پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران 36

Bu-Ali Sin University

Iranian Scientific Archaeological Association

پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران

PAZHOHESH-HA-YE BASTANSHENASI IRAN

P. ISSN: 2345-5225 & E. ISSN: 2345-5500 Homepage: https://nbsh.basu.ac.ir/

Vol. 13, No. 36, Spring 2023

Application of Historical Photos Photogrammetry in Documenting Destroyed Buildings (Case Study: Saadieh Historical Mansion)

Asadpour, A.[1]

https://dx.doi.org/10.22084/NB.2022.25574.2444
Received: 2022/01/14; Accepted: 2022/07/03
Type of Article: **Research**
Pp: 355-383

Abstract

In some cases, photos are the only surviving documents of Iranian architectural heritage that can be valuable and unique documents in re-reading destroyed buildings. The reverse process of perspective drawing (graphical method) is often used to retrieve architectural documents, which is a complex and time-consuming method that involves errors due to ignoring lens or image distortions resulting from the reproduction of photographs in various media. The present study aims to suggest and apply a method based on which a single-photo rectified photogrammetry according to building geometry constraints could be applied to correct non-metric architectural photos that include a significant number of Iranian architectural visual documents. So the questions are what is the practical process of preparing metric documents through single-image reflection photogrammetry in historical photographs? What are the challenges, errors, and ways to achieve valid results in the case of Iranian architecture? And in practice, how can use this process in photogrammetry of the Saadi tomb as a case study to obtain reliable architectural documents? The research strategy is qualitative and case study and tries to present the process of converting photos into architectural documents based on revised image documents to be used in other research. Findings of the research suggest a flowchart including the steps of "pre-process", "orientation" and "evaluation and analysis", which have been adapted to work on non-metric historical photographs. The precision of photo rectification and possible errors in the correction process was categorized and described in three general sections, including errors of "digitization", "reference point selection", and "estimation and calculation of reference distances". These errors could be minimized by repeating the process using various estimation methods, using parallel data in other available images, and using averaging as a way to find the most precise reference distances in complex situations. This method could be a reliable and fast way of producing architectural documents from images. The results of applying this method to the existing photos of Saadieh's historical mansion showed the efficiency and accuracy of the process.

Keywords: Photogrammetry, Monoplatting, Photo Rectification, Documentation, Saadi Tomb.

1. Associate Professor, Department of Interior Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Shiraz University of Arts, Fars, Iran.
Email: asadpour@shirazartu.ac.ir

Citations: Asadpour, A., 2023, "Application of Historical Photos Photogrammetry in Documenting Destroyed Buildings (Case Study: Saadieh Historical Mansion)". *Pazhoheshha-ye Bastan Shenasi Iran,* 13(36): 355-383. (doi: 10.22084/nb.2022.25574.2444).
Homepage of this Article: https://nbsh.basu.ac.ir/article_5206.html?lang=en

PAZHOHESH-HA-YE BASTANSHENASI IRAN
Archaeological Researches of Iran
Journal of Department of Archaeology, Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.

Publisher: Bu-Ali Sina University. All rights reserved.
*Copyright©2022, The Authors. This open-access article is published under the terms of the **Creative Commons**.*

Introduction

Documentation of historical monuments is the preparation of graphical and visual information that describes the physical arrangement, developments, and historical conditions of the building with accurate drawings. However, when a monument had been destroyed or access to it is not possible, the preparation of architectural documents from them requires methods other than the on-site survey. This is especially important in historical studies, which can be considered as various hypotheses about the building or as a basis for deeper analysis of the monument. Reading historical photographs from the perspective of architectural documentation requires methods that are sufficiently accurate and precise. Architectural photogrammetry, especially in the last two decades, with its growth in digital technologies and processing software, has made reliable tools available to researchers that are evolving every day. The purpose of this article is to develop a practical process that can be used to rectify historical photographs of Iranian architecture and applied to buildings that have been destroyed or severely eroded, by extracting metric data from them and producing the necessary architectural documents. The methodology of this process and its levels and stages can be used as a way to deal with other existing visual documents of Iranian architecture and to help extract comparable architectural documents from photographs. To know the way of working and the challenges of the researchers as much as possible in advance and find a solution, the former mansion of Saadieh in Shiraz, which was built in the time of Zandieh, has been considered as a case study.

The main questions of this research are as follows: What is the practical process of metric reading through photogrammetry, single-reflection in historical photographs? What are the challenges and their validation in Iranian architectural monuments? And in practice, how can we use this process in the photogrammetry of the Saadieh mansion (in terms of design and geometry of the facade) to obtain reliable architectural information, and what will be the validation of the findings? The strategy of this research is qualitative. First, the basic concepts and key steps of photogrammetry are presented. Then the steps of rectifying the historical photo are introduced and finally, the photogrammetry of the selected photos of the Saadieh mansion is given. In this research, Faro-As-Built version 2019 has been used, which is one of the most practical and accurate photogrammetric software in architecture and documentation.

Identified Traces

In this article, a flowchart for photogrammetry of historical photographs is proposed. These steps are similar to almost all methods and systems, regardless of the type of software used. The proposed flowchart consists of three logical steps. In step (a) or the pre-process, the appropriate photo or photos should be selected according to the criteria set out earlier. Then if they are not digital, they should be scanned. In the next step (b), the orientation process is performed. The lens distortion must first be corrected. Photogrammetry software has its instructions for removing camera lens distortion, in which the user must perform a set of actions on the image according to the standards of any software. But in general, all of them use a simple method to eliminate lens distortion in non-metric cameras, and that is the comparison of horizontal and vertical lines parallel to the building that must be defined by the user in the software environment. The accuracy and frequency of the lines introduced by the user can be important in the quality of the final result. Selecting reference points and controlling is another step in the justification section, which is very important and is the key step after correcting the lens distortion or internal camera alignment. The final step (c) is the measurement and evaluation, which requires the addition of a correction grid to the image. This network must be adapted to the perspective of the building and adjusted based on the reference points and the desired correction page. The reference point data must then be provided to the software for correction.

Conclusion

Today, with the development of digital technologies, new tools are provided to rectify historical photographs that can provide researchers with a more accurate understanding of architectural heritage. In this research, a three-step method including “pre-process”, “orientation” and “measurement and analysis” for photogrammetry of historical non-metric photographs was proposed. Errors in the process of photogrammetry Historical photographs can be generally classified into three categories, including “digitization errors”, “reference point selection” and “reference size estimation errors”. The first error could be considered “tool-oriented” and the other two should be considered “user-oriented”.

Although the errors resulting from “reference point selection” can be greatly remedied by increasing the skill and experience of the user and repeating the photogrammetric process by defining various reference points, errors in “reference point selection” and “reference size estimation”

should be considered the most fundamental flaw in the course of work and results. This requires skill, knowledge, and creativity at the same time; In general, identifying the geometry and proportions in Iranian architecture, familiarity with styles and methods in building facades designs and a correct understanding of the spatial structure of the building along with reviewing existing sources and historical documents can be considered basic skills to solve these errors.

پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران
فصلنامهٔ علمی پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران
P. ISSN: 2345-5225 & E. ISSN: 2345-5500
نشانی پایگاه نشریه: https://nbsh.basu.ac.ir
شمارهٔ ۳۶، دورهٔ سیزدهم، بهار ۱۴۰۲
دانشگاه بوعلی سینا
انجمن علمی باستان‌شناسی ایران

کاربست فتوگرامتری عکس‌های تاریخی در مستندنگاری بناهای تخریب‌شده (نمونهٔ موردمطالعه: عمارت تاریخی سعدیه)

علی اسدپور[I]

شناسهٔ دیجیتال (DOI): https://dx.doi.org/10.22084/NB.2022.25574.2444
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲
نوع مقاله: پژوهشی
صص: ۳۸۳-۳۵۵

چکیده

عکس‌ها در برخی موارد تنها اسناد برجای‌مانده از میراث معماری ایران هستند که می‌توانند سندی ارزشمند و بی‌همتا در بازخوانی بناهای تخریب‌شده باشند. در بیشتر اوقات از معکوس کردن فرآیند رسم پرسپکتیو (شیوهٔ گرافیکی) برای بازیابی اسناد معماری از این عکس‌ها استفاده شده است که روشی پیچیده و زمان‌بر است و به‌دلیل نادیده گرفتن اعوجاج‌های لنز و اِشکالات تصویری ناشی از بازتولید عکس‌ها در رسانه‌های مختلف، خطاهایی دربر دارند. هدف پژوهش کنونی، تدوین و کاربستِ عملیِ روشی است که براساس آن بتوان با استفاده از فتوگرامتریِ تک‌عکسِ تصحیح‌شده و مبتنی‌بر قیود شکلی بناهای ایرانی به تصحیح عکس‌های غیرمتریک از آثار معماری پرداخت؛ بنابراین، پرسش پژوهش چنین طرح شده است که، فرآیند عملی در بازخوانی متریک ازطریق فتوگرامتری تک‌عکس در عکس‌های تاریخی چگونه است؟ چالش‌ها، خطاها و راه‌های دستیابی به نتایج معتبر در آثار معماری ایران به چه نحوی است؟ و در عمل چگونه می‌توان با استفاده از این فرآیند در فتوگرامتری عمارت سعدیه به‌عنوان نمونهٔ موردی به اطلاعات معماری قابل استناد و معتبر دست یافت؟ روش پژوهش، کیفی و مبتنی‌بر موردپژوهی است. نتایج پژوهش، نموداری کاربردی شامل «پیش‌فرآیند»، «توجیه» و «ارزیابی و تحلیل» است که برای کار بر روی عکس‌های تاریخی غیرمتریک انطباق لازم را یافته است. دقت کارِ تصحیح عکس‌های تاریخی، به‌ویژه از آثار تخریب‌شدهٔ معماری ایران و خطاهای احتمالی در فرآیند تصحیح در سه بخش شامل خطاهای «رقومی‌سازی»، «انتخاب نقاط مرجع» و «تخمین و محاسبهٔ اندازه‌های مرجع» دسته‌بندی و تشریح شدند. این خطاها می‌توانند با استفاده از «تکرار فرآیند با استفاده از روش‌های تخمین گوناگون»، بهره‌گیری از «داده‌های موازی در سایر عکس‌های موجود» و استفاده از «میانگین به‌عنوان روشی برای یافتن بیشترین دقت در اندازه‌های مرجع» در شرایط پیچیده به کمترین میزان خود برسند. نتایج کار برروی عکس‌های موجود از عمارت تاریخی سعدیه به‌عنوان نمونهٔ عملیِ مطالعه، کارایی و صحت فرآیند را نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: فتوگرامتری، مُنوپِلات کردن، تصحیح عکس، مستندسازی، آرامگاه سعدی.

I. دانشیار گروه معماری داخلی، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر شیراز، فارس، ایران.
Email: asadpour@shirazartu.ac.ir

ارجاع به مقاله: اسدپور، علی، ۱۴۰۲، «کاربست فتوگرامتری عکس‌های تاریخی در مستندنگاری بناهای تخریب‌شده (نمونهٔ موردمطالعه: عمارت تاریخی سعدیه)». پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران، ۱۳(۳۶): ۳۸۳-۳۵۵. (doi: 10.22084/nb.2022.25574.2444)
صفحهٔ اصلی مقاله در سامانهٔ نشریه:
https://nbsh.basu.ac.ir/article_5206.html?lang=fa

فصلنامهٔ علمی گروه باستان‌شناسی دانشکدهٔ هنر و معماری، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران.

حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقالهٔ چاپ شده را در سامانه به اشتراک بگذارد، منوط بر این‌که حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

مقدمه

مستندنگاری آثار تاریخی «به‌منزلهٔ تهیهٔ آن‌دسته از اطلاعات گرافیکی و تصویری است که چیدمان کالبدی، سیر تحولات و شرایط تاریخی اثر را شرح دهد [...] و ترسیماتی دقیق و قابل استناد» را فراهم می‌سازد (حناچی و همکاران، ۱۳۹۵: ۹۳). بااین‌حال، زمانی‌که اثر تاریخی تخریب‌شده یا دسترسی به آن ممکن نباشد، تهیهٔ اسناد معماری از آن‌ها نیازمند روش‌های دیگری به‌جز برداشت بنا در محل است. این موضوع، به‌ویژه در مطالعات تاریخی، امری حیاتی است که می‌تواند فرضیه‌های گوناگونی را درخصوص بنا مطرح یا مبنایی برای تحلیل‌های عمیق‌تر برروی آثار تلقی شود. خوانش عکس‌های تاریخی ازمنظر مستندسازی معماری نیازمند روش‌هایی است که صحت و دقت کافی را داشته باشند. در این‌میان، فتوگرامتری معماری، به‌ویژه در دو دههٔ اخیر با رشدی که در فناوری‌های دیجیتالی و نرم‌افزارهای پردازشگر داشته است، ابزارهای قابل‌اعتمادی را در دسترس پژوهشگران قرار داده که هرروز نیز درحال توسعه هستند.

«فتوگرامتری» در واژه به‌معنی «استخراج عدد و اندازه از عکس» یا «علم و فناوری اندازه‌گیری به‌وسیلهٔ عکس» (Collier, 2020: 95) است و شامل روش‌های اندازه‌گیری و تفسیر تصویر باهدف بازیابی شکل و مکان شئ از یک یا چند عکس است (Luhmann et al., 2011: 2) که به‌طور غیرمستقیم یا غیرتماسی انجام می‌شود؛ درواقع فتوگرامتری را باید بخشی از جریان مستندنگاری و مستندسازی معماری در عصر دیجیتال دانست (Akboy-Ilk, 2016). به‌طورکلی، استفاده از فتوگرامتری برای ایجاد مدلی سه‌بُعدی از بنا براساس عکس‌های دوبُعدی، مدت‌هاست که موردتوجه باستان‌شناسان، مرمتگران و معماران است، ولی آن بخش از دانش فتوگرامتری در این پژوهش مورد تأکید و توجه است که از آن به‌عنوان «فتوگرامتریِ تک‌عکس تصحیح‌شده» در ادبیات نظری فتوگرامتری تعبیر می‌شود و کمتر در منابع فارسی از آن یاد شده است.

هدف نوشتار کنونی تدوین فرآیندی عملی است که بتوان با استفاده از آن به تصحیح عکس‌های تاریخی از آثار معماری ایرانی پرداخت و با تصحیح عکس‌های منتخب از بناهایی که تخریب‌شده یا دچار فرسایش جدی شده‌اند، داده‌هایی متریک از آن‌ها استخراج و اسناد معماری لازم را تولید نمود. روش‌شناسی این فرآیند و مراتب و مراحل آن می‌تواند به‌عنوان راهی برای مواجه با دیگر اسناد تصویری موجود از معماری ایران به‌کاررفته و به استخراج اسناد معماری مقایس‌دار از عکس‌ها کمک شایانی نماید. برای این‌که روش کار و چالش‌های پیشِ‌روی پژوهشگران تا حد ممکن از قبل شناخته و چاره‌یابی شوند، عمارت پیشین سعدیه در شیراز که بنایی از دورهٔ زندیه بوده به‌عنوان نمونه، مطالعه شده است.

پرسش‌های پژوهش: ازآنجاکه موضوع فتوگرامتری معماری موضوع نسبتاً شناخته‌شده‌ای برای پژوهشگران باستان‌شناسی و مرمت کشور است؛ لذا پرسش‌های اصلی این پژوهش مواردی بدین‌شرح هستند: فرآیند عملی در بازخوانی متریک ازطریق فتوگرامتری تک‌عکس در عکس‌های تاریخی چگونه است؟ چالش‌ها،

خطاها و راه‌های دستیابی به نتایج معتبر در آثار معماری ایرانی به چه نحوی است؟ و در عمل چگونه می‌توان با استفاده از این فرآیند در فتوگرامتری عمارت سعدیه (ازنظر طرح و هندسهٔ نما) به اطلاعات معماری قابل استناد دست‌یافت و اعتبارسنجی یافته‌ها چگونه خواهد بود؟

روش پژوهش: روش این پژوهش، کیفی و موردپژوهی است. در ابتدا مفاهیم پایه و مراحل کلیدی فتوگرامتری و گونه‌های مختلف فتوگرامتری معماری عرضه شده‌اند؛ سپس مراحل تصحیح عکس تاریخی معرفی و درنهایت فتوگرامتری عکس‌های منتخب از عمارت سعدیه آورده شده است. باید توجه داشت که در فتوگرامتری «دقت، نشانگر بهترین اندازه‌گیری ممکن است، ولی پرسش از صحت دشوار است؛ چراکه به‌طور مستقیم متأثر از روش‌های خودکار حجیمی است که نرم‌افزار انجام می‌دهد» (Sapirstein, 2016: 137, 138). به‌همین جهت «اعتبار» و «روایی» تصحیح عکس‌های منتخب نیازمند «صحت» و «دقت» در انتخاب نقاط مرجع، اندازه‌های پایه و تناسبات استخراج‌شده از منابع نوشتاری، تصویری و حتی شواهد عینی هستند. به‌همین سبب برای دستیابی به اندازه‌ها و تناسبات موردنیاز از روش‌ها موازی استفاده می‌شود تا ضمن تأیید یافته‌ها به شناسایی خطاها در مراحل کار نیز کمک نماید. این فرآیندی چرخشی است که تا رسیدن به پاسخ مناسب و معتبر ادامه خواهد یافت. در این پژوهش از فتوگرامتری رقومیِ تک‌عکس بر پایهٔ تصحیح تحلیلی استفاده شده است.

نرم‌افزارهای گوناگونی برای فتوگرامتری معماری به شیوهٔ تحلیلی، طراحی و توسعه‌یافته‌اند که به‌طورکلی به دو دستهٔ برخط و غیربرخط تقسیم می‌شوند؛ ازسوی دیگر می‌توان آن‌ها را در دو گروه نرم‌افزارهای مبتنی‌بر اتوکد و یا مستقل از آن نیز تقسیم نمود. مهم‌ترین و معروف‌ترین آن‌ها Agisoft Metashape و PhotoModeler نرم‌افزارهای توانمندی برای فتوگرامتری سه‌بُعدی هستند و نمونه‌هایی مانند DigiCad 3D و PhoToPlan نرم‌افزارهایی مبتنی‌بر اتوکد می‌باشند. شرکت «فارو» آمریکا که پیشینهٔ فراوانی در ساخت نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای سنجش‌ازدور و فتوگرامتری دارد، توسعهٔ نرم‌افزار PhoToPlan را از سال ۲۰۱۸م. متوقف و آن را در مجموعهٔ بزرگ‌تری به‌نام «Faro-As-Built» قرار داد. در این پژوهش از Faro-As-Built نسخهٔ ۲۰۱۹م. استفاده شده که از کاربردی‌ترین و دقیق‌ترین نرم‌افزارهای فتوگرامتری در معماری و مستندنگاری است.

پیشینهٔ پژوهش

از مهم‌ترین تلاش‌ها برای بازیابی داده‌های متریک بناهای تاریخی از عکس‌های قدیمی در قرن بیستم میلادی، پروژهٔ «آلبوم‌خانهٔ آلبرشت مایدن‌باوئر»[1] (۱۸۳۴-۱۹۲۱م) است. مایدن‌باوئر -معمار آلمانی- به خاطر پایه‌گذاری فتوگرامتری معماری موردتوجه است؛ وی در سال ۱۸۸۵م. با تأسیس «مؤسسهٔ سلطنتی تصاویر متریک پروس» بیش از ۲۰،۰۰۰ صفحهٔ بزرگ شیشه‌ای دارای تصاویر متریک را گردآورد که متأسفانه، تمام اسناد مربوط به دوربین‌ها به‌همراه خود آن‌ها در جنگ جهانی دوم

مفقود شدند؛ بنابراین هرچند در این آرشیو، عکس‌ها به‌صورت متریک هستند، ولی هیچ اطلاعاتی از کالیبراسیون آن‌ها برای بازیابی بناها -که بخش زیادی از آن‌ها در دو جنگ جهانی از بین رفته‌اند- وجود نداشت؛ با این‌حال، «ماتیاس هِملِب» در سال ۱۹۹۹م. تالار شهر نوامبورگ را براساس عکسی از مایدن‌باوئر فتوگرامتری نمود (Hemmleb, 1999). در تلاشی دیگر نیز برای بازسازی بخش‌های تخریب‌شدهٔ قصر سلطنتی در مرکز شهر برلین و هم‌چنین آکادمی معماری برلین از عکس‌های همین آرشیو به‌روش فتوگرامتری استفاده شد (Wiedemann et al., 2000).

نمونهٔ قابل‌توجه دیگر پژوهش «کاراس» و «پتسا» (۱۹۹۹) است. آن‌ها به‌جای عکس‌های متریک به عکس‌های غیرمتریک روی آوردند و توانستند ساختمان تئاتر شهرداری آتن را که حدود شصت‌سال پیش تخریب شده بود، فتوگرامتری نمایند (Karras & Petsa, 1999). تلاشی مشابه برای بازسازی برج «گوبیرنا» در اسپانیا نیز انجام شده است (Garcia-Gago et al., 2014). نمونهٔ دیگر، کلیسایی قرن نوزدهمی است که در آتش‌سوزی سال ۱۹۱۷م. ازمیان رفت و به‌وسیلهٔ تنها عکس موجود از آن فتوگرامتری و مدل‌سازی گردید (Styliadis, 2008). در سال‌های اخیر تلاش برای استفاده از آرشیو عکس‌های تاریخی در تولید مدل‌های سه‌بُعدی براساس اطلاعات فتوگرامتری نیز رواج یافته است (Paiz Reyes et al., 2020; Niebling et al., 2018)؛ یا از فتوگرامتری عکس‌های آرشیوی برای تکمیل و تلفیق با کارهای میدانی باستان‌شناسی استفاده شده است (Discamps et al., 2016).

در ایران کوشش کافی برای فتوگرامتری عکس‌های تاریخی در پژوهش‌های معماری دیده نمی‌شود. آن‌چه نیز انجام‌شده اغلب بدون اشاره به فتوگرامتری بوده است، ولی درحقیقت نوعی فتوگرامتری به «شیوهٔ گرافیکی» هستند که از روش‌های ابتدایی و مرسوم تا پیش از جنگ جهانی دوم به‌شمار می‌روند؛ به‌عنوان نمونه، «وحدت‌زاده» (۱۳۸۷) با اعمال اصول پرسپکتیو بر اسناد تصویری موجود از «میدان امیرچخماق» و «میدان شاه» در یزد کوشید تا پلان و نمای این میدان‌های شهری را از روی عکس بازنمای نماید. برای یافتن مقیاسی برای ترسیم از ارتفاع مشخص سردر «مسجد میرچخماق» استفاده و در ابتدا پلان استخراج گردید و سپس برمبنای آن نما ترسیم شده است. در این پژوهش از اعوجاج لنز و زاویهٔ دوربین نیز چشم‌پوشی شده است. نمونهٔ دیگر، تلاشی است که «موسوی» (۱۳۹۹) در بازنمایی بنای قاجاری «مدرسهٔ دارالفنون» با بهره‌گیری از هندسهٔ ترسیمی و نرم‌افزار «اسکچ‌آپ» انجام داده است. در آن پژوهش بخش‌هایی از نما مستقیماً از روی عکس‌هایی که به‌ظاهر فاقد پرسپکتیو بودند، ترسیم شده و با استفاده از هندسهٔ ترسیمی و اسکچ‌آپ، دیگر عکس‌های موجود را به‌قول نویسنده «تخت» کرده‌اند که درحقیقت در اصلاح علمی «تصحیح» کرده‌اند. برای ترسیم پلان‌ها به محل قرارگیری عکاس و ارتفاع دوربین از سطح زمین نیاز بوده که تخمین زده شده است و اختلافاتی در ارتفاع یکی از دیوارها در ترسیم به‌دست‌آمده که نویسنده آن را ناشی از خطای اعوجاج عکس یا ارتفاع ساختمان‌های همسایه تشخیص داده و برای پیشبرد کار از آن صرف‌نظر کرده است. پژوهش‌هایی از این‌دست به‌دلیل چشم‌پوشی از توجیه درونی و بیرونی دوربین

و متکی بودن بر هندسهٔ ترسیمی پرسپکتیو، فرآیند پیچیده و زمان‌بری دارند که عاری از خطا نیستند. در تمامی این نمونه‌ها، مراحل عملی کار برخلاف مفاهیم نظری هم‌چنان مختصر ارائه شده و چارچوبی عملی که بتواند توسط دیگران تکرار شود، چندان دیده نمی‌شود یا بسیار مبهم و پرسش‌برانگیز هستند. آن‌چه در نوشتار کنونی عرضه‌شده، برمبنای «فتوگرامتری تحلیلی» و مبتنی‌بر رابطهٔ ریاضی میان شئ و تصویر است و در صورت رعایت دقیق مراحل کار، می‌تواند دقت بسیار زیادی داشته باشد؛ از سوی دیگر، نمودار و فرآیند معرفی شده در این پژوهش می‌تواند چارچوبی اولیه و تکرارپذیر را فراهم آورد.

روش‌شناسی فتوگرامتری معماری؛ چالش‌ها و فرصت‌ها

ترسیم نقشه‌ها با استفاده از پرسپکتیو موجود در تصاویر مبتنی‌بر اصل شبکه‌بندی، در ابتدای قرن هجدهم میلادی به‌خوبی کاویده شده بود. در آن‌زمان از واژهٔ «آیکنومتری»[۲] به‌معنی «اندازه‌گیری به‌وسیلهٔ تصویر» برای نامیدن فتوگرامتری استفاده شد که چندان فراگیر نشد (Zhizhuo, 1996: 1). با ظهور فناوری‌های رقومی در قرن اخیر، فتوگرامتری دستی یا فتوگرامتری برروی صفحهٔ میز[۳] که به‌دست «لوسدات»[۴] و مایدن‌باوئر در میانهٔ قرن نوزدهم میلادی ابداع شده بود جای خود را به فتوگرامتری تحلیلی رایانه‌ای در دههٔ ۱۹۵۰م. داد که آزادی عملی در استفاده از انواع دوربین‌ها و شبکهٔ طراحی را درپی داشت (Torlegård, 1988: 198, 200). در گذشته از دوربین‌های متریک یا نیمه‌متریک برای عکاسی فتوگرامتری استفاده می‌شد که گران‌قیمت بودند، ولی هم‌اکنون با دوربین‌های غیرمتریک که به‌راحتی در دسترس هستند می‌توان عکس‌های مناسب را گرفت (Waldhaeusl, 1994: 21). ارتباط بین پرسپکتیو خطی و نرم‌افزارهای طراحی به کمک رایانه (CAD) مبتنی‌بر هندسهٔ بنا و شبکهٔ پرسپکتیوِ قابل‌تشخیص برروی عکس در همین دهه توسعه‌یافت که به تشخیص مکان دوربین، ارتفاع آن، آشنایی با قوانین ترسیم پرسپکتیو در یافتن نقاط گریز و مقیاس نقاط ایستگاهی وابسته بود (Crankshaw, 1990) که کار دشوار و زمان‌بری محسوب می‌شدند، ولی روش‌های مختلفی برای خودکارسازی این فرآیند در رایانه ابداع و توسعه یافته است؛ بااین‌حال، مهم‌ترین نقطه‌ضعف آن‌ها نادیده گرفتن اعوجاج‌های لنز دوربین است که می‌تواند تأثیر مهمی در ابعاد و اندازه‌های استخراج‌شده داشته باشد.

روش‌های رقومی جدید برپایهٔ مقایسهٔ موقعیت هر پیکسل از عکس با صفحهٔ متناظر با آن در جهان واقعی کار می‌کنند و می‌کوشند تا روابط پیچیدهٔ ریاضی موجود را تشریح و مدل‌سازی کنند. به‌عنوان نمونه، رویکردی برای ساخت تصاویر قائمه از بناها با استفاده از مدل‌های رقومی صفحه در رایانه، بنای واقعی را به مجموعه‌ای از صفحات متوالی تفکیک می‌نماید و با تعریف شبکه‌ای برروی هر یک، نقاط متناظر عکس، بر آن صفحه منطبق و درنهایت ماتریسی از نقاط حاصل می‌گردد که تصویر قائمه‌شده از بنا را به‌دست خواهد داد. این‌کار نیازمند معادلات همخوانی[۵]، توجیه درونی و بیرونی دوربین[۶] و مدل صفحهٔ رقومی عکس است (Wiedemann,

1996). توجیه درونی نوعی مدل‌سازی دوربین به‌مثابهٔ سامانهٔ فضایی است که دارای صفحهٔ مسطح تصویر و لنز به‌عنوان مرکز پرسپکتیو است و شامل مؤلفه‌هایی است که به تعریف موقعیت فضایی مرکز پرسپکتیو دوربین، فاصلهٔ اصلی و موقعیت نقطهٔ مبنا اشاره دارد. توجیه درونی شامل این موارد است؛ الف) مختصات نقطهٔ مبنا (yo و xo)، ب) فاصلهٔ اصلی (c) و ج) اصلاحات اعوجاج تصویر (Δx و Δy). مقدار ثابت c برابر بافاصلهٔ کانونی است که با طول لنز متفاوت است و در هنگام فوکوس بی‌نهایت قابل‌اندازه‌گیری است. مختصات نقطهٔ مبنا، تقاطع صفحهٔ تصویر و خط عمودبر صفحهٔ تصویر است و از مرکز صفحهٔ تصویر می‌گذرد. با دانستن این مقادیر، «دوربینْ کالیبره» خوانده می‌شود؛ ازسوی دیگر، توجیه بیرونی شامل مؤلفه‌هایی است که موقعیت فضایی و جهت‌گیری سامانهٔ مختصاتی دوربین را با توجه به سامانهٔ جهانی مختصات شئ توصیف می‌کند (Luhmann et al., 2011: 114, 202; Stylianidis, 2020: 150, 161). یکی از دشواری‌های کار با عکس‌های تاریخی، دقیقاً در همین‌جا ظاهر می‌شود؛ به این معنی که دوربین‌هایی که عکس‌های تاریخی را ثبت کرده‌اند در بسیاری مواقع غیرمتریک هستند و درنتیجه توجیه درونی آن‌ها در هر بار عکاسی تغییر می‌یافته است. حتی اگر دوربین‌های متریک نیز استفاده شده باشند، باز چالش دیگر این است که به‌ندرت آن دوربین‌ها در دسترس هستند تا بتوان در شرایط آزمایشگاهی آن‌ها را کالیبره کرد؛ بنابراین باید روش‌های دیگری به‌کار برد که ذیل عنوان «فتوگرامتری تک‌عکس» شناخته می‌شوند.

روش «تک‌عکس»[۷] و «زوج‌عکس»[۸] دو شیوهٔ فتوگرامتری معماری هستند. در این پژوهش به‌دلیل استفاده از عکس‌های تاریخی که از پیش تهیه شده‌اند، تنها روش تک‌عکس قابل استفاده است. این روش برای مساحی عناصر صفحه‌ای و یا نزدیک به آن مطلوب است؛ با این‌حال، هر فتوگرامتری مبتنی‌بر تک‌عکس نیازمند نوعی «تصحیح»[۹] است. تصحیح فرآیندی است که در آن از عکس یک شئِ صفحه‌ای حاوی اعوجاج‌های گوناگون، نتیجه‌ای برابر با صفحهٔ متعامد تصویرِ[۱۰] شئ در مقیاس داده‌شده حاصل می‌شود و به چهار روش گرافیکی (روشی ابتدایی و با دقت کم و مرسوم تا انتهای جنگ جهانی دوم)، نوری (نیازمند مهارت ترسیم دستی پرسپکتیو با در دست داشتن پلان)، عکاسی (بازتولید عکس تصحیح‌شده از عکس‌های دارای اعوجاج) و تحلیلی (براساس رابطهٔ ریاضی میان شئ و عکس) قابل انجام است (Badekas, 1975: 116). «فتوگرامتری زوج‌عکس» یا «استریو فتوگرامتری» شاخه‌ای از مساحی و نقشه‌برداری هوایی است که «بُرد کوتاه» خوانده می‌شود و به تولید مدارک سه‌بُعدی از موضوع می‌انجامد؛ ولی عکس‌های تصحیح‌شده، ساده و به دانش تخصصی کمتری نیاز دارند. عکس‌های تصحیح‌شده به تصویر قائمه‌شده[۱۱] که در تمامی وجوه فاقد پرسپکتیو است، منتج نمی‌شوند؛ بلکه تنها در یک صفحه دارای مقیاس معتبر هستند؛ بنابراین کماکان دارای پرسپکتیوی در سایر صفحات می‌باشند (Mann, 1987: 25, 26)؛ به‌همین جهت در استخراج اسناد معماری از عکس‌های تاریخی ممکن است لازم باشد چندین نوبت کار تصحیح عکس را در صفحه‌های گوناگون انجام‌داد تا اسناد لازم استخراج و درنهایت برهم منطبق شوند.

جدول ۱، گونه‌شناسی مهم‌ترین روش‌های مرسوم در فتوگرامتری معماری را نشان می‌دهد که شامل: نوع، ابزار موردنیاز، روش تصحیح و شرح مختصری از روش کار و نقاط قوت و ضعف آن‌هاست.

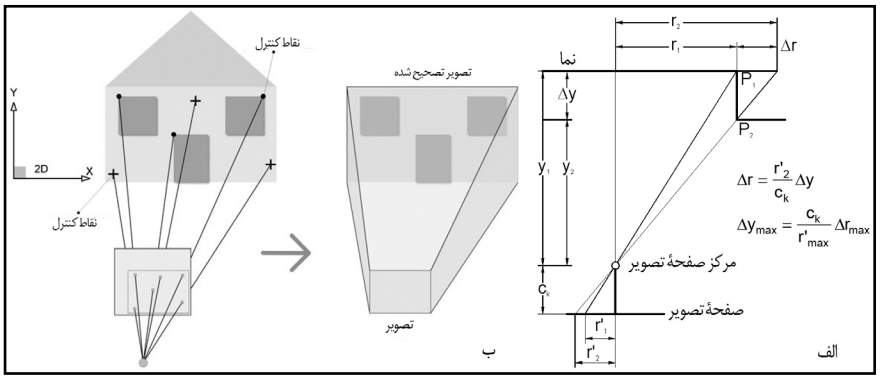
جدول ۱: گونه‌شناسی انواع روش‌ها/تکنیک‌های فتوگرامتری معماری (براساس داده‌های اولیه‌ای از حناچی و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۹۶-۲۹۲؛ Badekas, 1975: 116; Andreas, 2019).▼

Tab. 1. Typology of architectural photogrammetry methods/techniques (The author based on preliminary data from Hanachi et al., 2015: 292-296; Badekas, 1975: 116; Andreas, 2019).

ردیف	عنوان روش/ تکنیک	نوع فتوگرامتری	ابزار موردنیاز	روش تصحیح	شرح روش	ویژگی‌ها (قوت و ضعف)
۱	ساخت گرافیکی	تک‌عکس	صفحهٔ شفافِ و ابزاری برای ترسیم	گرافیکی	ترسیم شبکهٔ پرسپکتیو بر روی عکس مبتنی‌بر ارتفاع موجود بنا و ترسیم دستی نمای مسطح مبتنی‌بر موقعیت عناصر در شبکه‌بندی مفروض	اعوجاج لنز تصحیح نمی‌شود. برای عکس‌هایی با پرسپکتیو مخروطی مناسب است و ارتفاع بنا باید موجود باشد. خطاهای ترسیمی کاربر، می‌توانند دقت کار را زیرسؤال ببرند.
۲	روش نوری (اپتیکی)	تک‌عکس	اتاقک روشن (camera lucida)	نوری	ابزار کوچک قابل‌حملی که اجازه می‌دهد هم‌زمان عکس تصحیح‌شده و کاغذ ترسیم که بر روی آن باید ترسیم گردد، دیده شود. تصحیح با داشتن چندین اندازه‌های واقعی از عکس ممکن است.	اعوجاج لنز تصحیح نمی‌شود. به دلیل ابعاد دستگاه، برای بناهای بزرگ یا پر جزئیات مناسب نیست. به شمار فراوانی اندازه نیاز دارد. کاربر باید مهارت‌های ترسیم بالایی داشته باشد در غیر این صورت، خطاهای ترسیمی می‌توانند دقت کار را زیرسؤال ببرند.
۳	روش عکاسی	تک‌عکس	ابزارهای ویژه‌ای مانند نمونه‌هایی از شرکت Karl Zeiss و Wild Heerbrugg	عکاسی	این ابزارها با بازتاب نگاتیو عکس به‌صورت اُریب، عکس فرآیند عکاسی را تداعی کرده و رونوشتی تصحیح‌شده فراهم می‌آورند که می‌توانند ابزارهایی بسیار کوچک تا میزهای بزرگی برای تصحیح را شامل شوند.	اغلب تصحیح اعوجاج لنز انجام نمی‌شود. کمابیش طیف گوناگونی از بناها در ابعاد گوناگون قابل تصحیح هستند. کار با دستگاه‌های بزرگ، فضا و مهارت فراوانی نیاز دارد. بیشتر اوقات تنها برای بناهایی با سطوح تخت مناسب‌اند. بااین‌حال، نمی‌توان به عکس تصحیح‌شده‌ای با صحت بسیار بالا دست‌یافت.
۴	روش رقومی	تک‌عکس	انواع نرم‌افزارهای رایانه‌ای مانند PhoToPlan	تحلیلی	مبتنی‌بر پردازش تصویر رقومی یا اسکن‌شده با روش‌های گوناگون مدل‌سازی تحلیلی ریاضی	اعوجاج لنز قابل‌محاسبه و تصحیح است. توجیه درونی و بیرونی دوربین به‌خوبی لحاظ می‌شوند. سرعت عمل، دقت و صحت بالایی در فرآیند کار وجود دارد. خطاهای کاربر در کمینهٔ خود است.
۵	رسام‌های آنالوگ (قیاسی)	روج‌عکس	دستگاه‌های ترسیمی با سازوکارهای نوری–مکانیکی	عکاسی	بخش نوری دستگاه، کارکردی مانند استریواسکوپ دارد که دو عکس را بر هم منطبق می‌کند. ترسیم از روی عکس نهایی به روش مکانیکی به دست کاربر با ابزارهای ترسیمی مانند پانتوگراف انجام می‌شود.	مشخصه‌های هندسی دوربین قابل بازسازی است. نیاز به دستکم سه نقطهٔ کنترل دارد. کار با دستگاه‌های بزرگ، فضا و مهارت فراوانی نیاز دارد. دقت کاربر در ترسیم مهم است.
۶	رسام‌های تحلیلی	زوج‌عکس	دستگاه‌های ترسیمی با سازوکارهای نوری–مکانیکی و کنترل رایانه	عکاسی	همانند رسام‌های آنالوگ است ولی کنترل مراحل نوری–مکانیکی با رایانه انجام می‌شود. همچنین تصحیح اعوجاج عکس‌ها نیز در قالب توجیه درونی انجام‌پذیر است.	قادر به درک تقریبی هندسه درونی و بیرونی عکس‌ها هستند. امکان رقومی سازی به‌صورت سه‌بعدی را نیز فراهم می‌کنند.
۷	میز کار رقومی	روج‌عکس	یک رایانه و یک کنترل‌گر (فیلتر)	تحلیلی	روش کار در کل شبیه به رسام‌های تحلیلی است ولی بخش‌های نوری–مکانیکی، همگی رایانه‌ای شده‌اند. کاربر با به‌کارگیری عینک پولاریزه‌شده (فیلتر) تصمیم نهایی را دربارهٔ تصحیح رایانه خواهد گرفت.	توجیه عکس‌ها با دقت بالایی همراه است و خطاهای ناشی از انحراف زاویه، تیلت و برجستگی‌های شئ قابل تصحیح است. فضای اندکی اشغال می‌کند ولی نیاز به مهارت و تجربه کاربر دارد.

بنابراین، عکس‌های تصحیح‌شده بیشترین کاربرد را می‌توانند در فتوگرامتری معماری داشته باشند. شیوهٔ تصحیح عکس را می‌توان براساس ماهیت هندسی بنای موردنظر نیز طبقه‌بندی نمود؛ به‌این‌ترتیب می‌توان چهار دسته را تشخیص داد: تصحیح تصویری[۱۲] (هنگامی‌که بنا ساختار هندسیِ صفحه‌ای صحیحی دارد)، تصحیح چندجمله‌ای[۱۳] (نماهایی با عناصر منحنی با نقاط کنترل کافی)، نمای گستردهٔ سطوح قابل‌گسترش[۱۴] (برای تهیهٔ نقشهٔ گسترده از احجام پارامتریک مانند استوانه و مخروط) و تصحیح افتراقی[۱۵] (هنگامی‌که هیچ‌یک از روش‌های بالا به‌کار نیایند با تفکیک اجزای شئ از روش‌های ترکیبی استفاده خواهد شد). رویکردهای موجود در تصحیح عکس‌ها نیز به‌طورکلی به دو دستهٔ رویکردهای پارامتریک و غیر پارامتریک بخش می‌شوند؛ در رویکرد پارامتریک مؤلفه‌های توجیه درونی و بیرونی موردنیاز است؛ درحالی‌که در رویکرد غیر پارامتریک بیشتر به نقاط کنترل احتیاج است (Hemmleb & Wiedemann, 1997). در کار فتوگرامتری عکس‌های تاریخی تنها می‌توان از «تصحیح تصویری» بهره برد.

تصویر اصلی در فرآیند تصحیح می‌بایست به تصویر جدیدی تغییر فرم دهد که همان تصویر تصحیح‌شده و صفحهٔ شئ است (تصویر ۱). افزون‌بر دوران، عامل مقیاس‌دهی نیز در این‌میان تأثیرگذار است. تولید تصویر تصحیح‌شده به این معناست که تصویری کوچک مجبور به تبعیت از هندسهٔ صفحهٔ پروژکتیو یا تصویر می‌شود که نتیجهٔ آن تصویری با هندسهٔ درست و عکس رقومی بدون اعوجاج خواهد بود (Stylianidis, 2020: 154, 155). ازنظر هندسی، شعاع تاشدگی rΔ مربوط به اختلاف فاصلهٔ P1 و P2 در نما به فاصلهٔ کانونی دوربین (Ck) و تفاوت yΔ میان y1 و y2 بستگی دارد (Hemmleb & Wiedemann, 1997: 262).



تصویر ۱. الف: قیود هندسی مورداستفاده در فنون تصحیح (Hemmleb and Wiedemann, 1997: 261)؛ و ب: تصحیح نمای ساختمان (Stylianidis, 2020: 154). ◄

Fig 1. A: Geometric constraints used in rectifying techniques (Hemmleb and Wiedemann, 1997: 261) and B: Rectifying the facade of the building (Stylianidis, 2020: 154).

هرچند الگوریتم‌های تشخیص اشیاء، لبه‌ها و سطوح رشد فراوانی داشته است ولی به‌دلیل پیچیدگی، هیچ فرآیند کاملاً خودکاری برای فتوگرامتری تاکنون ایجاد نشده است (Chengshuang et al., 1997: 548)؛ بنابراین، کار فتوگرامتری همواره نیازمند مداخلهٔ کاربر سامانه خواهد بود. فرآیند کار به‌طورکلی در چهار مرحلهٔ کلیدی انجام می‌شود (تصویر ۲).

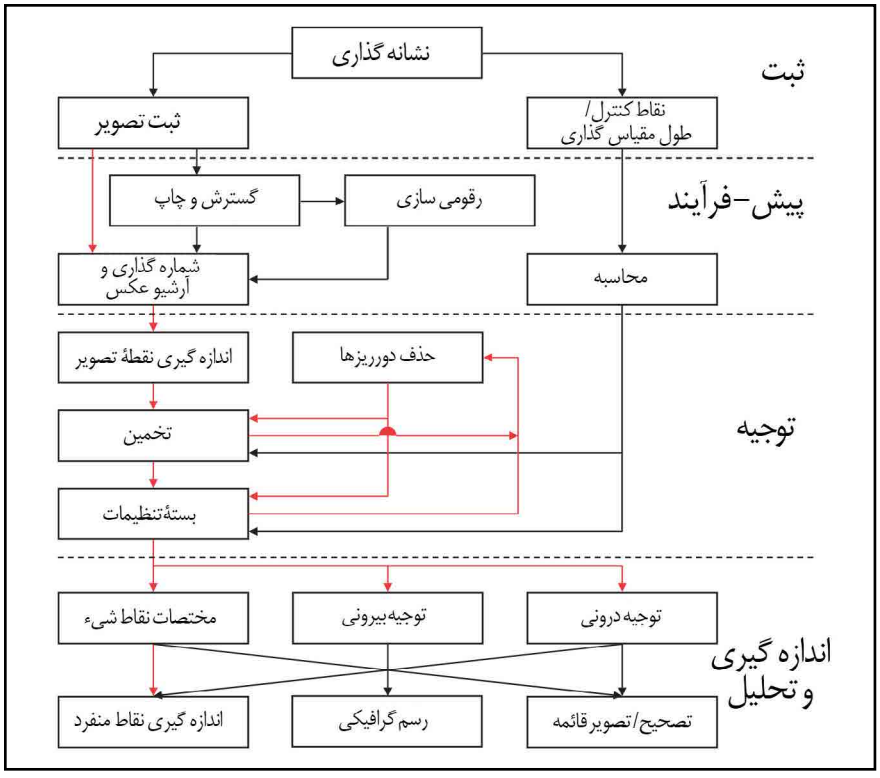
الف) ثبت: شامل نشانه یا هدف‌گذاری نقاطی بر روی شئ است که به خودکارسازی و ارتقای صحت اندازه‌گیری نقاط بر روی عکس می‌انجامد. هم‌چنین

در این مرحله باید به نقاط کنترل یا طول‌های مقیاس‌گذاری برای افزایش دقت نشانه‌ها اندیشید؛ و سرانجام مرحلهٔ ثبت شامل ثبت تصویر به‌صورت آنالوگ یا رقومی در سامانه نیز می‌باشد.

ب) پیش‌فرآیند: شامل محاسبهٔ مختصات نقاط و یا فاصله از نقاط مرجع در مساحی مانند استفاده از شبکه‌بندی است. در چاپ فیلم یا نسخهٔ چاپی از عکس، این موارد درنظر گرفته می‌شوند تا در صورت نیاز با اسکنر به‌صورت رقومی درآیند و درنهایت شماره‌گذاری و آرشیو شوند.

ج) توجیه: به‌معنی اندازه‌گیری نقاط عکس است که به شناسایی و اندازه‌گیری نقاط مرجع و مقیاس یا نقاط موازی برای توسعهٔ شبکه‌بندی نقاط اطلاق می‌شود. مرحلهٔ تخمین برای محاسبهٔ دربستهٔ تنظیمات نرم‌افزار موردنیاز است. بستهٔ تنظیمات برنامه‌ای است که محاسبات مؤلفه‌های توجیه درونی و بیرونی و مختصات نقاط شئ را که برای تحلیل‌های بعدی موردنیازند، شبیه‌سازی می‌نماید؛ درنهایت تشخیص و حذف خطاهای فاحش که در حین اندازه‌گیری دستی به‌وجود می‌آیند نیز ضروری است.

د) اندازه‌گیری و تحلیل (گام نهایی است): هدف از اندازه‌گیریِ تک‌نقطه، خلق مختصات سه‌بعدی از شئ برای محاسبات عددی بعدی است. رسم گرافیکی به تولید نقشه‌ها و پلان‌های مقیاس‌دار به‌عنوان نمونه در CAD و GIS منتهی می‌شود. تصحیح و تصویر قائمه نیز تصویر یا تصاویری دگردیسی شده با حذف اعوجاج برمبنای صفحهٔ مرجع یا عکس‌های تخت و بدون پرسپکتیو تولید می‌کنند (Luhmann et al., 2011: 10, 11).



◄ تصویر ۲. فرآیند ثبت و تحلیل در فتوگرامتری (خطوط قرمزرنگ در فتوگرامتری رقومی، خودکار انجام می‌شوند)، (Luhmann et al., 2011: 10).
Fig 2. The recording and analysis process in photogrammetry (red lines are done automatically in digital photogrammetry) (Luhmann et al., 2011: 10).

نمودار پیشنهادی برای تصحیح (مُنوپِلات کردن) عکس تاریخی در فتوگرامتری معماری

کار با عکس‌های تاریخی از این‌نظر که اغلب توجیه درونی و بیرونی دوربین در آن‌ها مشخص نیست و یا به‌طورکلی با دوربین‌های متریک گرفته نشده‌اند کار آسانی نخواهد بود. در این‌صورت از مراحل چهارگانهٔ فتوگرامتری (تصویر ۲)، مرحلهٔ ثبت در اختیار پژوهشگر نخواهد بود. در مرحلهٔ پیش‌فرآیند نیز شناسایی و محاسبهٔ نقاط مرجع نیز اغلب به‌دلیل تخریب نسبی یا کامل بنا ممکن است میسر نباشد. در این مرحله راهکارهایی جایگزین وجود دارند که در ادامه آمده است؛ ولی در این مرحله، رقومی‌سازی عکس‌ها شرط اصلی و مهمی است که بدون آن امکان کار برروی عکس‌ها ممکن نخواهد بود. دسته‌بندی اسکنرهای رقومی‌سازی فیلم خام براساس معیارهای گوناگونی انجام می‌شود؛ به‌عنوان نمونه، این اسکنرها ازلحاظ نوع حسگر به سه دستهٔ نقطه‌ای، خطی یا سطحی یا ازنظر نحوهٔ قرار گرفتن نسبت به شئ اسکن‌شده به دو دستهٔ اسکنر تخت یا استوانه‌ای تفکیک می‌شوند. در عمل، وقتی از اسکنرها برای فتوگرامتری معماری استفاده می‌شود مشکل عدم وضوح کافی و موردنیاز پیش می‌آید؛ از یک‌سو باید جزئیات قابل‌تشخیص باشند، و ازسوی دیگر فضای ذخیره‌سازی محدود است. در فتوگرامتری معماری معمولاً از اسکنرهای فتوگرامتری با وضوح بالا و اسکنرهای رومیزی استفاده می‌شود. اسکنرهای رومیزی (DTP) برای مقاصد فتوگرامتری طراحی نشده‌اند، ولی باقیمت پایین و به‌صورت گسترده در بازار قابل‌دسترسی هستند و طراحی و اصلاح آن‌ها زمان‌بر نیست (Egels & Kasser, 2001: 310).

کار اصلی در فتوگرامتری عکس‌های تاریخی در مرحلهٔ توجیه انجام می‌شود؛ درصورتی‌که بنای موردنظر به‌طور کامل تخریب نشده باشد، داده‌های میدانی از نقاط مرجع قابل‌اندازه‌گیری و محاسبه هستند؛ ولی در صورت تخریب کامل بنای موردنظر در عکس دو وضعیت قابل‌تصور است.

الف) اگر هنوز مختصات نقطهٔ مرجع یا مبنا در اندازه‌گیری‌های پیشین یا اطلاعاتی که می‌توان از نقشه‌های تاریخی به‌دست آورد موجود باشند، باید این داده‌ها بررسی شوند. گاهی نقشه‌های تاریخی ساختمان یا اندازه‌گیری‌های بنا وجود دارند؛ ولی باید در استفاده از اندازه‌های به‌دست‌آمده از این نقشه‌ها دقت کرد. باید به یاد داشت که خطاهای موجود در این نقشه‌ها بی‌درنگ بر صحت فرآیند تصحیح تأثیر می‌گذارند.

ب) راه دیگر برای به‌دست آوردن مختصات نقطه مرجع، در صورت در دسترس بودن چند عکس تاریخی متریک از بنای موردنظر حاصل می‌شود. در بهترین حالت، می‌توان عکس‌ها را در یک نمودار تصویری مرتب و مختصات نقاط یکسان را تعیین کرد. تنظیم چنین مجموعه‌ای با کالیبراسیون ضمنی تلاش نسبتاً زیادی می‌طلبد و تنها با تعداد کافی عکس و یک چیدمان مناسب می‌تواند با موفقیت اعمال شود (Hemmleb, 1999: 1).

در عمل باید ترکیبی از دو حالت پیشین را به‌کار برد. در مواردی که داده‌های توجیه

درونی و بیرونی دوربین مشخص نباشند (عکس غیر متریک) نیز کماکان می‌توان به تصحیح عکس پرداخت ؛در این حالت در آغاز باید اعوجاج ناشی از مؤلفه‌های لنز و دوربین را از روی عکس محاسبه کرد که امروزه نرم‌افزارهای رایانه‌ای امکان این‌کار را دارند. توجیه درونی دوربین نخستین گام در فرآیند فتوگرامتری است که بدون آن نمی‌توان مراحل بعدی را طی نمود. علت آن است که توجیه درونی، شرط لازم برای تعریف مرکز پرسپکتیو و اعوجاج لنز به‌شمار می‌رود که در دوربین‌های غیر متریک با هر بار فوکوس لنز تغییر می‌یابد. با داشتن توجیه درونی دوربین، عکس گرفته‌شده می‌تواند برای مراحل بعدیِ تصحیح، قابل‌استفاده باشد. درحقیقت نمی‌توان انتظار داشت که یک فتوگرامتری کاملاً استاندارد را بتوان با عکس‌های غیرمتریک تاریخی انجام داد، بلکه درواقع می‌توان اطلاعات متریک را با دقتی منطقی و قابل‌قبول استخراج کرد (Karras & Petsa, 1999). مطالعات انجام‌شده در برج گوبیرنا (اسپانیا) نشان‌دادند که فتوگرامتری تنها یک عکس تاریخی از بنا با اندازه‌های واقعی این بنا که هنوز موجود بوده است، تنها یک درصد اختلاف داشته که اعتبار مناسبی به این روش می‌دهد (Garcia-Gago et al., 2014).

روش کار به‌طورکلی بر پایهٔ ویژگی‌های متقدم شئ مانند: خطی بودن، موازی بودن، عمودی بودن، تقارن و نظایر آن است (Bräuer-Burchardt & Voss, 2001). پیش‌فرض فتوگرامتری خطی مورداستفاده در این نمونه‌ها وجود خطوط عمودی و افقی در اثر معماری است که این خود می‌تواند ابهامات و کژی‌هایی در عکس یا در خود بنا داشته باشد. مبنای یافتن نقاط و فاصله‌های مرجع نیز اغلب از منابع ثانویه مانند متون و نقشه‌های پیشین ممکن می‌شوند که آن‌ها هم دقت معینی دارند. در پژوهش‌ها، ابعاد کلی نما و اندازهٔ پنجره‌ها و بازشوها مبناهای خوبی برای فتوگرامتری تشخیص داده‌شده‌اند که اغلب به‌طور مستقیم اندازه گرفته می‌شوند (Ordóñez et al., 2010)؛ ولی استفاده از عناصر تخمینی مانند مقیاس انسانی، ابعاد اشیاء موجود در عکس و شمارش یا اندازه‌گیری ضمنی عناصر معماری یا سازه‌ای مانند خیز پله‌ها، ارتفاع ازاره‌ها، ابعاد آجرها و نظایر آن می‌توانند جایگزین اندازه‌گیری واقعی شوند که هرکدام خطاهایی درپی داشته و در برخی موارد اجتناب‌ناپذیر نیز هستند. همهٔ این‌ها به خلاقیت پژوهشگر و میزان دسترسی به داده‌های موازی از یک‌سو و دقت و کیفیت عکس در دسترس نیز بستگی دارند؛ درنهایت باید گفت که در برخی از موارد همین عکس‌ها تنها مستندات تاریخی برای پژوهش، بازسازی، مرمت و مستندسازی آثار ازدست‌رفته در تاریخ معماری هستند. به‌همین سبب می‌بایست در فرآیند استخراج اطلاعات شئ یا اثر معماری از عکس تاریخی به موارد ذیل یا پیش‌فرض‌ها توجه داشت (Heuvel, 2001):

الف) لبه‌های شئ مستقیم هستند؛ بدین‌معنا که با حذف اعوجاج لنز، لبهٔ خطی صافی در عکس خواهند داشت. این موضوع، به‌ویژه در فتوگرامتری معماری که عناصر خطی بر عناصر نقطه‌ای مزیت دارند ابزاری برای اندازه‌گیری به‌دست می‌دهد. به‌هرحال، این عناصر خطی هستند که در فتوگرامتری به‌کار خواهند آمد.

ب) نیم‌رخ‌های شئ، صفحه‌ای هستند؛ این داده‌ها ناشی از ویژگی پیشین‌اند،

چراکه سطح تماس دو صفحه می‌تواند عناصر خطی مستقیم را به‌وجود آورد. این بدان‌معناست که شئ، حاوی اطلاعاتی از مرزهای چندوجهی است که در بازنمایی به‌خوبی در دست است.

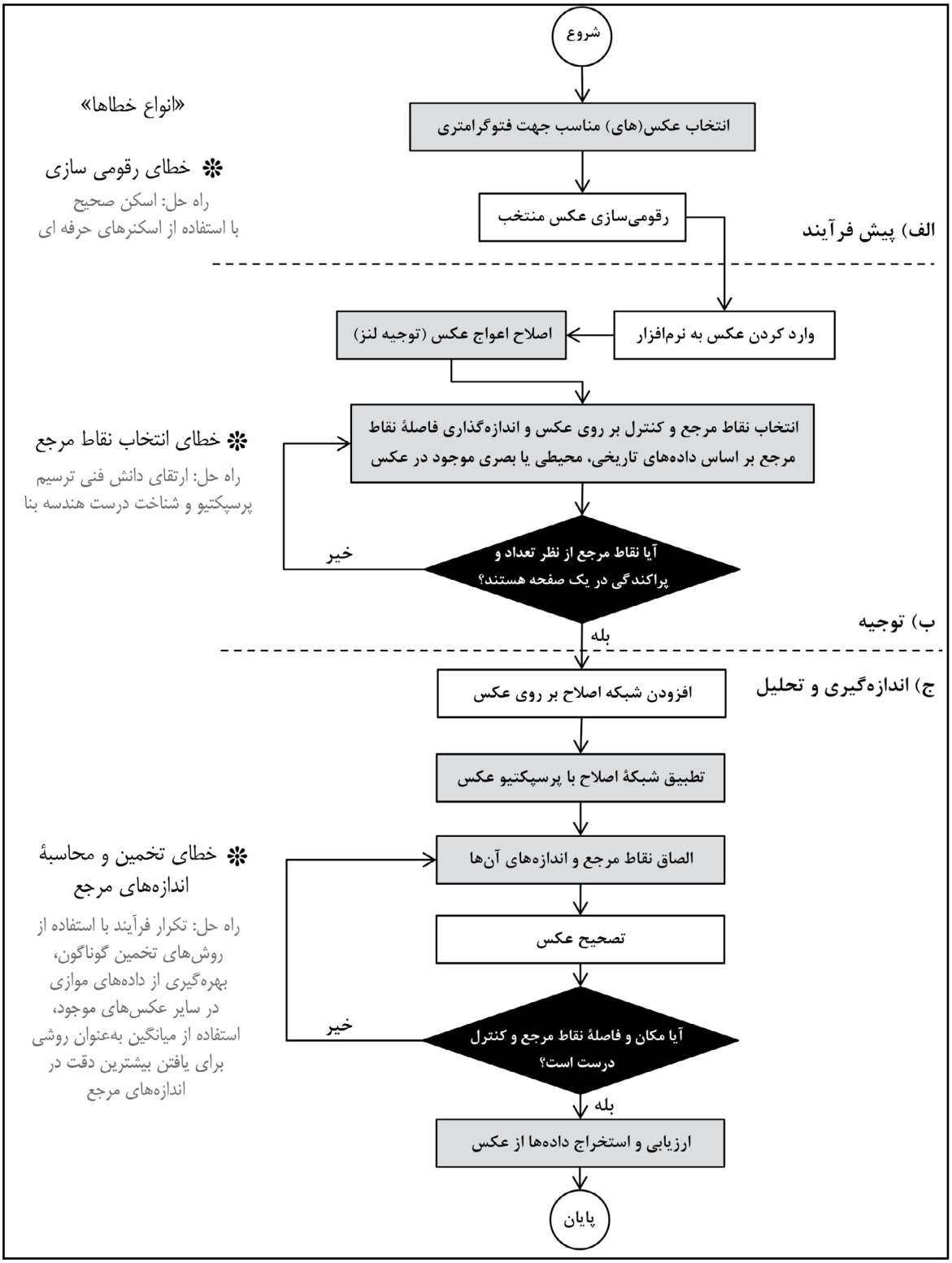
ج) قیود شکلی شئ مانند موازی بودن لبه‌ها و نیمرخ‌های شئ، عمود بودن لبه‌ها و نیم‌رخ‌ها، همسانی نقاط و نیم‌رخ‌های شئ و درنهایت تقارن لبه‌های شئ.

به استناد مطالبی که پیش‌تر آمد، نموداری برای فتوگرامتری عکس‌های تاریخی به‌شرح تصویر ۳، پیشنهاد می‌شود. این مراحل، فارغ از نوع سامانهٔ رایانه‌ای مورداستفاده کمابیش در تمامی روش‌ها و سامانه‌ها مشابه هستند. نمودار پیشنهادی شامل سه مرحلهٔ منطقی است: در مرحلهٔ الف یا پیش‌فرآیند، باید عکس یا عکس‌های مناسب با توجه به معیارهایی که پیش‌تر آمد انتخاب شوند؛ سپس در صورت رقومی نبودن می‌بایست اسکن گردند. در مرحلهٔ بعدی (ب) فرآیند توجیه انجام می‌شود. در ابتدا باید اعوجاج ناشی از لنز عکس را تصحیح کرد. نرم‌افزارهای فتوگرامتری دستورالعمل‌های ویژهٔ خود را برای حذف اعوجاج‌های لنز دوربین دارند که در آن کاربر باید براساس استانداردهای هر نرم‌افزار مجموعه اقداماتی را برروی عکس انجام دهد. اما به‌طورکلی تمامی آن‌ها برای حذف اعوجاج لنز در دوربین‌های غیرمتریک از روشی ساده استفاده می‌کنند و آن مقایسهٔ خطوط افقی و عمودی موازی در بنا است که باید توسط کاربر در محیط نرم‌افزار تعریف شوند. دقت و فراوانی خطوطی که توسط کاربر معرفی می‌شوند می‌تواند در کیفیت نتیجهٔ نهایی مهم باشد.

انتخاب نقاط مرجع و کنترل گام دیگر در بخش توجیه است که بسیار مهم بوده و بعد از مرحلهٔ اصلاح اعوجاج لنز یا توجیه درونی دوربین کلیدی‌ترین گام است. صحت و دقت در انتخاب این نقاط که حداقل باید ۴ نقطه و الزاماً در یک صفحه باشند، درنتیجهٔ نهایی تأثیر به‌سزایی دارد؛ افزون‌بر این، باید فاصلهٔ این نقاط را نیز براساس داده‌های میدانی، تعیین یا براساس داده‌های تاریخی یا تصویری موجود در عکس تخمین زد. مرحلهٔ نهایی (ج) اندازه‌گیری و ارزیابی است که نیازمند افزودن شبکهٔ تصحیح برروی عکس است. این شبکه می‌بایست بر پرسپکتیو بنا منطبق گردد و براساس نقاط مرجع و صفحهٔ تصحیح موردنظر تنظیم گردد؛ سپس باید داده‌های نقاط مرجع را جهت تصحیح در اختیار نرم‌افزار گذاشت. تصحیح عکس با توجه به توجیه درونی دوربین که پیش‌تر محاسبه‌شده و هم‌چنین داده‌های نقاط مرجع با استفاده از الگوریتم‌های تحلیلی ریاضی بر عکس اعمال‌شده و نتیجهٔ نهایی به‌صورت عکسی تصحیح‌شده عرضه می‌گردد. باید توجه داشت که این عکس تنها در صفحهٔ اصلاح که منطبق بر نقاط مرجع است اعتبار دارد و ابعاد و اندازه‌گیری‌ها تنها در آن صفحه قابل استناد هستند. بی‌تردید برای دیگر صفحات باید کاری مشابه انجام داد.

آزمون عملی نمودار پیشنهادی در فتوگرامتری عکس‌های عمارت سعدیه

آن‌چه به عمارت سعدیه مشهور است از اقدامات «کریم‌خان زند» (۱۱۸۷هـ.ق.) است



تصویر ۳. نمودار فرایند فتوگرامتری عکس تاریخی در مستندنگاری معماری (نگارنده، ۱۴۰۰).▲

Fig 3. Diagram of the photogrammetric process of a historical photo in architectural documentation (Author, 2021).

که تا روزگار پهلوی دوم (۱۳۲۷هـ.ش.) هم‌چنان برپا بوده و در سال ۱۳۲۹هـ.ش. با طرحی از «محسن فروغی» و «علی صادقی» جایگزین می‌گردد. در این بخش براساس نمودار پیشنهادی در تصویر ۳، کار فتوگرامتری برروی عکس‌های منتخب از عمارت تاریخی سعدی انجام شده است.

پیش‌فرآیند

عکس‌های باقی‌مانده از عمارت سه دسته‌اند؛ عکس‌هایی از بیرون عمارت که کلّیت میانسرا و ورودی را نشان می‌دهند. عکس‌های که از درون میانسرا گرفته‌شده‌اند و عکس‌هایی که پس از ویرانی دیوارهای میانسرا در دورهٔ پهلوی اول برای توسعه باغ گرفته‌شده‌اند. نگارنده توانسته است به عکسی از آرشیو «احمدرضا چهره‌نگار» دست‌یابد که به‌طور مستقیم از روی نگاتیو چاپ شده است. این عکس عمارت را اندکی پس از تخریب دیوارهای میانسرا از ضلع جنوب‌غربی نشان می‌دهد. عکس موردنظر توسط اسکنر کانُن (مدل LiED 220) با کیفیت (رزولوشن) ۳۰۰ dpi اسکن گردید. هم‌چنین عکس دیگری نیز از آرشیو «منصور صانع» منتشر شده است که عمارت را از زاویهٔ جنوب‌شرقی نشان می‌دهد. برخلاف عکس پیشین، در این عکس درختان به‌عنوان مانعی بصری وجود دارند، ولی می‌توانند به‌عنوان منبعی برای کنترل تصحیح عکس قبلی و هم‌چنین برای ترسیم جزئیات بیشتر به‌کار آید.

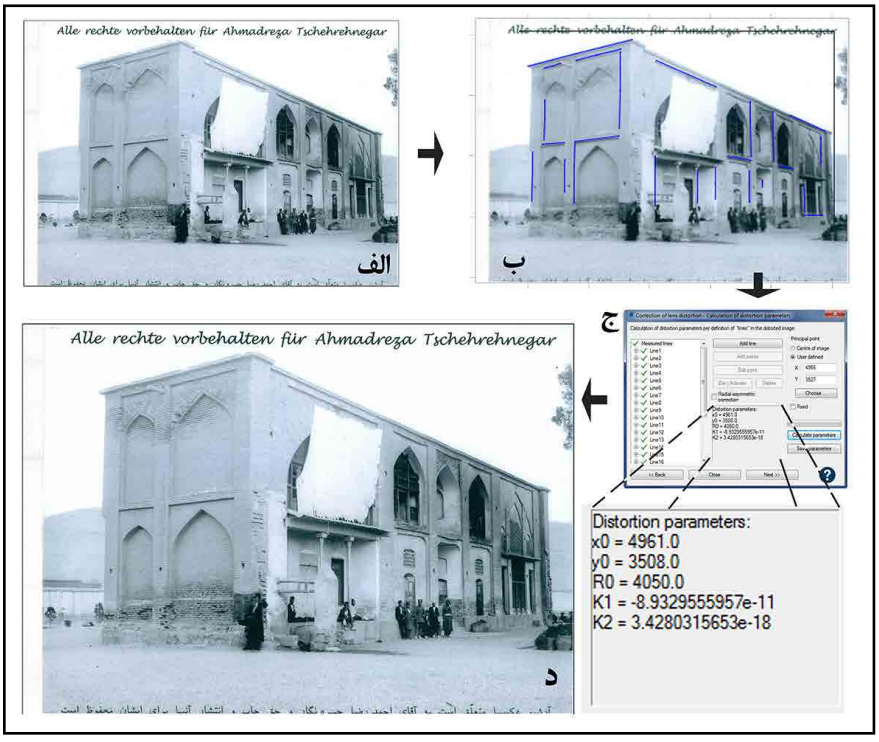
توجیه

کار وارد نمودن عکس‌های منتخب به نرم‌افزار فتوگرامتری Faro-As-Built و محاسبهٔ توجیه درونی دوربین و اصلاح اعوجاج عکس ناشی از لنز و اسکن در آن‌ها به‌صورت جداگانه انجام شده است. تصویر ۴، عکس منتخب شمارهٔ یک از آرشیو احمدرضا چهره‌نگار را نشان می‌دهد که با اعمال دستور حذف اعوجاج لنز به‌وسیلهٔ تعریف خطوط مستقیم افقی و عمودی درنهایت به عکسی بدون اعوجاج (دست‌کم به‌دلیل قدیمی بودن عکس با حداقل اعوجاج) تبدیل می‌شود. مؤلفه‌های توجیه لنز که در بخشِ ج تصویر ۴، بزرگ‌نمایی شده‌اند به این شرح هستند: x0 و y0 به‌ترتیب مختصات عکس برحسب پیکسل است. R0، شعاع صفر در منحنی اعوجاج است و K1 و K2 نیز پارامترهای اعوجاج شعاعی-متقارن هستند. مقادیر هر یک از مؤلفه‌ها در جدول ارائه‌شده در بخشِ ج تصویر ۴، آورده شده است. همان‌گونه که از نتیجه برمی‌آید این عکس به‌دلیل کیفیت مطلوب لنز، اعوجاج بسیاری اندکی داشته و در صورت دقت می‌توان عمودی‌تر شدن لبه‌های بیرونی حجم عمارت را تشخیص داد. مشابه همین‌کار نیز برای عکس منتخب دوم انجام‌شده که به‌طور خلاصه در تصویر ۵، نشان داده شده است. این عکس برخلاف نمونهٔ پیشین، اعوجاج قابل‌توجهی دارد که افزون‌بر ماهیت لنز دوربین می‌تواند ناشی از چاپ در کتاب و اسکن از روی آن نیز بوده باشد.

حال‌که اعوجاج‌های عکس‌ها حذف شده و به‌اصطلاح توجیه درونی انجام شده است می‌توان به تصحیح عکس‌ها براساس هندسهٔ بنا و نقاط مرجع پرداخت.

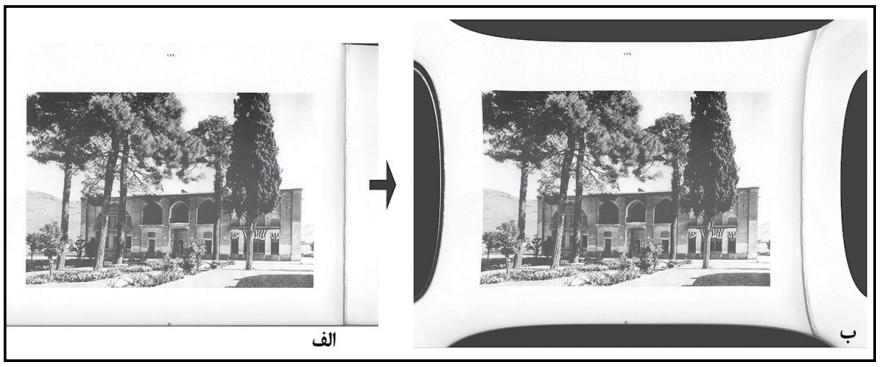
ازآنجاکه سندی مبنی‌بر معرفی اندازهٔ فضاها یا بخش‌های نما در دست نیست و نیز نقشهٔ تاریخی یا عکس هوایی از این بنا پیش از تخریب وجود ندارد؛ بنابراین استفاده از داده‌های موجود در خود عکس، راهنمای خوبی خواهد بود. در عکس منتخب اول، ضلع غربی، یعنی ضلع کوچک‌تر به‌خوبی قابل‌مشاهده است؛ در این ضلع آجرهای طاق‌نماهای بالایی کمابیش سالم، واضح و قابل‌شمارش هستند. برای به‌دست آوردن ابعاد آجرها راه‌حل مطمئن مراجعه به بنایی موجود و هم‌دوره با آن است. «عمارت دیوان‌خانه» بنایی مشابه و متعلق به کریم‌خان زند در شیراز است که می‌تواند مبنای خوبی باشد. اندازه‌گیری ابعاد آجرهای قدیمی دیوان‌خانه نشان‌دادند که هر آجر ۲۳ سانتی‌متر طول و ۵ سانتی‌متر ضخامت دارد. بندکشی افقی میان هر ردیف آجر برابر با ۲/۵ سانتی‌متر و ملاط عمودی بین آجرها نیز ۱/۵ سانتی‌متر است. با توجه به یکسان بودن دورهٔ ساخت این دو بنا، این اعداد برای محاسبهٔ ابعاد دو طاق‌نمای غربی یادشده استفاده گردید (طول طاق‌نماها برابر با ۴/۲۵ متر و عرض هرکدام به‌ترتیب ۳/۱۷ و ۱/۹۴ متر)؛ از این‌رو، نقاط بیرونی این طاق‌نما به‌عنوان نقاط مرجع و اندازه‌های محاسبه‌شده به‌عنوان فاصله‌های این نقاط برای تصحیح عکس منتخب اول به‌کار رفتند. از آنجاکه همهٔ این نقاط در یک صفحه هستند و پراکندگی مناسبی نیز دارند، می‌توان به مرحلهٔ بعدی، یعنی اندازه‌گیری و تحلیل رفت.

ازآنجاکه در هر دو عکس منتخب شمارهٔ یک و دو، امکان شمارش دقیق آجرها در نمای جنوبی ممکن نیست؛ بنابراین باید از راه دیگری کمک گرفت؛ گزینهٔ پیش‌رو محاسبهٔ تناسبات کلی نما خواهد بود تا بتوان از آن در فرآیند تصحیح به‌جای اعداد



◄ تصویر ۴. توجیه درونی دوربین و حذف اعوجاج لنز در عکس منتخب اول (الف: عکس اصلی؛ ب: اعمال دستور حذف اعوجاج لنز با تعریف خطوط مستقیم افقی و عمودی؛ ج. محاسبهٔ توجیه درونی و بزرگ‌نمایی مقادیر؛ د. عکس توجیه‌شده)، (نگارنده، ۱۴۰۰).

Fig 4. Interior orientation of the camera and removal of lens distortion in the first selected photo (A: Original photo; B: Applying the command to remove lens distortion by defining horizontal and vertical straight lines; C: Calculation of interior orientation and magnification of values; D: Justified photo) (Author, 2021).



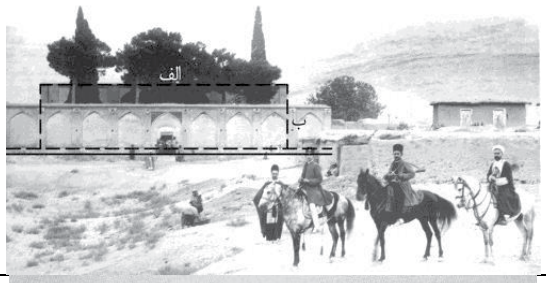
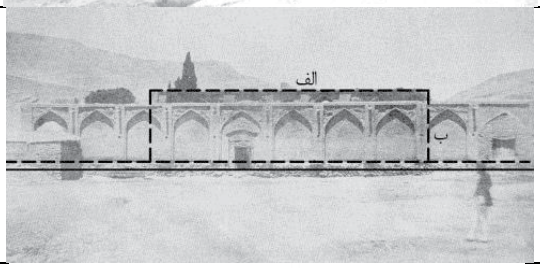
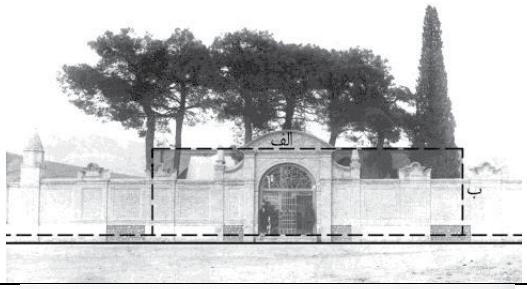
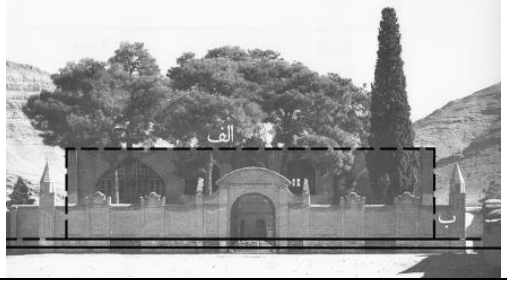
تصویر ۵. توجیه درونی دوربین و حذف اعوجاج لنز در عکس منتخب دوم (الف: عکس اصلی؛ ب: عکس توجیه‌شده)، (نگارنده، ۱۴۰۰).◄
Fig 5. Interior orientation of the camera and removal of lens distortion in the second selected photo (A: original photo; B: justified photo) (Author, 2021).

واقعی استفاده کرد. بدیهی است در این حالت عکس موردنظر، تصحیح‌شده، ولی فاقد مقیاس است. برای مقیاس‌دهی به آن می‌بایست از اندازه‌های به‌دست‌آمده از تصحیح عکس منتخب شمارهٔ یک بهره برد. جدول ۲، مجموعه‌ای از عکس‌هایی را نشان می‌دهد که کمابیش عمارت را به‌صورت نمای مسطح نشان می‌دهند. در این جدول، تناسبات کلی عمارت (نسبت طول به ارتفاع) محاسبه‌شده است. این عکس‌ها اصلاح‌نشده‌اند و توجیه درونی لنز در آن‌ها لحاظ نگردیده است؛ چراکه امکان مشاهده کامل و مناسب خطوط افقی و عمودی عمارت در آن‌ها ممکن نبوده و نیز به‌دلیل کیفیت پایین چاپ این عکس‌ها در منابع مورداستفاده، دقت لازم را برای فتوگرامتری نخواهند داشت. بیشتر اوقات در فرآیند مرسوم فتوگرامتری عکس‌های تاریخی نمی‌توان از این مرحله به‌عنوان توجیه نام‌برد، ولی از آنجاکه این داده‌ها برای دیگر بخش‌های موردنیاز هستند در این بخش آورده شده است. هدف از استخراج تناسبات کلی عمارت بدین‌روش، تنها به‌دست آوردن داده‌هایی است که می‌توانند برای بخش اصلی فتوگرامتری به‌عنوان داده‌های کنترل یا جانبی به‌کار آیند؛ میانگین تناسبات عمارت در این عکس‌ها برابر با ۳/۵۹ است.

اندازه‌گیری و تحلیل

برای تصحیح عکس ابتدا لازم است شبکهٔ اصلاح که یکی از قابلیت‌های نرم‌افزارهای فتوگرامتری است به عکس افزوده شود و با تغییر در نقاط چهارگانهٔ این شبکه، کاری کرد که هندسهٔ شبکهٔ اصلاح بر هندسهٔ پرسپکتیو بنا به‌طور کامل منطبق شود. دقت در این بخش بسیار مهم و کلیدی است (تصویر ۶). پس از انطباق شبکهٔ تصحیح برعکس، انتخاب نقاط مرجع و واردکردن طول و عرض (فاصلهٔ میان این نقاط) برای کار تصحیح ضروری است. این داده‌ها برمبنای نقاط مرجع وارد خواهند شد و توسط کاربر تعریف می‌شوند. برمبنای انطباق شبکهٔ تصحیح با داده‌های نقاط مرجع نوعی الگوریتم ریاضی برای دگردیسی شئ تنظیم می‌شود تا بتواند براساس نوعی نگاشت، مکان دقیق هر پیکسل از عکس را با مکان اصلاح‌شده پیوند دهد. همان‌گونه که پیش‌تر آمد، تمامی نقاط مرجع باید در یک صفحه باشند و این صفحه همان صفحهٔ اصلاح و نیز صفحه‌ای خواهد بود که داده‌های آن پس از اصلاح عکس متریک شده و قابل‌اندازه‌گیری هستند. صفحات دیگر چنین اعتباری را ندارند؛ بنابراین طاق‌های قوسی‌شکل داخلی در این فرآیند تصحیح نمی‌شوند.

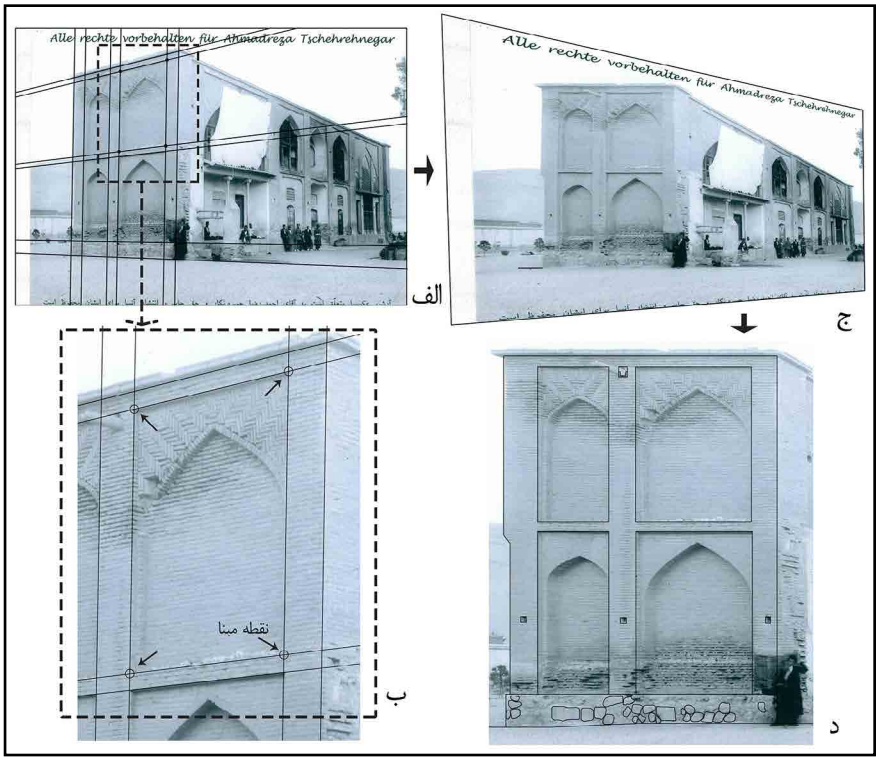
جدول ۲. تناسبات کلی عمارت در عکس‌های منتخب از عمارت سعدیه (نگارنده، ۱۴۰۰).▼
Tab. 2. General proportions of the mansion in selected photos of Saadieh mansion (Author, 2021).

ردیف	دوره	عکاس (تاریخ)	عکس	تناسبات نمای جنوبی	منبع عکس
۱	قاجار	آرشیو منوچهر چهره‌نگار		۳/۵۸	(صانع، ۱۳۸۲: ۱۲۸)
۲	قاجار (ناصری)	لوئیجی پِشِه (۱۲۷۴ق)		۳/۵۳	(سمسار و سراییان، ۱۳۹۰: ۲۹۹)
۳	اوایل دورهٔ پهلوی	آرشیو منصور صانع		۳/۵۹	(صانع، ۱۳۸۲: ۱۳۰)
۴	اوایل دورهٔ پهلوی	آرشیو منصور صانع		۳/۶۸	(صانع، ۱۳۹۶: ۸۷)

تصویر ۶: ج، عکس تصحیح‌شده به‌همین روش را نشان می‌دهد. تمامی خطوطی که در تصویر ۶: د ترسیم‌شده‌اند، افقی یا عمودی هستند و مستقیماً از روی عکس رسم گردیده‌اند. نتایج این بخش افزون‌بر عرض عمارت (۷/۴۹ متر) ارتفاع بنا (۱۰/۲۱ متر) را نیز نشان می‌دهد.

برای تصحیح نمای جنوبی نیز مشابه همین مراحل طی شده است. با این تفاوت که در این‌نما به‌دلیل بیرون‌زدن دو جرز دیوارهای جانبی، صفحهٔ طاق‌نماها و صفحهٔ حاصل از جرزهای دیوار برهم منطبق نیستند؛ بنابراین، این دو صفحه

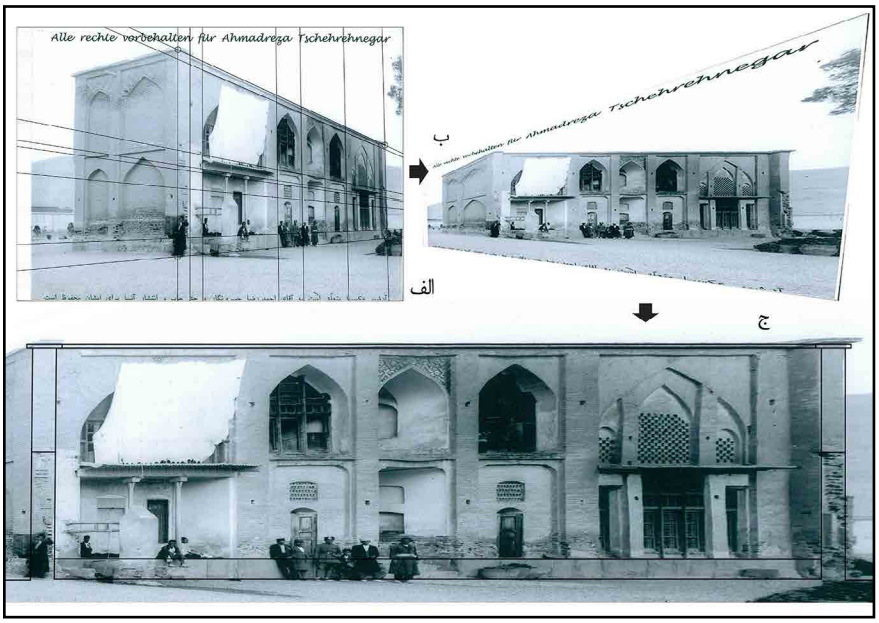
می‌بایست به‌طور جداگانه تصحیح شوند؛ صفحهٔ نخست، صفحه‌ای است که جرزهای دیوارها در آن واقع هستند و صفحهٔ دوم صفحهٔ طاق‌نماها یا صفحهٔ نمای جنوبی است (تصویر ۷). نقاط مرجع، چهارگوشهٔ نما هستند که در جدول ۱ نیز تناسبات برمبنای همین نقاط سنجش شده است. با داشتن این نقاط و با در دست داشتن ارتفاع عمارت از بخش پیشین، می‌توان فرآیند تصحیح را انجام و مقیاس این ترسیم را نیز معین نمود. نتیجهٔ کار تا اینجا استخراج کلیات نمای جنوبی است، ولی همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مکان قرارگیری دیگر عناصر به‌علت منطبق نبودن بر شبکهٔ تصحیح قابل استناد نیستند؛ به‌عنوان نمونه، تورفتگی پنجره‌ها و یا افراد موجود در تصویر حالت دگرگون‌شده‌ای یافته‌اند که صحت ندارند؛ بنابراین برای یافتن مکان دقیق و ابعاد درست جزئیات نما باید کار تصحیح را برروی صفحهٔ آن‌ها انجام‌داد. برای این‌کار محل نقاط مرجع براساس پرسپکتیو عمارت به صفحهٔ طاق‌نماها منطبق شدند و فرآیند تصحیح عکس و ترسیم بر روی آن‌ها نیز انجام شد (تصویر ۸). نتیجهٔ کار جزئیات اصلی نماست که به‌همراه کلیات نمای جنوبی (۳۵/۴۴ متر) نما را کامل می‌کند.



تصویر ۶. فرآیند تصحیح ضلع غربی عکس منتخب شمارهٔ یک (الف: افزودن شبکهٔ تصحیح؛ ب: الصاق نقاط مرجع؛ ج: تصحیح عکس در صفحهٔ موردنظر؛ د: ترسیم بر روی عکس تصحیح‌شده)، (نگارنده، ۱۴۰۰). ◄

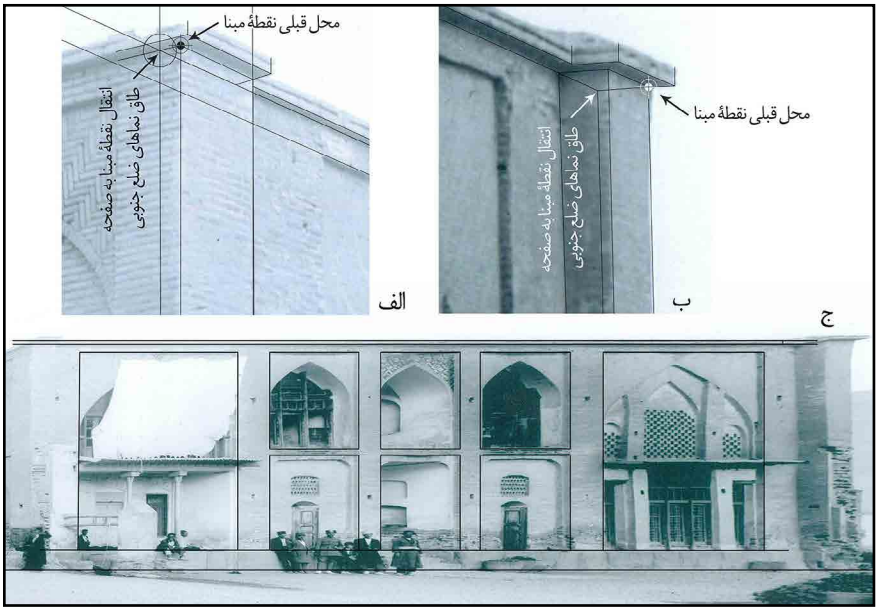
Fig 6. The process of rectifying the western side of the selected photo number one (A: adding the correction grid; B: attaching the reference points; C: rectifying the photo on the desired plane; D: drawing on the rectified photo), (Author, 2021).

حال‌که نمای جنوبی و غربی براساس عکس منتخب شمارهٔ یک استخراج شد، لازم است تا برای سنجش اعتبار این‌روش و مراحل آن و هم‌چنین ترسیم جزئیات بیشتری از نما، از عکس منتخب شمارهٔ دو برای تصحیح و مقایسه استفاده نمود. به‌دلیل تکرار مراحل، از بیان توضیحات این بخش صرف‌نظر می‌گردد. همان‌گونه



◄تصویر ۷. فرآیند تصحیح ضلع جنوبی (صفحهٔ جرزهای جانبی) عکس منتخب شمارهٔ یک (الف: افزودن شبکهٔ تصحیح و الصاق نقاط مرجع؛ ب: تصحیح عکس در صفحهٔ موردنظر؛ ج: ترسیم بر روی عکس تصحیح‌شده).

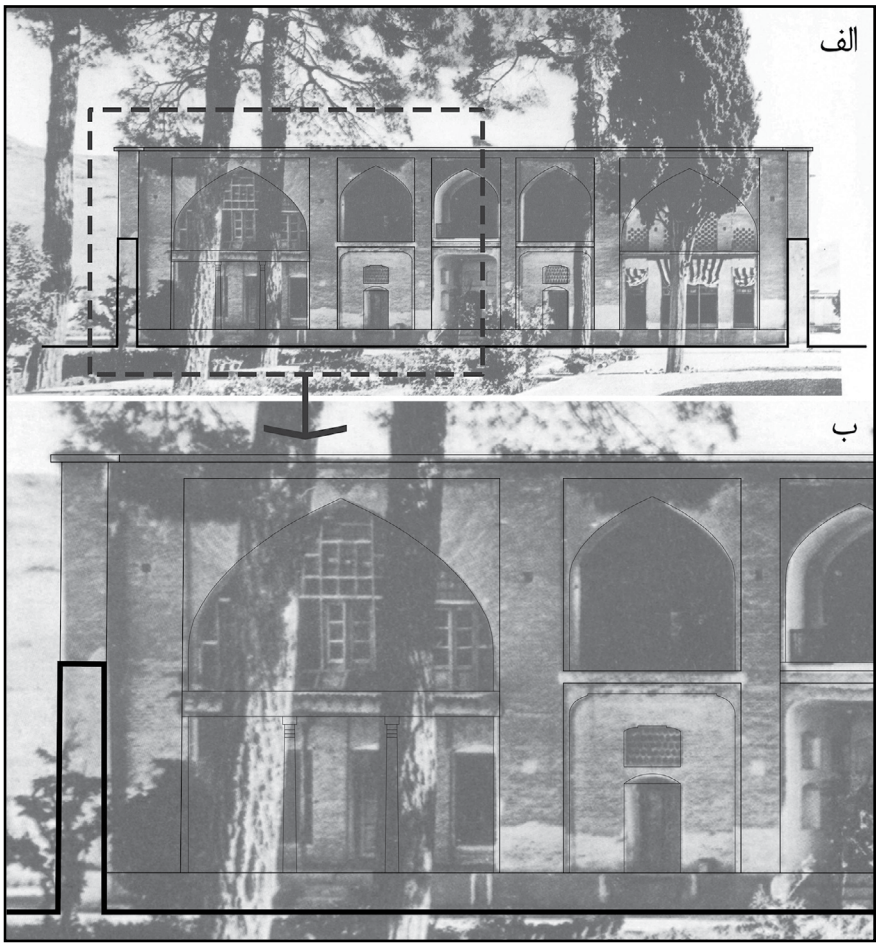
Fig 7. The process of rectifying the south side (the plane of the side walls) of the selected photo number one (A: adding the correction grid and attaching the reference points; B: rectifying the photo on the desired plane; C: drawing on the rectified photo) (Author, 2021).



◄تصویر ۸. فرآیند تصحیح ضلع جنوبی (صفحهٔ طاق‌نماها) عکس منتخب شمارهٔ یک (الف و ب: انتقال نقاط مرجع به صفحهٔ طاق‌نماها؛ ج: عکس تصحیح‌شده به‌همراه ترسیم)، (نگارنده، ۱۴۰۰).

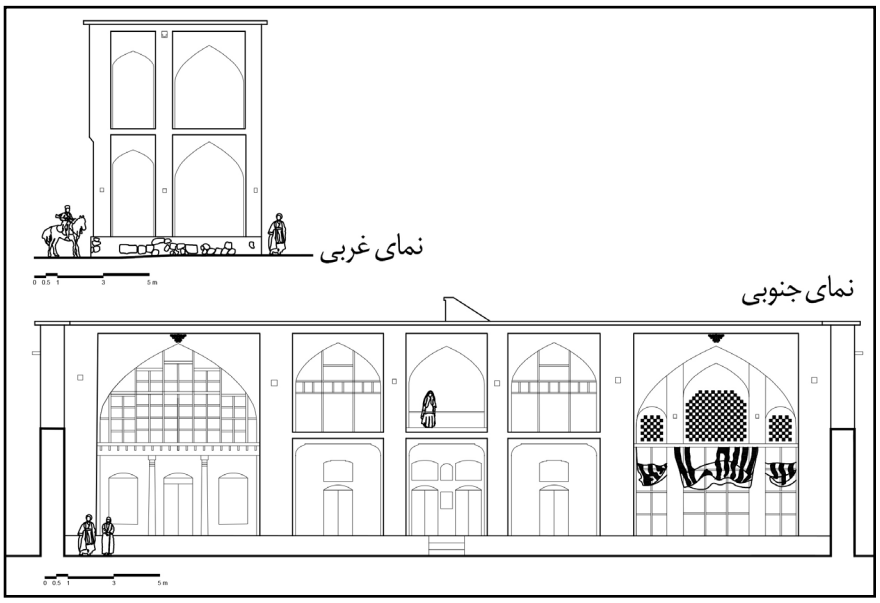
Fig 8. The process of rectifying the south side (the arched facades) selected photo number one (A and B: transfer of reference points to the arched facades; C: Rectified photo with drawing), (Author, 2021).

که در تصویر ۹، نشان داده شده است، داده‌های مستخرج از مراحل پیشین به‌خوبی برروی عکس تصحیح‌شده از این‌مرحله منطبق هستند. این موضوع گواهی بر صحت و دقت نقاط مرجع و روش فتوگرامتری استفاده شده است. در این‌مرحله جزئیات نما که در حالت پیشین به‌دلیل فاصلهٔ زیاد صفحهٔ این عناصر با صفحهٔ تصحیح قابل استناد نبودند، قابل افزودن به نماست. ترکیب همهٔ این داده‌ها، نماهای متریک عمارت تاریخی سعدیه را به‌دست می‌دهند (تصویر ۱۰). انطباق نمای مستخرج از عکس منتخب شمارهٔ یک برعکس تصحیح‌شدهٔ شمارهٔ دو، صحت فرآیند تصحیح عکس‌ها را نشان می‌دهد؛ چراکه در غیراین‌صورت می‌بایست تفاوتی میان آن وجود داشته باشد.



تصویر ۹. الف: تصحیح عکس منتخب شمارهٔ دو و ترسیم بر روی عکس؛ ب: بزرگ‌نمایی طاق‌نماهای بخش غربی نمای جنوبی (نگارنده، ۱۴۰۰). ◄

Fig 9. A: Rectifying the selected photo number two and drawing on the photo; B: Magnification of the arches of the western part of the southern facade (Author, 2021).



تصویر ۱۰. نماهای متریک استخراج‌شده به‌روش فتوگرامتری عکس‌های منتخب از عمارت تاریخی سعدیه (نگارنده، ۱۴۰۰). ◄

Fig 10. Metric facades extracted by photogrammetric method of selected photos of Saadiyeh historical mansion (Author, 2021).

گونه‌شناسی خطاها در فرآیند فتوگرامتری عکس‌های تاریخی

سنجش دقت تابعی از خطاهایی است که می‌توان آن‌ها را به‌شرح زیر دسته‌بندی نمود.

الف) خطاهای رقومی‌سازی: این خطاها ناشی از کیفیت پایین یا نامناسب عکس رقومی‌شده بازمی‌گردد. کیفیت نامناسب می‌تواند لبه‌های بنا، خطوط نما و یا نقاط مرجع را به‌خوبی نشان ندهد و بنابراین در فرآیند انتخاب و معرفی به نرم‌افزار دقت کافی لحاظ نگردد. ازآنجاکه عکس تصحیح‌شده نیز برای ترسیم جزئیات مورداستفاده است؛ بنابراین کیفیت پایین عکس اصلی می‌تواند دقت این ترسیم‌ها را نیز کاهش دهد.

ب) خطاهای انتخاب نقاط مرجع: انتخاب نقاط مرجع باید در یک صفحه و با پراکندگی مناسبی در صفحهٔ تصحیح باشند. اگر این نقاط سطح مناسبی از صفحهٔ تصحیح را شامل نشوند، خطاهای جزئی در فاصله‌های کوچک می‌تواند به تفاوت‌های بزرگ‌تری در ابعاد بنا منتهی شود.

ج) خطاهای تخمین و محاسبهٔ اندازه‌های مرجع: در فتوگرامتری عکس‌های تاریخی بیشتر اوقات بنای اصلی ازمیان‌رفته است. در این حالت استخراج اندازه‌ها براساس مقیاس‌های انسانی، عناصر معماری، بناهای موجود قابل‌دسترس و مانند آن هرکدام خطاهایی دربر دارد. در نمونهٔ موردمطالعه در این پژوهش، ۱۰٪ خطا در ضخامت بندکشی‌های افقی در بنای واقعی، حداکثر حدود ۳٪ به ارتفاع نهایی بنا می‌افزاید. این خطاها اجتناب‌ناپذیرند، ولی در مقایسه با برداشت دستی از بنای موجود نیز چندان بزرگ نیستند و در مقایسه با روش‌های استخراج داده‌ها از روی عکس به‌وسیلهٔ اصول ترسیم پرسپکتیو ناچیز هستند. چنین خطاهایی اغلب در تناسبات بنا اثر بسیار ناچیزی دارند؛ چراکه اختلاف بندکشی آجرها در هر دو ضلع اعمال می‌شود و این موضوع نمی‌تواند تناسبات کلی نما را مختل نماید.

در این پژوهش از کنترل ابعاد بخش‌های گوناگون نما براساس عکس‌های نمای نزدیک از عمارت نیز جهت کنترل صحت و دقت کار استفاده شده است که به‌دلیل مجال اندک، در متن کنونی ارائه نشده‌اند. این موارد در دیگر نمونه‌های موردی نیز قابل‌استفاده هستند. آزمون‌وخطا و تکرار فرآیند با نقاط مرجع و اندازه‌های محاسبه‌شده از روش‌های گوناگون می‌تواند درنهایت به ارتقای دقت نتیجهٔ نهایی بیانجامد. در برخی موارد، یافتن میانگینی از حالات مختلف نیز راه‌حلی مطمئن به‌دست می‌دهد؛ از این‌روی، برای هر پروژه‌ای لازم است راه‌های خلاقانه و سودمندی متناسب با ماهیت آن اتخاذ شود.

نتیجه‌گیری

امروزه با توسعهٔ فناوری‌های رقومی، ابزارهای تازه‌ای برای تصحیح عکس‌های تاریخی فراهم آمده که می‌توانند دریافت دقیق‌تری از میراث معماری را پیشِ‌روی پژوهشگران قرار دهند؛ به‌طورکلی فتوگرامتری تک‌عکسِ تصحیح‌شده در خوانش عکس‌های تاریخی بر پایهٔ ساختار هندسی و قیود شکلی معماریِ بنا پایه‌گذاری

شده است که با بهره‌گیری از شیوهٔ تحلیلی مبتنی‌بر محاسبات ریاضی، رویکردی پارامتریک را به‌کار می‌گیرد تا اعوجاج لنز یا اسکن را رفع و به‌این‌ترتیب، عکسی توجیه‌شده برای فرآیند اصلاح تولید نماید که به‌کار بازسازی تصویری و تهیهٔ اسناد معماری از بناهای تاریخی (به‌ویژه تخریب‌شده) خواهد آمد. در این پژوهش نموداری سه مرحله‌ای شامل «پیش‌فرآیند»، «توجیه» و «اندازه‌گیری و تحلیل» برای فتوگرامتری عکس‌های غیرمتریک تاریخی در مستندنگاری معماری ارائه شد که شامل معرفی خطاهای احتمالی در هر مرحله و راه‌حل‌های اصلاح آن نیز می‌گردد. این خطاها در کل، در سه دسته شامل «خطاهای رقومی‌سازی»، «انتخاب نقاط مرجع» و «خطاهای تخمین و محاسبهٔ اندازه‌های مرجع» قابل‌طبقه‌بندی هستند که خطای نخست را می‌توان «ابزار محور» و دو مورد دیگر را باید «کاربر محور» دانست.

اگرچه خطاهای ناشی از «انتخاب نقاط مرجع» با افزایش مهارت و تجربهٔ کاربر و تکرار فرآیند فتوگرامتری با تعریف نقاط مرجع گوناگون به‌اندازهٔ زیادی قابل‌رفع است، ولی «خطاهای تخمین و محاسبهٔ اندازه‌های مرجع» را باید بنیادی‌ترین ایرادی دانست که می‌تواند در مسیر کار رخ‌داده و دستاوردها را به‌کل دگرگون نماید. این‌مورد به مهارت، دانش و خلاقیت به‌طور هم‌زمان نیاز دارد؛ به‌طورکلی اشراف به هندسه و تناسبات در معماری ایرانی، آشنایی با سبک‌ها و اسلوب‌ها در نماسازی بناها و درک درست از ساختار فضایی معماری بنا در کنار بررسی متون و مستندات تاریخی موجود می‌توانند مهارت‌های پایه برای حل این خطاها تلقی شوند. بهره‌گیری از «تکرار فرآیند با استفاده از روش‌های تخمین گوناگون»، استفاده از «داده‌های موازی در سایر عکس‌های موجود» و استفاده از «میانگین به‌عنوان روشی برای یافتن بیشترین دقت در اندازه‌های مرجع» -هنگامی‌که مستندات از اعتبار مشابهی برخوردار هستند- می‌توانند تاکتیک‌هایی باشند که خطاها را به کمترین مقدار قابل‌قبول خود برسانند. این موارد در نمونهٔ موردی عمارت تاریخی سعدیه در شیراز، مورد آزمون قرار گرفتند؛ نتایج این‌روش در نمونهٔ موردی نشان‌داد که مراحل گوناگون نمودار ارائه‌شده، قابل‌اتکا و تکرار در دیگر نمونه‌ها است و نتایج آن از صحت و دقت مناسبی برخوردار است. پژوهش‌های آتی می‌توانند روش پیشنهادی در این پژوهش را برروی دیگر عکس‌های تاریخی اعمال نمایند. می‌توان با فتوگرامتری عکسی تاریخی از یک بنای موجود بدون مراجعه به خود بنا، دقت روش‌های استخراج نقاط مرجع و اندازه‌های مبنا را محاسبه و یا با تکرار موارد، اصول راهنمایی دقیق‌تر تنظیم کرد. هم‌چنین می‌توان با فتوگرامتری عکس‌های تاریخی از فضاهای شهری (میدان‌ها و گذرها)، اسناد دقیقی از آن‌ها فراهم آورد یا فرضیه‌ها و پرسش‌هایی تازه‌ای طرح یا اثبات نمود. امید می‌رود دیگر پژوهش‌ها به این موارد بپردازند.

پی‌نوشت

1. Albrecht Meydenbauer
2. Iconometry

3. Plane-table Photogrammetry
4. Aimé Laussedat
5. Collinearity Equations
6. Interior and Exterior Orientation
7. Single-image Method
8. Two-image Method
9. Rectification
10. Orthogonal Projection
11. Orthogonal Image
12. Projective Rectification
13. Polynomial Rectification
14. Unwrapping of Developable Surfaces
15. Differential Rectification

کتابنامه

- حناچی، پیروز؛ محمود کلایه، سعید؛ و غلام‌نژاد، محمد، ۱۳۹۵، اصول و روش‌های مستندسازی و مستندنگاری بناها و محوطه‌های تاریخی. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

- سمسار، محمدحسن؛ و سراییان، فاطمه، ۱۳۹۰، کاخ گلستان (آلبوم‌خانه) فهرست عکس‌های برگزیدهٔ عصر قاجار. تهران: آبان و زریران و سازمان میراث‌فرهنگی، صنایع‌دستی و گردشگری.

- صانع، منصور، ۱۳۸۲، به یاد شیراز. چاپ ۲. ناشر: منصور صانع.

- صانع، منصور، ۱۳۹۶، شیراز روزگار جوانی. ناشر: منصور صانع.

- موسوی، سیّده بشری، ۱۳۹۹، «بازنمایی بنای قاجاری مدرسهٔ دارالفنون با تکیه‌بر اسناد تصویری». صفه، ۳۰ (۸۸): ۱۰۷-۱۴۰.

- وحدت‌زاده، وحید، ۱۳۸۷، «ریخت‌شناسی فضاهای شهری با اعمال اصول پرسپکتیو بر اسناد تصویری». صفه، ۱۷ (۴۷): ۷۹-۹۰.

- Akboy-Ilk, S., 2016, “The nature of drawing in the changing culture of architectural documentation”. *Journal of Architectural and Planning Research,* 33: 29-44.

- Andreas, G., 2019, “CIPA slides on architectural photogrammetry: applying contemporary technologies from its early years”. In: E. Stylianidis (Ed.), *CIPA - Heritage Documentation 50 Years: Looking Backwards. CIPA:* 13-43.

- Badekas, J., 1975, “Recent developments of restitution methods in architectural photogrammetry”. *Photogrammetria,* 30: 115-126.

- Bräuer-Burchardt, C. & Voss, K., 2001, *Facade Reconstruction of Destroyed Buildings Using Historical Photographs*. XVIII CIPA Symposium, Postdam, Germany.

- Chengshuang, L.; Rodehorst, V. & Wiedemann, A., 1997, “Digital Image Processing For Automation In Architectural Photogrammetry”.

Second Turkish-German Joint Geodetic Days at Berlin, May 27-28-29 1997 Istanbul Technical University, (Grundig, A. L., eds.): 541-548.

- Collier, P., 2020, "Photogrammetry and Aerial Photography". *International Encyclopedia of Human Geography* (Second Edition), (Kobayashi, A.) ed. Oxford: Elsevier.

- Crankshaw, N. M., 1990, "CARPA: Computer Aided Reverse Perspective Analysis". *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology,* 22: 117-129.

- Discamps, E.; Muth, X., Gravina, B.; Lacrampe-Cuyaubere, F.; Chadelle, J.-P.; Faivre, J.-P. & Maureille, B., 2016, "Photogrammetry as a tool for integrating archival data in archaeological fieldwork: Examples from the Middle Palaeolithic sites of Combe–Grenal, Le Moustier, and Regourdou". *Journal of Archaeological Science: Reports*, 8: 268-276.

- Egels, Y. & Kasser, M., 2001, *Digital Photogrammetry.* London, Taylor & Francis Inc.

- Garcia-Gago, J.; Gomez-Lahoz, J.; Rodríguez-Mendez, J. & González-Aguilera, D., 2014, "Historical Single Image-Based Modeling: The Case of Gobierna Tower, Zamora (Spain)". *Remote Sensing,* 6: 1085-1101.

- Hemmleb, M. & Wiedemann, A., 1997, "Digital Rectification And Generation Of Orthoimages In Architectural Photogrammetry". *CIPA International Symposium, Göteborg, Sweden. IAPRS*: 261-267.

- Hemmleb, M., 1999, "Digital Rectification Of Historical Images". *CIPA International Symposium,* Olinda, Brasil: 1-3.

- Heuvel, F. V. D., 2001, "Reconstruction from a single architectural image from the meydenbauer archives. *XVIII CIPA Symposium,* Postdam, Germany.

- Karras, G. E. & Petsa, E., 1999, "Metric Information From Uncalibrated Single Images". *CIPA International Symposium.* Olinda, Brasil.

- Luhmann, T.; Robson, S.; Kyle, S. & Harley, I. A., 2011, *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*. Scotland, UK, Whittles Publishing.

- Mann, F. M., 1987, "Photo Drawings: A Practical Alternative". *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology,* 19: 24-37.

- Niebling, F.; Maiwald, F.; Munster, S.; Bruschke, J. & Henze, F., 2018, "Accessing Urban History using Spatial Historical Photographs". *2018 3rd Digital Heritage International Congress (DigitalHERITAGE) held jointly with 2018 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia*.

- Ordóñez, C.; Martínez, J.; Arias, P. & Armesto, J., 2010, "Measuring

building façades with a low-cost close-range photogrammetry system". *Automation in Construction,* 19: 742-749.

- Paiz Reyes, E.; Bredif, M. & Christophe, S., 2020, "Geometric Distortion of Historical Images For 3d Visualization". *ISPRS Annals of the Photogrammetry,* Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

- Sapirstein, P., 2016, "Accurate measurement with photogrammetry at large sites". *Journal of Archaeological Science,* 66: 137-145.

- Styliadis, A. D., 2008, "Historical photography-based computer-aided architectural design: Demolished buildings information modeling with reverse engineering functionality". *Automation in Construction,* 18: 51-69.

- Stylianidis, E., 2020, *Photogrammetric Survey for the Recording and Documentation of Historic Building*. Switzerland, Springer.

- Torlegård, K., 1988, "Transference of methods from analytical to digital photogrammetry". *Photogrammetria,* 42: 197-208.

- Waldhaeusl, P., 1994, "Photogrammetric Heritage Recording: Standard and Emergency Approaches". *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology,* 26: 20-22.

- Wiedemann, A., 1996, "Digital Orthoimages in Architectural Photogrammetry Using Digital Surface Models". *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,* 31: 605-609.

- Wiedemann, A.; Hemmleb, M.; Albertz, J. & Wg, C., 2000, *Reconstruction Of Historical Buildings Based On Images From The Meydenbauer Archives*. IAPRS, Amsterdam.

-Zhizhuo, W., 1996, "On the renaming of the discipline 'photogrammetry'". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,* 51: 1-4.