

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

مطالعه و تحلیل فنون اجرایی نقوش برجسته در محوطه میراث جهانی تخت جمشید با استفاده از مدل سازی سه بعدی و پردازش تصویر

محمدرضا رکنی^{۱*}، حمید فدایی^۲، مرجان کیفرگیر^۳

۱. کارشناس پژوهشی پژوهشکده باستان شناسی، 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

تخت جمشید به عنوان یکی از برجسته ترین محوطه های باستان شناختی ایران، نماد عظمت فرهنگی و هنری دوره هخامنشی است. هنر حجاری و آرایه های معماری این دوره با بهره گیری از تجربیات و دانش فرهنگ های گوناگون، شیوه ای نوین و هنرمندانه را خلق کرده است که در نقوش برجسته سنگی تخت جمشید نمود یافته اند. این نقوش به دلیل ظرافت و دقت اجرا، توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده و پرسش هایی در خصوص ارزش های هنری و روش های اجرایی آن ها مطرح ساخته است. این پژوهش با هدف تحلیل فنون اجرایی نقوش برجسته تخت جمشید، به مستندسازی نمونه هایی از این نقوش در پلکان شرقی کاخ آپادانا و پلکان شمالی کاخ شورا پرداخته است. برای مستندسازی و تهیه مدل های سه بعدی نقوش برجسته، از روش های پیشرفته فتوگرامتری، با تأکید ویژه بر فناوری فتواسکن، استفاده شد و تصاویر به وسیله نرم افزارهای تخصصی Reality 3D Zephyr، Agisoft و Capture پردازش گردید. نتایج این پژوهش بخشی از فرایند خلق این آثار هنری را آشکار می کند که تاکنون کمتر به آن پرداخته شده است. همچنین، کارایی روش مستندسازی مبتنی بر فتوگرامتری در استخراج داده های دقیق فنی و هنری مورد تأیید قرار گرفت. این روش نه تنها امکان تحلیل دقیق تر جزئیات نقوش برجسته و تناسبات هندسی آن ها را فراهم می سازد، بلکه به درک عمیق تری از ارزش های هنری این آثار و جایگاه آن ها در تاریخ هنر کمک می کند. این رویکرد می تواند الگویی ارزشمند برای پژوهش های آینده در زمینه مستندسازی و استحصال داده های فنی و هنری نقوش برجسته تاریخی باشد.

واژگان کلیدی: مستندسازی، فتوگرامتری، پردازش تصویر، فن شناسی، نقوش برجسته سنگی، تخت جمشید.



فصل نامه 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
باستان شناسی، پژوهشگاه میراث فرهنگی
و گردشگری، ایران.

رایانامه

mrrokni@gmail.com

مقدمه

جمع آوری 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

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 نه تنها 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

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 روش

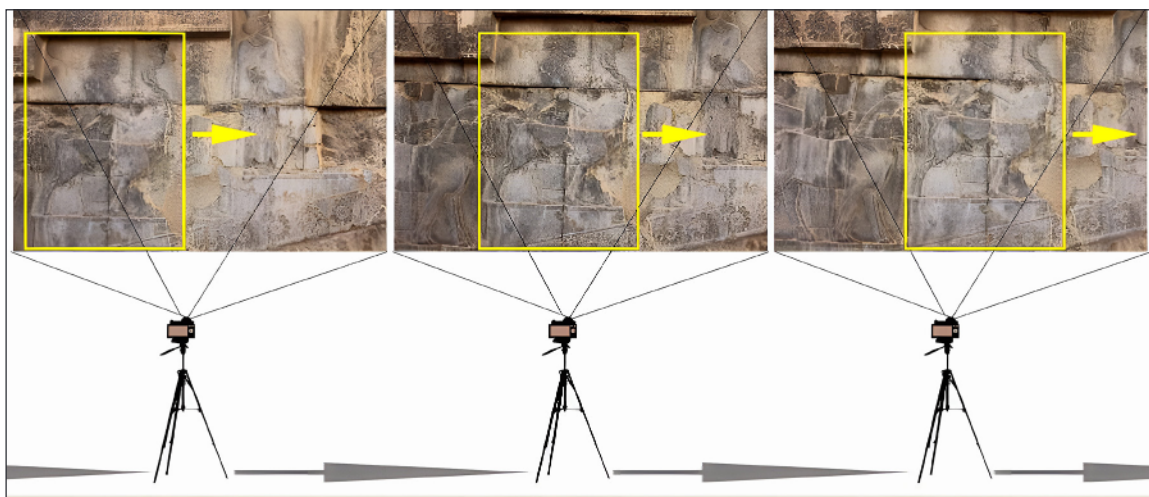
در این پژوهش، از روش مستندسازی سه‌بعدی به‌منظور ایجاد مدل‌های دیجیتال با دقت میلی‌متری استفاده شده است. این مدل‌ها شامل مختصات افقی، عمودی و ارتفاعی بوده و هدف آن‌ها ثبت و تحلیل دقیق نقوش تاریخی است. برای تهیه هر مدل سه‌بعدی، از روش‌های رایج فتوگرامتری با تأکید خاص بر شیوه فتواسکن، بهره‌برده شد. مبنای 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 جزییات 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 P (Program)، 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

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 اشیاء، اندازه‌گیری تصاویر اشیاء 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

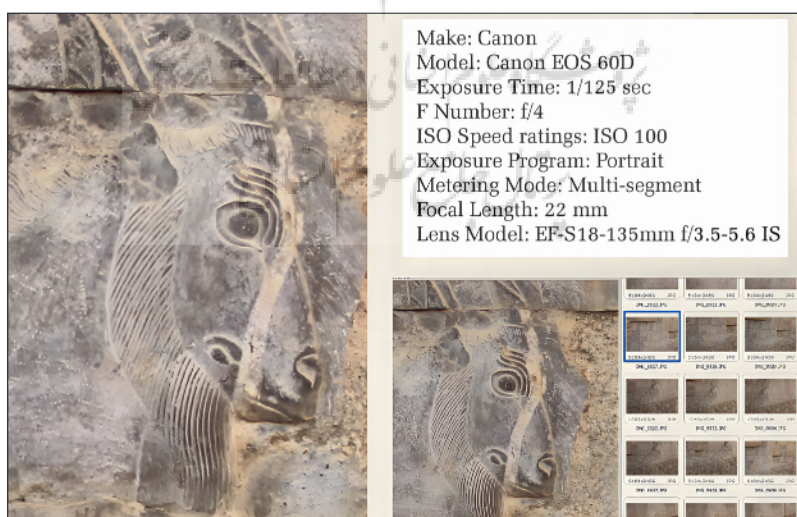


شکل ۱. روش عکس برداری از نقوش برجسته .

Figure 1. Method of photographing reliefs .

از روش های سریع و کارآمد برای ایجاد مدل های سه بعدی از طریق ابر نقاط متراکم است که در تحلیل جزئیات معماری کاربرد فراوانی دارد (Genin et al., 2019). این روش با بهره گیری از مدل های سه بعدی مانند ابر نقاط و مش های چندضلعی، امکان بررسی جزئیات هندسی ناهمواری های سطحی

حجاری شده ده ها عکس از زوایای مختلف تهیه شد. در مرحله دیگر، پس از عکس برداری، تصاویر با استفاده از نرم افزارهای شناخته شده در دانش فتوگرامتری، مورد پردازش و مدل سازی سه بعدی قرار گرفتند. در این پروژه از نرم افزارهای Reality و Agisoft, 3D Zephyr Capture استفاده گردیده است. فتوگرامتری یکی



شکل ۲. نمونه ای از تصاویر تهیه شده و خصوصیات فنی آن .

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

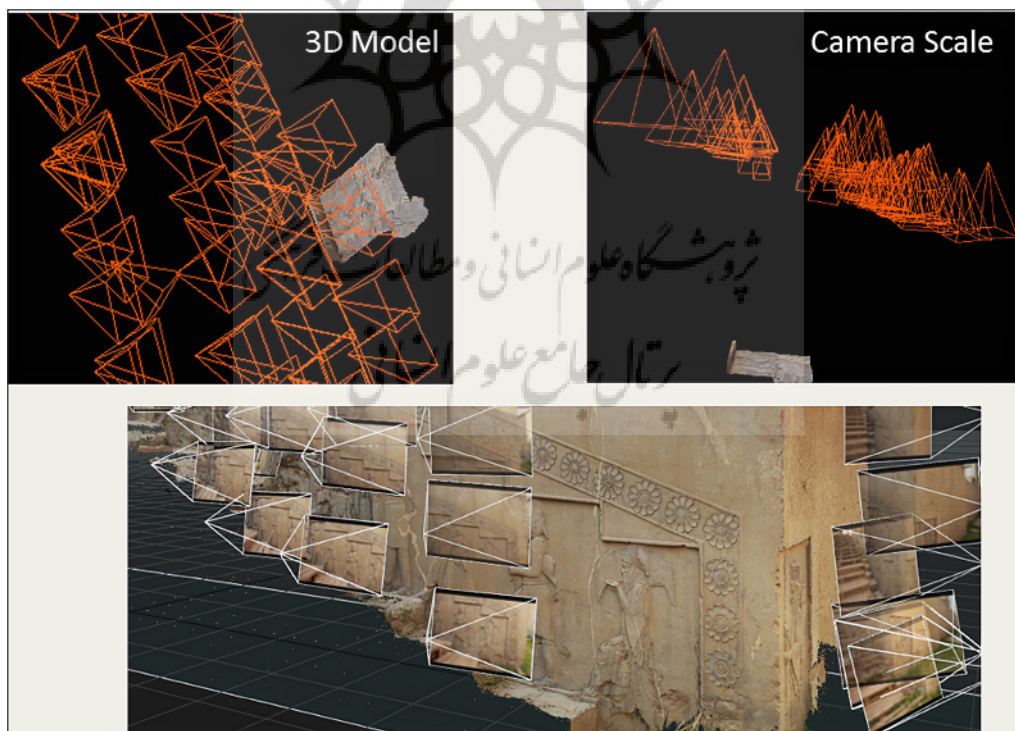
به ایجاد ابر نقاط شهرت دارد. در مدل ابر نقاط، با اتصال نقاط همجوار به یکدیگر از طریق پاره‌خطها، یک مدل سه‌بعدی (3D Mesh) ساخته می‌شود. به همین روش، از هر نقش یک مدل سه‌بعدی با کیفیت تفکیک بالا، مدل‌سازی می‌شود. چگونگی تنظیم مکانی دوربین و موقعیت قرارگیری آن برای عکاسی از نقوش در شکل ۳ نشان داده شده است. 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

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



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

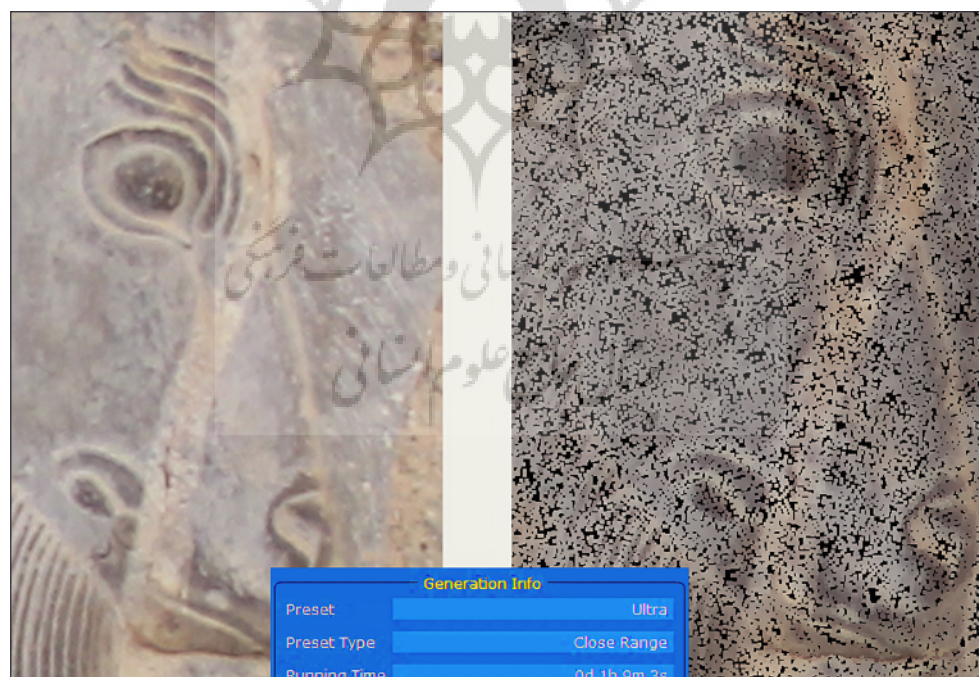
Figure 3. Spatial coverage of motifs during the photography and documentation phase.

این کار، بین هر نقطه و نقطه مجاور آن یک پاره خط ایجاد می شود که مختصات ارتفاعی خاصی دارد. این مختصات از موقعیت برداشت هر نقطه در تصاویر مختلف به طور دیجیتالی و توسط نرم افزار استخراج می شود. اتصال خطوط در سه نقطه همجوار، سطوح مثلی را می سازد که از لحاظ هندسی با سایر نقاط هم راس بوده و به طور سه بعدی (دارای ناهمواری) هستند. این فرآیند در ترسیم معماری به «مثلبندی» معروف است.

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

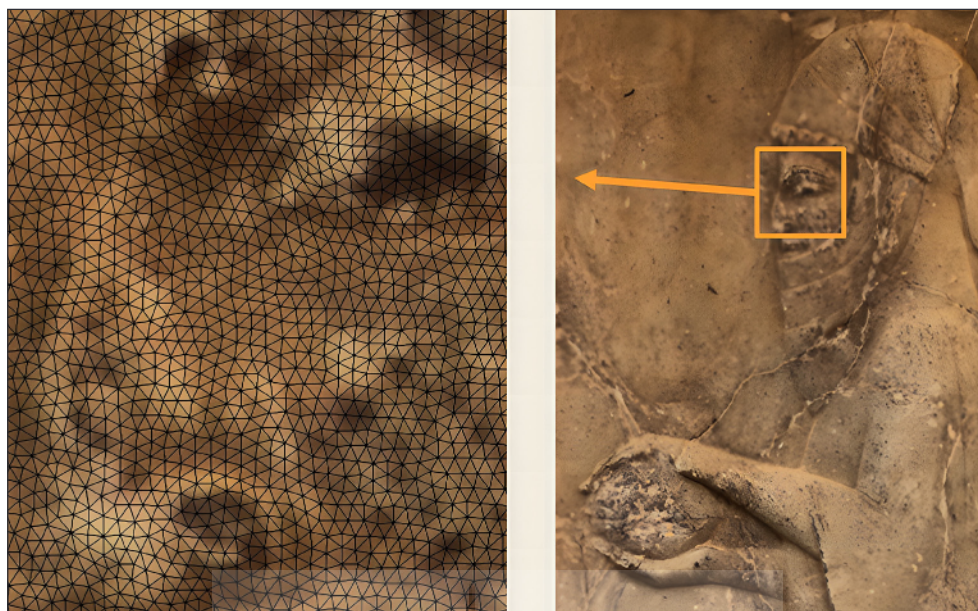
و تولید سطوح با کیفیت بالا را فراهم می آورد (Russo et al., 2018). فتوگرامتری مبتنی بر حداقل تصاویر از نماهای مختلف و با داده های دارای هم پوشانی است که تضمین کننده صحت فرآیند مثلبندی در تشکیل مدل سه بعدی است. این روش برای مستندسازی دقیق رنگ، بافت و ارائه داده های متریک اشیا با اندازه و پیچیدگی های گوناگون در مدت زمانی نسبتاً کوتاه استفاده می شود. خروجی های اصلی این روش شامل عکس های اصلاح شده (اورتو) و مدل های سه بعدی است (Hassani, 2015).

در شکل ۴ بخشی از نقش حجاری شده 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 سه بعدی ایجاد شده نیز ارائه شده است. یک مدل سه بعدی از فرآیند تبدیل نقاط به سطوح ساخته می شود. برای



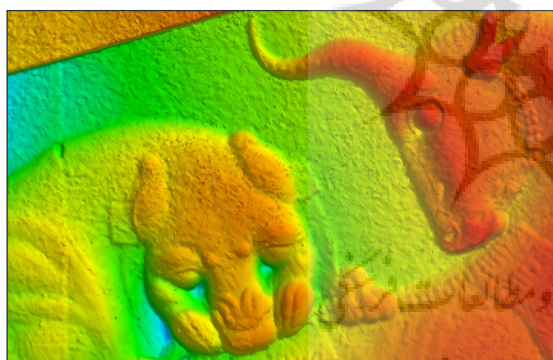
شکل ۴. نمونه ای از مدل ابر نقاط (سمت راست) و مدل سه بعدی (سمت چپ)، بخشی از نقش یک بز در پلکان شرقی کاخ آپادانا.

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 نقوش برجسته.

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



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

Figure 6. Image processing using the color spectrum algorithm.

روش، ارتفاع تمام نقاط با یک طیف رنگی دیجیتال نمایش داده می‌شود. به این ترتیب، تصویر بهتری از جزئیات آرایه‌های موجود در نقش به دست می‌آید. در شکل ۷، بخشی از نقش برجسته نبرد شیر و گاو در پلکان شرقی آپادانا با جزئیات زیاد و بدون بافت رنگی به نمایش درآمده است. در این پردازش

رندر (Render) از هر مدل سه‌بعدی، یک پردازش تصویر جدید ایجاد می‌شود.

فتوگرامتری همچنین می‌تواند داده‌های رنگ و بافت را همراه با اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها ارائه داده و برای تحلیل تغییرات مورد استفاده قرار گیرد یکی از مزایای اصلی این روش، امکان تولید مدل‌های بافت‌دار با جزئیات دقیق در رنگ و جنس مواد است (Golovina et al., 2016). نمونه خروجی مدل سه‌بعدی به همراه طیف رنگی در شکل ۶ نمایش داده شده است. در این تصویر، هر رنگ گرم (طیف زرد تا قرمز) نشان‌دهنده ارتفاع بیشتر آن بخش از مدل نسبت به رنگ سرد (سبز تا آبی) است. بدین ترتیب، ناهمواری‌های نقوش در بستر فضایی اثر و ساختار حجاری آن به وضوح قابل مشاهده است. با توجه به اینکه نقوش برجسته در تخت‌جمشید بر روی بلوک‌های سنگی قرار داده شده در کنار هم ایجاد شده‌اند، لذا در تصویر خط تفکیک بین قالب‌های سنگی نیز نمایان است.

یکی دیگر از روش‌های پردازش تصاویر، استفاده از پردازش ارتفاع نقاط نسبت به یکدیگر است. در این

تحلیل پردازش های سه بعدی در بازنمایی فنون و مراحل حجاری

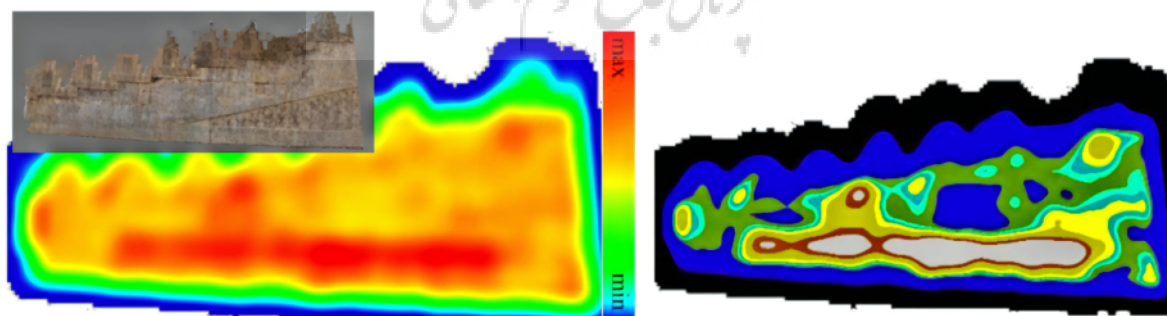
مدل های سه بعدی رنگی می توانند در پردازش و تحلیل میزان ظرافت در نقاط مختلف نقوش برجسته مورد استفاده قرار گیرند. در شکل ۸، خروجی پردازش شده از یک مدل سه بعدی نمایش داده شده است که در آن هر نقطه نسبت به نقطه همسایه خود سه واحد فاصله دارد. به این ترتیب، سطوح رنگی ایجاد می شوند که در مرکز هر سطح، همان نقاط ثبت شده قرار دارند. این سطوح دارای حريم پوششی هستند که دامنه ناهمواری ها را در بر می گیرند و حريم سوم هر نقطه با حريم سوم نقطه همسایه مشترک است. بدین ترتیب، مدل سه بعدی رنگی نشان می دهد که بیشترین ظرافت در کدام بخش از اثر متمرکز است. در این مدل سه بعدی، سطوح قرمز رنگ نشان دهنده بیشترین تمرکز بر فنون و جزئیات ایجاد نقش (تراشیدن، ساییدن) هستند و سطوح زرد و سبز رنگ کمترین میزان حجاری را نشان می دهند که البته این تفاوت ها مطابق با نیاز و محتوای نقوش بوده است. یک نمونه دیگر از پردازش تصویر در شکل ۹ ارائه شده که به سایه های خطوط مربوط می شود. به طور معمول، خطوط اصلی حجاری بیشترین پیوستگی نقاط مجاور را نشان می دهند. این خطوط مرز نقوش را مشخص کرده و بیانگر آن هستند که بیشترین دقت برای ایجاد طرح اولیه و جزئیات اطراف هر نقش



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 نشان دهنده فرورفتگی ها و فضاهای خاکستری نمایانگر ناهمواری های برجسته در سطح نقش برجسته هستند. این شیوه مستندسازی می تواند دقت و ظرافت کار هنرمند را در خلق جزئیات نقوش که به راحتی با چشم یا حتی با استفاده از روش های معمول عکاسی قابل تشخیص نیست، به نمایش بگذارد؛ از جمله این جزئیات می توان به برجستگی ماهیچه ها در سطح اثر اشاره کرد که در پردازش تصویری به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۸. استفاده از مدل سه بعدی در پردازش میزان ناهمواری های 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 - 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).



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.

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

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.

تا زرد) نسبت به بخش‌های برجسته (با طیف رنگی قرمز تا نارنجی) دارای عمق و فرورفتگی بیشتری هستند. در تصویر سوم، این تفاوت به وضوح 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 بی نقص و شایسته تحسین شده است.

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

تجزیه و تحلیل فرآیند لایه‌های حجاری در نقش برجسته هدیه آورندگان (لودیه‌ای‌ها)

اگر خطوط تشکیل دهنده مدل سه بعدی از بالاترین سطح دارای برجستگی در نقوش سنگ تفکیک شوند و به سطح بستر سنگ برسیم، لایه‌بندی مراحل حجاری و خلق نقوش به وضوح نمایان و قابل تحلیل خواهد بود. در بخش بالای شکل ۱۲، فلش‌ها محل ایجاد نخستین برجستگی‌ها را بر روی سنگ نمایش می‌دهند. پس از ایجاد دست‌ها، توجه به ایجاد برجستگی در کلاه و موی سر معطوف شده است. هم‌زمان، سطوح اولیه‌ای برای ایجاد تزئینات هنری و

نوع پوشش شکل گرفته‌اند. در این مرحله، بخشی از سلاح‌ها و هدایا نیز به صورت اولیه حجاری شده‌اند. در همین لایه، اندام اسب نیز به صورت برجسته پدیدار می‌شود (بخش میانی شکل ۱۲). پردازش تصویری این لایه‌بندی‌ها نشان می‌دهد که در مرحله حجاری، هم‌زمان با تکمیل و تدقیق خطوط محیطی نقوش، تمرکز هنرمند سنگ تراش بر جزئیات هدایا، تزئینات لباس، سلاح‌ها و اسب‌ها بوده است. بخش پایینی شکل ۱۲، به عنوان آخرین لایه‌بندی ایجاد نقوش برجسته، نمایش دهنده هم‌زمانی تمرکز بر جزئیات در تمامی سطوح سنگ است. در این مرحله، تمامی خطوط محیطی تراشیده شده و بیشتر



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.



شکل ۱۳. پردازش حجمی نقوش برجسته و آرایه ها و تزئینات آن ها.

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

در شکل ۱۴، فردی همراه با دو قوچ به تصویر کشیده شده است. این فرد با دست راست خود پشم های قوچ را فشرده است. اگر بر روی انگشتان این فرد خطی ترسیم کنیم، نیمرخ ناهمواری آن نشان می دهد که هر مفصل انگشت با دقت و ظرافت نسبت به

تزئینات و آرایه ها تکمیل شده اند.

از این مرحله به بعد، تمرکز اصلی بر پرداخت نهایی و افزودن جزئیات دقیق تر به نقوش معطوف شده است. بخشی از این جزئیات در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. به عنوان مثال، توجه به فرم گوش ها و دست بندها در این تصویر نشان می دهد که شکل گوش هر فرد با فرد دیگر متفاوت است که این امر بیانگر دقت بالایی هنرمند در ایجاد تفاوت های ظریف میان نقوش مختلف است. علاوه بر این، پردازش این تصویر نشان می دهد که تجسم حجمی نقوش برجسته با مهارت بسیار بالایی انجام شده و سطوح بستر سنگ با ظرافت و دقت پرداخت شده اند. پوشش لباس به طور طبیعی اندام ها را در بر گرفته و یال های اسب با آراستگی و دقت ویژه ای طراحی شده اند. این جزئیات نمایانگر توجه هنرمند به طراحی دقیق و پرداخت نهایی بی نقص نقوش برجسته هستند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

شکل ۱۴. پردازش تصویری جزئیات قرار گرفتن انگشتان دست.

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

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 نه تنها 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 لایه‌بندی مرحله به مرحله حجاری در این نقش، ترتیب و توالی

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.

تجزیه و تحلیل 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،



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

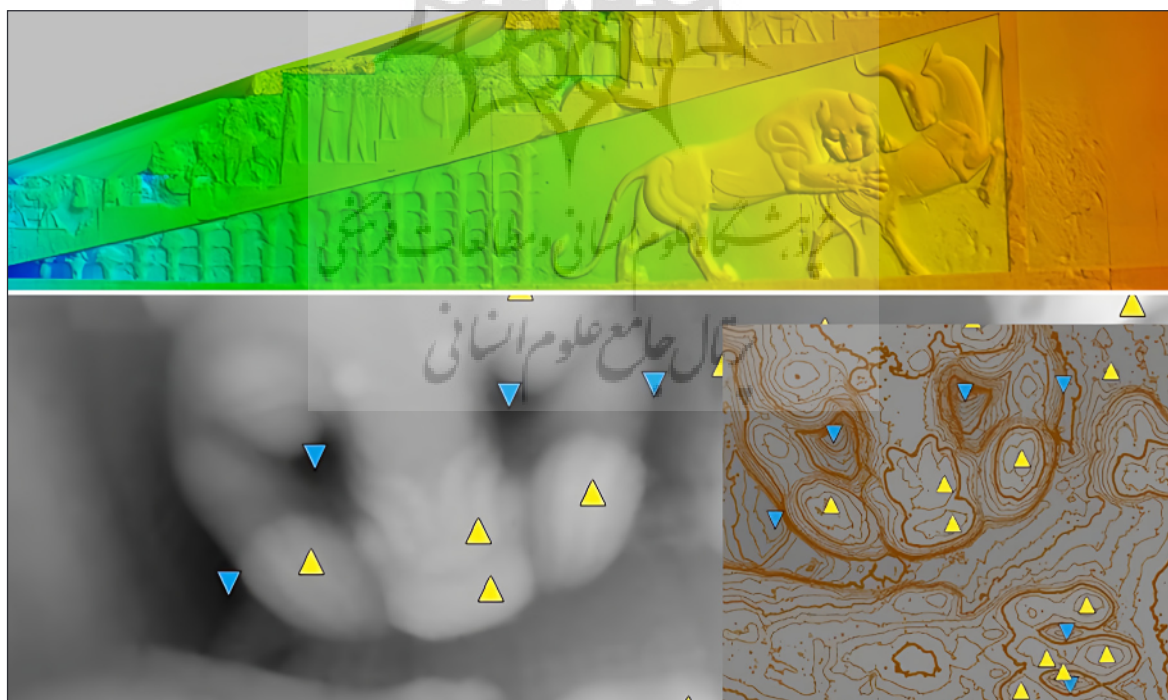
Figure 15. Color spectrum processing combined with leveling of motifs, relief of the lion and bull combat on the eastern staircase of the Apadana Palace.

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

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 نقاط برآمدگی بیشتر، گسترش یافته است. در این فرآیند، نقاط فرضی مشخص شده 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، جزئیات نقوش ایجاد و نقش گاو



شکل ۱۶. پردازش ناهمواری‌ها و ترازهای تشکیل نقش برجسته.

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 از جمله 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 تجزیه و تحلیل 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 نه تنها 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 نه تنها 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 مورد بحث در تحقیقات باستان‌شناختی است. با این حال، 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

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.

هنری نقوش برجسته سنگی به کار گرفته شود. این رویکرد چندرشته‌ای، امکان تحلیل دقیق‌تر و علمی‌تر از هنر و فرهنگ هخامنشی را فراهم کرده و با مستند ساختن این اطلاعات به حفظ و انتقال میراث ارزشمند تخت‌جمشید به نسل‌های آینده کمک شایانی می‌کند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از خانم دکتر لیلا مکوندی در دانشگاه کاشان به جهت مشاوره در انجام پروژه تشکر و قدردانی ویژه می‌نمایند.

حامیان مادی و معنوی

این پژوهش با حمایت معنوی پایگاه میراث جهانی تخت‌جمشید به انجام رسیده است و مولفان از همکاری این پایگاه در فراهم شدن امکان حضور و مستندسازی نقوش از نزدیک قدردانی می‌کنند.

منابع

Agosto, E., Ardisson, 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,

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 می کردند، آن ها مادی و مصری بودند: پژوهشی درباره فعالیت زرگرها در دوره هخامنشی. در: کارنامگ پارسه، مقالات علمی پژوهشی پایگاه میراث جهانی تخت جمشید. گردآوری و تدوین: حمید فدایی، سهیل دلشاد، مهرناز بردبار و محمد جواد اولادحسین. تهران: پرثوا، ۱۶۸-۱۹۲].

