



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=en>
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 33, Issue 4, No.88, Winter 2022, pp. 1- 4
Received: 21/05/2022 Accepted: 17/08/2022

Analysis and Comparison of the Conventional Methods of Georeferencing of Aerial Photos

Mohsen Bagheri Bodaghabadi¹ *, Fahemeh Ebrahimi Meymand²

1- Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran

m.baghery@areeo.ac.ir

2- PhD Candidate, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran

meymand1949@gmail.com

Abstract

Aerial photos are the basis of many researches, both applied and executive works, related to the earth. Applications of aerial photos, especially for GIS-based analysis, aerial photo georeferencing, and/or geometric correction are essential. Various methods have been proposed for georeferencing. The aim of this study was to achieve a suitable simple method with a low cost and acceptable accuracy. For this purpose, conventional georeferencing methods, including first- to third-order polynomial transformations, spline transformation, projective transformation, and orthorectification transformation were used in ILWIS3.3 and ArcGIS10.7 for two areas (flat area of Shahrekord and rugged area of Chaleshtor). Errors of the different methods were analyzed based on minimum and maximum errors, Mean of Error (ME), standard deviation, and Root Mean Square Error (RMSE). The results showed that the errors of the varied methods had fewer changes for the flat compared to the rugged area. Yet, with the increasing relief of land surface, the errors increased sharply and showed a significant difference. Based on the results, the most accurate georeferencing method was orthorectification method (ME=35 and RMSE=38). However, considering the time and data required for the orthorectification method, the most suitable georeferencing method was identified as the spline method, which had acceptable accuracy, but not the problems of the orthorectification method, such as marginal information of the aerial photos and digital elevation models.

Keywords: geometric correction, distortion, displacement, Geographical Information System (GIS)

Introduction:

The potential of aerial photographs as a tool in the research of land resources has long been

*Corresponding Author

Bagheri Bodaghabadi, M., & Ebrahimi Meymand, F. (2022). Analysis and comparison of conventional methods of georeferencing of aerial photos. *Geography and Environmental Planning*, 33 (4), 1 -4.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<https://doi.org/10.22108/gep.2022.133652.1524>



20.1001.1.20085362.1401.33.4.5.9

recognized. It has been the basis of many applied types of research, including soil survey studies. Despite the informative potential of aerial photographs, so far, their usage has been scarce due to the processing difficulty related to the lack of some key information. Fortunately, a recently introduced technology, such as Geographic Information System (GIS), has shown to be able to overcome the classic photogrammetric limitations. Generally, these photos must be converted from analog to digital forms to be used as a basis for mapping of soil resources. Thus, they have to be georeferenced and then imported into GIS. However, the accuracy of this process is very important due to the nature of aerial photographs and distortion caused by moving the phenomena to their actual positions. Therefore, the research design achieved an acceptable method of georeferencing with high accuracy and low cost, besides not being time-consuming.

Materials and Methods:

For this purpose, two study areas were selected from the roughness point of view (a flat area and a hilly area). Then, 6 transformation methods were applied for georeferencing of aerial photographs, including first-, second-, and third-order polynomial transformations, projective transformation, spline transformation, and orthorectification. Afterwards, 15 ground control points and 15 specific points on the aerial photographs were selected for measuring the error values. They included the points that were clearly and accurately recognizable on both the aerial photographs and Google Earth images, such as roads, buildings, waterways, peaks, etc. The coordinates of all the points were obtained based on the Universal Transverse Mercator (UTM) coordinate system using Google Earth images. The measurement error for each of these points was obtained based on the Euclidean distance between each point on the georeferenced aerial photographs and the Google Earth images. Finally, Descriptive statistics, such as minimum and maximum errors, Mean of Error (ME), standard deviation, and Root Mean Square Error (RMSE) were utilized to compare the errors of the 6 used georeferencing methods and introduce the best one. Georeferencing was done by using ILWIS 3.3 and ArcGIS10.7 and the calculations were performed via Excel.

Results and Discussion:

The results revealed that the errors of the different methods had fewer changes for the flat compared to the rugged area, but with the increasing relief of land surface, the errors increased sharply and showed a significant difference. Based on the results, orthorectification was the most accurate method of transforming the aerial photographs into the ground coordinate system (ME=35 and RMSE=38). However, this method required many data and was a time-consuming and costly method. Therefore, the most suitable approach to transforming the aerial photographs into the ground coordinate system, especially when there was not enough information and time for orthorectification, could be the spline method, which had acceptable accuracy for both flat and uneven areas.

References:

- Bannari A., Karl S., Catherine Ch. and Shahid Kh. (2015). Spatial Variability Mapping of Crop Residue Using Hyperion (EO-1) Hyperspectral Data. *Remote Sensing*, 7, 8107-8127.
- Casson, B., Delacourt, C., Baratoux, D., & Allemand, P. (2003). Seventeen years of the "La Clapiere" landslide evolution analysed from ortho-rectified aerial photographs. *Engineering Geology*, 68, 123–139.

- Chen, J. J., Huang, C. L., Wu, Y. G., & Wu, P. H. (2021). Influence Factors of 3D Modeling with Aerial Images. *International Journal on Computer, Consumer and Control*, 10 (2), 1-11.
- Chintan . D ., Rahul . J., Srivastava. S., (2015). A Survey on geometric correction of satellite imagery. *International journal of computer applications*, 116 (12).
- Hackeloeer, A., Klasing, K., Krisp, J. M., & Meng, L. (2014). Georeferencing: a review of methods and applications. *Annals of GIS*, 20(1), 61-69.
- Karsli, F., & Dihkan, M. (2010). Determination of geometric deformations in image registration using geometric and radiometric measurements. *Scientific Research and Essays* 5(3), 260-274.
- Lee, H.L., Beng, Y.L., Yin, C.W., & Wai, S.C. (2013). Aerial Images Rectification Using Non-parametric Approach. *Journal of Convergence* 4(2), 15-21.
- Liu D, Zhou G, Huang J, Zhang R, Shu L, Zhou X, Xin CS. (2019). On-Board Georeferencing Using FPGA-Based Optimized Second-Order Polynomial Equation. *Remote Sensing*, 11(2):124. <https://doi.org/10.3390/rs11020124>
- McNish, I. G., & Smith, K. P. (2022). Oat crown rust disease severity estimated at many time points using multispectral aerial photos. *Phytopathology*, 112(3), 682-690.
- Pha S.H. and Takeuchi W. (2017). Effect of GCPs in distribution and location on geometric correction of corona satellite image. *Coordinate Magazine*, XIII(07), 14-19.
- Powers, P. S., Chiarle, M., & Savage, W. Z. (1996). A digital photogrammetric method for measuring horizontal surficial movements on the Slumgullion earthflow, Hinsdale County, Colorado. *Computers and Geosciences*, 22, 651–663.
- Richards, J. A., & Jia, X. (1999). *Remote sensing digital image analysis. An introduction*. Berlin: Springer.
- Riquelme A., Soldato M. D., Tomás R., Cano M., Bordehore L. J. and Moretti S. 2019. Digital landform reconstruction using old and recent open access digital aerial photos. *Geomorphology*, 329, 206-223.
- Rocchini D., A. Di Rita, 2005, Relief effects on aerial photos geometric correction. *Applied Geography*, 25, 159–168.
- Rossiter, D. G., and Tomislav Hengl. (2004). Technical note: *Creating geometrically-correct photo-interpretations, photomosaics, and base maps for a project GIS*. Enschede, NL: ITC, Department of Earth System Analysis.
- Russ, J. C. (2002). *The image processing handbook* (3rd ed). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Sameen M. I., Pradhan B., Aziz O. S. (2018). "Classification of Very High-Resolution Aerial Photos Using Spectral-Spatial Convolutional Neural Networks", *Journal of Sensors*, 2018, 1-12.
- Sempio, J. N. H., Aranas, R. K. D., Lim, B. P., Magallon, B. J., Tupas, M. E. A., and Ventura, I. A. (2019). Assessment of different image transformation methods on diwata-1 smi images using structural similarity measure, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*, XLII-4/W19, 393–400, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W19-393-2019>.
- Tao, C.V.; Hu, Y. (2001). Use of the Rational Function Model for Image Rectification. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27(6), 593–602. doi:10.1080/07038992.2001.10854900.
- Toutin T. (2004). Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods, *International Journal of Remote Sensing*, 25(10), 1893-1924
- Wang M., J. Hu, M. zhou, J.M. Li, Z. Zhang. (2013). Geometric Correction Of Airborne Linear Array Image Based On Bias Matrix. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Hannover Workshop, 21 – 24 May, Hannover, Germany.

Figures and Tables

- Fig. 1: Study areas and locations of the aerial photos of Shahrekord and Chaleshtar
- Fig. 2: A 3-dimensional (south to north) view of the aerial photos of the relief areas Shahrekord (top) and Chaleshtar (bottom)
- Fig. 3: The original aerial photograph of Shahrekord Area with ground control points (triangles) and error measurement points (circles)
- Fig. 4: The original aerial photograph of Chaleshtar Area with ground control points (triangles) and error measurement points (circles)
- Table 1: Error calculation by affine (first-order) transformation method for the aerial photos of Shahrekord
- Table 2: Measured error statistics for the aerial photos of Shahrekord
- Table 3: Measured error statistics for the aerial photos of Chaleshtar
- Fig. 5: The effects of the different georeferencing methods on the aerial photos of Shahrekord (Transformations: 1) affine (first order); 2) second order; 3) third order, 4) projective; 5) spline; and 6) orthorectification with first order)

تجزیه و تحلیل و مقایسه روش‌های مرسوم زمین مرجع کردن عکس‌های هوایی

محسن باقری بداغ آبادی*، استادیار موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
m.baghery@areeo.ac.ir
فاطمه ابراهیمی میمند، دانشجوی دکتری موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
meymand1949@gmail.com

چکیده

عکس‌های هوایی برای سالیان متمادی، پایه و اساس بسیاری از پژوهش‌های کاربردی انجام‌شده بر روی منابع سرزمین، از جمله مطالعات خاک‌شناسی بوده‌اند. هم‌زمان با پیشرفت‌های فناوری و ورود سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی به مطالعات سرزمین به منظور تجزیه و تحلیل‌های جغرافیایی، زمین مرجع کردن عکس‌های هوایی در این سامانه‌ها مورد توجه قرار گرفت. درست و دقیق انجام‌شدن این فرایند، به دلیل ماهیت عکس‌های هوایی، اعوجاج و جابه‌جایی پدیده‌ها نسبت به موقعیت واقعی آنها بسیار ضروری و مهم است. بر این اساس، هدف از این پژوهش، دستیابی به روشی مناسب برای زمین مرجع کردن عکس‌های هوایی است که افزون بر ساده و کم‌هزینه بودن، با دقت باشد. برای این منظور، روش‌های مرسوم زمین مرجع کردن عکس‌های هوایی (روش‌های تبدیل درجه اول تا درجه سوم، اسپیلاین، تصویری و اصلاح قائم‌سازی) در دو منطقه متفاوت از نظر ناهمواری‌ها (منطقه‌ی هموار شهرکرد و منطقه‌ی تپه‌ماهوری چالستر)، در نرم‌افزار ILWIS3.3 و ArcGIS10.7 استفاده و خطای روش‌های مختلف از طریق محاسبه شاخص‌های کمینه و بیشینه، میانگین (ME)، انحراف معیار و جذر مربع خطاها (RMSE) تجزیه و تحلیل شد. نتایج حاکی از آن بود که برای منطقه هموار، خطای روش‌های مختلف، تغییرات کمتری نسبت به منطقه ناهموار داشت؛ به گونه‌ای که با افزایش ناهمواری‌ها، مقدار خطای روش‌ها به شدت افزایش یافت و نشان‌دهنده تفاوت چشمگیری بود. براساس نتایج به دست آمده، روش اصلاح قائم‌سازی صرف‌نظر از زمان و داده‌های مورد نیاز، دقیق‌ترین روش زمین مرجع کردن بود (ME = ۳۵ و RMSE = ۳۸)؛ اما با در نظر گرفتن زمان و داده‌هایی که برای این روش لازم بود، روش اسپیلاین مناسب‌ترین روش تشخیص داده شد. در روش اخیر نه تنها دقت مقبولی وجود دارد، مشکلات روش اصلاح قائم‌سازی را از جمله نیاز به داده‌های حاشیه‌ای عکس‌های هوایی و لایه مدل رقومی ارتفاع نیز ندارد.

واژه‌های کلیدی: تصحیحات هندسی، اعوجاج عکس‌های هوایی، جابه‌جایی عکس‌های هوایی، سامانه اطلاعات جغرافیایی

*نویسنده مسئول

باقری بداغ آبادی، محسن / ابراهیمی میمند، فاطمه. (۱۴۰۱). تجزیه و تحلیل و مقایسه روش‌های مرسوم زمین مرجع کردن عکس‌های هوایی - جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۳۳(۴)، ۹۷-۱۱۲.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



<https://doi.org/10.22108/gep.2022.133652.1524>



20.1001.1.20085362.1401.33.4.5.9

مقدمه

فناوری عکس‌برداری هوایی، روشی قدرتمند برای تولید سریع‌تر و دقیق‌تر انواع نقشه‌های مرتبط با زمین و تهیه داده‌های بیشتر و ارزان‌تر نسبت به روش‌های نمونه‌برداری میدانی بوده و تصاویر حاصل از آن، پایه و اساس بسیاری از کارهای پژوهشی، مطالعاتی، کاربردی و اجرایی مرتبط با زمین است. عکس‌های هوایی در ایران از دهه ۱۳۳۰ در دسترس و در زمینه بررسی تغییرات نمای سرزمین^۱ و به‌ویژه تغییرات کاربری سرزمین در طول زمان، بهترین ابزار برای تشخیص تغییرات است (Casson et al., 2003). مهم‌ترین عکس‌های هوایی پوششی ایران با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ یا ۱/۵۵۰۰۰ مربوط به سال‌های ۱۳۳۴ تا ۱۳۳۶ می‌باشد. با وجود پیشرفت فناوری و دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای با دقت بسیار خوب، این عکس‌ها هنوز در بسیاری از پژوهش‌ها و پروژه‌ها به‌ویژه در زمینه منابع طبیعی، کشاورزی و تغییر کاربری مهم‌ترین و گاه تنها مدارک موجود است؛ همچنین عکس‌های پوششی با مقیاس ۱/۲۰۰۰۰ و ۱/۴۰۰۰۰ نیز در دهه ۴۰ و ۵۰ هفتاد تهیه شده است؛ هرچند در مناطقی تکمیل نشده است.

از آنجا که عکس هوایی، تصویری مرکزی است، اعوجاج^۲ و جابه‌جایی^۳ (ارتفاعی، افقی یا شعاعی)، جزء ماهیتی و جدایی‌ناپذیر این عکس‌ها بوده است و سبب تغییر شکل واقعی پدیده‌ها یا معتبر نبودن اندازه‌گیری‌های جغرافیایی (مانند درازا و مساحت) می‌شود؛ بنابراین قبل از استفاده از این عکس‌ها و انجام اندازه‌گیری‌ها، تجزیه و تحلیل‌ها و محاسبات مختلف، باید اعوجاج در عکس‌ها حذف شود (Rocchini & Rita, 2005; Lee et al., 2013). به بیان دیگر، برای استفاده از این عکس‌ها، به‌ویژه زمانی که با تجزیه و تحلیل‌های مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی همراه باشد، زمین مرجع کردن عکس هوایی یا انجام تصحیحات هندسی بسیار ضروری و مهم است.

در بسیاری از پژوهش‌هایی که بر پایه‌ی استفاده از عکس هوایی انجام شده، بر ضرورت انجام تصحیحات هندسی عکس‌ها تأکید شده است (برای مثال، McNish et al., 2022; Chen et al., 2021; Riquelme et al., 2019; Sameen et al., 2018; Wang et al., 2013; Bannari et al., 2015). برای این منظور، روش‌های مختلف تصحیح هندسی از ثبت ساده‌ی تصویر^۴ تا توابع چند جمله‌ای و مدل‌های دقیق مانند اصلاح قائم‌سازی^۵ (Rocchini & Rita, 2005) استفاده شده است. هر یک از روش‌های زمین مرجع کردن عکس‌های هوایی، معایب و مزایای ویژه‌ی خود را دارد؛ برای نمونه، روش‌های پیچیده‌تر نیازمند تعداد نقطه شاهد زمینی^۶ بیشتری است. برای مقایسه برخی از این روش‌ها، روکچینی و همکاران (2011) دقت تبدیل‌های مختلف را در تصحیحات هندسی عکس‌های هوایی بررسی کردند. براساس نتایج آن‌ها، از بین سه روش رده اول، رده دوم و اصلاح قائم‌سازی، روش اصلاح قائم‌سازی بیشترین دقت و کمترین خطا را داشت (Rocchini et al., 2011).

اعوجاج و جابه‌جایی موجود در عکس‌های هوایی منابع زیادی دارد که برخی از آنها شامل چرخش زمین در زمان

1. Landscape
2. Distortion
3. Displacement and Shift
4. Simple image registration
5. Orthorectification
6. Ground Control Points (GCPs)

دریافت تصویر، زاویه تابش، انحنای کره زمین، تغییرات ارتفاعی، تغییر در زاویه حرکت، تعادل و سرعت هواپیما یا ماهواره است (Chintan et al., 2015). هدف از تصحیح هندسی، جبران این اعوجاج و جابه‌جایی‌ها (شعاعی و ارتفاعی) است؛ به طوری که تصویر تصحیح شده ارزش هندسی (از نظر جغرافیایی) دارد. فرایند تصحیح هندسی به طور عمده شامل دو بخش اعوجاج‌های نظام‌دار یا سیستماتیک (که پیش‌بینی پذیر) و اعوجاج‌های پیش‌بینی ناپذیر است (Chintan et al., 2015). اعوجاج‌های نظام‌دار یا سیستماتیک (مانند زاویه عکس برداری) به خوبی تشخیص داده و به سادگی از طریق کاربرد معادله‌های به دست آمده از فرایند مدل‌سازی ریاضی تصحیح می‌شود. این تصحیح‌ها به طور معمول روی عکس‌های رقومی یا تصاویر ماهواره‌ای، پیش از فروش یا پخش آنها انجام می‌شود؛ ولی آنچه باید از سوی کاربران انجام شود، تصحیح هندسی به منظور تصحیح جابه‌جایی‌ها و اعوجاج‌هایی است که به صورت پیش‌بینی ناپذیر است.

برای این منظور از سه روش مختلف استفاده می‌شود که عبارت است از: تصحیح هندسی با استفاده از مختصات جغرافیایی برداشت شده از نقاط مشخص یا نقطه شاهد زمینی با سامانه موقعیت یاب جهانی (GPS)، تصحیح هندسی بر پایه نقشه‌های دارای مختصات جغرافیایی و تصحیح هندسی بر پایه تصاویر دارای مختصات جغرافیایی که پیش از این تصحیحات هندسی روی آنها انجام شده است (Chintan et al., 2015).

با توجه به آنچه بیان شد، برای به کارگیری عکس‌های هوایی، به ویژه در تجزیه و تحلیل‌های مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی، نیاز به زمین مرجع کردن عکس‌های هوایی است؛ اما روش‌های دقیق‌تر بنا بر برخی ملاحظات، همواره مناسب‌ترین روش نیست؛ برای مثال، روکچینی و ریتا (2005) تأثیر ناهمواری‌ها را روی تصحیحات هندسی عکس‌های هوایی بررسی کردند و دریافتند در مناطق هموارتر، با استفاده از توابع ساده‌تر هم تصحیح هندسی مقبولی به دست می‌آید. متأسفانه در بسیاری از پروژه‌ها یا پژوهش‌ها، بنا بر دلایل گوناگون از جمله نبود اطلاعات حاشیه‌ای عکس‌های هوایی، نبود لایه‌ی مدل رقومی ارتفاع^۱، ناآشنا بودن کاربران با روش‌های مختلف زمین مرجع کردن، زمان ناکافی و غیره، تلاش و کوشش لازم برای انجام بهترین یا دقیق‌ترین زمین مرجع کردن عکس‌های هوایی صورت نمی‌گیرد و در بیشتر موارد به روش‌های ساده‌تر مانند تبدیل درجه اول یا دوم بسنده می‌شود. این موضوع، سبب می‌شود بین لایه‌های مختلفی که در محیط GIS استفاده می‌شود، انطباق لازم وجود نداشته باشد. این مشکل به ویژه برای انطباق خود عکس‌های هوایی و نیز نقشه‌هایی که بر پایه عکس‌های هوایی تهیه شده، با تصاویر ماهواره‌ای یا لایه‌های نقشه‌های توپوگرافی بسیار چشمگیر است؛ بنابراین ضرورت دارد دقت روش‌های مختلف زمین مرجع کردن در موقعیت‌های مختلف جغرافیایی اعم از هموار یا ناهموار تجزیه و تحلیل شود تا کاربران مناسب‌ترین روش را متناسب با نیاز خود انتخاب کنند. البته در این زمینه باید به قدرت تفکیک و نیز مقیاس عکس‌های هوایی توجه ویژه داشت و به بیان دیگر، عکس‌های هوایی متناسب با اهداف پژوهش یا پروژه مدنظر انتخاب شود؛ برای نمونه، اگر هدف، کارهای ثبت املاک است که در آن باید حد و مرز یک محدوده مشخص شود، مانند خانه و غیره، عکس‌های هوایی و روش‌های

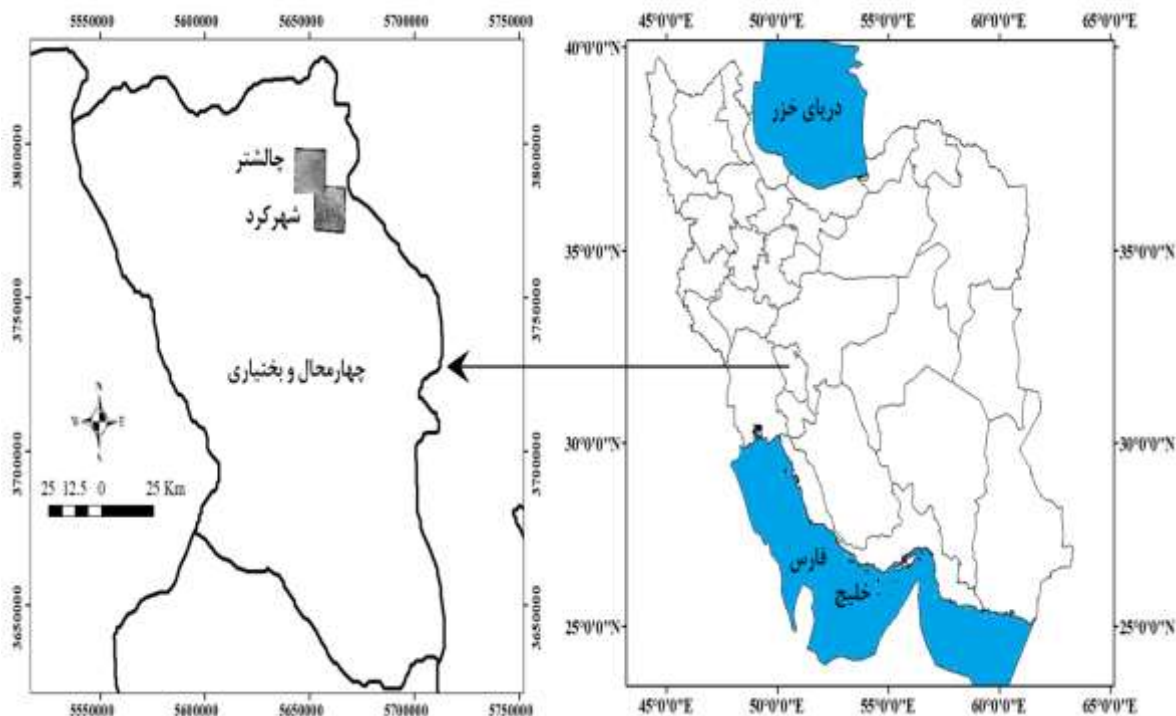
1. Digital Elevation Models (DEM)

زمین مرجع کردن مرسوم، پاسخ‌گوی هدف نخواهد بود؛ بنابراین در بسیاری از پژوهش‌ها و پروژه‌ها به‌ویژه در منابع طبیعی و کشاورزی عکس‌های هوایی مرسوم کارایی بسیار خوبی دارد؛ در نتیجه انتخاب مناسب‌ترین روش برای زمین مرجع کردن نقشه‌هایی که بر پایه عکس هوایی به دست می‌آید، به‌ویژه در منابع طبیعی و کشاورزی، از جمله نقشه‌های ژئومورفولوژی، خاک، ژئوپدولوژی، کاربری سرزمین و غیره، بسیار ضروری‌تر و مهم‌تر است؛ زیرا این نقشه‌ها گاه از چندین عکس هوایی تهیه شده است و امکان اینکه همه این عکس‌ها جداگانه زمین مرجع و نقشه‌های مربوطه از اول براساس عکس‌های زمین مرجع شده اصلاح شود، وجود ندارد؛ بنابراین آگاهی از اینکه روش‌های گوناگون زمین مرجع کردن چه دقتی دارد، به‌طور ضمنی نشان‌دهنده دقت زمین مرجع کردن نقشه‌های حاصل از عکس‌های هوایی است. بر این اساس، هدف از پژوهش حاضر، دستیابی به یک روش مناسب برای زمین مرجع کردن عکس‌های هوایی است که در عین سادگی و هزینه کم، بتوان این فرایند را در زمان کمتر و با دقت بیشتر انجام داد.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد مطالعه

مناطق انتخاب شده شامل دو منطقه در استان چهارمحال و بختیاری است: یکی، منطقه هموار دشت شهرکرد و دیگری منطقه تپه‌ماهوری چالستر. شکل (۱) نشان‌دهنده جانمایی مناطق مطالعاتی و شکل (۲) نمایی از ناهمواری‌های این مناطق است.



شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و جانمایی عکس‌های هوایی شهرکرد و چالستر

Figure (1) Study areas and location of aerial photos of Shahrekord and Chaleshtar



شکل (۲) نمای سه بعدی با دید جنوب به شمال از ناهمواری‌های محدوده پوشش عکس هوایی شهرکرد (بالا) و چالشر (پایین)

Figure (2) Three-dimensional view – South to North- of the relief of Shahrekord aerial photo (top) and Chaleshtar (bottom)

روش کار

در این پژوهش برای زمین مرجع کردن عکس‌های هوایی، شش روش تبدیل بررسی شد که عبارت است از:

- ۱- تبدیل چند جمله‌ای رده اول یا تبدیل همگر^۱: یک تبدیل خطی است و دست کم به سه نقطه مرجع نیاز دارد.
- ۲- تبدیل چند جمله‌ای رده دوم^۲: شبیه چند جمله‌ای رده اول است؛ بنابراین برای طول و عرض جغرافیایی استفاده می‌شود و دست کم به شش نقطه مرجع نیاز دارد.

1. Polynomial first order or affine transformation

2. Polynomial second order

۳- تبدیل چند جمله‌ای رده سوم^۱: شبیه چند جمله‌ای رده اول است؛ بنابراین برای طول و عرض جغرافیایی استفاده می‌شود و دست‌کم به ۱۰ نقطه مرجع نیاز دارد.

۴- تبدیل اسپلاین^۲: از چندین چند جمله‌ای محلی استفاده می‌کند؛ اما انحنای سطح چند جمله‌ای را به حداقل می‌رساند و دست‌کم به ۱۰ نقطه مرجع نیاز دارد.

۵- تبدیل تصویری^۳: یک تبدیل خطی است؛ اما برخلاف تبدیل رده اول، موازی‌بودن، طول و زاویه در آن حفظ نمی‌شود و بیشتر برای یک عکس یا تصویر غیر عمود ممکن است خوب باشد و دست‌کم به چهار نقطه مرجع نیاز دارد.

۶- روش اصلاح قائم‌سازی: یک روش پیشرفته‌ی زمین مرجع کردن است که در آن هر پیکسل تصویر، نشان‌دهنده یک مکان واقعی زمین است و تمام اعوجاج‌های هندسی، زمین و حسگر (یا دوربین) با دقت مشخصی حذف می‌شود. با این روش یک تصویر مرکزی (مانند عکس هوایی یا تصویر ماهواره‌ای) به یک تصویر قائم تبدیل می‌شود؛ به گونه‌ای که اثرهای شیب دوربین و ناهمواری‌های زمین را از بین برد. این روش نیاز به داده‌های گوناگون از جمله فاصله کانونی دوربین، مقیاس عکس، شعاع کره زمین، معرفی سامانه مختصاتی، اعداد مربوط به علائم حاشیه‌ای^۴ و ارتفاع نقاط شاهد زمین دارد. کمینه نقاط لازم، بستگی به نوع تبدیل استفاده‌شده در روش مزبور دارد.

شرح مبانی نظری روش‌های استفاده‌شده در این مقاله گنجانده نمی‌شود. (برای اطلاعات بیشتر به منابع از جمله (Sempio et al., 2019)، (Hackeloeer et al., 2014)، (Toutin, 2004) و (Tao & Hu, 2001) مراجعه شود). از آنجا که کمترین تعداد نقطه لازم برای روش‌های گوناگون متفاوت و در روش اسپلاین کمترین تعداد نقطه ده عدد است، در این پژوهش برای اینکه تأثیر تعداد نقاط شاهد زمینی برای همه روش‌ها یکسان باشد، تعداد ۱۵ نقطه برای زمین مرجع کردن و برای اندازه‌گیری مقدار خطا نیز تعداد ۱۵ نقطه مشخص روی عکس هوایی انتخاب شد. تلاش شد که نقاط در عکس هوایی پراکنش مقبولی داشته باشد و نقاطی انتخاب شد که هم روی عکس هوایی و هم تصویر گوگل ارث به خوبی و با دقت تشخیص داده شود (مانند جاده‌ها، ساختمان‌ها، آبراهه‌ها، قله‌ها و مواردی از این قبیل). مختصات همه نقاط براساس سامانه مختصاتی مرکاتور معکوس جهانی (UTM) و با استفاده از تصاویر گوگل ارث به دست آمد. شایان ذکر است از آنجا که مختصات یک نقطه مشخص در تصاویر ماهواره‌ای در زمان‌های مختلف همواره یکسان نیست و به بیان دیگر تصاویر سال‌های مختلف گوگل ارث، روی هم قرار نمی‌گیرد، معیار اندازه‌گیری‌ها، جدیدترین تصویر گوگل ارث مربوط به سال ۲۰۲۱ است. اندازه‌گیری خطا برای هر یک از ۱۵ نقطه مدنظر، فاصله اقلیدسی بین نقطه مدنظر روی عکس هوایی زمین مرجع شده و تصویر گوگل ارث با استفاده از معادله زیر به دست آمد (Pha & Takeuchi, 2017):

$$i \text{ خطا نقطه } = \sqrt{(x_{ai} - x_{si})^2 + (y_{ai} - y_{si})^2} \quad (1)$$

1 Polynomial third order
2. Spline transformation
3. Projective transformation
4. Fiducial marks

که در آن، x_{ai} و x_{si} به ترتیب مختصات طول برای هر نقطه (i) روی عکس هوایی زمین مرجع شده، تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث و y_{ai} و y_{si} به ترتیب مختصات عرض برای هر نقطه (i) روی عکس هوایی زمین مرجع شده و تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث است. در پایان، روش‌های مختلف براساس آماره‌هایی مانند کمینه و بیشینه، میانگین، انحراف معیار و جذر مربع خطاها با هم مقایسه و بهترین روش معرفی شد. به منظور محاسبه جذر میانگین خطا از معادلات ۲ تا ۴ استفاده شد (Liu et al., 2019):

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x'_i - x_i)^2}{n}} \quad (2)$$

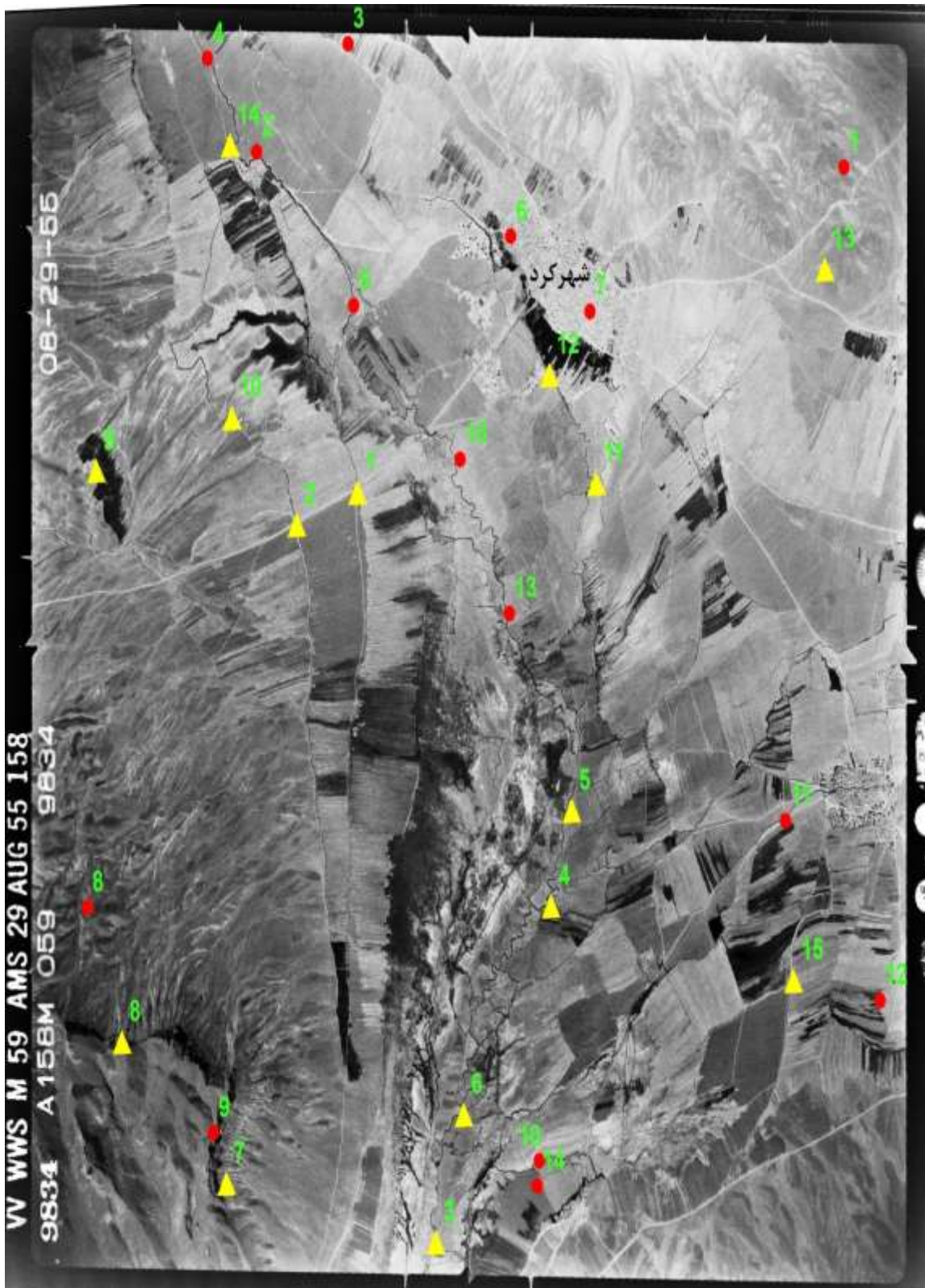
$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (4)$$

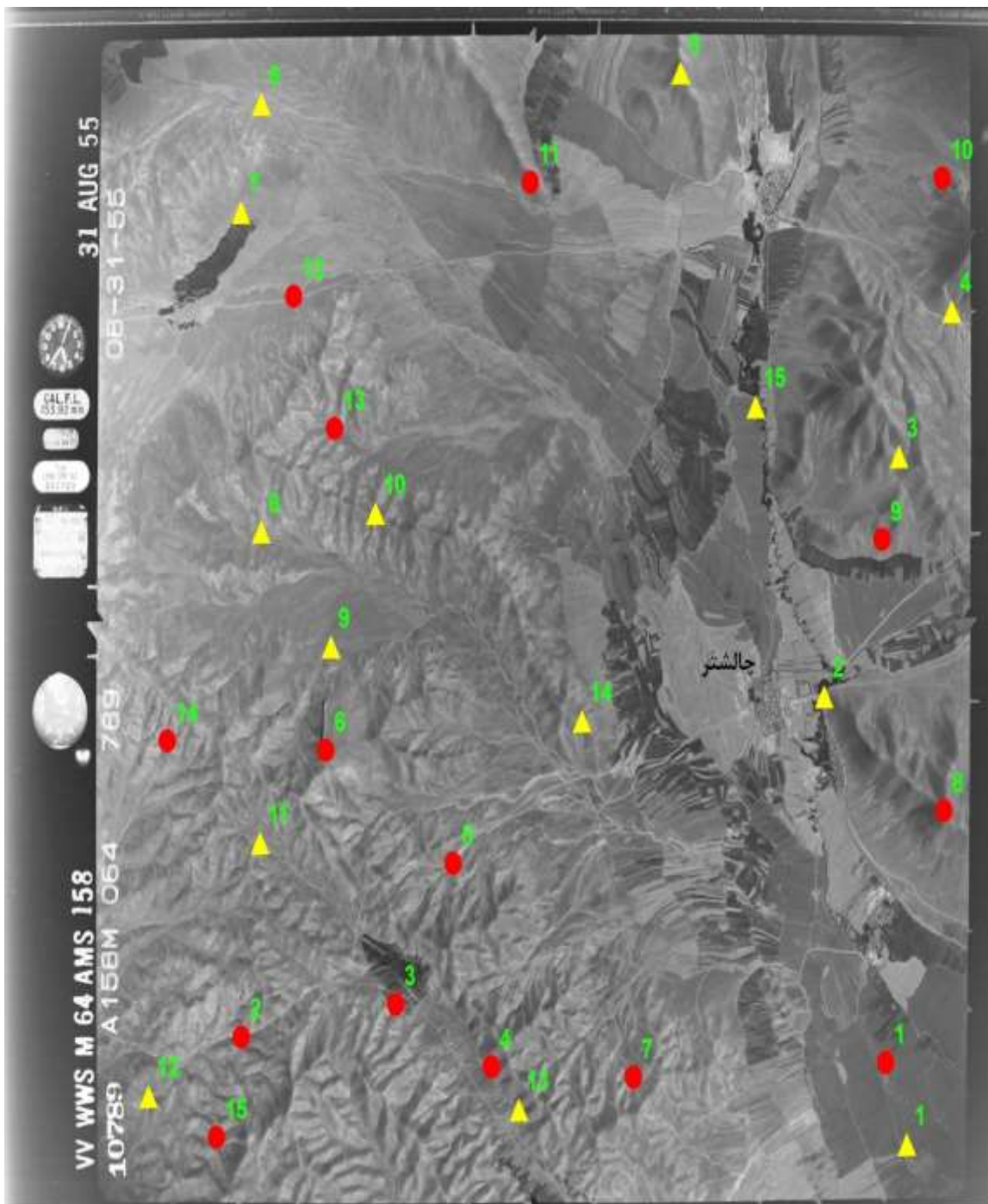
که در آن x و y به ترتیب طول و عرض جغرافیایی نقطه i (شاهد زمینی یا نقاط اندازه‌گیری روی گوگل ارث) و x' و y' طول و عرض جغرافیایی همان نقطه روی عکس هوایی زمین مرجع شده و n تعداد نقاط است. فرایند زمین مرجع کردن عکس‌ها در نرم‌افزارهای ILWIS3.3 و ArcGIS10.7 و همه محاسبات لازم در نرم‌افزار اکسل انجام شد.

نتایج و بحث

شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب نشان‌دهنده عکس هوایی خام یا زمین مرجع نشده مناطق شهرکرد و چالشر به همراه نقاط شاهد زمینی و نقاط اندازه‌گیری خطاست. تاریخ عکس‌برداری (۱۹۵۵)، فاصله کانونی دوربین (۱۵۳/۹۳ میلی متر) و برخی ویژگی‌های دیگر در شکل (۴) دیده می‌شود. متأسفانه در برخی از موارد، اطلاعات حاشیه‌ای عکس‌های هوایی ناقص است یا گاه وجود ندارد. این موضوع، به ویژه برای زمین مرجع کردن عکس‌های هوایی با روش اصلاح قائم‌سازی، بسیار مشکل‌ساز است؛ زیرا در این روش، دسترسی به برخی از اطلاعات حاشیه‌ای عکس، مانند فاصله کانونی دوربین، ارتفاع پرواز و علائم حاشیه‌ای بسیار ضروری است.



شکل (۳) عکس هوایی خام دشت شهرکرد به همراه نقاط شاهد زمینی (مثلث) و نقاط اندازه‌گیری خطا (دایره)
Figure (3) Original aerial photograph of Shahrekord area with ground control points (triangle) and error measurement points (circle)



شکل (۴) عکس هوایی خام منطقه چالشتار به همراه نقاط شاهد زمینی (مثلث) و نقاط اندازه‌گیری خطا (دایره)
 Figure (4) Original aerial photograph of Chaleshtar area with ground control points (triangle) and error measurement points (circle)

با توجه به اینکه حجم داده‌ها و محاسبات انجام‌شده بسیار زیاد است، به‌عنوان مثال، مقادیر خطای زمین مرجع کردن برای عکس هوایی دشت شهرکرد با تبدیل رده اول در جدول (۱) نشان داده شده است؛ همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار خطا از ۱۱ (نقطه ۱۴) تا ۱۸۱ (نقطه ۸) متر متغیر است.

جدول (۱) محاسبه خطا با تبدیل همگر (رده اول) برای عکس هوایی شهرکرد

Table (1) Error calculation by affine (first order) transformation method for aerial photos of Shahrekord

نقطه	x_a	y_a	x_s	y_s	$(x_a-x_s)^T$	$(y_a-y_s)^T$	خطا
۱	۴۸۳۳۰۰	۳۵۷۴۶۳۷	۴۸۳۲۷۰	۳۵۷۴۶۰۸	۹۰۰	۸۴۱	۴۲
۲	۴۸۲۴۹۰	۳۵۷۴۳۵۱	۴۸۲۴۲۷	۳۵۷۴۳۳۶	۳۹۶۹	۲۲۵	۶۵
۳	۴۸۴۰۶۲	۳۵۷۶۷۹۱	۴۸۳۹۸۸	۳۵۷۶۷۳۱	۵۴۷۶	۳۶۰۰	۹۵
۴	۴۸۵۶۷۷	۳۵۷۰۷۱۲	۴۸۵۶۴۸	۳۵۷۰۶۸۷	۸۴۱	۶۲۵	۳۸
۵	۴۸۶۰۱۱	۳۵۷۱۵۲۱	۴۸۵۹۹۳	۳۵۷۱۵۰۸	۳۲۴	۱۶۹	۲۲
۶	۴۸۴۴۷۹	۳۵۶۸۸۲۳	۴۸۴۴۳۳	۳۵۶۸۷۷۱	۲۱۱۶	۲۷۰۴	۶۹
۷	۴۸۱۴۰۳	۳۵۶۸۳۳۸	۴۸۱۴۳۰	۳۵۶۸۴۳۸	۷۲۹	۱۰۰۰۰	۱۰۴
۸	۴۸۰۰۹۸	۳۵۶۹۷۱۹	۴۸۰۲۶۱	۳۵۶۹۷۹۷	۲۶۵۶۹	۶۰۸۴	۱۸۱
۹	۴۷۹۹۵۶	۳۵۷۴۹۰۰	۴۷۹۹۲۳	۳۵۷۴۸۴۹	۱۰۸۹	۲۶۰۱	۶۱
۱۰	۴۸۱۷۴۲	۳۵۷۵۳۷۹	۴۸۱۷۲۲	۳۵۷۵۳۴۹	۴۰۰	۹۰۰	۳۶
۱۱	۴۸۶۴۴۲	۳۵۷۴۶۰۰	۴۸۶۴۸۱	۳۵۷۴۶۱۴	۱۵۲۱	۱۹۶	۴۱
۱۲	۴۸۵۸۸۱	۳۵۷۵۶۳۷	۴۸۵۸۹۱	۳۵۷۵۶۵۱	۱۰۰	۱۹۶	۱۷
۱۳	۴۸۹۵۰۵	۳۵۷۶۴۵۸	۴۸۹۵۷۶	۳۵۷۶۵۲۹	۵۰۴۱	۵۰۴۱	۱۰۰
۱۴	۴۸۱۸۰۱	۳۵۷۷۸۶۸	۴۸۱۷۹۳	۳۵۷۷۸۷۶	۶۴	۶۴	۱۱
۱۵	۴۸۸۱۵۵	۳۵۶۹۹۰۰	۴۸۸۱۶۶	۳۵۶۹۸۸۹	۱۲۱	۱۲۱	۱۶
			کمینه		۶۴	۶۴	۱۱
			بیشینه		۲۶۵۶۹	۱۰۰۰۰	۱۸۱
			مجموع		۴۹۲۶۰	۳۳۳۶۷	۸۹۹
			میانگین		۳۲۸۴	۲۲۲۴	۶۰
			انحراف معیار		۶۶۸۵	۲۸۹۵	۴۵

x و y به ترتیب طول و عرض جغرافیایی (UTM) بر روی a (عکس هوایی زمین مرجع شده) و S (تصویر گوگل ارث) جدول‌های (۲) و (۳) به ترتیب نشان‌دهنده آماره‌های خطای اندازه‌گیری شده برای روش‌های گوناگون زمین مرجع کردن است.

جدول (۲) آماره‌های خطای اندازه‌گیری شده برای دشت شهرکرد

Table (2) Measured error statistics for aerial photos of Shahrekord

روش زمین مرجع کردن	نوع نقاط	مجموع خطاها	میانگین خطاها	کمینه خطا	بیشینه خطا	انحراف معیار خطا	RMSE
رده اول	نقاط شاهد زمینی	۸۹۹	۶۰	۱۱	۱۸۱	۴۵	۷۴
	نقاط اندازه‌گیری خطا	۹۴۱	۶۳	۱۰	۲۰۱	۴۷	۷۵
رده دوم	نقاط شاهد زمینی	۵۷۳	۳۸	۷	۷۰	۲۱	۴۴
	نقاط اندازه‌گیری خطا	۶۰۱	۴۰	۹	۸۰	۲۲	۴۷
رده سوم	نقاط شاهد زمینی	۱۷۴	۱۲	۱	۲۷	۹	۱۴
	نقاط اندازه‌گیری خطا	۵۵۱	۳۷	۸	۱۹۰	۴۷	۷۶
اسپیلاین	نقاط شاهد زمینی	-	-	-	-	-	-
	نقاط اندازه‌گیری خطا	۴۴۸	۳۰	۸	۶۰	۱۸	۳۶
تبدیل تصویری	نقاط شاهد زمینی	۶۱۸	۴۱	۷	۹۳	۲۷	۴۹
	نقاط اندازه‌گیری خطا	۶۴۶	۴۳	۸	۱۴۰	۳۱	۵۳
اصلاح قائم‌سازی	نقاط شاهد زمینی	۴۹۷	۳۳	۷	۶۰	۲۱	۳۷
	نقاط اندازه‌گیری خطا	۵۲۱	۳۵	۹	۷۱	۲۱	۳۸

جدول (۳) آماره‌های خطای اندازه‌گیری شده برای چالشتور

Table (3) Measured error statistics for aerial photos of Chaleshtor

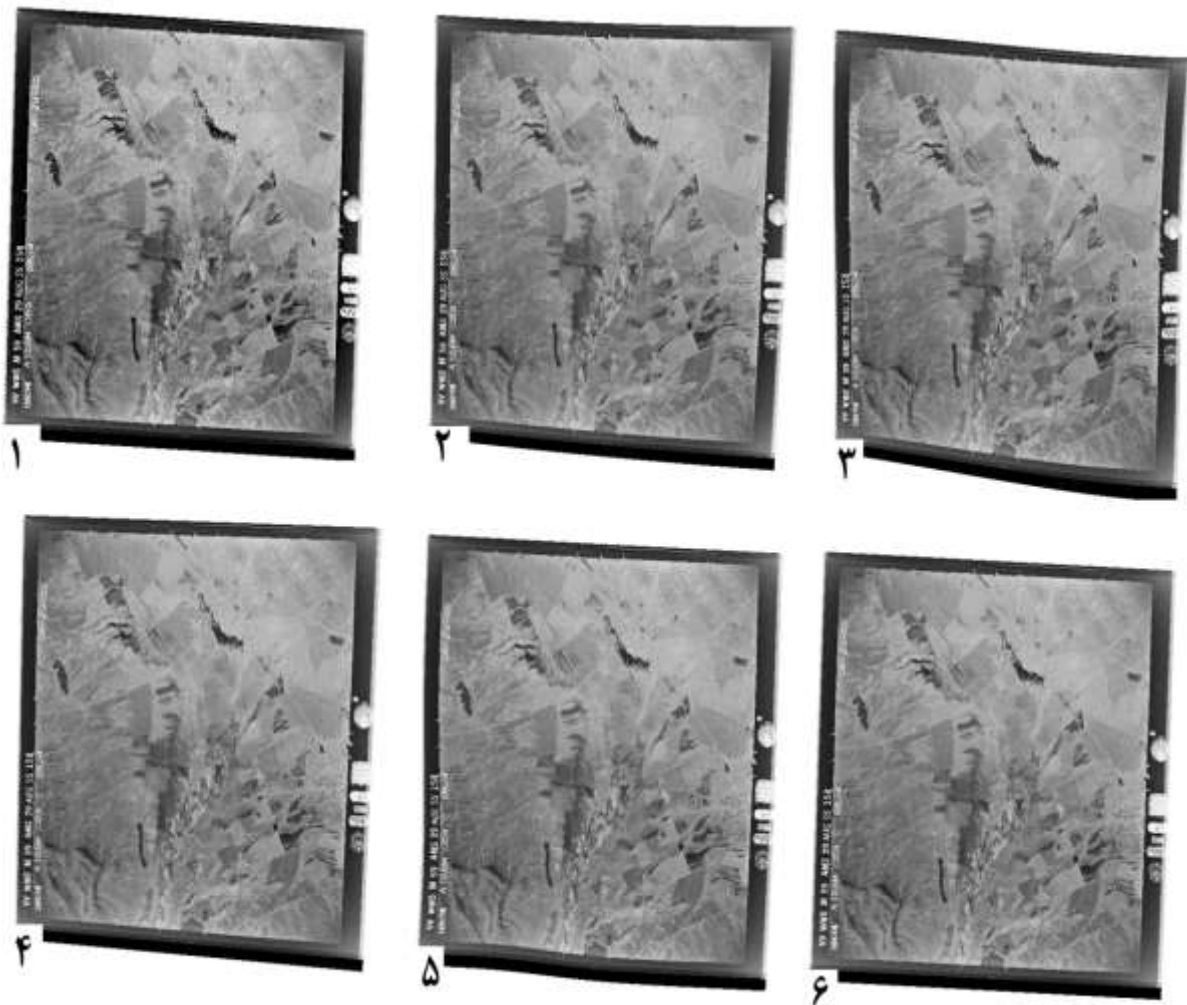
روش زمین مرجع کردن	نقاط	مجموع خطاها	میانگین خطاها	کمینه خطا	بیشینه خطا	انحراف معیار خطا	RMSE
رده اول	نقاط شاهد زمینی	۹۲۱	۶۱	۱۰	۱۷۴	۴۵	۷۴
	نقاط اندازه‌گیری خطا	۱۰۹۳	۷۳	۱۰	۱۹۰	۴۷	۷۸
رده دوم	نقاط شاهد زمینی	۶۴۸	۴۳	۷	۶۷	۱۹	۴۶
	نقاط اندازه‌گیری خطا	۷۳۹	۵۱	۸	۷۴	۲۰	۵۱
رده سوم	نقاط شاهد زمینی	۲۷۱	۱۸	۱	۲۷	۱۱	۲۱
	نقاط اندازه‌گیری خطا	۶۳۴	۴۲	۱۰	۲۰۴	۵۱	۸۳
اسپیلاین	نقاط شاهد زمینی	-	-	-	-	-	-
	نقاط اندازه‌گیری خطا	۴۳۲	۲۹	۸	۵۴	۱۸	۳۷
تبدیل تصویری	نقاط شاهد زمینی	۵۸۱	۵۴	۹	۱۰۴	۳۵	۵۵
	نقاط اندازه‌گیری خطا	۱۰۱۸	۶۸	۱۲	۱۸۰	۴۱	۶۱
اصلاح قائم‌سازی	نقاط شاهد زمینی	۳۹۸	۲۶	۷	۴۲	۱۷	۲۵
	نقاط اندازه‌گیری خطا	۴۱۰	۲۷	۹	۴۳	۱۸	۲۷

بر اساس اطلاعات جدول‌های (۲) و (۳) بیان می‌شود که با افزایش رده تابع تبدیل، مقدار میانگین خطای نقاط شاهد زمینی کاهش می‌یابد؛ به طوری که تابع رده سوم، کمترین مقدار خطای نقاط شاهد زمینی را دارد که به ترتیب برای شهرکرد و چالشتور مقدار آن ۱۲ و ۱۸ است. این مقدار کم خطا ممکن است سبب گمراهی و تصور شود که بهترین روش زمین مرجع کردن، به کارگیری تابع رده سوم است؛ در حالی که کاهش خطا فقط در نزدیکی نقاط شاهد زمینی است و با فاصله گرفتن از این نقاط، خطا افزایش می‌یابد. به همین دلیل است که به طور آشکار مقدار تغییرات میانگین خطا برای نقاط اندازه‌گیری شده در تبدیل رده سوم نسبت به دیگر روش‌ها به شدت افزایش یافته و به ترتیب برای شهرکرد و چالشتور مقدار آن ۳۷ و ۴۲ است؛ یعنی برای شهرکرد و چالشتور به ترتیب مقدار آن برابر ۲۵ (= ۳۷-۱۲) و ۲۴ (= ۴۲-۱۸) است. به طور کلی، هرچه درجه تابع چند جمله‌ای بالاتر باشد، امکان تصحیح تصاویر برای انواع پیچیده‌تر اعوجاج بیشتر است (Rocchini & Rita, 2005)؛ اما از سوی دیگر، داشتن اصطلاحات فراتر از تبدیل‌های درجه دوم معمول نیست (Russ, 2002)؛ زیرا هر چند چند جمله‌ای‌های مرتبه بالاتر در نزدیکی نقاط شاهد زمینی دقیق است، به خطاهای چشمگیری برای مناطق خارج از محدوده نقاط شاهد زمینی منجر می‌شود (Richards & Jia, 1999). در همین راستا، سمپو و همکاران (2019) نیز بیان داشتند که تبدیل‌های با درجه بالاتر با توجه به زمان و تلاشی که برای انجام آنها لازم است، برتری چندانی بر تبدیل‌های درجه پایین‌تر ندارد (Sempio et al., 2019). برای تابع اسپیلاین به طور معمول خطای نقاط شاهد زمینی تعریف نمی‌شود یا صفر است؛ زیرا در این تابع، یک صفحه از چندین چند جمله‌ای محلی استفاده می‌کند و به بیان دیگر تابع مدنظر از همه نقاط عبور داده می‌شود. در این پژوهش، تبدیل تصویری نسبت به تبدیل درجه اول بهتر بود؛ اما نسبت به تبدیل درجه دوم دقت کمتری داشت. نتایج پژوهش کارسیل و دیهکان (2010) نیز نشان‌دهنده آن بود که تبدیل تصویری نسبت به تبدیل درجه اول و دوم بهتر است

(Karsli & Dihkan, 2010)؛ همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، برای منطقه هموار، خطای روش‌های مختلف، تغییرات کمتری نسبت به منطقه ناهموار (جدول ۳) دارد؛ اما با افزایش ناهمواری‌ها مقدار خطای روش‌ها به شدت افزایش یافته و حاکی از تفاوت چشمگیری است؛ برای نمونه، هرچند مقدار میانگین خطای نقاط شاهد زمینی و نقاط اندازه‌گیری شده برای رده اول به ترتیب برای شهرکرد برابر ۶۰ و ۶۳ است (سه واحد اختلاف)، برای چالستر این مقادیر از ۶۱ (برای نقاط شاهد زمینی) به ۷۳ (نقاط اندازه‌گیری شده) افزایش می‌یابد (۱۲ واحد اختلاف). این موضوع به نوعی نشان‌دهنده اعوجاج و جابه‌جایی بیشتر در عکس هوایی برای مناطق ناهموارتر است. از طرف دیگر، هرچند مقادیر کمینه خطا برای هر دو منطقه به‌طور تقریبی یکسان است، مقادیر بیشینه خطا برای منطقه ناهموارتر چالستر، بسیار بیشتر از منطقه هموار دشت شهرکرد است. همین موضوع سبب شده است که مقادیر انحراف معیار خطا و به دنبال آن مقادیر RMSE در منطقه چالستر بیشتر از شهرکرد باشد. نکته حائز اهمیت دیگر اینکه مقدار میانگین خطای نقاط شاهد زمینی و نقاط اندازه‌گیری شده برای منطقه هموار در روش‌های مختلف (به جز رده سوم) تا حدی به هم نزدیک است (دامنه تغییرات بین ۳۰ تا ۶۳ است)؛ اما در منطقه ناهموار، مقدار میانگین خطای نقاط شاهد زمینی و نقاط اندازه‌گیری شده زیاد می‌شود (دامنه تغییرات بین ۲۶ تا ۷۳ است)؛ بنابراین برای دو روش اسپیلاین و اصلاح قائم‌سازی نسبت به سایر روش‌ها چه در منطقه ناهموار و چه هموار، مقدار میانگین خطای نقاط شاهد زمینی و نقاط اندازه‌گیری شده به هم نزدیک است؛ اما روش اصلاح قائم‌سازی خطای کمتری را نشان می‌دهد.

به‌منظور نمایش تأثیر روش‌های مختلف زمین مرجع کردن، برای عکس هوایی دشت شهرکرد، تصویرهای به‌دست‌آمده از روش‌های گوناگون در شکل (۵) نشان داده شده است؛ همان‌طور که دیده می‌شود، ساختار عکس در حالت ۱، ۴ و ۶ تغییر نکرده و عکس‌ها در همان حالت مربع‌شکل خود باقی مانده است. به بیان دیگر، پیچیدگی یا خمیدگی در این حالت‌ها وجود ندارد؛ زیرا در این روش‌ها از تبدیل رده اول استفاده شده است. در حالت‌های ۲، ۳ و ۵ پیچش و خمیدگی وجود دارد و به‌ویژه در حالت ۳ بیشترین خمیدگی نیز هست؛ زیرا از تبدیل درجه سوم استفاده شده است؛ برای نمونه، در حالت ۳ اگر به حاشیه عکس توجه شود، کاملاً مشخص است که حالت صاف و مربعی شکل خود را از دست داده است. هرچه رده یا درجه تبدیل افزایش یابد خطای اندازه‌گیری شده برای آن روش کاهش می‌یابد؛ بنابراین تصویر از ساختار طبیعی خود خارج می‌شود. به‌طور کلی براساس این نتایج گفته می‌شود برای عکس‌های هوایی روش‌های تبدیل رده اول، دوم یا سوم مناسب نیست؛ زیرا جابه‌جایی شعاعی عکس را اصلاح نمی‌کند. روزیتر و هنگل (2004) نیز روش‌های خطی را برای زمین مرجع کردن عکس هوایی نامناسب بیان کردند.

بدیهی است که جایگاه نقاط شاهد زمینی در افزایش دقت و کاهش خطای زمین مرجع کردن تأثیر دارد و هرچه پراکنش این نقاط روی عکس یکنواخت‌تر و منظم‌تر باشد، افزون بر دقت بیشتر، پیچیدگی کمتر عکس را هم به‌همراه خواهد داشت؛ اما چون پیدا کردن نقاط منظم و مرتبی که هم روی عکس هوایی و هم روی تصویر ماهواره‌ای زمین مرجع شده قابل شناسایی باشد، به‌طور تقریبی غیرممکن است، این خطا و وابستگی آن به نقاط شاهد زمینی همواره وجود خواهد داشت؛ بنابراین پیش‌بینی می‌شود که هرچه این نقاط به یک شبکه منظم و پراکنش یکنواخت نزدیک‌تر شود، مقدار خطا و پیچیدگی یا خمیدگی عکس هوایی کاهش یابد.



شکل (۵) تأثیر روش‌های گوناگون زمین مرجع بر عکس هوایی شهرکرد (تبدیل‌ها: ۱. همگر (رده اول) ۲. رده دوم ۳. رده سوم ۴. تصویری ۵. اسپلاین ۶. اصلاح قائم‌سازی با تبدیل همگر)

Figure (5) The effect of different georeferencing methods on aerial photos of Shahrekord (Transformations: 1. affine (first order) 2. second order 3. third order 4. projective 5. spline 6. orthorectification by first order)

نتیجه گیری

عکس‌های هوایی جایگاه و نقش چشمگیری در کارهای پژوهشی و شناسایی پدیده‌های مرتبط با زمین دارد؛ بنابراین این عکس‌ها به دلیل ماهیتشان اعوجاج و جابه‌جایی دارد که به‌ویژه در زمان به‌کارگیری این عکس‌ها در سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی همراه با بروز خطاهایی است که باید اصلاح شود. این کار به‌طور معمول با فرایند زمین مرجع کردن انجام می‌شود. روش‌های گوناگون زمین مرجع کردن مزایا و معایب ویژه خود را دارد. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده آن بود که برای مناطق هموار، خطای زمین مرجع کردن کمتر از مناطق ناهموار (مانند مناطق تپه‌ای و یا کوهستانی) است. با این حال، روش‌های خطی اعم از تبدیل‌گرهای رده اول، دوم یا سوم، روش‌های مناسبی برای زمین مرجع کردن عکس هوایی نیست؛ زیرا اعوجاج، جابه‌جایی و کج بودن عکس را اصلاح نمی‌کند. براساس نتایج

این پژوهش مشخص شد بهترین روش برای انجام تصحیحات هندسی روی عکس‌های هوایی، روش اصلاح قائم‌سازی است؛ اما این روش نیاز به برخی داده‌های تکمیلی مانند اطلاعات حاشیه‌ای عکس هوایی، مدل ارتفاع رقومی منطقه و غیره دارد و روشی زمان‌بر و پرهزینه است؛ بنابراین مناسب‌ترین روش برای زمین‌مرجع کردن عکس‌های هوایی، به‌ویژه وقتی اطلاعات و زمان کافی برای روش اصلاح قائم‌سازی وجود ندارد، روش اسپیلاین است که دارای دقت مقبول (چه برای مناطق هموار و چه ناهموار) است، نیاز به داده‌های کمکی دیگر ندارد و به‌سادگی و با صرف کمترین زمان انجام می‌شود. پیشنهاد می‌شود با توجه به اهمیتی که عکس‌های هوایی موجود، به‌ویژه در پژوهش‌های منابع طبیعی، کشاورزی و تغییر کاربری دارد، این روش در مناطق دیگر نیز آزمون شود تا در صورت رسیدن به نتایج مشابه، از این روش برای زمین‌مرجع کردن و با انجام تصحیحات هندسی نقشه‌های حاصل از عکس‌های هوایی استفاده شود.

تشکر و قدردانی

هزینه‌های اجرای این پژوهش از سوی مؤسسه تحقیقات خاک و آب با پروژه به شماره ۹۷۰۹۵۹-۰۹۴۵۲-۰۶۹-۱۰-۱۴ پرداخت شده است که بدین وسیله کمال سپاس‌گزاری به عمل می‌آید.

منابع

- Bannari A., Karl S., Catherine C. & Shahid K. (2015). **Spatial Variability Mapping of Crop Residue Using Hyperion (EO-1) Hyperspectral Data**. *Remote Sensing*, 7, 8107-8127.
- Casson, B., Delacourt, C., Baratoux, D., & Allemand, P. (2003). **Seventeen years of the "La Clapiere" landslide evolution analysed from ortho-rectified aerial photographs**. *Engineering Geology*, 68, 123-139.
- Chen, J. J., Huang, C. L., Wu, Y. G., & Wu, P. H. (2021). **Influence Factors of 3D Modeling with Aerial Images**. *International Journal on Computer, Consumer and Control*, 10 (2), 1-11.
- Chintan, D., Rahul, J., & Srivastava. S. (2015). **A Survey on geometric correction of satellite imagery**. *International journal of computer applications*, 116 (12).
- Hackeloer, A., Klasing, K., Krisp, J. M., & Meng, L. (2014). **Georeferencing: a review of methods and applications**. *Annals of GIS*, 20(1), 61-69.
- Karsli, F., & Dihkan, M. (2010). **Determination of geometric deformations in image registration using geometric and radiometric measurements**. *Scientific Research and Essays* 5(3), 260-274.
- Lee, H., Beng, Y., Yin, C.W., & Wai, S.C. (2013). **Aerial Images Rectification Using Non-parametric Approach**. *Journal of Convergence* 4(2), 15-21.
- Liu D., Zhou, G., Huang, J., Zhang, R., Shu, L., Zhou, X., Xin, C. (2019). **On-Board Georeferencing Using FPGA-Based Optimized Second-Order Polynomial Equation**. *Remote Sensing*, 11(2):124. <https://doi.org/10.3390/rs11020124>
- McNish, I. G., & Smith, K. P. (2022). **Oat crown rust disease severity estimated at many time points using multispectral aerial photos**. *Phytopathology*, 112(3), 682-690.
- Pha, S.H. & Takeuchi, W. (2017). **Effect of GCPs in distribution and location on geometric correction of corona satellite image**. *Coordinate Magazine*, XIII(07), 14-19.
- Powers, P. S., Chiarle, M., & Savage, W. Z. (1996). **A digital photogrammetric method for measuring horizontal surficial movements on the Slumgullion earthflow, Hinsdale County, Colorado**. *Computers and Geosciences*, 22, 651-663.

- Richards, J. A., & Jia, X. (1999). **Remote sensing digital image analysis. An introduction**. Berlin: Springer.
- Riquelme A., Soldato M. D., Tomás R., Cano M., Bordehore L. J. & Moretti S. (2019). **Digital landform reconstruction using old and recent open access digital aerial photos**. *Geomorphology*, 329, 206-223.
- Rocchini, D., & Di Rita, A. (2005) **Relief effects on aerial photos geometric correction**. *Applied Geography*, 25, 159–168.
- Rossiter, D. G., & Tomislav, H. (2004). **Technical note: Creating geometrically-correct photo-interpretations, photomosaics, and base maps for a project GIS**. Enschede, NL: ITC, Department of Earth System Analysis.
- Russ, J. C. (2002). **The image processing handbook** (3rd ed). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Sameen M. I., Pradhan B., & Aziz O. S. (2018). "**Classification of Very High-Resolution Aerial Photos Using Spectral-Spatial Convolutional Neural Networks**", *Journal of Sensors*, 2018, 1-12.
- Sempio, J. N. H., Aranas, R. K. D., Lim, B. P., Magallon, B. J., Tupas, M. E. A., & Ventura, I. A. (2019). **Assessment of different image transformation methods on diwata-1 smi images using structural similarity measure**, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*, XLII-4/W19, 393–400, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W19-393-2019>.
- Tao, C.V., & Hu, Y. (2001). **Use of the Rational Function Model for Image Rectification**. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27(6), 593–602. <https://doi.org/10.1080/07038992.2001.10854900>.
- Toutin T. (2004). **Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods**, *International Journal of Remote Sensing*, 25(10), 1893-1924
- Wang, M., Hu, J., Zhou, M., Li, J.M. & Zhang, Z. (2013). **Geometric Correction Of Airborne Linear Array Image Based On Bias Matrix**. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Hannover Workshop, 21 – 24 May, Hannover, Germany.

