مدل سه‌بعدی از هر نقش، چندین تصویر از جهات مختلف گرفته شد. در این فرایند، همپوشانی حداقل ۴۰ درصد بین تصاویر در نظر گرفته شد تا کیفیت مدل سه‌بعدی افزایش یابد. تصاویر مورد نیاز به‌صورت شبکه‌ای موزاییکی از جزئیات نقوش تهیه شدند. این تصاویر با استفاده از دوربین عکاسی ثابت شده بر روی سه‌پایه و در فواصل کوتاه (کمتر از یک گام جابه‌جایی دوربین) ثبت شدند (شکل ۱). این شیوه به‌دلیل گرفتن تصاویر متعدد و با کیفیت بالا، امکان تولید مدل‌هایی با تفکیک‌پذیری و دقت بالاتر را فراهم آورد.

در شکل ۲، ویژگی‌های نمونه‌ای از تصاویر با کیفیت بالا که از یک نقش تهیه شده‌اند، نمایش داده شده است. برای هماهنگ‌سازی وضوح تصاویر با یکدیگر، از تنظیمات حالت(Program) P، برای برآورد نوردهی خودکار توسط دوربین) استفاده شد. در این تنظیمات، حساسیت حس‌گر دوربین (ISO) بر اساس شرایط نوری محیط، بر روی عدد ۱۰۰ تنظیم گردید تا کمترین نویز (تغییرات تصادفی سیگنال در حس‌گر دوربین) در تصاویر ایجاد شود. به این ترتیب، از هر نقش

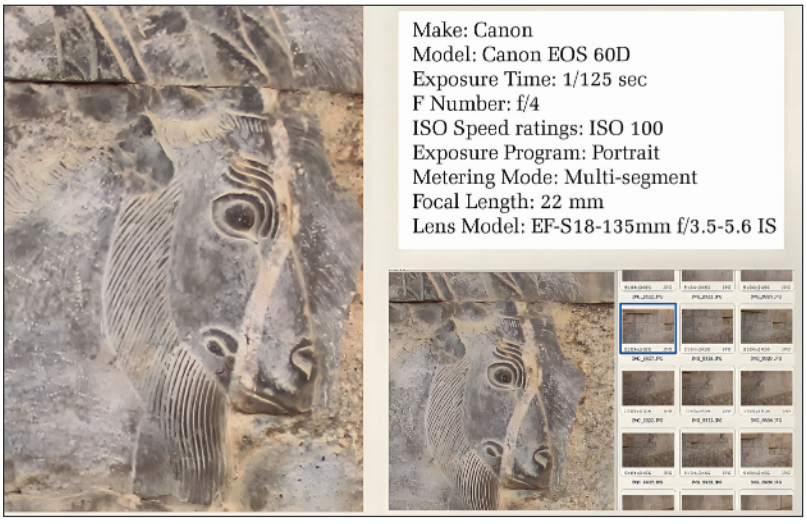


شکل ۱. روش عکس‌برداری از نقوش برجسته .

Figure 1. Method of photographing reliefs .

حجاری‌شده ده‌ها عکس از زوایای مختلف تهیه شد.

در مرحله دیگر، پس از عکس‌برداری، تصاویر با استفاده از نرم‌افزارهای شناخته شده در دانش فتوگرامتری، مورد پردازش و مدل‌سازی سه‌بعدی قرار گرفتند. در این پروژه از نرم‌افزارهای Agisoft, 3D Zephyr و Reality Capture استفاده گردیده است. فتوگرامتری یکی از روش‌های سریع و کارآمد برای ایجاد مدل‌های سه‌بعدی از طریق ابر نقاط متراکم است که در تحلیل جزئیات معماری کاربرد فراوانی دارد (Genin et al., 2019). این روش با بهره‌گیری از مدل‌های سه‌بعدی مانند ابر نقاط و مش‌های چندضلعی، امکان بررسی جزئیات هندسی ناهمواری‌های سطحی



شکل ۲. نمونه‌ای از تصاویر تهیه شده و خصوصیات فنی آن .

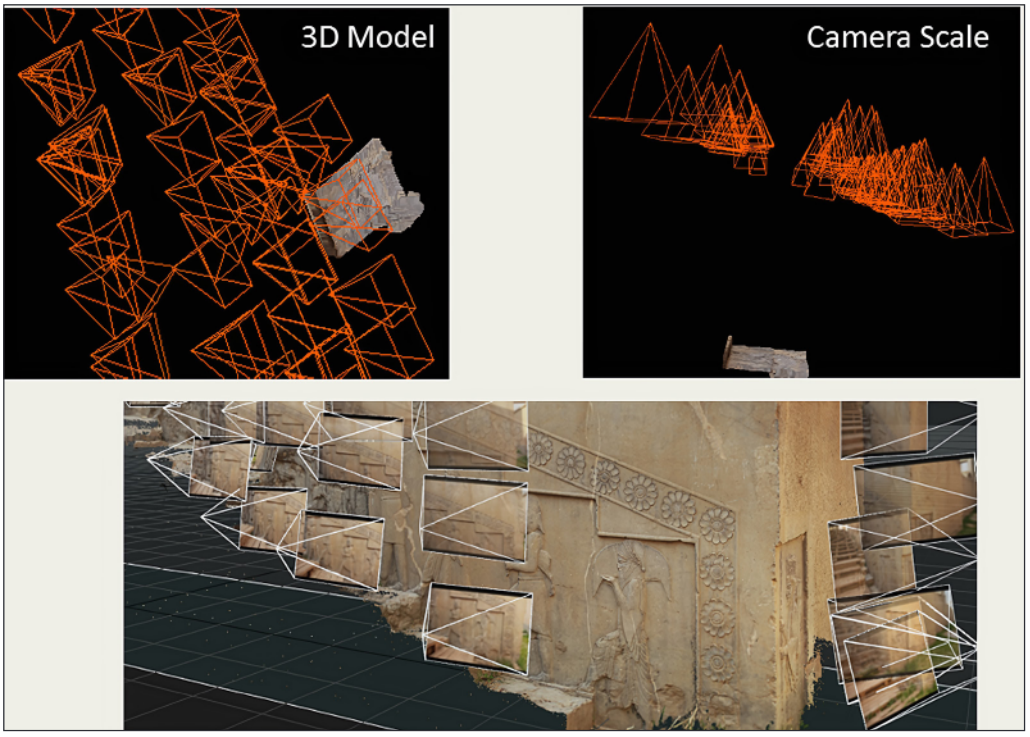
Figure 2. Example of captured images and their technical specifications .

و همچنین ارزیابی ترک‌ها و ویژگی‌های ناشی از زوال مصالح را فراهم می‌کند. بخشی از این تحلیل‌ها به شناسایی فنون اجرایی ساخت اثر اختصاص دارد (Alessia Galantucci, 2018; Genin et al., 2019). در روش فتوگرامتری، پیکسل‌های مشترک (از نظر هندسه مکانی و فضایی) در هر تصویر با تصاویر دیگر توسط نرم‌افزار شناسایی شده و مختصات مکانی آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. پس از شناسایی اشتراکات هر تصویر، یک مدل دیجیتال از ابر نقاط (Point Cloud) از ترکیب تصاویر به‌دست می‌آید.

در این مرحله، نقاط شناسایی‌شده از نظر مختصات مکانی در هر عکس مشخص می‌شوند و تراکم آن‌ها به‌صورت نقاط در فضای دیجیتال ثبت می‌گردد. هر یک از این نقاط که تعداد آن‌ها ممکن است به میلیون‌ها برسد، دارای کد رنگ استخراج‌شده از روی تصاویر با استفاده از الگوریتم‌های شناسایی نرم‌افزار است. این نقاط در فضای دیجیتال مانند یک ابر متراکم از نقاط بوده و به همین دلیل این شیوه به ایجاد ابر نقاط شهرت دارد. در مدل ابر نقاط، با اتصال نقاط همجوار به یکدیگر از طریق پاره‌خطها، یک مدل سه‌بعدی (3D Mesh) ساخته می‌شود. به همین روش، از هر نقش یک مدل سه‌بعدی با کیفیت تفکیک بالا، مدل‌سازی می‌شود. چگونگی تنظیم مکانی دوربین و موقعیت قرارگیری آن برای عکاسی از نقوش در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این که برخی از نقوش بر روی سطوح سنگی در چندین وجه ایجاد شده‌اند و برخی دیگر نیز در مقایسه با ساختار فضای معماری، ابعاد کوچکی دارند، لذا در این پژوهش تنظیم مکان دوربین برای مستندسازی بسیار حائز اهمیت بود.

روش‌های پردازش در مدل‌سازی سه‌بعدی

اصل کلیدی مدلسازی سه بعدی در فتوگرامتری، مثلث‌بندی است که با استفاده از خطوط متقاطع در فضا، موقعیت یک نقطه را در سه بعد محاسبه می‌کند. این روش امکان دستیابی به داده‌های هندسی دقیق



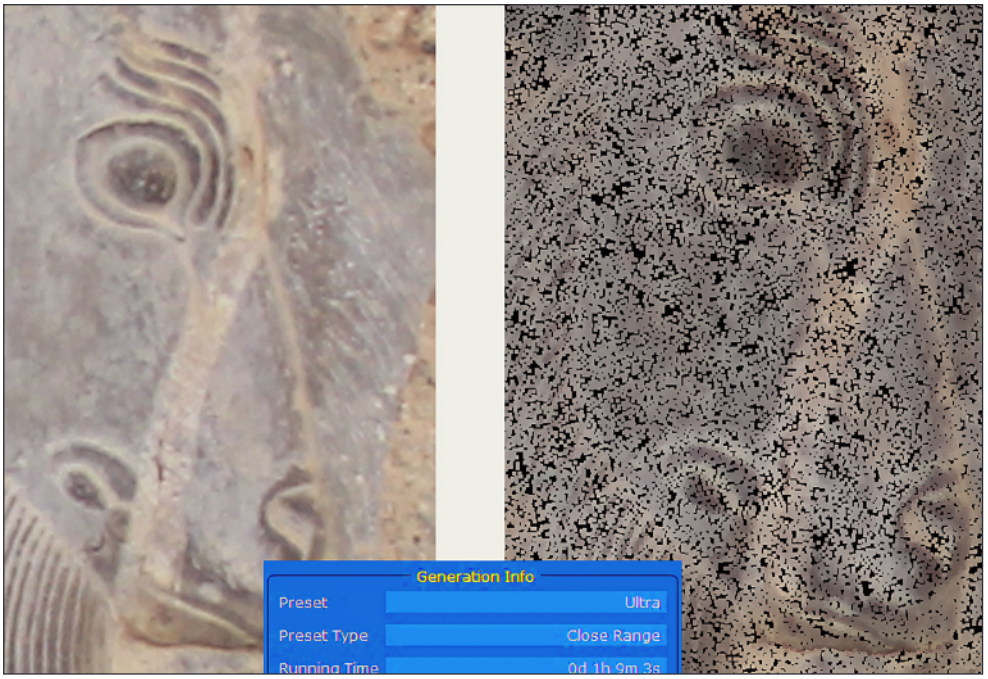
شکل ۳. نحوه پوشش‌دهی فضایی نقوش در مرحله عکاسی و مستندسازی.

Figure 3. Spatial coverage of motifs during the photography and documentation phase.

و تولید سطوح با کیفیت بالا را فراهم می‌آورد (Russo et al., 2018). فتوگرامتری مبتنی بر حداقل تصاویر از نماهای مختلف و با داده‌های دارای هم‌پوشانی است که تضمین‌کننده صحت فرآیند مثلث‌بندی در تشکیل مدل سه بعدی است. این روش برای مستندسازی دقیق رنگ، بافت و ارائه داده‌های متریک اشیا با اندازه و پیچیدگی‌های گوناگون در مدت زمانی نسبتاً کوتاه استفاده می‌شود. خروجی‌های اصلی این روش شامل عکس‌های اصلاح‌شده (اورتو) و مدل‌های سه‌بعدی است (Hassani, 2015).

در شکل ۴ بخشی از نقش حجاری‌شده یک بز روی سنگ نمایش داده شده است که شامل ۱۳۵,۰۰۰ نقطه شناسایی و ثبت شده است. این مرحله با بالاترین کیفیت پردازش در مدت زمانی معادل یک ساعت انجام شده است و تصویری از مدل سه‌بعدی ایجاد شده نیز ارائه شده است. یک مدل سه‌بعدی از فرآیند تبدیل نقاط به سطوح ساخته می‌شود. برای این کار، بین هر نقطه و نقطه مجاور آن یک پاره‌خط ایجاد می‌شود که مختصات ارتفاعی خاصی دارد. این مختصات از موقعیت برداشت هر نقطه در تصاویر مختلف به‌طور دیجیتالی و توسط نرم‌افزار استخراج می‌شود. اتصال خطوط در سه نقطه همجوار، سطوح مثلثی را می‌سازد که از لحاظ هندسی با سایر نقاط هم‌راس بوده و به‌طور سه‌بعدی (دارای ناهمواری) هستند. این فرآیند در ترسیم معماری به «مثلث‌بندی» معروف است.

در شکل ۵، تراکم مثلث‌ها در چهره یک نقش برجسته نمایش داده شده است. هر چه تراکم و تعداد مثلث‌ها بیشتر باشد، کیفیت مدل و دقت برآورد ناهمواری‌های سطح بالاتر خواهد بود، هرچند باید توجه داشت که گاهی ممکن است نویزهای موجود در داده‌ها باعث ایجاد خطا در برآورد ناهمواری‌های سطحی شوند. هر مدل سه‌بعدی (شامل خط، نقطه و سطح) دارای سه مختصات X، Y و Z است؛ بنابراین با استفاده از روش



شکل ۴. نمونه‌ای از مدل ابر نقاط (سمت راست) و مدل سه‌بعدی (سمت چپ)، بخشی از نقش یک بز در پلکان شرقی کاخ آپادانا.

Figure 4. Example of a point cloud model (right) and a 3D model (left), depicting part of a goat motif on the eastern staircase of the Apadana Palace.

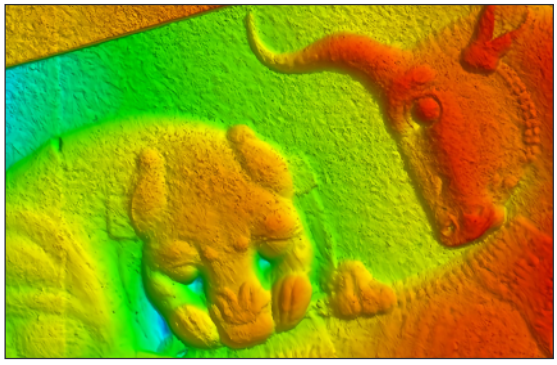
شکل ۵. مثلث‌بندی در مدل سه‌بعدی و تراکم مثلث‌ها در چهره نمونه‌ای از نقوش‌برجسته.

Figure 5. Triangulation in the 3D model and the density of triangles in the face of a sample relief motif.

رنـدر (Render) از هـر مـدل سـه‌بعدی، یـک پـردازش تصویـر جدیـد ایجـاد می‌شـود.

فتوگرامتـری همچنیـن می‌توانـد داده‌هـای رنـگ و بافـت را همـراه بـا اندازه‌گیـری تغییـر شـکل‌ها ارائـه داده و بـرای تحلیـل تغییـرات مـورد اسـتفاده قـرار گیـرد یـکی از مزایای اصـلی ایـن روش، امـکان تولیـد مدل‌هـای بافـت‌دار بـا جزئیـات دقیـق در رنـگ و جنـس مـواد اسـت (Golovina et al., 2016). نمونـه خـروجی مـدل سـه‌بعدی بـه همـراه طیـف رنـگی در شـکل ۶ نمایـش داده شـده اسـت. در ایـن تصویـر، هـر رنـگ گـرم (طیـف زرد تـا قرمـز) نشـان‌دهنده ارتفـاع بیشـتر آن بخـش از مـدل نسـبت بـه رنـگ سـرد (سـبز تـا آبی) اسـت. بدیـن ترتیـب، ناهمواری‌هـای نقـوش در بسـتر فضـایی اثـر و سـاختار حجـاری آن بـه وضـوح قابـل مشـاهده اسـت. بـا توجـه بـه اینکـه نقـوش برجسـته در تخت‌جمشیـد بـر روی بلوک‌هـای سـنگی قـرار داده شـده در کنـار هـم ایجـاد شـده‌اند، لـذا در تصویـر خـط تفکیـک بیـن قالب‌هـای سـنگی نیـز نمایـان اسـت.

یـکی دیگـر از روش‌هـای پـردازش تصاویـر، اسـتفاده از پـردازش ارتفـاع نقـاط نسـبت بـه یکدیگـر اسـت. در ایـن



شکل ۶. پردازش تصاویر با استفاده از الگوریتم طیف رنگی.

Figure 6. Image processing using the color spectrum algorithm.

روش، ارتفـاع تمـام نقـاط بـا یـک طیـف رنـگی دیجیتـال نمایـش داده می‌شـود. بـه ایـن ترتیـب، تصویـر بهتـری از جزئیـات آرایه‌هـای موجـود در نقـش بـه دسـت می‌آیـد. در شـکل ۷، بخـشی از نقـش برجسـته نبـرد شیـر و گاو در پلـکان شـرقی آپادانـا بـا جزئیـات زیـاد و بـدون بافـت رنـگی بـه نمایـش درآمـده اسـت. در ایـن پـردازش

شکل ۷. ایجاد مدل سیاه و سفید با جزئیات تصویری بر اساس پردازش طیف رنگ ابر نقطه.

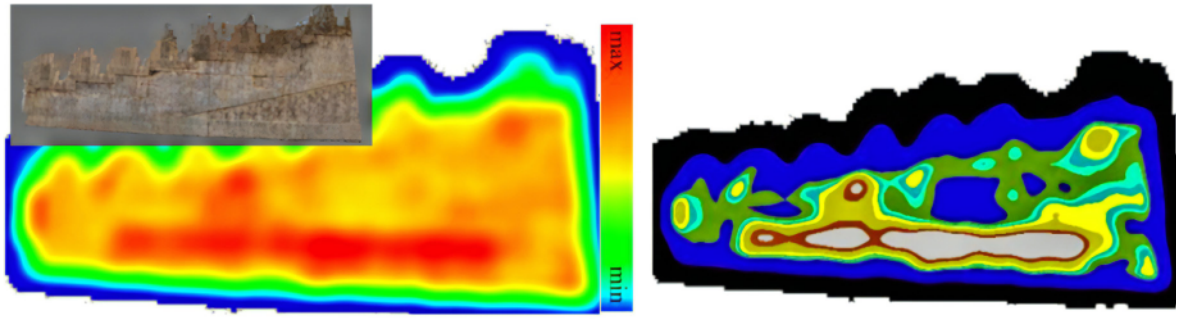
Fig 7. Creation of a black-and-white model with detailed imagery based on color spectrum processing of the point cloud.

تصویری، فضاهای مشکی نشان‌دهنده فرورفتگی‌ها و فضاهای خاکستری نمایانگر ناهمواری‌های برجسته در سطح نقش برجسته هستند. این شیوه مستندسازی می‌تواند دقت و ظرافت کار هنرمند را در خلق جزئیات نقوش که به راحتی با چشم یا حتی با استفاده از روش‌های معمول عکاسی قابل تشخیص نیست، به نمایش بگذارد؛ از جمله این جزئیات می‌توان به برجستگی ماهیچه‌ها در سطح اثر اشاره کرد که در پردازش تصویری به وضوح قابل مشاهده است.

تحلیل پردازش‌های سه‌بعدی در بازنمایی فنون و مراحل حجاری

مدل‌های سه‌بعدی رنگی می‌توانند در پردازش و تحلیل میزان ظرافت در نقاط مختلف نقوش برجسته مورد استفاده قرار گیرند. در شکل ۸، خروجی پردازش شده از یک مدل سه‌بعدی نمایش داده شده است که در آن هر نقطه نسبت به نقطه همسایه خود سه واحد فاصله دارد. به این ترتیب، سطوح رنگی ایجاد می‌شوند که در مرکز هر سطح، همان نقاط ثبت شده قرار دارند. این سطوح دارای حریم پوششی هستند که دامنه ناهمواری‌ها را در بر می‌گیرند و حریم سوم هر نقطه با حریم سوم نقطه همسایه مشترک است. بدین ترتیب، مدل سه‌بعدی رنگی نشان می‌دهد که بیشترین ظرافت در کدام بخش از اثر متمرکز است. در این مدل سه‌بعدی، سطوح قرمز رنگ نشان‌دهنده بیشترین تمرکز بر فنون و جزئیات ایجاد نقش (تراشیدن، ساییدن) هستند و سطوح زرد و سبز رنگ کمترین میزان حجاری را نشان می‌دهند که البته این تفاوت‌ها مطابق با نیاز و محتوای نقوش بوده است.

یک نمونه دیگر از پردازش تصویر در شکل ۹ ارائه شده که به سایه‌های خطوط مربوط می‌شود. به طور معمول، خطوط اصلی حجاری بیشترین پیوستگی نقاط مجاور را نشان می‌دهند. این خطوط مرز نقوش را مشخص کرده و بیانگر آن هستند که بیشترین دقت برای ایجاد طرح اولیه و جزئیات اطراف هر نقش



شکل ۸. استفاده از مدل سه‌بعدی در پردازش میزان ناهمواری‌های سطحی، پلکان شرقی کاخ آپادانا.

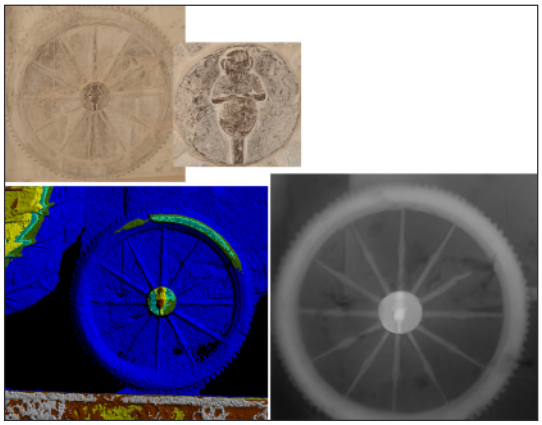
Figure 8. Use of the 3D model in analyzing surface irregularities, eastern staircase of the Apadana Palace.

شکل ۹. پردازش سایه ـ روشن در بخشی از نقش برجسته هدیه‌آوران در پلکان شرقی کاخ آپادانا (لودیه‌ای‌ها).

Figure 9. Shadow and light processing on part of the relief of gift bearers on the eastern staircase of the Apadana Palace (Lydians).

در کدام بخش‌ها به کار رفته است. این موضوع از منظر الگو یا شیوه‌های اجرایی نقوش دارای اهمیت زیادی است. در شکل مذکور، پردازش بخشی از صف هدیه‌آوران (لودیه‌ای‌ها) در پلکان شرقی کاخ آپادانا، با استفاده از روش پردازش سایه به نمایش درآمده است. اگر نقوش از دو زاویه مختلف مشاهده شوند، در بخش‌های بیرونی هر نقش سایه‌های روشن‌تر دیده می‌شود، در حالی که در بخش‌های میانی که تزئینات بیشتری در آن‌ها قرار دارد، سایه‌ها تیره‌تر هستند. با ترکیب این دو پردازش سایه، نتیجه‌ای جدید حاصل می‌شود که نشان می‌دهد هر نقش با دقتی بی‌نظیر و توجه به خطوط محیطی طراحی شده و دارای حجم است. این تحلیل، ظرافت و مهارت بالای هنرمندان در ایجاد نقوش را به خوبی به تصویر می‌کشد.

در شکل ۱۰، پردازش مربوط به جزئیات چرخ ارابه در نقش برجسته مذکور نشان داده شده که در مرکز آن و بر روی میخ محور چرخ ارابه نقش بسیار کوچک یک آدمک قابل مشاهده است. در پردازش ناهمواری‌ها بر اساس طیف رنگی، پیکر این نقش به رنگ زرد



شکل ۱۰. پردازش حجمی در نقش چرخ ارابه و نقش برجسته کوچک حجاری شده بر محور چرخ.

Figure 10. Volumetric processing of the chariot wheel motif and the small relief sculpture on the wheel axis.

دیده می‌شود و سپر در دست آدمک و سر او به رنگ قهوه‌ای است. بر اساس نتایج پردازش تصویری، این نقش برجسته بسیار کوچک دارای تناسبات دقیقی است؛ بنابراین، حتی در چنین اثر کوچک و ظریفی، اصول

شکل ۱۱. پردازش طیف رنگ همراه با برجسته و تخت نمایی، نقش برجسته هدیه‌آوران (لودیه‌ای‌ها) در پلکان شرقی کاخ آپادانا.

Figure 11. Color spectrum processing combined with raised and flat representations, relief of gift bearers (Lydians) on the eastern staircase of the Apadana Palace.

تناسبات آناتومی و حجم به دقت رعایت شده است.

در شکل ۱۱، پردازش ناهمواری‌های بخشی از نقوش هدیه‌آوران بر پلکان شرقی کاخ آپادانا به تصویر کشیده شده است. در شکل میانی، ضمن حذف برخی از ناهمواری‌های، سطح اثر با استفاده از طیف رنگی قرمز تا آبی (نمایانگر اختلاف ارتفاع از زیاد به کم) تحلیل شده است. این پردازش نشان می‌دهد که سطوح پشتی و زمینه نقوش (با طیف رنگی آبی، سبز تا زرد) نسبت به بخش‌های برجسته (با طیف رنگی قرمز تا نارنجی) دارای عمق و فرورفتگی بیشتری هستند. در تصویر سوم، این تفاوت به‌وضوح قابل مشاهده است. چنین اختلاف سطوحی گویای دقت و کنترل بالای حجاران بر فرایند حجاری و ایجاد جزئیات نقوش در مساحت زیاد پیش از پرداخت نهایی نقوش است. این تلاش دقیق و هنرمندانه منجر به خلق اثری بی‌نقص و شایسته تحسین شده است.

تجزیه‌وتحلیل فرآیند لایه‌های حجاری در نقش برجسته هدیه آورندگان (لودیه‌ای‌ها)

اگـر خطـوط تشـکیل‌دهنده مـدل سـه‌بعدی از بالاتریـن سـطح دارای برجسـتگی در نقـوش سـنگ تفکیـک شـوند و بـه سـطح بسـتر سـنگ برسیـم، لایه‌بنـدی مراحـل حجـاری و خلـق نقـوش به‌وضـوح نمایـان و قابـل تحلیـل خواهـد بـود. در بخـش بـالای شـکل ۱۲، فلش‌هـا محـل ایجـاد نخسـتین برجسـتگی‌ها را بـر روی سـنگ نمایـش می‌دهنـد. پـس از ایجـاد دسـت‌ها، توجـه بـه ایجـاد برجسـتگی در کلاه و مـوی سـر معطـوف شـده اسـت. هم‌زمـان، سـطوح اولیـه‌ای بـرای ایجـاد تزئینـات هنـری و نـوع پوشـش شـکل گرفته‌انـد. در ایـن مرحلـه، بخـشی از سلاح‌هـا و هدایـا نیـز به‌صـورت اولیـه حجـاری شـده‌اند. در همیـن لایـه، انـدام اسـب نیـز به‌صـورت برجسـته پدیـدار می‌شـود (بخـش میـانی شـکل ۱۲). پـردازش تصویـری ایـن لایه‌بندی‌هـا نشـان می‌دهـد کـه در مرحلـه حجـاری، هم‌زمـان بـا تکمیـل و تدقیـق خطـوط محیـطی نقـوش، تمرکـز هنرمنـد سـنگ‌تراش بـر جزئیـات هدایـا، تزئینـات لبـاس، سلاح‌هـا و اسـب‌ها بـوده اسـت. بخـش پاییـنی شـکل ۱۲، به‌عنـوان آخریـن لایه‌بنـدی ایجـاد نقـوش برجسـته، نمایش‌دهنـده هم‌زمـانی تمرکـز بـر جزئیـات در تمـامی سـطوح سـنگ اسـت. در ایـن مرحلـه، تمـامی خطـوط محیـطی تراشیـده شـده و بیشـتر

شکل ۱۲. لایه‌بندی مراحل حجاری و خلق نقوش بر اساس پردازش ناهمواری‌های سطح سنگ، نقش برجسته هدیه‌آوران (لودیه‌ای‌ها) در پلکان شرقی کاخ آپادانا.

Figure 12. Layering of carving and motif creation stages based on surface irregularity analysis, relief of gift bearers (Lydians) on the eastern staircase of the Apadana Palace.

تزئینـات و آرایه‌هـا تکمیـل شـده‌اند.

از ایـن مرحلـه بـه بعـد، تمرکـز اصلـی بـر پرداخـت نهـایی و افـزودن جزئیـات دقیق‌تـر بـه نقـوش معطـوف شـده اسـت. بخـشی از ایـن جزئیـات در شـکل ۱۳ نمایـش داده شـده اسـت. به‌عنـوان مثـال، توجـه بـه فـرم گوش‌هـا و دسـت‌بندها در ایـن تصویـر نشـان می‌دهـد کـه شـکل گـوش هـر فـرد بـا فـرد دیگـر متفـاوت اسـت کـه ایـن امر بیانگـر دقـت بـالای هنرمنـد در ایجـاد تفاوت‌هـای ظریـف میـان نقـوش مختلـف اسـت. علاوه بـر ایـن، پـردازش ایـن تصویـر نشـان می‌دهـد کـه تجسـم حجـمی نقـوش برجسـته بـا مهـارت بسیـار بـالایی انجـام شـده و سـطوح بسـتر سـنگ بـا ظرافـت و دقـت پرداخت شـده‌اند. پوشـش لبـاس به‌طـور طبیـعی اندام‌هـا را در بـر گرفتـه و یال‌هـای اسـب بـا آراسـتگی و دقـت ویـژه‌ای طـراحی شـده‌اند. ایـن جزئیـات نمایانگـر توجـه هنرمنـد بـه طـراحی دقیـق و پرداخـت نهـایی بی‌نقـص نقـوش برجسـته هسـتند.

شکل ۱۳. پردازش حجمی نقوش برجسته و آرایه‌ها و تزئینات آن‌ها.

Figure 13. Volumetric processing of relief motifs, ornaments and decorations.

در شـکل ۱۴، فـردی همـراه بـا دو قـوچ بـه تصویـر کشیده شـده اسـت. ایـن فـرد بـا دسـت راسـت خـود پشـم‌های قـوچ را فشـرده اسـت. اگـر بـر روی انگشـتان ایـن فـرد خـطی ترسیـم کنیـم، نیـم‌رخ ناهمـواری آن نشـان می‌دهـد کـه هـر مفصـل انگشـت بـا دقـت و ظرافـت نسـبت بـه

شکل ۱۴. پردازش تصویری جزئیات قرارگرفتن انگشتان دست.

Figure 14. Image processing of the details of finger positioning.

مفصل دیگر و متناسب با آناتومی دست انسان، کمی بالاتر یا پایین‌تر قرار دارد. هنرمند حجار با مهارت و آگاهی از آناتومی انسانی، جزئیات دقیقی را بر روی سنگ به‌طور بسیار ظریف خلق کرده است.

تجزیه‌وتحلیل فرآیند حجاری نقش برجسته جدال شیر و گاو در پلکان شرقی کاخ آپادانا

نمونه دیگری که در این پژوهش مورد پردازش تصویری قرار گرفته است، نقش برجسته مشهور "جدال شیر و گاو" از شاخص‌ترین نقوش در تخت‌جمشید است. این نقش برجسته بر دیواره پلکان برخی از کاخ‌ها، از جمله پلکان‌های شرقی کاخ آپادانا و پلکان شمالی کاخ شورا، به زیبایی حجاری شده است. در این صحنه، شیر در حال حمله به گاو است و پویایی و تنش میان این دو موجود، هنرمندانه تصویر شده است. جزئیات دقیق و از جمله حالت بدن دو حیوان، نمایش عضلات و انحنای طبیعی بدن آن‌ها، با ظرافتی مثال‌زدنی اجرا شده‌اند. این صحنه، تضاد و کشمکش میان قدرت طبیعی گاو و نیروی سلطه‌گرانه شیر را با دقت و مهارت خاصی به نمایش می‌گذارد. نمایش حجم، حرکت و تنش در این اثر، گویای تسلط هنرمندان هخامنشی بر آناتومی و درک عمیق آن‌ها از دینامیک حرکت بدن است. جزئیات حجاری، از جمله نمایش دقیق ماهیچه‌ها و تعامل فیزیکی میان دو حیوان، به‌ویژه در نمایش خشونت و پویایی نبرد، اهمیت هنری و تاریخی این نقش را آشکار می‌سازد. این اثر نه‌تنها نمایشگر هنر برجسته هخامنشیان است، بلکه بازتاب‌دهنده مفاهیمی نظیر قدرت، تسلط و پیروزی است که در ساختار اجتماعی و سیاسی این دوران نقش کلیدی ایفا کرده‌اند.

پردازش تصویری انجام‌شده بر اساس لایه‌بندیِ مرحله‌به‌مرحله حجاری در این نقش، ترتیب و توالی

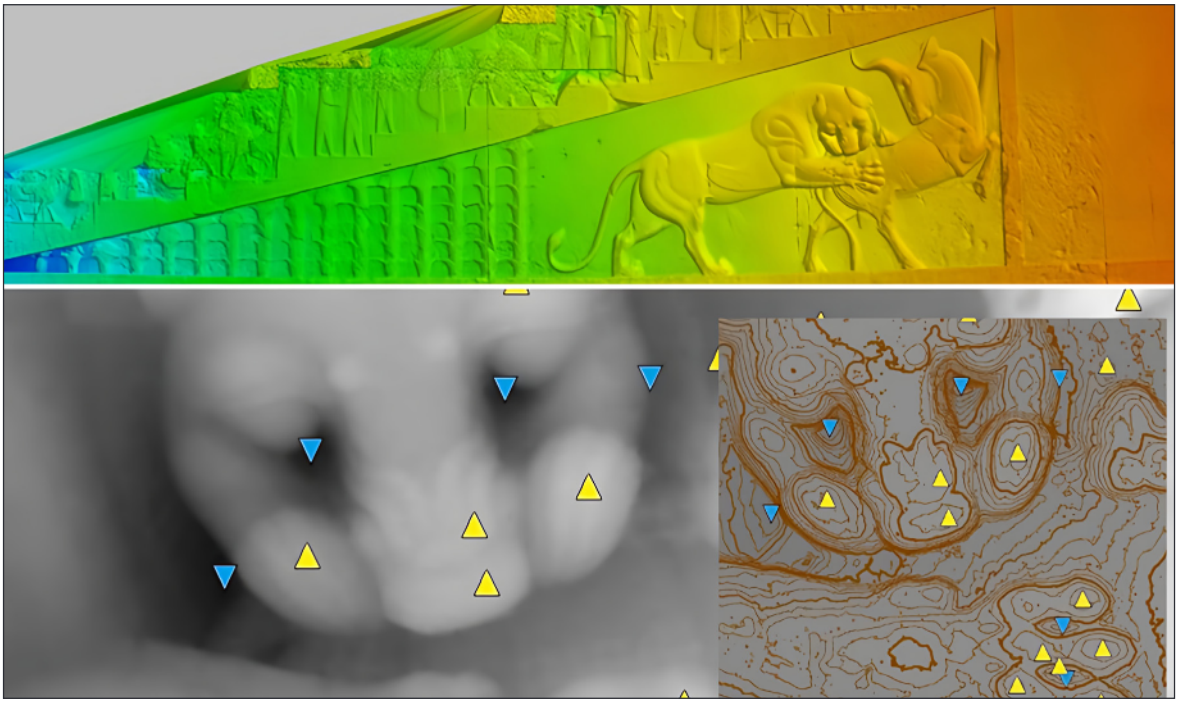
شکل ۱۵. پردازش طیف رنگی همراه با ترازیابی ایجاد نقوش، نقش برجسته جدال شیر و گاو در پلکان شرقی کاخ آپادانا.

Figure 15. Color spectrum processing combined with leveling of motifs, relief of the lion and bull combat on the eastern staircase of the Apadana Palace.

دقیق ایجاد آن‌ها ارائه می‌کند (شکل ۱۵). بر اساس این تحلیل، نخستین لایه‌ای که در برنامه حجاری قرار داشته، مربوط به گاو در سمت راست تصویر است. در این مرحله، حجاری با ایجاد پاهای جلویی آغاز شده و سپس به گردن گاو، به‌عنوان نقاطی با برآمدگی بیشتر، گسترش یافته است. در این فرآیند، نقاط فرضی مشخص‌شده با مثلث‌های زرد به‌عنوان نقاط کمکی در حجاری نقش مهمی ایفا کرده‌اند. این نقاط که دارای بیشترین میزان برآمدگی در سطح سنگ بوده‌اند، به‌صورت راهنما برای تعیین عمق و میزان فرورفتگی یا برآمدگی سایر بخش‌های نقش به‌کار گرفته شده‌اند. همان‌طور که در پردازش تصویر دیده می‌شود، با پیشرفت فرآیند حجاری، این نقاط کمکی به تدریج از سمت راست نقش به سمت چپ افزوده شده‌اند.

ابتدا، این نقاط روی بخش‌هایی نظیر پاهای جلویی، گردن و سر گاو (از جمله گوش، دهان و بینی) ظاهر شده‌اند. در ادامه، جزییات نقوش ایجاد و نقش گاو تکمیل گردیده است. با پیشرفت حجاری گاو، فرآیند حجاری شیر نیز با استفاده از نقاط کمکی مشابه انجام شده و هر لایه جدید به تدریج بر روی لایه قبلی، با رعایت دقیق تناسبات، افزوده شده است. در نهایت، شکل کلی نقش برجسته پدیدار شده و سپس مراحل تکمیلی حجاری شامل ایجاد جزئیات و پرداخت‌های نهایی انجام گرفته است. تناسبات دقیق میان نقاط کمکی و خطوط نهایی نقش، نشان‌دهنده دانش و مهارت بالای هنرمندان هخامنشی در اجرای نقوش برجسته بر اساس پیش‌طرح‌های آماده شده است. این ظرافت فنی و هنری، توجه ویژه‌ای به جزئیات و اصول زیبایی‌شناسی داشته و گواهی بر توانمندی‌های خیره‌کننده هنرمندان این دوره در خلق آثار ماندگار است.

در شکل ۱۶، ظرافت خیره‌کننده در ایجاد جزئیات بخش سر و پنجه‌های شیر به‌وضوح قابل مشاهده است. پردازش تصویری نشان می‌دهد که هنرمند هخامنشی در کدام قسمت‌های نقش برجسته، بیشترین دقت و توجه را به خرج داده است. بر



شکل ۱۶. پردازش ناهمواری‌ها و ترازهای تشکیل نقش‌برجسته.

Figure 16. Analysis of irregularities and levels forming the relief.

اساس پردازش تصویر، مثلث‌های آبی در این تصویر نمایانگر نواحی با فرورفتگی‌های عمیق و مثلث‌های زرد نشان‌دهنده برآمدگی‌های برجسته هستند. برای نمونه، برآمدگی روی گونه‌ها و بینی شیر به‌عنوان چهار نقطه شاخص برآمدگی اصلی شناسایی شده‌اند. در مقابل، فرورفتگی‌هایی که در محل چشم‌ها و میان انگشت‌های شیر دیده می‌شوند، نقاط شاخص فرورفته محسوب می‌شوند. تضاد میان این نواحی فرورفته و برآمده، بیشترین عمق بصری و تأثیرگذاری را در این بخش از نقش برجسته ایجاد کرده است. این ترکیب هوشمندانه، بر اهمیت و جذابیت این قسمت از اثر تأکید دارد و نشان‌دهنده توجه ویژه هنرمند به این جزئیات است. علاوه بر این، نقاط شاخص مذکور را می‌توان به‌عنوان نقاط راهنما یا کمکی در نظر گرفت که در مراحل مختلف حجاری به کار گرفته شده‌اند. سایر تزئینات نقش برجسته بر اساس فاصله و میزان برآمدگی یا فرورفتگی این نقاط ایجاد شده‌اند. این رویکرد مبتنی بر اصول هندسی، ساختاری دقیق و هنری ظریف را در اثر نشان می‌دهد که ویژگی بارز حجاری‌های دوره هخامنشی است.

نتیجه‌گیری

مستندسازی فرآیندی پیچیده و چندبعدی است که شامل مجموعه‌ای گسترده از فعالیت‌ها ازجمله برداشت، پایش، آزمایش، گردآوری اطلاعات زمینه‌ای و دیگر داده‌های مرتبط می‌شود. در این فرآیند، ثبت هندسه یک شی یا اثر تنها بخشی از موضوع است؛ بلکه تمام ویژگی‌هایی که یک شی را تعریف و واجد معنا می‌سازد، باید در مستندسازی مورد توجه قرار گیرد. این ویژگی‌ها شامل ارزش‌های احتمالی هنری، معماری، تاریخی و علمی هستند. این امر مستلزم رویکردی پژوهش‌محور است که بر پایه بررسی، برداشت و تجزیه‌وتحلیل اطلاعات باشد تا بتوان تصمیم‌گیری آگاهانه‌ای در زمینه شناخت و مدیریت این آثار انجام داد.

هخامنشیان در خلق نقوش و تزئینات معماری، با بهره‌گیری از دانش و تجربیات فرهنگ‌های مختلف، زبانی تصویری و نمایشی منحصربه‌فرد در نقوش برجسته سنگی این دوره به وجود آوردند. این هنر نه‌تنها بازتابی از شکوه و عظمت شاهنشاهی هخامنشی است، بلکه مفاهیم عمیق فرهنگی آن دوران را نیز به تصویر می‌کشد. در این پژوهش، مستندسازی بخشی از نقوش برجسته پلکان شرقی کاخ آپادانا و پلکان شمالی کاخ شورا مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی، مدل‌های سه‌بعدی دقیق و واقع‌گرایانه‌ای از این نقوش تهیه شد. روند کار شامل مدل‌سازی سه‌بعدی، پردازش تصاویر و تحلیل لایه‌های نقوش بود که منجر به ثبت و شناسایی بخشی از فنون و هنر معماری تخت‌جمشید به‌صورت مستند گردید. مدل‌های تولیدشده امکان مطالعه دقیق جزئیات، اندازه‌گیری‌های دقیق و تحلیل‌های فنی را فراهم کردند. یافته‌ها نشان داد که فتوگرامتری به‌عنوان یک روش غیرتهاجمی و مؤثر، قادر است اطلاعات ارزشمندی درباره شیوه‌های اجرایی و تغییرات ایجادشده در نقوش برجسته طی گذر زمان ارائه دهد. این رویکرد علمی نه‌تنها ابزاری برای درک بهتر ارزش‌های هنری و فنی این آثار است، بلکه بستری برای حفاظت و مدیریت پایدار میراث فرهنگی نیز فراهم می‌کند.

در ایجاد نقوش بر سنگ‌های حجاری‌شده تخت‌جمشید، دانش فنی و مهارت هنری با دقتی استثنایی در تناسبات هندسی همراه بوده است. هنرمندان دربار هخامنشی، با شناخت عمیق از آناتومی انسان و حیوان و تسلط بر مفاهیم حجم و سطح، نقوشی را خلق کرده‌اند که ظرافت‌های ترسیمی و حجاری شگفت‌انگیزی را به نمایش می‌گذارد. بدون شک، طراحی اولیه نقش‌ها نقش اساسی در خلق این آثار داشته است. اینکه این طراحی‌ها روی موادی مانند گل، چرم، پاپیروس یا سایر مواد اجرا می‌شده است، همچنان یک پرسش مهم و موردبحث در تحقیقات باستان‌شناختی است. بااین‌حال، بررسی دقیق مدل‌های بازسازی‌شده از این نقوش می‌تواند به درک عمیق‌تری از فرآیندهای هنری و فنی منجر شود که در تولید این آثار نقش داشته‌اند. این پژوهش همچنین تأکید دارد که استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند فتوگرامتری و پردازش تصویری می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در مستندسازی جزئیات فنی و

هنـری نقـوش برجسـته سـنگی بـه کار گرفتـه شـود. ایـن رویکـرد چندرشـته‌ای، امـکان تحلیـل دقیق‌تـر و علمی‌تـر از هنـر و فرهنـگ هخامنـشی را فراهـم کـرده و بـا مسـتند سـاختن ایـن اطلاعـات بـه حفـظ و انتقـال میراث ارزشـمند تخت‌جمشیـد بـه نسـل‌های آینـده کمـک شـایانی می‌کنـد.

سپاسگزاری

نویسـندگان مقالـه از خانـم دکتـر لیلا مکونـدی در دانشـگاه کاشـان بـه جهـت مشـاوره درانجـام پـروژه تشـکر و قـدردانی ویـژه می‌نماینـد.

حامیان مادی و معنوی

ایـن پژوهـش بـا حمایـت معنـوی پایـگاه میـراث جهـانی تخت‌جمشیـد بـه انجـام رسیـده اسـت و مولفـان از همـکاری ایـن پایـگاه در فراهـم شـدن امـکان حضـور و مستندسـازی نقـوش از نزدیـک قـدردانی می‌کننـد.

منابع

Agosto, E., Ardissone, P., Maschio, P., Porporato, C., & Ranieri, P. (2005). A survey of "the sala degli stucchi," an ornate baroque hall. In Proceedings of CIPA XXth International Symposium (pp. 59-62). Torino, Italy.

Baik, A. A., & Alitany, A. (2018). From architectural photogrammetry toward digital architectural heritage education [Paper presentation]. ISPRS TC II Mid-term Symposium "Towards Photogrammetry 2020" (pp. 423-430). Riva del Garda, Italy.

Galantucci, R., & Fatiguso, F. (2018). Advances damage detection techniques in historical buildings using digital photogrammetry and 3D surface analysis. Journal of Cultural Heritage, 32, 11-19.

Genin, S. M. (2019). Photogrammetry: Methods of survey and applications on restoration works. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W11, 129-135.

Golovina, S. V., & Kanyukova, S. V. (2016). Photogrammetry and laser scanning for reconstruction and restoration of historical buildings [Paper presentation]. MATEC Web of Conferences, 73, 01008.

Hassani, F. (2015). Documentation of cultural heritage techniques, potentials and constraints [Paper presentation]. 25th International CIPA Symposium 2015 (pp. 1-8). Taipei, Taiwan.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, L. (2006). Close range photogrammetry: Principles, methods and applications. Whittles Publishing.

Manea, G., & Calin, A. (2006). Architectural photogrammetry: An extension of conventional surveying [Paper presentation]. In ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology' (pp. 1205-1212). Dresden, Germany. http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part5/paper/1205_Dresden06.pdf.

Patias, P. (2006). Cultural heritage documentation. The Aristotle University Faculty of Surveying Engineering, Commission VI Special Interest Group "Technology Transfer Caravan", International Summer School "Digital Recording and 3D Modeling", Aghios Nikolaos, Crete, Greece.

Russo, M., Carnevali, L., Russo, V., Savastano, D., & Taddia, Y. (2018). Modeling and deterioration mapping of façades in historical urban context by close-range ultra-lightweight UAVs photogrammetry. International Journal of Architectural Heritage Conservation, Analysis, and Restoration.

Shahbazi, A. S. (2004). The Authoritative Guide to Persepolis. Tehran, Iran: Safiran-Mirdashti.

Zehbari, Z. (2024). The Goldsmiths, Who Wrought the Gold, Those Were Medes and Egyptians: An Investigation of the Goldsmiths in the Achaemenid Period. In: Kar-namagi Parsa, Studies from the Persepolis World Heritage Site. Dited by: Hamid Fadaei, Soheil Delshad, Mehrnaz Bordbar, Mohammad Jawad Owladhussein. Tehran, Parthava Publication, 168-192. [In Persian].

[زهبری، زهره. (۱۴۰۲). زرگرهایی که بر طلا کار می‌کردند، آن‌ها مادی و مصری بودند: پژوهشی درباره فعالیت زرگرها در دوره هخامنشی. در: کارنامگ پارسه، مقالات علمی پژوهشی پایگاه میراث جهانی تخت‌جمشید. گردآوری و تدوین: حمید فدایی، سهیل دلشاد، مهرناز بردبار و محمد جواد اولادحسین. تهران: پرثوا، ۱۹۲-۱۶۸].