Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Ecology of Iranian Forests, Vol. 14, Issue 1, 2026 p: 121-133

OPEN ACCESS

Research Paper

Investigating the Elevation Accuracy of a Digital Surface Model Obtained from UAV Images in Forest Areas (Case Study: Darabkola Forests of Sari)

Hava Hasanvand[1], Hasan Akbari[2], Shaban Shataee Jouibary[3], Majid Lotfalian[4] and Alireza Hosseinpour[5]

1-PhD Student, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2-Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, (Corresponding author: hassan_akbarivas@yahoo.com)

3-Professor, Department of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

4- Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

5- Ph.D. in Forestry, Employee of Natural Resources of Gologah, Faculty of Forestry, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Received: 10 August, 2025 Revised: 15 October, 2025 Accepted: 25 November, 2025

Extended Abstract

Background: The construction of forest roads serves as a vital lifeline for the management and planning of the Hyrcanian forests. It is essential for utilizing various forest services, implementing conservation and restoration operations, and transporting timber and non-timber forest products, thereby playing a significant role in the national income. However, road construction can disrupt natural watercourses, create impervious surfaces, and induce runoff through side ditches, cross-drains, and cut-and-fill slopes. If forest roads are properly designed and distributed, they cause minimal damage to the biological mass and habitats, allowing the forest to maintain its optimal conditions for efficient management. Given the necessity of obtaining up-to-date information regarding forest micro-topography and the surface condition of forest roads to assess surface degradation, there is a need for a precise study of modern remote sensing methods, such as UAV imagery, and their required processing requirements. One effective quality control method for roads is a management and planning system based on UAV technology, which offers comprehensiveness, high precision, cost-effectiveness, and speed compared to traditional methods involving manual field inspections by technical experts. Furthermore, the Digital Surface Model (DSM) is a key product of remote sensing that serves as the foundation for many practical projects; photogrammetry enables the generation of accurate 3D models from 2D images. The objective of this study was to investigate the vertical accuracy of DSMs derived from UAV imagery, comparing models generated with varying numbers and distributions of accurate Ground Control Points (GCPs) against those generated without GCPs, using both high and medium-quality processing methods in the Type-1 Darabkola forests of Sari.

Methods: UAV images in suitable weather conditions with a flight height of 100 meters above the ground, overlapping length of 85% and width of 75%, and with a speed of 5 meters per second by Phantom 3 Pro quadcopter UAV images in days 3, 4 February 2023 in part of Darabkla forests with a length of about 2 km, 200 meters wide road around the road and in three separate flight projects were received during different days. The position of the points of ground reality observations was done using differential DGPS. Several ground control points were made for accurate ground referencing of the images and the preparation of a precise and integrated orthophoto mosaic of the harvested area using differential DGPS. Digital elevation models of the area prepared with ground control points and without control points were processed and compared using Agiosoft Photoscan software in high and medium-quality modes.

Results: The results showed that the mean Elevation points error (ME) was 1.01 m for the digital height model prepared with high-quality control points and 1.21 m for the medium quality method. However, it was 11.05 meters high and 10.72 meters with average quality for the digital height model prepared without high-quality control points. Moreover, the root mean square

Copyright © 2026 Hasanvand et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

absolute error (RMSE) of the height values was 2.33 meters for the height digital model prepared with control points with high-quality method and 2.39 meters with medium quality . For the digital model, the height prepared without control points was 13.67 meters with high quality and 13.42 meters with medium quality. The root means square relative error (RMSE%) values were was 0.87% and 0.90% for the height digital model prepared with high-quality control points and with medium quality, respectively. However, values of 5.14% and 5.04% were obtained for the height digital model prepared without high-quality control points and average quality, respectively. In addition, the results of the paired t-test at 5 and 1% probability levels of error showed that no significant difference between the height of the ground collection points and the digital height model with high and medium quality control points. However, there was a significant difference with high and medium quality methods between the height of the ground collection points and the digital height model of the preparation without control points.

Conclusion: The use of accurate Ground Control Points (GCPs) for georeferencing and orthomosaic production significantly improves the accuracy of DSM generation. Furthermore, comparing the two processing levels showed that high-quality processing yields lower RMSE values; therefore, it is recommended to use high-quality settings in Agisoft Metashape Professional 1.8. The results demonstrate that integrating accurate GCPs with UAV imagery ensures the production of highly accurate DSMs, and that high-quality processing enhances both vertical and horizontal precision. Notably, due to the sensitivity of the parameters, image acquisition was conducted during the deciduous season when the trees were leafless, ensuring a clear view of the forest floor (absence of canopy cover). To minimize errors in DSM production, the simultaneous use of GCPs

Keywords: Digital Surface Model, Elevation accuracy, Ground control point**s,** Processing method**,** UAV

How to Cite This Article: Hasanvand, H., Akbari, H., Shataee Jouibary, Sh., Lotfalian, M., & Hosseinpour, A. (2026). Investigating the Elevation Accuracy of a Digital Surface Model Obtained from UAV Images in Forest Areas (Case Study: Darabkola Forests of Sari). *Ecol Iran For,* 14(1), 121-133. DOI: 10.61882/ifej.2026.561

مقاله پژوهشی

بررسی دقت ارتفاعی مدل رقومی سطح تصاویر پهپاد در مناطق جنگلی (مطالعه موردی: جنگل دارابکلا ساری)

هوا حسنوند[۱]، حسن اکبری[۲]، شعبان شتایی جویباری[۳]، مجید لطفعلیان[۴] و علی‌رضا حسین‌پور[۵]

۱- دانشجوی دکتری، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۲- دانشیار، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، (نویسنده مسوول: hassan_akbarivas@yahoo.com)
۳- استاد، گروه جنگل‌داری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۴- استاد، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۵- دکتری جنگل‌داری، کارمند منابع طبیعی گلوگاه ساری، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴
صفحه: ۱۲۱ تا ۱۳۳

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: احداث جاده‌های جنگلی به‌عنوان شریان حیاتی مدیریت و برنامه‌ریزی جنگل هیرکانی، استفاده از خدمات مختلف آن، اجرای عملیات حفاظت و احیاء جنگل‌ها و حمل‌ونقل محصولات چوبی و غیر چوبی یک نیاز اساسی بوده و در درآمد ملی کشور نقش ویژه‌ای دارد. ساخت جاده باعث به هم خوردن مسیر آب‌های طبیعی، باعث ایجاد سطح نفوذناپذیر، ایجاد رواناب توسط جوی کناری، آبروهای عرضی، دامنه‌های خاک‌برداری و خاک‌ریزی می‌شود. اگر جاده جنگلی به‌خوبی طراحی و توزیع شود کمترین تخریب و صدمه به توده بیولوژیکی و رویشگاه وارد می‌شود و جنگل از نظر مدیریت بهینه در مطلوب‌ترین شرایط خود قرار می‌گیرد. توجه به ضرورت کسب اطلاعات به روز از وضعیت پستی‌وبلندی‌های ریز جنگلی و همچنین سطح رویی جاده‌های جنگلی از نظر وضعیت تخریب سطحی آنها، نیازمند مطالعه دقیق بررسی روش‌ها و منابع نوین سنجش از دوری نظیر تصاویر پهپادی و الزامات پردازش‌های مناسب تصویر می‌باشد. یکی از روش‌های کنترل کیفیت جاده، سیستم مدیریت و برنامه‌ریزی مبتنی بر بهره‌گیری از پهپاد است که علاوه بر جامعیت، دقت زیاد، بسیار کم‌هزینه و البته سریع می‌باشد و در مقایسه با روش‌های قدیمی که سطح راه‌ها توسط کارگران و کارشناسان فنی و به‌صورت حضور در محل و بازدید میدانی صورت می‌گیرد، بسیار مقرون‌به‌صرفه‌تر است. همچنین یکی از محصولات سنجش از دور مدل رقومی سطح زمین است که پایه بسیاری از پروژه‌های پرکاربرد است، و فتوگرامتری توانایی ایجاد مدل سه‌بعدی دقیق را با استفاده از تصاویر دوبعدی در اختیار کاربر قرار می‌دهد. هدف این تحقیق بررسی دقت ارتفاعی مدل رقومی سطح زمین حاصل از تصاویر پهپاد با استفاده از نقاط کنترل زمینی دقیق با تعداد و پراکندگی متفاوت و بدون نقاط کنترل زمینی برای استخراج مدل دقیق رقومی سطح زمین با روش‌های پردازش با کیفیت بالا و متوسط در جنگل‌های سری یک دارابکلا ساری است.

مواد و روش‌ها: تصاویر پهپاد در شرایط جوی مناسب با ارتفاع پروازی ۱۰۰ متر از سطح زمین، هم‌پوشانی طولی ۸۵ درصد و عرضی ۷۵ درصد و با سرعت ۵ متر بر ثانیه توسط پهپاد کوادکوپتر Phantom3 Pro در روزهای ۱۴ و ۱۵ بهمن ماه سال ۱۴۰۱ در بخشی از محدوده جنگل‌های دارابکلا به طول حدوداً ۲ کیلومتر جاده به پهنای ۲۰۰ متر اطراف جاده و در سه پروژه پروازی مجزا در طی روزهای مختلف دریافت شد. موقعیت نقاط برداشت‌های واقعیت زمینی با استفاده از DGPS تفاضلی صورت گرفت. تعدادی نقاط کنترل زمینی برای زمین مرجع‌سازی دقیق تصاویر و تهیه ارتوفتوموزائیک دقیق و یکپارچه منطقه برداشت‌شده با استفاده از DGPS تفاضلی انجام شدند. مدل‌های رقومی ارتفاعی زمین منطقه تهیه‌شده با نقاط کنترل زمینی و بدون نقاط کنترلی با استفاده از نرم‌افزار Agiosoft Photoscan در دو حالت کیفیت بالا و متوسط پردازش شدند و مورد مقایسه قرار گرفت.

یافته‌ها: میانگین خطای نقاط (ME) برای مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده با نقاط کنترلی با روش کیفیت بالا ۱/۰۱ متر و برای روش کیفیت متوسط ۱/۲۱ متر بود، درحالی‌که برای مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده بدون نقاط کنترلی با کیفیت بالا ۱۱/۰۵ متر و با کیفیت متوسط ۱۰/۷۲ متر بود. همچنین، جذر میانگین مربعات خطای مطلق (RMSE) مقادیر ارتفاعی برای مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده با نقاط کنترلی با روش کیفیت بالا ۲/۳۳ متر و با کیفیت متوسط ۲/۳۹ متر بود، درحالی که برای مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده بدون نقاط کنترلی با کیفیت بالا ۱۳/۶۷ متر و با کیفیت متوسط ۱۳/۴۲ متر بوده است. جذر میانگین مربعات خطای نسبی (RMSE٪) برای مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده با نقاط کنترلی با روش کیفیت بالا ۰/۸۷ درصد و با کیفیت متوسط ۰/۹۰ درصد بود، درحالی که برای مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده بدون نقاط کنترلی با کیفیت بالا ۵/۱۴ درصد و با کیفیت متوسط ۵/۰۴ درصد بود. به‌علاوه، نتایج حاصل از آزمون t جفتی در سطوح ۵ و ۱ درصد احتمال خطا نشان دادند که بین ارتفاع نقاط برداشت زمینی و مدل رقومی ارتفاعی با نقاط کنترلی با کیفیت بالا و متوسط تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، اما بین ارتفاع نقاط برداشت زمینی و مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده بدون نقاط کنترلی با روش کیفیت بالا و متوسط تفاوت معنی‌داری وجود داشت.

نتیجه‌گیری: استفاده از نقاط کنترل زمینی دقیق برای زمین مرجع‌سازی تصاویر و تهیه ارتوفتوموزائیک دقیق موجب بهبود دقت در تولید مدل رقومی سطح زمین می‌شود. همچنین، با توجه به این اینکه پردازش تصاویر با دو کیفیت (بالا و متوسط) انجام شد. نتایج نشان داد که در پردازش تصاویر با کیفیت بالا جذر مربع میانگین خطا کمتر می‌باشد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که پردازش تصاویر در نرم‌افزار Agisoft Metashape Professional 1.8 با کیفیت بالا انجام شود. نتایج پژوهش نشان می‌دهند است که استفاده از نقاط کنترل زمینی دقیق در تصویربرداری و تولید مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از تصاویر پهپاد، باعث تولید مدل رقومی ارتفاعی دقیق می‌شود و نوع پردازش با کیفیت بالا نیز موجب افزایش دقت ارتفاعی و حتی مسطحاتی می‌گردد. لازم به ذکر است که در این پژوهش با توجه به حساسیت و دقت اندازه‌گیری پارامترها برداشت تصاویر در فصل کاملاً خزان و بی‌برگی درختان انجام شد که جنگل فاقد تاج‌پوشش است. همچنین برای کاهش خطا در مدل رقومی سطح زمین، استفاده هم‌زمان از نقاط کنترل زمینی، موقعیت قرارگیری نقاط کنترلی و پراکندگی نقاط کنترلی دقیق پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پهپاد، روش پردازش، دقت ارتفاعی، مدل رقومی سطح زمین، نقاط کنترل زمینی

مقدمه

جاده‌های جنگلی تأسیسات زیرساختی مهمی هستند که فعالیت‌های جنگلداری را بدون وقفه انجام می‌دهند، این تأسیسات زیربنایی از نظر حفاظت و نگهداری از جنگل‌ها، جنگل‌کاری، گردشگری و حمل و نقل محصولات چوبی و غیر چوبی جنگل‌ها بسیار حائز اهمیت هستند (Ciritcioğlu &

Buğday, 2022). یکی از روش‌های فتوگرامتری نوین برای تولید[1] (DSM) استفاده از پرنده‌های بدون سرنشین[2] (UAV) است. با افزایش دسترسی به تصاویر دیجیتال و بهبود سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای کامپیوتری با قابلیت‌های بالا، گرایش به سمت استفاده از روش‌های خودکار جهت پردازش داده‌ها روزبه‌روز در حال افزایش است. یکی از روش‌هایی که امکان اندازه‌گیری و تفسیر را از طریق تصویر می‌دهد فتوگرامتری است که این کار از طریق ایجاد مدل دقیق سه‌بعدی منطقه مورد نظر انجام می‌دهد. از تصاویر همپوشان فتوگرامتری DSM منطقه به‌دست می‌آید که شامل مقادیر Z در یک شبکه دوبعدی x-y است، به طوری که می‌توان تکنیک‌های پردازش تصویر را بر روی آن اعمال کرد. به اندازه‌گیری مختصات سه‌بعدی به‌صورت دقیق برای تولید DSM دقیق نیاز است (Yilmaz *et al*., 2023). فناوری فتوگرامتری پهپادی به‌طور گسترده در بررسی‌های توپوگرافی، نظارت بر محیط زیست، استخراج اطلاعات پوشش گیاهی، کشاورزی، مخاطرات طبیعی، میراث فرهنگی، برنامه‌ریزی شهری، تهیه نقشه در پروژه‌های خطی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد (Remondino *et al*., 2011). مدل‌های رقومی سطح عوارض DSM و زمین مجموعه‌ای از قطعات همگن و عموماً هم‌اندازه‌اند که هریک دارای ارزش ارتفاعی خاصی هستند و برای استخراج عوارضی که از نظر هندسی ویژگی منحصربه‌فردی نسبت به سایر عوارض موجود در مدل دارند قابل استفاده هستند (Hinz & Baumgartner, 2000). مدل رقومی سطح (DSM)، مانند مدل رقومی ارتفاعی تنها شامل اطلاعات توپوگرافی سطح برهنه زمین نیست، بلکه در مورد اشیاء بالاتر از سطح توپوگرافی نیز اطلاعاتی دارد. در حقیقت، مدل رقومی سطح معرف بازتاب سطحی درختان، ساختمان‌ها و دیگر عوارض بالای سطح برهنه زمین و خود سطح زمین است (Kiani *et al*., 2021). ارتفاع در این مدل‌ها، صرفاً ارتفاع سطح زمین نیست بلکه سایر عوارض زمین مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و خط‌الرأس‌ها و مرزها نیز در این مدل‌ها لحاظ شده‌اند. در واقع، DTMها، DEMهایی هستند که به‌طور خاص المان‌هایی چون خطوط شکست را نیز نمایش می‌دهند (Podobnikar *et al*., 2020). روش‌های سنتی از قبیل فتوگرامتری و نقشه‌برداری زمینی امکان تهیه مدل‌های رقومی مذکور را با دقت زیاد فراهم می‌نمایند، اما اجرای این روش‌ها زمان‌بر و نیازمند حجم کاری بالایی است (Wierzbicki & Nienaltowski, 2021). در این راستا، حیدری مظفر و همکاران (Heydari Mozafar *et al*., 2022) در محوطه دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینای همدان، به پردازش تصاویر بدون اطلاعات دقیق مراکز تصویر با نقاط کنترل، پردازش تصاویر با اطلاعات دقیق مراکز تصویر و بدون استفاده از نقاط کنترل و پردازش تصاویر با اطلاعات دقیق مراکز تصویر و نقاط کنترل، در دو حالت پرواز با ارتفاع- ثابت و مقیاس- ثابت مد نظر پرداختند. طبق نتایج آنها، استفاده از نقاط کنترل زمینی، تصاویر مقیاس- ثابت و اطلاعات مراکز تصویر در فرآیند پردازش تصاویر جهت تولید نقشه‌های محدوده‌های خطی بهترین دقت ارتفاعی را نسبت به سایر حالات فراهم می‌کند. سپهری و امامی (Sepaheri & Emami, 2024) در مطالعه‌ای به تولید ارتوفتو حقیقی از تصاویر گوگل‌ارث و مقایسه با ارتوفتو تولیدی از تصاویر پهپاد در محوطه دانشگاه تفرش در استان مرکزی پرداختند. ارزیابی بصری نتایج نشان داد که در ارتوفتو تولیدی از تصاویر گوگل‌ارث لبه‌های عوارض کم‌ارتفاع بهتر از ارتوفتو تولیدی از تصاویر پهپاد بودند، ولی لبه‌های عوارض بلند به‌خصوص دارای سایه محسوس، کیفیت مناسبی نداشتند. همچنین، نتایج کمی در مناطق غیر ساختمانی نشان داد که با در نظر گرفتن خطای جذر میانگین مربعات خطای ارتفاعی، در ارتوفتوی تولیدی از داده‌های گوگل‌ارث نسبت به داده‌های پهپاد به‌ترتیب ۱/۱۰ متر و ۱/۳۴ متر است.

ذوالکیپلی و طاهر (Zulkipli & Tahar, 2018) در پژوهشی عملکرد پهپاد چند موتوره به منظور تولید نقشه مورد نیاز برای طراحی جاده در یک ارتفاع خاص در جاده بین‌المللی مالزی را بررسی کردند. مطالعه آنان شامل چهار مرحله مطالعه مقدماتی، جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها و تجزیه‌وتحلیل آنها بود. آنان نشان دادند که فتوگرامتری پهپادی توانست برای نقشه‌برداری بزرگ‌مقیاس، در بازه کوتاه‌مدت در طول پروژه مورد استفاده قرار گیرد. پس از انجام بررسی‌های مختلف، به این نتیجه رسیدند که این نوع فتوگرامتری برای استخراج راه با دقت اطمینان قابل قبول استفاده شود. لئوناردیا و همکاران (Leonardi *et al*., 2020) در پژوهشی میزان تأثیر پارامترهای ارتفاع پرواز، پوشش‌های طولی و عرضی، زاویه تیلت عکس‌برداری و شرایط آب و هوایی را بر روی کیفیت هندسی مدل ارتفاعی زمین مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پارامتر ارتفاع پرواز بیشترین تأثیر را بری روی کیفیت مدل ارتفاعی دارد و شرایط آب و هوایی ابری کیفیت بهتری نسبت به شرایط آفتابی دارد. سنکال و همکاران (Senkal *et al*., 2021) پارامترهای نقاط کنترل زمینی و هوایی، پوشش تصویربرداری و ارتفاع پرواز را بر روی کیفیت مدل سه‌بعدی سطح در اسکی شهیر ترکیه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان دادند که اختلاف ارتفاع نقاط کنترل تأثیر کمتری نسبت به پارامترهای ارتفاع پرواز و پوشش‌های تصویربرداری بر روی دقت مدل سه‌بعدی سطح داشتند. فورلانی و همکاران (Forlani *et al*., 2022) در قسمت جنوبی پردیس دانشگاه پارما تأثیر نقاط کنترل زمینی و هوایی و کیفیت آن‌ها بر روی دقت مدل سه‌بعدی حاصل از پهپاد را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان دادند که با افزایش کیفیت مختصات مراکز عدسی دقت نقطه سه‌بعدی افزایش یافت و دقت ارتفاعی مدل سه‌بعدی سطح در صورت اضافه شدن یک نقطه کنترل زمینی دو برابر افزایش یافت. گرک و پرزیبیلا (Gerke & Przybilla, 2023) در تحقیقی تأثیر توپوگرافی منطقه، پرواز متقاطع با ارتفاع کمتر از بخشی از منطقه مورد مطالعه و پخش و تعداد نقاط کنترل زمینی و هوایی را بر روی کیفیت هندسی مدل سه‌بعدی سطح مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان دادند که به‌طورکلی پرواز

1- Digital Surfase Model

2- Unmanned Aerial Vehicle

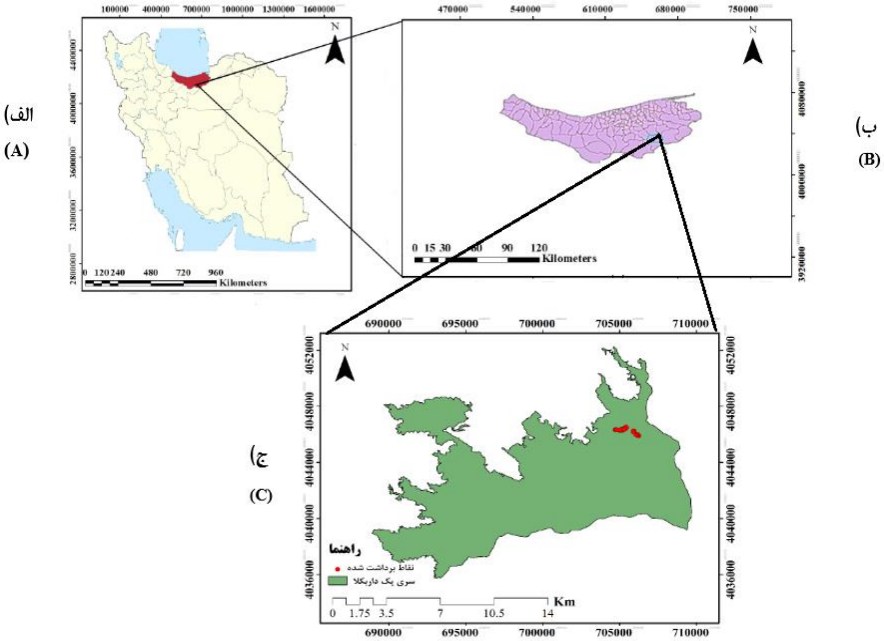
متقاطع باعث افزایش دقت شد که برای منطقه با توپوگرافی خشن این افزایش نقاط ناچیز بود ولی در توپوگرافی هموار و در حالت تعداد نقاط کنترل کمتر افزایش دقت برای مؤلفه‌ی ارتفاعی قابل توجه بود.

امروزه راهکار فتوگرامتری پهپاد در بین فناوری‌های نقشه‌برداری هوایی و زمینی، تبدیل به یکی از مؤثرترین روش‌های برداشت داده‌های مکانی از لحاظ هزینه، ملاحظات زمان، کیفیت و تنوع خروجی‌ها شده است. همچنین، با توجه به اهمیت مدل رقومی سطح در زمینه‌های مختلف و مزایای استفاده از فناوری UAV، به بررسی و تجزیه‌وتحلیل روش تولید مدل رقومی سطح با استفاده از تصاویر پهپاد با وضوح بالا در پژوهش حاضر در مناطق جنگلی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

پژوهش پیش رو در جنگل‌های آموزشی دانشگاه کشاورزی ساری سری یک دارابکلا در حدود ۱۵ کیلومتری شرق شهرستان ساری با مساحت ۲۶۱۲ هکتار در حاشیه رشته‌کوه‌های البرز و در قسمت مرکزی آن و در ارتفاعات پایین‌بند تا میان‌بند حوضه آبخیز ۷۴ انجام شد. این منطقه در محدوده جغرافیایی″ ۰۰ ′۲۳° ۳۶ تا ″ ۰۰ ′۳۳° ۳۶ عرض شمالی و ″ ۰۰ ′۳۱° ۵۲ تا ″ ۰۰′ ۲۰° ۵۲ طول شرقی قرار گرفته است. حداقل ارتفاع عرصه مورد نظر از سطح دریای آزاد ۱۶۰ متر و حداکثر ۷۱۰ متر و بیش‌ترین پراکنش سطوح آن در میانگین ارتفاعی ۵۰۰ متر قرار دارد. این جنگل‌ها از شمال به روستا دارابکلا، از جنوب به جنگل‌های بخش ۵ نکا–ظالم‌رود، از شرق به بخش یک نکا چوب و از غرب به سری دو دارابکلا محدود هستند که با احتساب اراضی بدون پوشش محاط در آن و عرصه‌هایی که به‌صورت مصنوعی و از طریق جنگل‌کاری احیاء گردیده‌اند مجموعاً سطحی حدود ۲۶۱۲ هکتار را در بر می‌گیرند. تیپ این جنگل‌ها در ارتفاعات پایین بلوط–ممرز، ممرز–انجیلی و ممرز–راش و در ارتفاعات بالا (۷۰۰ متر) راش–ممرز یا راش است.



شکل ۱– موقعیت منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب در: الف) کشور ایران، ب) استان مازندران و ج) جنگل‌های سری یک دارابکلا

Figure 1. The location of the studied area in: A) Iran, B) Mazandaran province, and C) the forests of Darabkla series

برداشت داده‌های زمینی

موقعیت داده‌های عرصه‌ای با استفاده از دستگاه DGPS تفاضلی مدل TS5 برداشت شد. پس از پیاده‌سازی قطعات، به‌صورت تصادفی تعداد ۴۳ نمونه با رعایت توزیع مناسب در طول مسیر جاده انتخاب گردیدند. شکل ۲ نقاط برداشت‌شده توسط DGPS تفاضلی را نشان می‌دهد.

شکل ۲- نقاط برداشت‌شده توسط DGPS تفاضلی
Figure 2. Points taken by differential DGPS

داده‌های پهپاد

تصاویر پهپاد در شرایط جوی مناسب با ارتفاع پروازی ۱۰۰ متر از سطح زمین، هم‌پوشانی طولی ۸۵ درصد و عرضی ۷۵ درصد و با سرعت ۵ متر بر ثانیه توسط پهپاد کوادکوپتر Phantom3 Pro در فصل زمستان و شرایط بدون برگی درختان جنگلی در ۱۴و ۱۵ بهمن ماه سال ۱۴۰۱ در بخشی از محدوده جنگل‌های دارابکلا به طول حدوداً ۲ کیلومتر جاده به پهنای ۲۰۰ متر اطراف جاده (شکل ۱) و در سه پروژه پروازی مجزا در طی روزهای مختلف دریافت شدند (شکل۳).

شکل۳- دوربین فانتوم پرو
Figure 3. Phantom Pro camera

تصاویر برداشت‌شده طی سه پروژه پروازی مجزا انجام و ۲۳۳۱ تصویر اخذ و ذخیره‌سازی شدند. به‌منظور انجام زمین مرجع‌سازی و تهیه ارتوفتوموزائیک منطقه در مراحل پردازش، قبل از انجام پروژه‌های پرواز، در مناطق باز منطقه ۶ نشانه (پریک) بر روی زمین گذاشته شد. موقعیت دقیق مرکز آن‌ها توسط DGPS تفاضلی به روش پردازش بعد از برداشت (PPK)[1] اخذ شد و سپس توسط نرم‌افزار (TBC)[2] مورد پردازش قرار گرفت. مشخصات پهپاد فانتو پرو۳ در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

1- Post-Processing Kenimatic
2- Trimble Business Center

جدول ۱- مشخصات پهپاد فانتوم پرو ۳

Table 1. Specifications of Phantom Pro 3 UAV

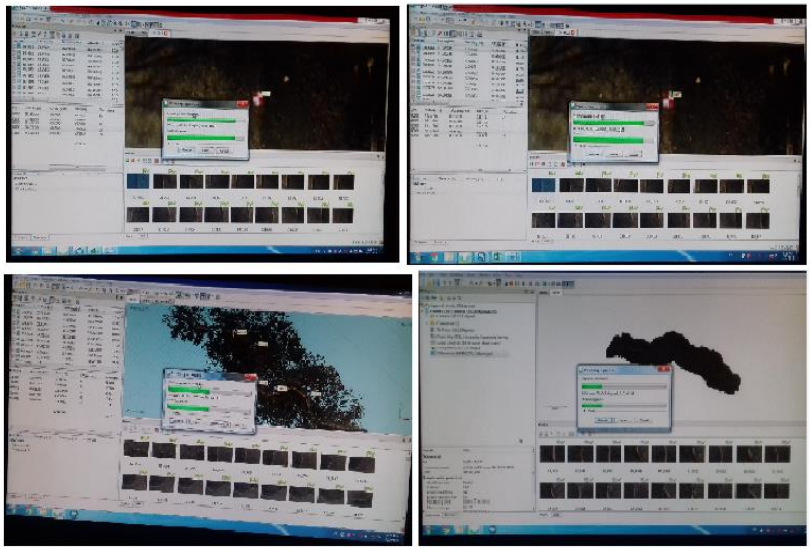
نام کامل محصول (Full product name)	DJI Phantom 3 Professional
ابعاد محصول (Product Dimensions)	قطر به‌همراه ملخ‌ها ۵۹ سانتی‌متر (Diameter including the blades: 59 cm)
وزن محصول (Product Weight)	۱۲۱۶ گرم (1216 gr)
خروجی تصویر (Image Output)	وایرلس (Wireless)
قابلیت ارتقاء حافظه (Memory Upgradeability)	تا ۶۴ گیگابایت Micro SD (Up to 64 GB Micro SD)
دوربین اصلی (Main Camera)	۱۲/۸مگاپیکسل-قابلیت فیلم‌برداری ۴K (12.8 Megapixels- K4 video recording capability)
سایر امکانات دوربین (Other Camera Features)	ایزو ۱۰۰ تا ۳۲۰۰ (ISO 100 to 3200)
جی‌پی‌اس (GPS)	مجهز به GPS داخلی با دقت بالا (Equipped with a high-precision internal GPS)
ارتباط USB (USB Connectivity)	USB Version2
حسگرها (Sensors)	قطب‌نما—ارتفاع‌سنج-شتاب‌سنج—ژیروسکوپ—فراصوت—حس‌گر اولتراسونیک (Compass–Altimeter–Accelerometer–Gyroscope–Ultrasonic–Ultrasonic sensor)
باتری (Battery)	۴ سلولی —۴۴۸۰ میلی‌آمپر-۱۵/۲ ولت (4 cells-4480 Milliampere-15.2 Volt)
سایر امکانات (Other Features)	مجهز به سیستم کمک پرواز—سیستم Way Point– سیستم Follow me–سیستم Home Lock Equipped with a flight assistance system- Way Point system- Follow me system- Lock Home system

پردازش تصویر هوایی پهپاد

پس از اخذ تصاویر پهپاد، آماده‌سازی‌های اولیه برای بررسی کنترل کیفیت تصاویر و حذف تصاویر با کیفیت پایین انجام گرفتند. ابتدا عکس‌های برداشت‌شده در عملیات پروازی، وارد نرم‌افزار Agiosoft Photoscan شدند. کیفیت عکس‌ها با استفاده از تابع برآورد کیفیت خودکار، مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که هر گاه مقدار عددی این تابع برابر یک باشد، نشان‌دهنده این است که تصاویر برداشت‌شده دارای بهترین کیفیت هستند و چنانچه کیفیت تصاویر کمتر از ۰/۵ باشد امکان اجرای پردازش‌های بعدی وجود ندارد. یک ساختار سه‌بعدی که اطلاعاتی در مورد موقعیت‌های نسبی دوربین و فاصله‌های نسبی بین دوربین و شیء نیز ارائه می‌دهد، خروجی نهایی این فرآیند خواهد بود (Leonardi *et al*., 2020). نرم‌افزار Agiosoft Photoscan با بهره‌گیری از اپراتور SIFT نقاط مشترک را در تصاویر پهپاد جستجو و با یکدیگر متناظر می‌کند. برای این کار، به‌منظور تأثیر مد کیفیت پردازش و اثر نقاط کنترل دقیق زمینی بر کیفیت مدل رقومی ارتفاعی تولیدی، تولید مدل رقومی سطح برای هر یک از پروژه‌های پروازی به‌طور جداگانه و همچنین با نقاط کنترل زمینی دقیق اخذشده توسط DGPS و بدون نقاط کنترل دقیق تهیه گردید.

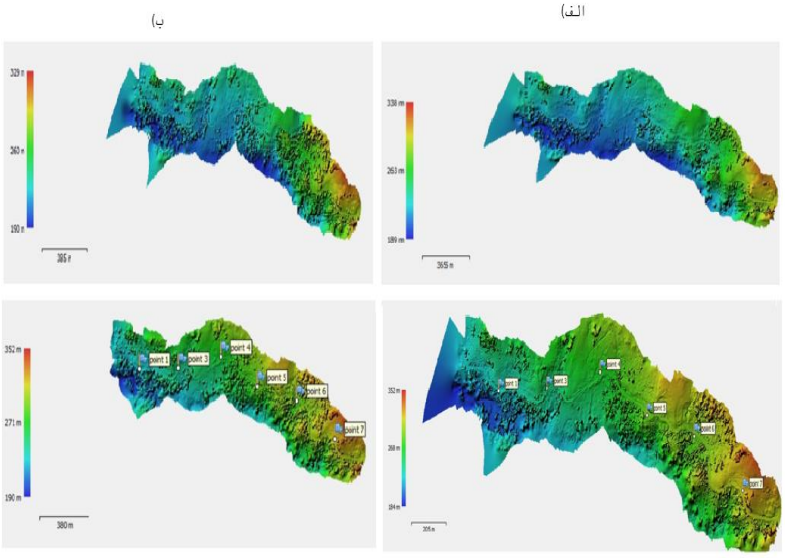
پردازش تصاویر در نرم‌افزار (Agisoft Metashape Professional 1.8) با دو کیفیت بالا و متوسط انجام شد و با استفاده از الگوریتم حرکت مبنا (SfM)[1]، ابر نقاط کم‌تراکم که خروجی این مرحله است در مناطق مشترک عکس‌ها ایجاد شد. در مرحله پردازش اولیه، ابر نقاط پراکنده تولید شده تنها از نقاط گرهی تشکیل شده است و دارای تراکم کم است که برای ایجاد هندسه یک مدل سه‌بعدی مناسب، ناکافی است. در مرحله بعد، با استفاده از پارامترهای دوربین و تصویر و ابر نقاط پراکنده حاصل از مرحله قبل، ابر نقاط متراکم که از میلیون‌ها نقطه تشکیل شده است برای تشکیل هندسه مدل ایجاد شد. شکل ۴ مراحل پردازش تصاویر اخذشده را در نرم‌افزار Agisoft نشان می‌دهد.

1- Structure from motion



شکل ۴- مراحل تشکیل ارتوفتوموزائیک و DSM در نرم‌افزار (Agisoft Metashape Professional 1.8)
Figure 4. The stages of forming ortho-photomosaic and DSM in the Agisoft Metashape Professional 1.8 software

سپس با استفاده از ابر نقاط متراکم، مدل رقومی ارتفاعی سطح (DSM) با قدرت تفکیک ۷ سانتی‌متر و ارتوفتوموزائیک پهپاد ۴ سانتی‌متر به‌صورت خودکار تولید شد. شکل ۴ مدل‌های رقومی ارتفاعی زمین منطقه با نقاط کنترلی با کیفیت بالا و متوسط و بدون نقاط کنترلی با کیفیت بالا و متوسط را نشان می‌دهد.



شکل ۵- مدل رقومی زمین (DSM) منطقه: الف) بدون نقاط کنترلی با کیفیت بالا، ب) بدون نقاط کنترلی با کیفیت متوسط، ج) همراه با نقاط کنترلی با کیفیت بالا، د) همراه با نقاط کنترلی با کیفیت متوسط
Figure 5. The Digital Earth Model (DSM) of the region: a) without high-quality control points, b) without medium-quality control points, c) with high-quality control points, d) with medium-quality control points

ارزیابی دقت

برای ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی، از داده‌های برداشت زمینی با DGPS (۴۳ نقطه) به‌عنوان داده‌های مبنا در تحقیق حاضر استفاده شد. برای مقایسه میزان تفاوت نقاط استخراجی از مدل رقومی سطح با داده‌های مبنا از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا مطلق (RMSE) (رابطه ۱)، جذر میانگین مربعات خطای نسبی (RMSE%) (رابطه ۲) و میانگین خطای مطلق نقاط (رابطه ۳) استفاده گردید.

$$RMSE=\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-y_i)^2/n}}{\bar{Y}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$RMSE\%=\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-y_i)^2/n}}{\bar{Y}}\times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$ME = \frac{|\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i)^2|}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این روابط $\hat{y}_i$ دار برآورد شده، $\bar{Y}$ میانگین برآورد شده و y مقدار مشاهده‌شده و همچنین n تعداد (قطعات نمونه) است.

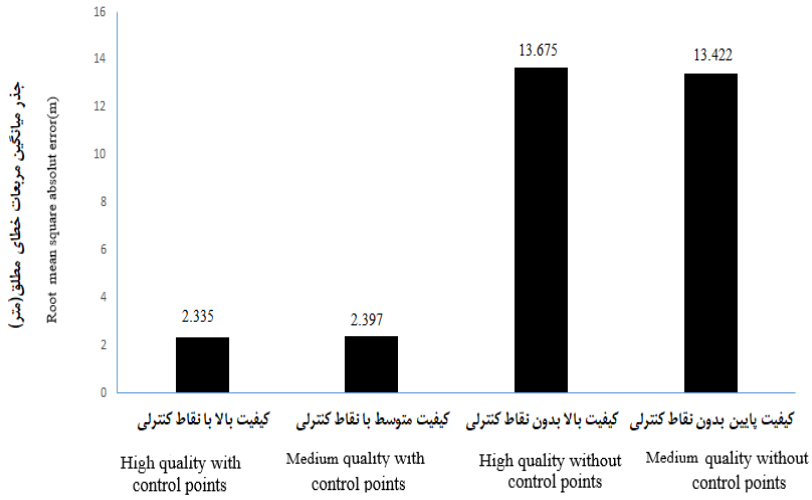
خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) تفاوت میان مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل یا برآوردگر آماری و مقدار واقعی می‌باشد و یک ابزار خوبی برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی‌شده توسط یک مجموعه داده است؛ بنابراین از این عدد می‌توان به‌عنوان یک شاخص مهم استفاده نمود. میانگین خطای مطلق (ME) کارایی مدل را نشان می‌دهد.

به‌منظور تجزیه‌وتحلیل آماری، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف–اسمیرنوف، در نرم‌افزار SPSS 26 بررسی شد. سپس داده‌های مربوط به مناطق با و بدون نقاط کنترلی که توزیع نرمال داشتند با استفاده از آزمون تی جفتی در سطح معنی‌داری ۵ و ۱ درصد تجزیه‌وتحلیل شد.

نتایج و بحث

با توجه به هزینه بالا و وقت‌گیر بودن تهیه نقشه‌های توپوگرافی با استفاده از تکنیک‌های زمینی، امروزه مدل‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور با توجه به این که از حیث دقت ارتفاعی دارای تنوع زیادی هستند و دسترسی به آنها بدون هیچ‌گونه هزینه‌ای به‌راحتی امکان‌پذیر است، مورد توجه گسترده بسیاری از محققین و مهندسین قرار گرفته‌اند. بررسی دقت ارتفاعی مدل‌های رقومی حاصل از هر یکی از منابع سنجش از دوری، از جمله سنجش از دور پهپادی، در مناطق مختلف از جمله مناطق جنگلی می‌تواند به تصمیم‌گیری در خصوص یافتن و ارائه منابع قابل قبول در تولید مدل‌های رقومی ارتفاعی زمین کمک زیادی نماید.

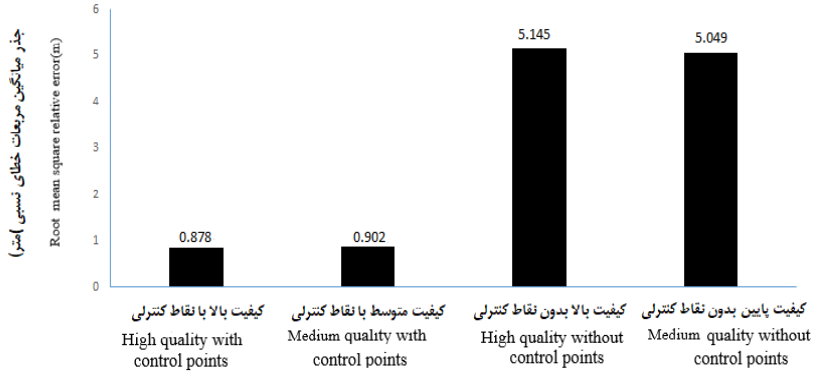
در این تحقیق و به‌منظور بررسی دقت ارتفاعی مدل‌های رقومی ارتفاعی حاصل از تصاویر پهپادی، نتایج ارزیابی خطای برآورد برای نقاط برداشت‌شده جنگلی با استفاده از نقاط کنترل زمینی اخذ شده توسط سیستم موقعیت جهانی DGPS نشان دادند که جذر میانگین مربعات خطای مطلق برای مناطق با نقاط کنترلی با روش کیفیت بالا ۲/۳۳ متر و با کیفیت متوسط ۲/۳۹ متر بود. درحالی که برای همین حالت بدون نقاط کنترلی با کیفیت بالا ۱۳/۶۷ متر و با کیفیت متوسط ۱۳/۴۲ متر بود (شکل ۵).



شکل ۶- نمودار مقایسه جذر میانگین مربعات خطای ارتفاعی مطلق مدل رقومی ارتفاعی تولیدشده با روش‌های مختلف پردازش تصاویر (کیفیت بالا و کیفیت متوسط) با و بدون نقاط کنترل دقیق زمینی

Figure 6. The comparison chart of the root mean square error (absolute) of produced DTM in different image processing methods (high-quality and medium-quality) and with and without accurate ground control points

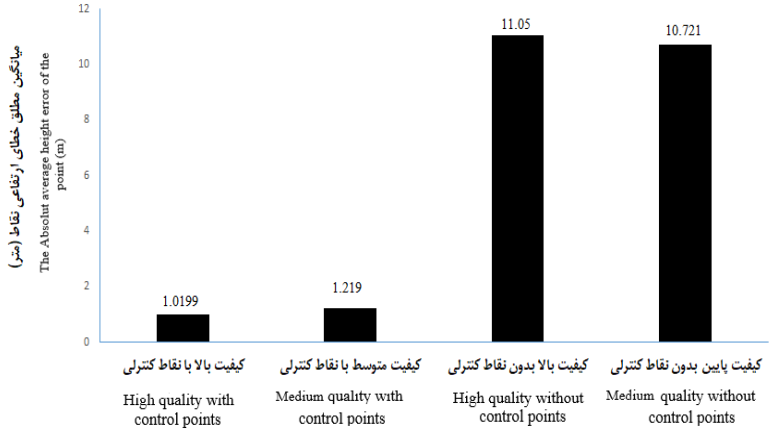
همچنین، میزان جذر میانگین مربعات خطای نسبی (RMSE%) مدل رقومی ارتفاعی تولید شده با نقاط کنترلی با روش کیفیت بالا ۰/۸۷ درصد و با کیفیت متوسط ۰/۹۰ درصد بود، درحالی‌که برای مدل رقومی ارتفاعی تولید شده بدون نقاط کنترلی با کیفیت بالا ۵/۱۴ درصد و با کیفیت متوسط ۵/۰۴ درصد بود (شکل ۶).



شکل ۷- نمودار مقایسه جذر میانگین مربعات خطای نسبی مدل رقومی ارتفاعی تولیدشده با روش‌های مختلف پردازش تصاویر (کیفیت بالا و کیفیت متوسط) با و بدون نقاط کنترل دقیق زمینی

Figure 7. The comparison chart of the root mean square error (relative) of produced DTM in different image processing methods (high-quality and medium-quality) with and without accurate ground control points

همچنین، میانگین مطلق خطای ارتفاعی نقاط (ME) برای مدل رقومی ارتفاعی تولیدشده با نقاط کنترلی با روش کیفیت بالا ۱/۰۱ متر و برای مدل با کیفیت متوسط ۱/۲۱ متر بود، درحالی‌که برای مدل رقومی ارتفاعی تولیدشده بدون نقاط کنترلی با کیفیت بالا ۱۱/۰۵ متر و برای کیفیت متوسط ۱۰/۷۲ متر بود (شکل ۷).



شکل ۸- نمودار مقایسه میانگین مطلق خطای مدل رقومی ارتفاعی تولید شده در روش‌های مختلف پردازش تصاویر (کیفیت بالا و کیفیت متوسط) با و بدون نقاط کنترل دقیق زمینی

Figure 8. The comparison chart of the absolute average error of produced DTM in different image processing methods (high-quality and medium-quality) with and without accurate ground control points

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که اثر نقاط کنترل زمینی دقیق در تهیه مدل رقومی سطح دقیق و با کیفیت در کاهش میزان خطا قابل توجه است (شکل ۵). کاردنیز و همکاران (Karadeniz *et al*., 2022) با استفاده از تصاویر پهپاد در مسیر جاده‌های جنگلی در ارتفاع ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ متری با کیفیت متوسط مقدار خطای جذر میانگین مربعات را به‌ترتیب در ارتفاع ۵۰ متری ۲/۵۱ متر، ۷۰ متری ۱۳/۳ متر و در ارتفاع ۱۰۰ متری ۵۳/۲ متر بیان کردند، که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. همچنین سپهری و امامی (Sepaheri & Emami, 2024) مقدار خطای جذر میانگین مربعات ۲/۳۴ متر را نشان دادند. در واقع، هرچه منطقه مسطح‌تر باشد و از نقاط کنترل زمینی استفاده شود خطای ارتفاعی کمتر خواهد بود که با نتایج حاصل از پژوهش حاضر مطابقت دارد. یانگ و تین (Xiang & Tain, 2018) ضمن تأکید بر اثر نقاط کنترل زمینی و زمین مرجع‌سازی، تصاویر حاصل از پهپاد را با استفاده از ۱۶ نقطه کنترل زمینی مرجع کردند و (RMSE) را ۵۶/۹ سانتی‌متر به‌دست آوردند. زهاوی و همکاران (Zahawi *et al*., 2015) نیز از نقاط کنترل زمینی برای پایش تغییرات پوشش گیاهی استفاده کردند و به دقت ۳۵ سانتی‌متر رسیدند. علت تفاوت نتایج این پژوهش‌ها با پژوهش پیش رو می‌تواند به‌دلیل تفاوت در نوع سکو، نحوه ثبت نقاط کنترلی و نیز فرایند مرجع‌سازی باشد.

همان‌طور که در مطالعه پیش رو نشان داده شد، یکی از محدودکننده‌ترین کارها و زمان‌برترین از نظر دسترسی به منطقه، تعیین موقعیت نقاط کنترل است، بهترین نتایج برای دقت‌ها با در نظر گرفتن نقاط کنترل در اطراف محدوده نقاط کنترل به دست می‌آید که با پژوهش‌های (Demir *et al*., 2018; Haider Yamzofar *et al*., 2022; Erfanzadeh & Saadatzadeh, 2021) مطابقت دارد. به‌علاوه، انتخاب نقاط کنترل در درون محدوده با توزیع مناسب برای بهینه‌سازی دقت ارتفاعی ضروری است. تعداد و موقعیت قرارگیری نقاط کنترل زمینی در محدوده مد نظر برای زمین مرجع نمودن دقیق تصاویر و ارزیابی دقت در مراحل مختلف لازم است (Mijani *et al*., 2017; Martínez *et al*., 2018; Abbasporou & Varshosaz, 2019). در این راستا، سنکال و همکاران (Senkal *et al*., 2021) در تحقیق خود اذعان داشتند که عدم استفاده از نقاط کنترلی باعث اختلاف ۱ متر جذر میانگین مربعات (RMSE) شد، ولی استفاده از نقاط کنترل به‌طور قابل توجهی نتایج را بهبود بخشید که این نتیجه‌گیری، با نتایج پیش رو همسو است. در این تحقیق، مشخص گردید که اگر تعداد کمی از نقاط کنترل زمینی استفاده شود، مقدار جذر مربع میانگین خطا در نقاط کنترل حدود ۵ برابر خواهد شد، ولی با اضافه کردن تعداد بیشتری از نقاط کنترل زمینی مقدار جذر مربع میانگین خطا در نقاط چک حدود ۲ برابر کاهش می‌یابد. فررگونزالیز و همکاران (Ferrer-González *et al*., 2020) بیان نمودند که برای تعداد معینی از نقاط کنترل، دقت به‌دست‌آمده با استفاده از یک توزیع بهینه، دو برابر حالتی است که نقاط کنترل توزیع نامناسبی داشته باشند. درنهایت برای پروژه‌های با وسعت زیاد، تنها با تعداد متوسط یا زیاد نقاط کنترل می‌توان به دقت مطلوبی رسید، که با پژوهش پیش رو همخوانی دارد. عدم استفاده از نقاط کنترل زمینی باعث کاهش توان تفکیک مکانی DSM می‌شود و مقدار (RMSE) افزایش و مقدار (ME) کاهش می‌یابد که در مطالعه حاضر مشاهده شد و به نتایج چناری و همکاران (Chenare *et al*., 2018) نزدیک است.

مقایسه میانگین ارتفاعی نقاط برداشت زمینی و مدل رقومی ارتفاعی تولید شده با نقاط کنترلی و بدون نقاط کنترلی با روش کیفیت بالا و متوسط با استفاده از آزمون T جفتی در سطح ۵ و ۱ درصد نشان داد که در مناطق با نقاط کنترلی میانگین برداشت زمینی و مدل رقومی با روش کیفیت بالا (۰/۰۷۶ متر) کمتر از میانگین برداشت زمینی و مدل رقومی با کیفیت متوسط (۰/۰۸۸ متر) بود. در مناطق بدون نقاط کنترلی، میانگین برداشت زمینی و مدل رقومی با روش کیفیت بالا (۹/۵۹ متر) بیشتر از میانگین برداشت زمینی و مدل رقومی با کیفیت متوسط (۹/۲۸ متر) بود. به‌علاوه در مناطق با نقاط کنترلی، بین برداشت زمینی و مدل رقومی ارتفاعی با کیفیت بالا و متوسط تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ($P > 0.05$). در مناطق بدون نقاط کنترلی، بین برداشت زمینی و مدل رقومی با روش کیفیت بالا و متوسط تفاوت معنی‌داری وجود داشت ($P < 0.05$) (جدول ۲). صفرپور و همکاران (Safar por *et al*., 2016) که به بررسی پروژه‌های جاده‌های جنگلی در سری ۷ پارسل ۱، ۲ و ۲۳ نکا مازندران با استفاده از تصاویر پهپاد پرداخته بودند اذعان داشتند که اختلاف معنی‌داری در مناطق با ۸ نقطه کنترلی بین دو روش برداشت زمینی و برداشت هوایی داده‌ها وجود نداشت. همچنین، چناری و همکاران (Chenare *et al*., 2018) گزارش نمودند که اختلاف معنی‌داری بین اندازه‌گیری‌ها و مقدار واقعی وجود نداشت و از دقت نتایج کاسته شد که با نتایج حاصل از پژوهش حاضر همخوانی دارد. یلماز و همکاران (Yilmaz *et al*., 2022) و سنکال و همکاران (Senkal *et al*., 2021) نشان دادند که بین تصاویر پهپاد و داده‌های زمینی در مناطق بدون نقاط کنترلی آنها تفاوت معنی‌داری وجود داشت که با پژوهش حاضر مطابقت دارد. گیندراکس و همکاران (Gindraux *et al*., 2017) بیان نمودند که افزایش تعداد نقاط کنترل تا یک محدوده مشخص تأثیر معنی‌داری روی دقت مدل سه‌بعدی داشت. روسلی و همکاران (Rusli *et al*., 2017) با تجزیه و تحلیل آماری نشان دادند که مدل رقومی ارتفاعی حاصل از تصاویر پهپاد تفاوت معنی‌داری با داده‌های زمینی نداشت.

در پژوهش عرفانی فرد و همکاران (Erfani fard *et al*., 2019) که تأثیر توان تفکیک مکانی تصاویر هوایی پهپاد در برآورد ارتفاع درختان بنه در استان فارس را بررسی کردند، بین مقدار برآوردی و واقعی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت که مؤید نتایج به‌دست‌آمده است.

جدول ۲- مقایسه میانگین برداشت زمینی و مدل رقومی ارتفاعی بین مناطق با و بدون نقاط کنترلی (کیفیت بالا و متوسط) با آزمون t جفتی

Table 2. The comparison of average ground survey and the elevation digital model between areas with and without control points using a paired t-test (high and medium quality)

گروه‌ها Groups	مؤلفه‌ها Components	انحراف استاندارد Std. Deviation	میانگین Mean	t	درجه آزادی Degrees of freedom	سطح معنی‌داری Sig
مناطق با نقاط کنترلی	کیفیت بالا و زمینی	2.36	0.766	0.213	42	0.83 ns
	کیفیت متوسط و زمینی	2.42	0.088	0.238	42	0.81 ns
مناطق بدون نقاط کنترلی	کیفیت بالا و زمینی	9.85	9.59	6.38	42	0.000**
	کیفیت متوسط و زمینی	9.81	9.28	6.20	42	0.000**

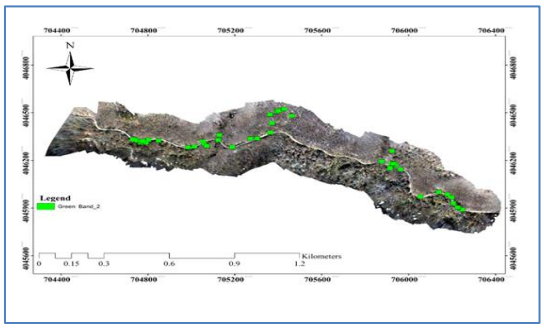
ns بدون معنی‌داری، * معنی‌داری در سطح اطمینان ۰/۰۵ درصد، و ** معنی‌داری در سطح اطمینان ۱ درصد

ns no significance, * significance at the 95% confidence level, and ** significance at the 99% confidence level

همچنین در این تحقیق علاوه بر مدل رقومی ارتفاعی، ارتوفتوموزاییک[1] رقومی تصاویری را برای دید یکپارچه از منطقه و رویت وضعیت کلی منطقه تولید نمود. امروزه ارتوفتو یکی از پرکاربردترین محصولات فتوگرامتری نوین است. در ارتوفتو می‌توان تصویر قائم زمین به همراه تمامی عوارض موجود بر روی آن (نظیر ساختمان‌ها، خیابان‌ها و غیره) را

1- Orthophoto

به‌صورت یکپارچه مشاهده کرد. در مطالعه حاضر، مدل رقومی سطح (DSM) با قدرت تفکیک ۷ سانتی‌متر و ارتوفتوموزائیک ۴ سانتی‌متر به‌صورت خودکار تولید شد (شکل ۸). چناری و همکاران (Chenare *et al*., 2018) به بررسی برآورد مساحت تاج تک‌درختان بنه با استفاده از DSM تصاویر هوایی پهپاد در جنگل تحقیقاتی بنه در فارس پرداختند. آنها ارتوفتوموزاییک ۳/۴۷ سانتی‌متر و DSM با توان تفکیک مکانی ۸ سانتی‌متر را گزارش دادند. دقت نسبی و مطلق کیفیت تولیدات فتوگرامتری به عوامل مختلفی ازجمله پارامترهایی نظیر ویژگی‌های دوربین، فاصله نمونه‌برداری زمینی، طراحی پرواز، فاصله پهپاد تا سطح زمین، کیفیت هندسی و رادیومتری دوربین تصویربرداری، دقت، تعداد و پراکندگی نقاط کنترل زمینی و عوامل دیگر بستگی دارد. ژو و همکاران (Zhou *et al*., 2022) نیز اذعان داشتند که وجود اطلاعات مکانی و بافتی دقیق عوارض در ارتوفتو موجب می‌شود تا بتوان از آن در تلفیق با مدل‌های سه‌بعدی به واقعیت مجازی دست یافت که در آن امکان اندازه‌گیری موقعیت مسطحاتی عوارض حین دید سه‌بعدی وجود دارد.



شکل ۹- ارتوفتوموزاییک منطقه تصویربرداری شده و موقعیت آن در جنگل دارابکلا
Figure 9. The orthophotomosaic of the imaged area and its location in Darabkla forests

نتیجه‌گیری کلی

هدف از این پژوهش، بررسی دقت ارتفاعی مدل رقومی زمین در مناطق جنگلی با استفاده از تصاویر پهپاد با وضوح بالا ناشی از به‌کارگیری نقاط کنترل دقیق زمینی و نوع مد پردازشی در تولید مدل است. نتایج نشان می‌دهند که به‌کارگیری تعداد محدودی از نقاط کنترل زمینی دقیق با مد پردازش تصاویر با کیفیت بالا، بهترین دقت ارتفاعی در تهیه مدل رقومی سطح را فراهم می‌کند. همچنین باعث افزایش دقت ارتفاعی می‌شود، تأثیر کمتری بر روی دقت مسطحاتی دارند و همچنین در کاهش میزان خطا قابل توجه است.

Referencess

Abbaspur, M., & Varshusaz, M. (2018). The effect of the number and position of ground control points on the accuracy obtained for the UAV-based photogrammetry map. *Proceedings of the 3rd National Geospatial Information Technology Engineering Conference and the 25th National Geomatics Conference*, 1(12), 1–9. [In Persian]

Barazzetti, L., Brovelli, M. A., & Valentini, L. (2020). LiDAR digital building models for true orthophoto generation. *Applied Geomatics, 2*(4), 187–196.

Cevik, P., Kocaman, I., Akgul, A. S., & Akca, B. (2013). The small and silent force multiplier: A swarm UAV electronic attack. *Journal of Intelligent & Robotic Systems, 70*, 595–608. https://doi.org/10.1007/s10846-012-9698-1

Chenare, A., Erfanifard, Y., Deghani, M., & Porghasemi, H. (2018). Estimating the crown area of monocots using DSM aerial drone images in the forest, Fars Province. *Journal of Wood and Forest Science and Technology, 24*(1), 117–130. [In Persian]

Demir, N., Sönmez, N. K., Akar, T., & Ünal, S. (2018). Automated measurement of plant height of wheat genotypes using a DSM derived from UAV imagery. *Proceedings of the Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*. [Please verify journal/proceedings details]

Erfanifard, S. Y., Chenari, A., Dehghani, M., & Amiraslani, F. (2019). Effect of spatial resolution of UAV aerial images on height estimation of wild pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) trees. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research,* 27(2), 169-181. [In Persian]

Erfanzadeh, A., & Saadat Sarasht, M. (2021). Analysis of the behavior and effect of UAV photogrammetry network design parameters on the quality of 3D reconstruction by Monte Carlo-like method. *Journal of Application of Geographic Information System and Remote Sensing, 30*(19), 28–45. [In Persian]

Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2020). UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sensing, 12*, 2447.

Forlani, G., Dall'Asta, E., Diotri, F., Cella, U., Roncella, R., & Santise, M. (2018). Quality assessment of DSMs produced from UAV flights georeferenced with on-board RTK positioning. *Remote Sensing, 10*(2), 311.

Gerke, M., & Przybilla, H. J. (2023). Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, (1), 17–30.

Gindraux, S., Boesch, R., & Farinotti, D. (2017). Accuracy assessment of digital surface models from unmanned aerial vehicles' imagery on glaciers. *Remote Sensing, 9*(2), 186.

Goudei, M. A., & Landry, R. J. (2020). Assessing horizontal positional accuracy of unmanned aerial vehicles' imagery in the city of Montreal, Canada. *Geodesy and Cartography, 43*(2), 56–65.

Heydari, M., Zarafati, J. R., & Torabzadeh Khorasani, H. (2022). Accuracy of topographic map production in linear projects by drone photogrammetry method. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Information, 31*(123), 124–130. [In Persian]

Hinz, S., & Baumgartner, A. (2000). Road extraction in urban areas is supported by context objects. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33*(B3), 405–412.

Karadeniz, T., Orman, F., & Orman, M. (2022). Use of unmanned aerial vehicles in forest road projects. *Journal of Bartin Faculty of Forestry, 24*(3), 530–541.

Kiani, A., Ahmadi, F. F., & Ebadi, H. (2021). Correction of the training process in object-based image interpretation via knowledge-based system capabilities. *Multimedia Tools and Applications, 80*, 25997–26020.

Leonardi, G., Barrile, V., Palamara, R., Suraci, F., & Candela, G. (2020). 3D Mapping of pavement distresses using an unmanned aerial vehicle (UAV) system. In *New Metropolitan Perspectives*, 164-171, Springer.

Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F. J. (2018). Assessment of UAV photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 72*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015

Mijani, N., Moghadam, M., & Firouzjaei, H. (2017). Investigating the effectiveness of unmanned aerial images for producing a digital model of the surface. *Journal of Application of Geographic Information System and Remote Sensing in Planning, 8*(1), 25–39. [In Persian]

Podobnikar, T., Stancic, Z., & Oštir, K. (2020). Data integration for the DTM production. *International Cooperation and Technology Transfer, 25*(3), 158–162.

Remondino, F., Barazzetti, L., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling: Current status and future perspectives. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38*(1), 25–31.

Rusli, N., Majid, M. R., & Din, A. H. M. (2020). Google Earth's derived digital elevation model: A comparative assessment with ASTER and SRTM data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 540*(1), 012028.

Safarpor, M. (2016). Accuracy assessment of UAV-based photogrammetric mapping in forest road construction projects (Parcels 1, 2, and 23, Neka, Mazandaran) [Master's thesis, University of Mazandaran]. [In Persian]

Senkal, E., Kaplan, G., & Avdan, U. (2021). Accuracy assessment of digital surface models from unmanned aerial vehicles' imagery on archaeological sites. *International Journal of Engineering and Geosciences, 6*(2), 81–89.

Sepaheri, M., & Emami, H. (2024). Real orthophoto production from Google Earth images and comparison with orthophoto produced from UAV images. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Information, 32*(124), 22–37. [In Persian]

Wierzbicki, D., & Nienaltowski, M. (2021). Accuracy analysis of a 3D model of excavation, created from images acquired with an action camera from low altitudes. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 10*(2), 43. https://doi.org/10.3390/ijgi10020043

Xiang, H., & Tian, L. (2018). Method for automatic georeferencing aerial remote sensing (RS) images from an unmanned aerial vehicle (UAV) platform. *Biosystems Engineering, 108*(2), 104–113.

Yilmaz, V., Konakoglu, B., Serifoglu, C., Gungor, O., & Gökalp, E. (2023). Image classification-based ground filtering of point clouds extracted from UAV-based aerial photos. *Geocarto International, 38*(3), 310–320.

Zahawi, R. A., Dandois, J. P., Holl, K. D., Nadwodny, D., Reid, J. L., & Ellis, E. C. (2015). Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biological Conservation, 186*, 287–295. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.03.020

Zhou, G., Wang, Q., Huang, Y., Tian, J., Li, H., & Wang, Y. (2022). True2 orthoimage map generation. *Remote Sensing, 14*(17), 4396. https://doi.org/10.3390/rs14174396

Zulkipli, M. A., & Tahar, K. N. (2018). Multirotor UAV-based photogrammetric mapping for road design. *International Journal of Optics, 13(3),5361.* https://doi.org/10.1155/2018/1871058