

Improving land cover classification in mountainous areas by combining Sentinel-1 images from different orbits and Assessing Radiometric Terrain Flattening Effects

Mohammad Ebrahimi*, and Mahmod Reza Sahebi

Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of
Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author: m.ebrahimi\@email.kntu.ac.ir

Abstract

Background and aim: In recent years, land cover has been recognized as a key indicator for assessing climate change, ecosystems, and the management of natural resources. Growing challenges in acquiring up-to-date and accurate data have led to the adoption of modern remote sensing technologies. Among these, the Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery has emerged as a reliable source for land surface characterization. These images are produced by a SAR system using active microwave technology, enabling effective operation in all weather conditions. Therefore, this technology proves to be an appropriate tool for generating reliable and detailed land cover maps. The aim of this research is to improve the classification of land cover by simultaneously utilizing images acquired from both the ascending and descending orbits of Sentinel-1. In addition, the study investigates the impact of applying radiometric terrain flattening corrections on the overall accuracy of the classification results.

Materials and methods: This study examined three different regions in Iran: Marand, Sari, and Chadegan, which were selected due to their varied land cover characteristics and the presence of mountainous areas. The data used consisted of Sentinel-1 satellite images with VV and VH polarizations from both ascending and descending passes. Preprocessing steps included applying orbit file, thermal noise removal, border noise removal, calibration, radiometric terrain flattening, speckle filtering, Range-Doppler terrain correction, and conversion to decibels. Additionally, the data were rescaled to a specific range using the min-max normalization method. The Random Forest (RF) algorithm was then employed to classify land cover into five classes: water, soil, vegetation, urban areas, and agriculture. Finally, the results were evaluated using overall accuracy, the kappa coefficient, and class-specific accuracy metrics.

Results and discussion: The results indicate that the simultaneous use of ascending and descending images without applying radiometric terrain flattening significantly improves classification accuracy across all study areas. For example, in Marand, the overall classification accuracy increased from 65.33% to 79.17%, representing an approximate improvement of 13%. In Sari, the combination of images raised the overall accuracy from 55.77% to 70.51%, while in Chadegan, it resulted in an approximate 12% increase from 56.88% to 68.06%. Regarding class-specific accuracy, in Marand, the vegetation class improved from 43.41% to 69.64%, and in Sari, the soil class accuracy increased from 19.57% to 46.40%. Numerical analysis suggests that combining images from different orbits provides complementary perspectives of the Earth's surface, helping to reduce distortions caused by viewing angles and topography. In addition, the results reveal that while radiometric terrain flattening can enhance the accuracy of certain classes when using a single image, its application in the combination of two images may cause excessive similarity between some classes, ultimately reducing overall performance.

Conclusion: In conclusion, this research highlights the importance of concurrently using Sentinel-1 images from both ascending and descending orbits, particularly when radiometric terrain flattening is not applied, which plays a crucial role in enhancing the accuracy of land cover classification. The observed improvement in overall accuracy, ranging from 13% to 20% across different study areas, underscores the strong potential of this approach for land cover mapping. Moreover, the findings of this study demonstrate that the preprocessing methods employed for Sentinel-1 images have a significant

impact on the accuracy and efficiency of classification models. In some cases, applying radiometric terrain flattening can lead to a decrease in both accuracy and efficiency. Therefore, optimally combining Sentinel-1 data from multiple orbital passes can lead to more accurate and reliable land cover maps. The approach presented in this study can thus serve as a valuable reference for future studies in the field of remote sensing, particularly those focused on improving land cover classification for environmental and agricultural applications.

Keywords: Remote Sensing, Land Cover Classification, SAR Imagery, Radiometric Terrain Flattening, Random Forest Algorithm.

بهبود طبقه‌بندی پوشش زمین در نواحی کوهستانی با ترکیب تصاویر سنتینل-۱ از مدارهای مختلف و ارزیابی

اثرات تصحیح رادیومتریک توپوگرافی

محمد ابراهیمی*، محمودرضا صاحبی

دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

نویسنده عهده دار مکاتبات: m.ebrahimi1@email.kntu.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: در سال‌های اخیر، پوشش زمین به عنوان یک شاخص کلیدی در بررسی تغییرات اقلیمی، سیستم‌های اکولوژیکی و مدیریت منابع طبیعی مورد توجه قرار گرفته است. محدودیت‌های موجود در تهیه داده‌های به‌روز و دقیق، نیاز به استفاده از فناوری‌های نوین سنجش از دور را افزایش داده است. در این میان، تصاویر راداری سنتینل-۱، که به یک سامانه رادار با روزنه مجازی (SAR) مجهز است، به دلیل فناوری مایکروویو فعال خود، می‌تواند با قابلیت عملکرد در هر شرایط جوی، ابزاری مناسب جهت تهیه نقشه‌های پوشش زمین به‌شمار آید. هدف این تحقیق، بهبود طبقه‌بندی پوشش زمین با استفاده همزمان از تصاویر دریافتی از مدارهای بالارونده و پایین‌رونده سنتینل-۱ و بررسی تأثیر تصحیح رادیومتریک توپوگرافی بر صحت نتایج طبقه‌بندی می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق، سه منطقه مختلف در ایران شامل شهرهای مرند، ساری و چادگان، به دلیل ویژگی‌های متفاوت پوشش زمین و وجود نواحی کوهستانی، مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، تصاویر ماهواره سنتینل-۱ با قطبش‌های VV و VH در هر دو گذر بالارونده و پایین‌رونده می‌باشد. پیش‌پردازش داده‌ها شامل مراحل نظیر اعمال فایل مداری، حذف نویز حرارتی، حذف نویز حاشیه، کالیبراسیون، تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، فیلتر اسپکل، تصحیح توپوگرافی رنج داپلر و تبدیل به دسی‌بل انجام شد. همچنین، با استفاده از روش نرمال‌سازی کمینه-بیشینه، داده‌ها به بازه‌ای مشخص تغییر مقیاس یافتند. سپس، الگوریتم جنگل تصادفی (RF) جهت طبقه‌بندی پوشش زمین به کار گرفته شد. این طبقه‌بندی شامل پنج کلاس آب، خاک، پوشش گیاهی، مناطق شهری و کشاورزی می‌باشد. در انتها نتایج با استفاده از معیارهای صحت کلی، ضریب کاپا و صحت هر کلاس مورد ارزیابی قرار گرفتند.

نتایج و بحث: نتایج نشان می‌دهد که استفاده همزمان از تصاویر بالارونده و پایین‌رونده بدون اعمال تصحیح رادیومتریک توپوگرافی باعث بهبود قابل توجه صحت طبقه‌بندی در تمامی مناطق مورد مطالعه می‌شود. به عنوان مثال، در مرند صحت کلی طبقه‌بندی از ۶۵.۳۳ درصد به ۷۹.۱۷ درصد افزایش یافته است که معادل با بهبود تقریبی ۱۳ درصد می‌باشد. در ساری، ترکیب تصاویر منجر به افزایش صحت کلی از ۵۵.۶۷ درصد به ۷۵.۴۱ درصد شده است. همچنین در چادگان، افزایش حدود ۱۲ درصدی صحت کلی از ۵۶.۸۸ درصد به ۶۸.۰۶ درصد مشاهده شده است. از نظر صحت کلاسی، در مرند صحت کلاس پوشش گیاهی به طور چشمگیری از ۴۳.۴۱ درصد به ۶۹.۶۴ درصد ارتقا یافته است و در ساری، صحت کلاس خاک از ۱۹.۵۷ درصد به ۴۶.۴۰ درصد بهبود یافته است. تحلیل عددی نشان می‌دهد که ترکیب تصاویر از مدارهای مختلف، دیدگاه‌های مکملی از سطح زمین ارائه می‌دهد که به کاهش اعوجاج‌های ناشی از زاویه دید و توپوگرافی کمک می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که اعمال

تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، تأثیر دوگانه‌ای دارد. در حالت تک‌تصویری می‌تواند به بهبود صحت برخی کلاس‌ها کمک کند، اما در ترکیب دو تصویر ممکن است باعث شباهت بیش از حد بین برخی کلاس‌ها شده و در نهایت عملکرد کلی را کاهش دهد. **نتیجه‌گیری:** این تحقیق تأکید می‌کند که به‌کارگیری همزمان تصاویر سنتینل-۱ از مدارهای بالارونده و پایین‌رونده، به‌ویژه بدون استفاده از تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، نقش کلیدی در افزایش صحت طبقه‌بندی پوشش زمین دارد. افزایش صحت کلی طبقه‌بندی به میزان ۱۳ تا ۲۰ درصد در مناطق مختلف، نشان از پتانسیل بالای این رویکرد در طبقه‌بندی پوشش زمین دارد. از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهد که نحوه پیش پردازش تصاویر سنتینل-۱ در صحت و کارایی مدل تأثیر گذار است و استفاده از تصحیح رادیومتریک توپوگرافی در بعضی موارد باعث کاهش صحت و کارایی مدل می‌شود. به عبارت دیگر، ترکیب بهینه داده‌های سنتینل-۱ در مدارهای مختلف، می‌تواند به ارائه نقشه‌های دقیق‌تر و قابل اعتمادتر منجر شود. بنابراین، رویکرد ارائه شده می‌تواند به عنوان مرجعی برای مطالعات آینده در حوزه سنجش از دور، بهبود طبقه‌بندی پوشش زمین و کاربردهای محیط‌زیستی و کشاورزی مطرح گردد.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، طبقه‌بندی پوشش زمین، تصاویر SAR، تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، الگوریتم جنگل تصادفی.

۱- مقدمه

پوشش زمین یکی از عوامل محیطی کلیدی است که بر سیستم‌های اکولوژیکی، گرمایش جهانی، فرسایش خاک و تنوع زیستی تأثیر می‌گذارد و در کنار تغییرات اقلیمی نقش مهمی در تحولات زیست‌محیطی ایفا می‌کند. با این حال، داده‌های دقیق و به‌روز از پوشش زمین همچنان محدود است، که توانایی ما را در پایش و پیش‌بینی این تغییرات پویا کاهش می‌دهد. سنجش از دور یک راهکار ارزشمند ارائه می‌دهد که با فراهم کردن نقشه‌های موضوعی پیوسته و با وضوح بالا در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف، این محدودیت را تا حدی برطرف می‌کند (Foody, ۲۰۰۲).

سنجش از دور با توانایی خود در ارائه اطلاعات دقیق و به‌موقع در مورد تغییرات مکانی سطح زمین، ابزاری حیاتی برای پایش پوشش زمین است. سنتینل-۱ که به یک سامانه رادار با روزنه مجازی (SAR)^۱ مجهز است، به دلیل فناوری میکروویو فعال خود که می‌تواند در تمامی شرایط آب و هوایی عمل کند، به ابزاری ضروری برای تهیه نقشه پوشش زمین تبدیل شده است. این ویژگی محدودیت‌هایی مانند پوشش ابری و همچنین عدم امکان تصویر برداری در طول شب را برطرف می‌کند. علاوه بر این، با پرتاب سنتینل-۱ B، دوره بازدید مجدد ماهواره از ۱۲ روز به ۶ روز کاهش یافت که امکان نقشه‌برداری گسترده و به‌موقع را فراهم می‌کند و برای پایش تغییرات پویای محیطی بسیار حیاتی است (Šćepanović et al., ۲۰۲۱). پیشرفت‌های اخیر، فناوری سنجش از دور را از سامانه‌های SAR تک‌پلاریزه (SP)^۲ به سامانه‌های SAR تمام پلاریمتری (FP)^۳ ارتقا داده‌اند که به طور قابل‌توجهی توانایی تفکیک کلاس‌های پوشش زمین را بهبود بخشیده است. علاوه بر این، یکپارچه‌سازی سامانه‌های SAR پلاریمتری دوگانه (DP)^۴، صحت تهیه نقشه پوشش زمین و خاک را به‌ویژه در کاربردهای کشاورزی افزایش داده است، هرچند که چالش‌هایی مانند افزایش صحت و ارزیابی عینی همچنان موضوع تحقیقات جاری باقی مانده‌اند (Sayedain et al., ۲۰۲۰; Dubois-Fernandez et al., ۲۰۰۸). از سوی دیگر، یکپارچه‌سازی داده‌ها از منابع مختلف مانند سنجنده‌های نوری با قدرت تفکیک مکانی بالا، داده‌های SAR و تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، به‌طور قابل‌توجهی طبقه‌بندی پوشش زمین را بهبود بخشیده

^۱ Synthetic Aperture Radar

^۲ Single Polarimetric

^۳ Fully Polarimetric

^۴ Dual Polarimetric

است. این فرآیند ادغام داده‌ها، اطلاعات مکملی را استخراج می‌کند که از هیچ سنجنده منفردی به تنهایی قابل دریافت نیست (Hu et al., ۲۰۲۱; Ndikumana, ۲۰۱۸).

تصاویر SAR به‌طور ذاتی دارای هندسه دید جانبی هستند، به این معنا که سامانه راداری، زمین را از یک زاویه مایل مشاهده می‌کند، نه مستقیماً از بالا. این هندسه جانبی همراه با تغییرات توپوگرافی باعث ایجاد اعوجاج‌های هندسی^۵ قابل توجهی می‌شود که شامل کوتاه شدگی^۶، وارونگی^۷ و سایه^۸ است. این اعوجاج‌های هندسی تأثیرات منفی زیادی بر روی تصاویر SAR دارند، به‌ویژه در مناطقی با عوارض کوهستانی. به همین دلیل، بسیاری از محققان روش‌هایی برای شبیه‌سازی و اصلاح این اعوجاج‌ها توسعه داده‌اند تا این مشکل را برطرف کنند (Cigna et al., ۲۰۱۴; Chen et al., ۲۰۱۸). علاوه بر این، سامانه‌های SAR به‌طور معمول تصاویر را از مسیرهای مداری مختلف، گذرهای بالارونده^۹ و پایین‌رونده^{۱۰}، ثبت می‌کنند که منجر به الگوهای بازپراکنش بازگشتی متفاوتی به دلیل تغییرات در هندسه دید می‌شود. در واقع، گذر بالارونده صحنه را از زاویه‌ای متفاوت نسبت به گذر پایین‌رونده ثبت می‌کند و در نتیجه اطلاعات پراکندگی مکملی را ارائه می‌دهد. با ترکیب این تصاویر از مدارهای متقاطع^{۱۱}، محققان می‌توانند محدودیت‌های جهت‌گیری یک مدار منفرد را جبران کرده و در نهایت نمایی کامل‌تر و پایدارتر از سطح زمین به دست آورند. این قابلیت دید دوگانه در سیستم‌های SAR مدار قطبی، به‌طور گسترده‌ای برای بهبود صحت طبقه‌بندی و تفسیر ویژگی‌های سطحی پیچیده استفاده شده است (Sayedain et al., ۲۰۲۰).

در تحقیق پشین، Sayedain و همکاران (۲۰۲۰) ترکیب تصاویر سنتینل-۱ از مدارهای بالارونده و پایین‌رونده را برای طبقه‌بندی پوشش زمین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که این ترکیب عملکرد طبقه‌بندی پوشش زمین را در مقایسه با استفاده از یک مدار بالارونده یا پایین‌رونده به‌تنهایی بهبود می‌بخشد. در تحقیقی دیگر، De Luca و همکاران (۲۰۲۱) از تصاویر سری زمانی سنتینل-۱ از مدارهای بالارونده و پایین‌رونده برای تهیه نقشه محدوده حریق^{۱۲} با استفاده از روش یادگیری ماشین بدون نظارت K-means بهره گرفتند. همچنین، Wang و همکاران (۲۰۲۳) چارچوبی نوین برای تهیه نقشه پوشش زمین در مناطق دارای عوارض پیچیده ارائه دادند که بر مبنای داده‌های Gaofen-۳ از مدارهای بالارونده و پایین‌رونده طراحی شده است. نتایج این مطالعه، اهمیت استفاده از داده‌های مداری بالارونده و پایین‌رونده را در جبران اعوجاج‌های هندسی برجسته می‌کند و ارزیابی‌های کمی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مناطق با توپوگرافی پیچیده عملکرد به مراتب بهتری دارد. در تحقیقی دیگر، Qadir و همکاران (۲۰۲۴) یک مدل برای تهیه نقشه از مناطق تحت کشت آفتابگردان با استفاده از داده‌های SAR سنتینل-۱ توسعه داده است. نتایج این تحقیق نشان داد که تصاویر مدار پایین‌رونده نسبت به مدار بالارونده عملکرد بهتری برای این منظور دارند، زیرا رفتار جهت‌گیری گل آفتابگردان در مراحل فنولوژیکی خاص، موجب بازپراکنش متمایز در تصاویر راداری می‌شود.

^۵ Geometric distortions

^۶ Foreshortening

^۷ Layover

^۸ Shadow

^۹ Ascending

^{۱۰} Descending

^{۱۱} Cross orbit

^{۱۲} Burned Area

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که به کارگیری تصاویر بالارونده و پایین‌رونده در کاربردهای مختلف نتایج متنوعی به همراه دارد و ترکیب این دو نوع تصویر می‌تواند کارایی و صحت نهایی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. با این حال، تحقیقات پیشین کمتر به ارزیابی همزمان اثر ترکیب تصاویر این دو مدار و تصحیح رادیومتریک توپوگرافی^{۱۳} پرداخته‌اند. از این رو، هدف این تحقیق، بهبود طبقه‌بندی پوشش زمین به ویژه در مناطق کوهستانی، از طریق استفاده همزمان از تصاویر سنتینل-۱ در مدارهای بالارونده و پایین‌رونده است. در این مطالعه، سه منطقه متفاوت در ایران انتخاب شده و طبقه‌بندی پوشش زمین با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (RF)^{۱۴} انجام گرفته است. همچنین، عملکرد تصحیح رادیومتریک توپوگرافی در بهبود نتایج طبقه‌بندی در مناطق مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. این تحقیق به بررسی تأثیر ترکیب داده‌ها در کاهش اعوجاج‌های هندسی، به‌ویژه در مناطق با توپوگرافی پیچیده و همچنین در نواحی مسطح، و شناسایی روش‌های پیش‌پردازش مؤثر برای بهره‌برداری بهینه از داده‌های SAR (به‌صورت منفرد یا ترکیبی) می‌پردازد.

۲- مواد و روش‌ها

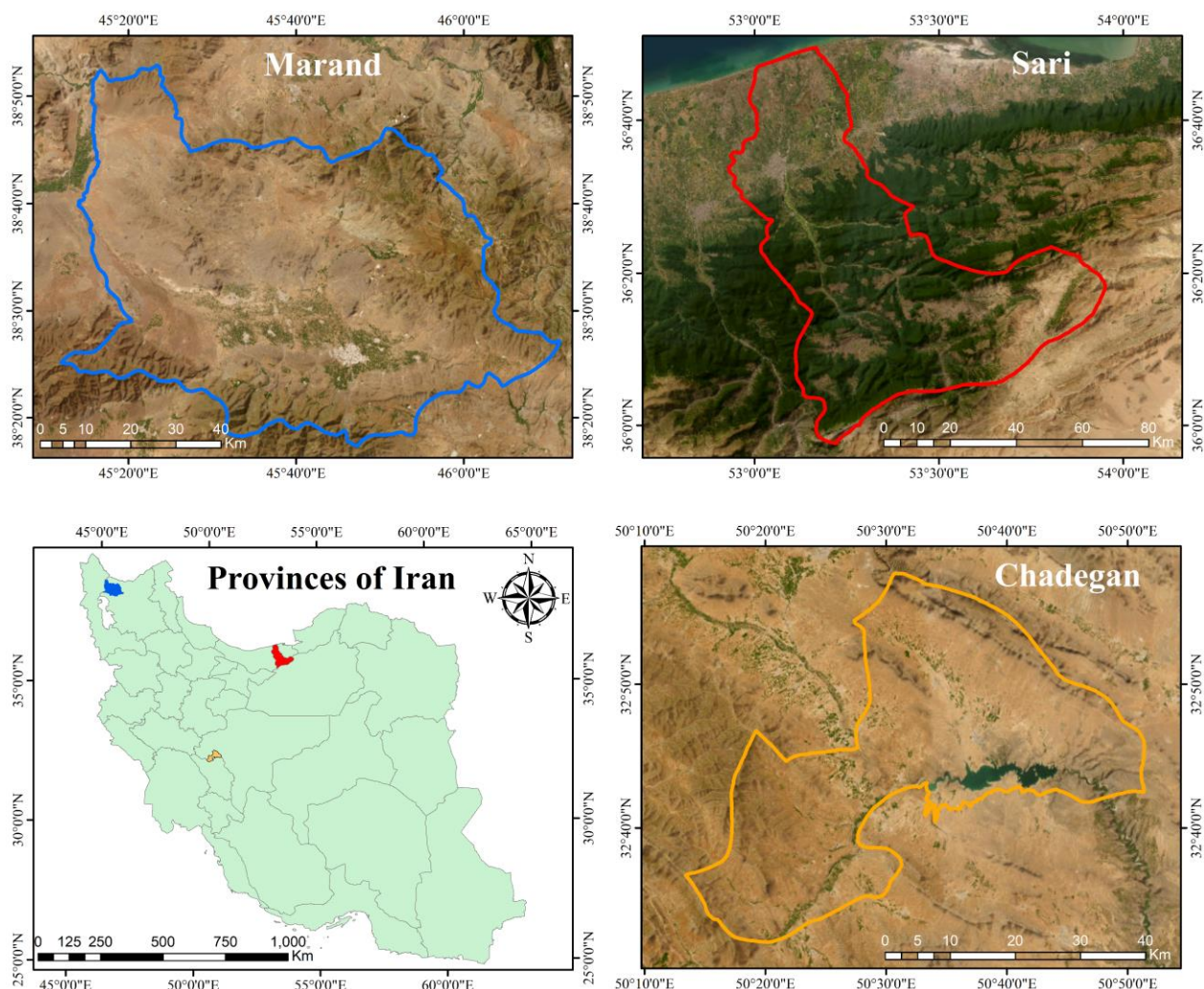
در این بخش ابتدا مناطق مورد مطالعه و تصاویر سنتینل-۱ معرفی می‌شوند. سپس روند کلی روش پیشنهادی ارائه شده و به دنبال آن، روند پردازش داده‌های سنتینل-۱ مطرح می‌شود. در انتها، مروری کلی بر معیارهای ارزیابی نقشه‌های پوشش زمین ارائه خواهد شد.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

برای ارزیابی این تحقیق، سه منطقه مختلف در ایران انتخاب شده‌اند. وجه مشترک این سه منطقه، وجود نواحی کوهستانی در آن‌ها است. منطقه اول: ساری، مرکز استان مازندران است و مساحتی برابر با ۳۶۸۵ کیلومتر مربع دارد. این شهر در شمال ایران، بین سواحل جنوبی دریای خزر و دامنه‌های شمالی کوه‌های البرز قرار گرفته و بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر استان مازندران محسوب می‌شود (35.56° شمالی، 53.06° شرقی)؛ علاوه بر این، نواحی اطراف ساری دارای پوشش‌های جنگلی، کشاورزی و شیب‌های تند ناشی از دامنه‌های کوهستانی هستند. منطقه دوم: مرند در شمال غربی استان آذربایجان شرقی و در شمالی‌ترین منطقه ایران واقع شده است. این شهر در ناحیه‌ای کوهستانی قرار دارد (38.43° شمالی، 45.77° شرقی) و توپوگرافی آن شامل ارتفاعات متغیر، شیب‌های متعدد و پوشش‌های طبیعی و مراتع می‌باشد. منطقه سوم: چادگان، یکی از شهرستان‌های استان اصفهان در ایران است (32.77° شمالی، 50.63° شرقی). در این منطقه، پوشش زمین عمدتاً خشک و کشاورزی بوده و ویژگی‌های محیطی منحصربه‌فرد مناطق مرکزی ایران از نظر پوشش زمین به خوبی منعکس می‌شود. شکل ۱ موقعیت این مناطق را نشان می‌دهد.

^{۱۳} Radiometric Terrain Flattening

^{۱۴} Random Forest



شکل ۱. تصاویر گوگل ارث و مرزهای سه منطقه مطالعاتی، مرند (آبی)، ساری (قرمز) و چادگان (نارنجی) در کنار نقشه استان‌های ایران

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه از تصاویر DP SAR ماهواره سنتینل-۱ بهره برده شده است. مأموریت سنتینل-۱ شامل صورت‌فلکی از دو ماهواره (سنتینل-۱ و سنتینل-۲) در مدار قطبی می‌باشد. داده‌های این ماهواره‌ها به دو فرمت SLC^{۱۵} و GRD^{۱۶} توزیع می‌شوند (Torres et al., ۲۰۱۲). مشخصات تصاویر مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات تصاویر مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه	مدار	زمان اخذ تصویر	زاویه فرود
مرند	بالارونده	۲۰۲۴/۰۶/۱۴	۳۰.۷۵°-۴۶.۱۱°
	پایین‌رونده	۲۰۲۴/۰۶/۲۰	۳۰.۹۰°-۴۶.۲۵°
ساری	بالارونده	۲۰۲۴/۰۷/۰۵	۳۰.۷۵°-۴۶.۲۷°

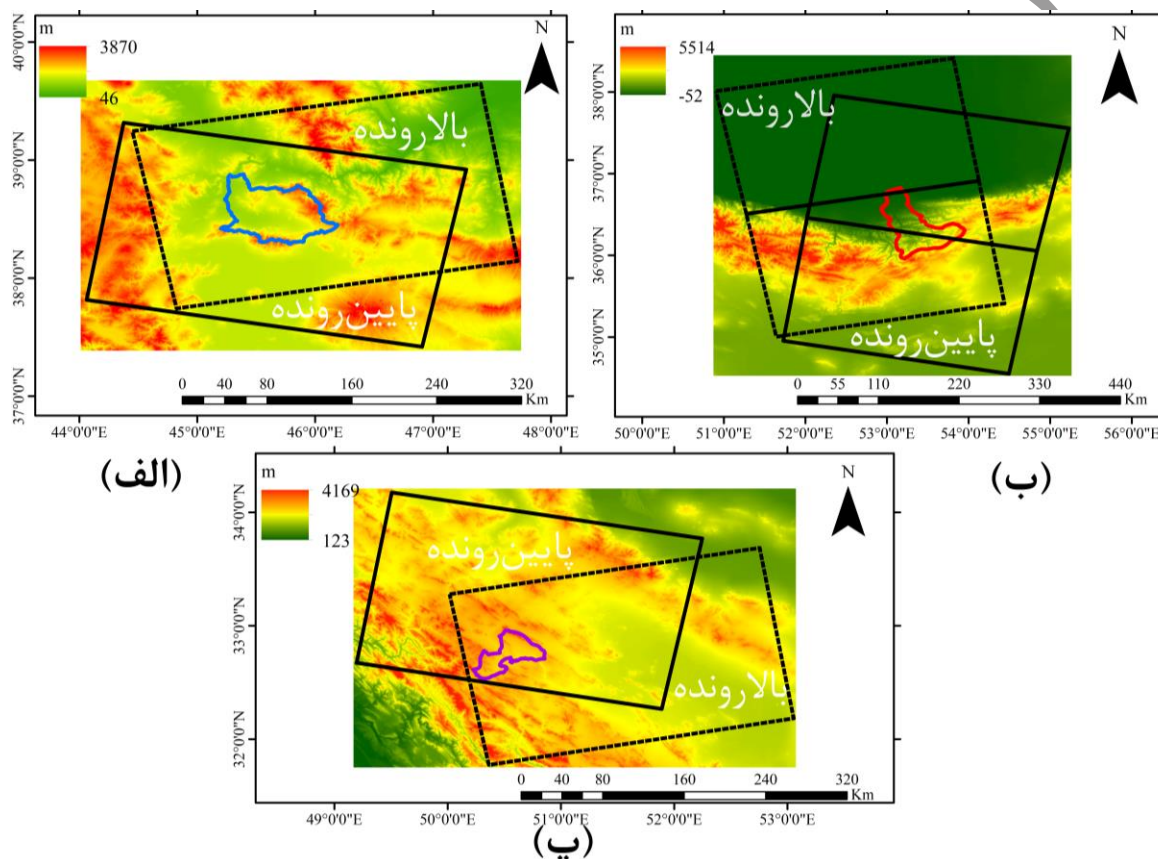
^{۱۵} Single Look Complex

^{۱۶} Ground Range Detected

بالارونده	۲۰۲۴/۰۷/۰۵	۳۰.۴۴° - ۴۶.۰۳°
پایین‌رونده	۲۰۲۴/۰۷/۰۶	۳۰.۶۸° - ۴۶.۰۳°
پایین‌رونده	۲۰۲۴/۰۷/۰۶	۳۰.۷۳° - ۴۶.۲۵°
بالارونده	۲۰۲۴/۰۶/۰۴	۳۱.۰۳° - ۴۶.۳۹°
پایین‌رونده	۲۰۲۴/۰۶/۰۵	۳۰.۹۵° - ۴۶.۳۷°

چادگان

در ادامه، به منظور نمایش هم‌پوشانی تصاویر بالارونده و پایین‌رونده سنتینل-۱ و ساختار توپوگرافی مناطق، شکل ۲ مدل رقومی ارتفاعی^{۱۷} مناطق مورد مطالعه را بر پایه داده‌های SRTM^{۱۸} با حد تفکیک مکانی ۳۰ متر، همراه با محدوده‌های پوشش تصاویر نمایش می‌دهد.



شکل ۲. مدل رقومی ارتفاعی مناطق مورد مطالعه، به همراه محدوده پوشش تصاویر بالارونده و پایین‌رونده سنتینل-۱. (الف) مرند، (ب) ساری، (پ) چادگان

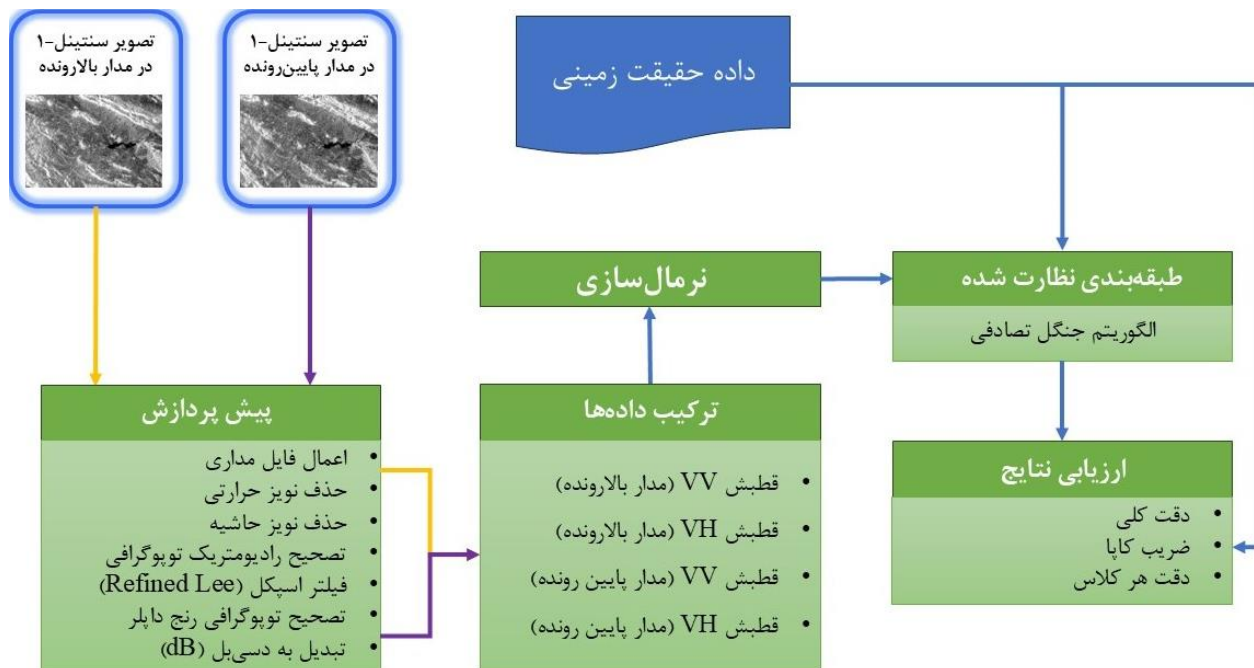
۲-۳- روش انجام تحقیق

روش پیشنهادی در این تحقیق (شکل ۳) تلاش می‌کند تا با به کارگیری همزمان داده‌های سنتینل-۱ از مدارهای بالارونده و پایین‌رونده، یک طبقه‌بندی پوشش زمین مبتنی بر الگوریتم RF با صحت مطلوب ارائه دهد. این روش از چندین مرحله اصلی تشکیل شده است. در ابتدا، تصاویر سنتینل-۱ در هر دو مدار تحت پیش پردازش قرار می‌گیرند. سپس، با ترکیب داده‌ها، اطلاعات

^{۱۷} Digital elevation model

^{۱۸} Shuttle Radar Topography Mission

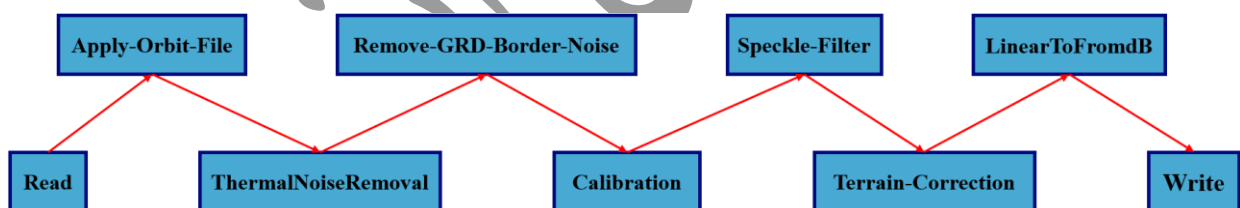
لازم جهت طبقه‌بندی فراهم می‌شود. در مرحله بعد، الگوریتم RF به منظور طبقه‌بندی پوشش زمین به کار گرفته می‌شود و در نهایت نتایج به دست آمده مورد ارزیابی دقیق قرار می‌گیرند. در ادامه هر یک از این مراحل به طور جامع شرح داده شده‌اند.



شکل ۳. روندنمای تحقیق پیش‌رو

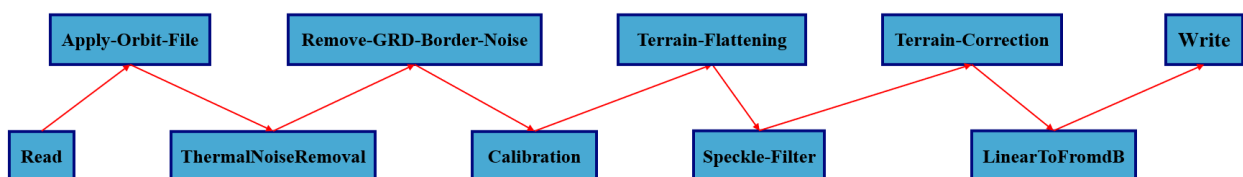
۲-۳-۱- پیش پردازش

یک پیش پردازش استاندارد برای داده‌های سنتینل-۱ در فرمت GRD شامل شش مرحله پردازشی است که این مراحل به ترتیب در شکل ۴ به نمایش درآمده است (Filipponi, ۲۰۱۹). برای انجام این مراحل از نرم افزار SNAP استفاده شده است.



شکل ۴. مراحل پیش‌پردازش استاندارد تصاویر سنتینل-۱ با فرمت GRD

زمانی که منطقه مورد مطالعه حاوی مناطق کوهستانی باشد، توصیه شده است که تصحیح رادیومتریک توپوگرافی بر روی تصویر انجام شود. روند انجام پیش‌پردازش در این فرم در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. مراحل پیشنهاد شده برای پیش‌پردازش تصاویر سنتینل-۱ با فرمت GRD حاوی مناطق کوهستانی

در ادامه، هر بخش به صورت جداگانه توضیح داده شده است.

۲-۳-۱-۱ اعمال فایل مداری^{۱۹}

اطلاعات اولیه مدار موجود در فراداده^{۲۰} محصولات سنتینل-۱ عموماً از دقت کمتری نسبت به فایل‌های مدار دقیق که چند روز تا چند هفته پس از تولید محصول در دسترس قرار می‌گیرند، برخوردار است. اعمال فایل مداری، اطلاعات مربوط به موقعیت و سرعت ماهواره را به‌روزرسانی می‌کند، که برای تصحیح هندسی دقیق و زمین‌مرجع‌سازی در مراحل بعدی بسیار مهم است (Filipponi, ۲۰۱۹).

۲-۳-۱-۲ حذف نویز حرارتی^{۲۱}

تصاویر سنتینل-۱ تحت تأثیر نویز حرارتی جمع شونده قرار دارند، که به ویژه در کانال‌های با قطبش متقاطع (HV, VH) قابل توجه است. هدف از حذف نویز حرارتی، کاهش تأثیر این نویز، یکنواخت‌سازی سیگنال بازپراکنش در کل صحنه و به حداقل رساندن ناپیوستگی‌ها بین زیرنوارهای موجود در حالت‌های تصویربرداری چندنوار مانند تداخل گسترده عرض (IW)^{۲۲} است. حذف نویز حرارتی، کیفیت تصویر را بهبود می‌بخشد و مقایسه مقادیر پیکسل و تشخیص تغییرات ظریف در بازپراکنش را آسان‌تر می‌کند. نویز حرارتی می‌تواند سیگنال بازپراکنش واقعی از سطح زمین را مبهم کند و منجر به تفسیرهای نادرست از داده‌ها شود (Filipponi, ۲۰۱۹).

۲-۳-۱-۳ حذف نویز حاشیه^{۲۳}

در حین تولید محصولات سنتینل-۱، لازم است که زمان شروع نمونه‌برداری اصلاح شود تا تغییرات انحنای زمین جبران گردد. همزمان، فشردن‌سازی در جهت آزیموت^{۲۴} و رنج^{۲۵} منجر به ایجاد آثار رادیومتریکی در لبه‌های تصویر می‌شود. الگوریتم حذف نویز مرزی، برای حذف نویز با شدت کم و داده‌های نامعتبر در لبه‌های صحنه طراحی شده است (Filipponi, ۲۰۱۹).

۲-۳-۱-۴ کالیبراسیون^{۲۶}

در تصاویر SAR، مقدار هر پیکسل بیانگر نسبت شدت انرژی بازپراکنشی دریافت‌شده به شدت سیگنال ارسالی است که به سنجنده بازگشته است. برای تحلیل‌های کمی، لازم است این مقادیر به ضریب بازپراکنش راداری تبدیل شوند. کالیبراسیون، فرآیندی است که مقادیر خام پیکسلی را به ضریب بازپراکنش راداری کالیبره‌شده از نظر رادیومتریک تبدیل می‌کند. این فرآیند بسته به نوع سنجنده و سطح پردازش^{۲۷} داده‌های SAR متفاوت خواهد بود (Freeman, ۱۹۹۲).

^{۱۹} Apply Orbit File

^{۲۰} metadata

^{۲۱} Thermal Noise Removal

^{۲۲} Interferometric Wide swath

^{۲۳} Border Noise Removal

^{۲۴} Azimuth

^{۲۵} Range

^{۲۶} Calibration

^{۲۷} Processing level

۲-۳-۱-۵- تصحیح رادیومتریک توپوگرافی

زمانی که منطقه مورد مطالعه شامل نواحی کوهستانی باشد، تغییرات ارتفاعی زمین و زاویه دید سنجنده نه تنها بر موقعیت مکانی اهداف روی سطح زمین تأثیر می گذارند، بلکه می توانند بر مقدار بازپراکنش دریافت شده توسط سنجنده نیز اثرگذار باشند. از این رو، به منظور حذف یا کاهش اثرات ناشی از ناهمواری های زمین و هندسه تصویربرداری بر مقادیر بازپراکنش، انجام تصحیح رادیومتریک توپوگرافی ضروری است (Small, ۲۰۱۱). در همین راستا، الگوریتم ارائه شده توسط Small (۲۰۱۱) به عنوان یک روش پیشنهادی برای کاهش تغییرات رادیومتریکی مرتبط با توپوگرافی مورد استفاده قرار می گیرد.

۲-۳-۱-۶- فیلتر اسپکل^{۲۸}

اسپکل به عنوان یک الگوی دانه دانه ی نمک فلفلی ناشی از تداخل سازنده و مخرب چندین بازپراکنش در هر پیکسل شناخته می شود که می تواند به طور قابل توجهی بر ظاهر عوارض در تصاویر SAR تأثیر بگذارد. برای کاهش این نویز و بهبود کیفیت بصری و قابلیت تفسیر تصاویر، از فیلترهای اسپکل استفاده می شود (Masoomi et al., ۲۰۱۲). در این مطالعه، پس از انجام مطالعات اولیه، به منظور کاهش اثر اسپکل از فیلتر Refined lee با ابعاد پنجره ۷ در ۷ استفاده شده است، زیرا این فیلتر تعادل مناسبی بین حذف نویز و حفظ جزئیات مکانی مانند لبه ایجاد می کند (Lee ۱۹۸۱). همچنین در مطالعاتی مشابه مانند Sayedain و همکاران (۲۰۲۰) مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۳-۱-۷- تصحیح توپوگرافی رنج داپلر^{۲۹}

تصاویر SAR به دلیل ماهیت دید مایل حسگر و تغییرات در ارتفاع زمین، اعوجاجاتی از خود نشان می دهند. تصحیح هندسی رنج داپلر از یک مدل ارتفاعی رقومی (DEM)^{۳۰} برای تصحیح این اعوجاجات و زمین مرجع سازی تصویر استفاده می کند و اطمینان می دهد که نمایش هندسی آن تا حد امکان به دنیای واقعی نزدیک است (Filipponi, ۲۰۱۹).

۲-۳-۱-۸- تبدیل به دسی بل

به عنوان آخرین مرحله در روند پیش پردازش تصاویر سنتینل-۱ در این تحقیق، ضریب بازپراکنش با استفاده از تبدیل لگاریتمی به دسی بل (dB) تبدیل می شود.

۲-۳-۲- ترکیب تصاویر بالارونده و پایین رونده

در سامانه های SAR، قطبش بیانگر جهت گیری بردار میدان الکتریکی سیگنال ارسالی به سطح زمین است. معمولاً در این سامانه ها از قطبش های خطی افقی (H)^{۳۱} و عمودی (V)^{۳۲} یا ترکیبی از آن ها استفاده می شود که چهار حالت اصلی HH, HV, VH و VV را شامل می شود (Van Zyl et al., ۲۰۱۱; Chan & Koo, ۲۰۰۸).

^{۲۸} Speckle

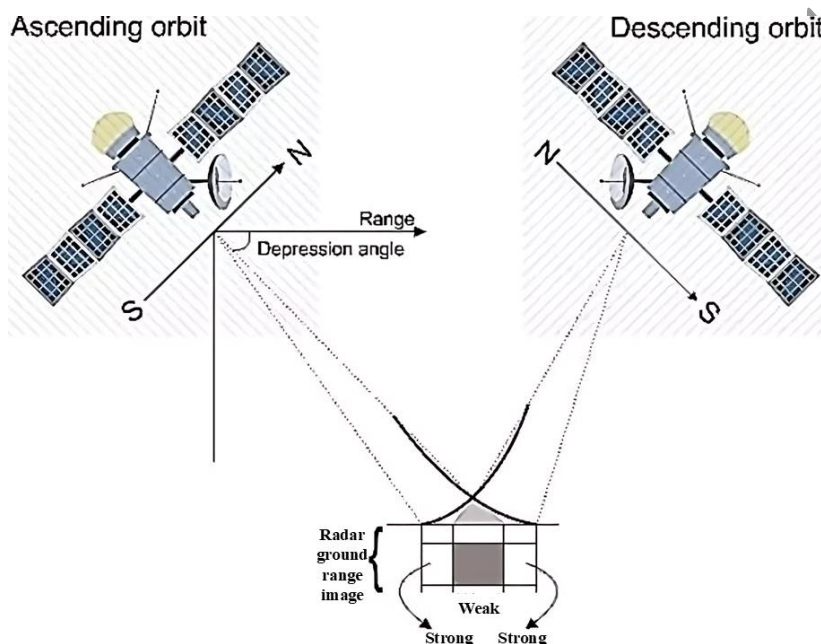
^{۲۹} Range Doppler Terrain Correction

^{۳۰} Digital Elevation Model

^{۳۱} Horizontal

^{۳۲} Vertical

سنتینل-۱ که از سامانه DP SAR بهره می‌برد، محصولاتش معمولاً شامل قطبش‌های VV و VH می‌باشد. این تصاویر در دو گذر بالارونده و پایین‌رونده ثبت می‌شوند. در تصاویر سنتینل-۱، اصطلاحات «بالارونده» و «پایین‌رونده» به گذرهای متفاوت مداری ماهواره بر روی زمین اشاره دارند. در گذر بالارونده، ماهواره از جنوب به شمال حرکت کرده و به دلیل جهت‌گیری «راست‌نگر» خود، سطح زمین را از سمت غرب مشاهده می‌کند، در حالی که در گذر پایین‌رونده، از شمال به جنوب حرکت کرده و رادار منطقه را از سمت شرق می‌نگارد (شکل ۶). این تفاوت‌های هندسه مشاهده، شامل تغییرات در زاویه برخورد و سمت مشاهده، باعث بروز اختلافات اندکی در مقادیر بازپراکنش در یک ناحیه می‌شود، امری که در کاربردهایی نظیر تحلیل تغییر شکل و مطالعات پوشش زمین اهمیت ویژه‌ای دارد (Army & Saepuloh, ۲۰۲۰; Sayedain et al., ۲۰۲۰). در این تحقیق، به منظور طبقه‌بندی، از تصاویر ثبت شده در هر دو گذر بالارونده و پایین‌رونده استفاده شده است. به عبارت دیگر، قطبش‌های VV و VH از هر دو گذر به‌طور همزمان به کار گرفته شده‌اند.



شکل ۶. نمایش دو حالت تصویر برداری مدار بالارونده و پایین‌رونده (Army & Saepuloh, ۲۰۲۰)

۲-۳-۳- طبقه‌بندی نظارت شده

طبقه‌بندی نظارت شده، یکی از شاخه‌های اصلی یادگیری ماشین است. در این رویکرد، مدل‌ها با استفاده از داده‌های برچسب‌گذاری شده آموزش می‌بینند. به این معنا که هر نمونه آموزشی دارای یک برچسب صحیح (یا کلاس) است که نشان‌دهنده دسته‌ای است که آن نمونه به آن تعلق دارد. یکی از الگوریتم‌های برجسته در طبقه‌بندی نظارت شده، RF است. این الگوریتم از مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم تشکیل شده که به طور تصادفی از زیرمجموعه‌هایی از داده‌ها و ویژگی‌ها آموزش می‌بینند. سپس با ترکیب نتایج حاصل از تمامی درختان معمولاً از طریق رأی‌گیری اکثریت در طبقه‌بندی یا میانگین در رگرسیون، تصمیم نهایی گرفته می‌شود (Belgiu & Drăguț, ۲۰۱۶).

۲-۳-۴- جمع‌آوری داده‌های حقیقت زمینی

با توجه به اینکه طبقه‌بندی مورد استفاده ما به صورت نظارت‌شده انجام می‌شود، جمع‌آوری داده‌های حقیقت زمینی اهمیت ویژه‌ای دارد. از این رو، تصاویر سنتینل-۲ و گوگل ارث به عنوان منابع اصلی گردآوری داده‌های حقیقت زمینی انتخاب شدند.

برای هر کلاس، مجموعه‌ای از نمونه‌ها استخراج و ثبت گردید که هم در آموزش مدل و هم در ارزیابی عملکرد آن از طریق مقایسه نتایج طبقه‌بندی با داده‌های حقیقت زمینی مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور تضمین اعتبار و قابلیت تعمیم مدل، نمونه‌های جمع‌آوری شده به گونه‌ای تقسیم شدند که ۷۰ درصد برای آموزش مدل و ۳۰ درصد به عنوان داده‌های ارزیابی به کار رفتند. جدول ۲ تعداد نمونه‌های آموزش و ارزیابی را به تفکیک هر منطقه و هر کلاس نشان می‌دهد.

جدول ۲. تعداد نمونه‌های آموزشی و ارزیابی به تفکیک کلاس و منطقه

کلاس	مرند آموزش	مرند ارزیابی	ساری آموزش	ساری ارزیابی	چادگان آموزش	چادگان ارزیابی
پوشش گیاهی	۵۱۳۵	۲۱۵۴	۶۳۳۴۹	۲۶۸۴۸	۴۴۳۷	۱۸۷۴
خاک	۲۵۲۵۶	۱۰۹۶۹	۳۹۵۸۵	۱۷۰۲۹	۲۲۵۸۶	۹۹۷۸
آب	۲۳۰۰	۹۱۱	۶۲۳۲	۲۶۵۹	۴۸۹۲	۲۱۶۷
مناطق شهری	۹۴۳۸	۳۹۵۶	۱۳۱۲۵	۵۶۲۱	۴۷۹۰	۱۹۷۴
کشاورزی	۱۴۰۵۰	۶۰۶۱	۳۸۳۷۷	۱۶۷۰۲	۱۸۳۰۲	۷۸۹۲

۲-۳-۵- ارزیابی نتایج

برای ارزیابی عملکرد مدل طبقه‌بندی، از دو شاخص اصلی یعنی صحت کلی^{۳۳} و ضریب کاپا^{۳۴} استفاده شده است. صحت کلی نشان‌دهنده درصد نمونه‌هایی است که به درستی شناسایی شده‌اند و دیدگاهی اولیه از عملکرد مدل ارائه می‌دهد اما در شرایطی که توزیع کلاس‌ها نامتوازن باشد، این شاخص ممکن است گمراه‌کننده باشد، زیرا مدل می‌تواند با پیش‌بینی مکرر کلاس غالب به درصد بالایی دست یابد. ضریب کاپا با مقایسه صحت مشاهده‌شده با صحت مورد انتظار (به عبارت دیگر، صحت تصادفی) این نقص را جبران کرده و ارزیابی دقیق‌تری از قابلیت اطمینان مدل ارائه می‌دهد. روابط محاسبه صحت کلی (OA) و ضریب کاپا (K) به ترتیب در رابطه ۱ و رابطه ۲ بیان شده است (Grandini et al., ۲۰۲۰; Congalton & Green, ۲۰۱۹).

$$OA = \frac{\sum_i^k n_{ii}}{n} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$K = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در روابط بالا، منظور از k تعداد کلاس‌ها، n_{ii} عنصر واقع در قطر اصلی ماتریس ابهام کلاس i ام، n تعداد کل داده‌های ارزیابی، p_o درستی مشاهده شده، و p_e توافق مورد انتظار است.

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج به دست آمده از این تحقیق ارائه می‌شود. برای هر سه منطقه مورد بررسی، ابتدا سه حالت طبقه‌بندی بدون تصحیح رادیومتریک توپوگرافی انجام شده است: ابتدا با استفاده از مقادیر بازپراکنش VV و VH در تصویر بالارونده، سپس با داده‌های تصویر پایین‌رونده و نهایتاً با ترکیب اطلاعات هر دو گذر. علاوه بر این، همان سه حالت مذکور پس از اعمال پردازش اولیه جهت تصحیح رادیومتریک توپوگرافی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در نهایت، نقشه‌ای با پنج کلاس (آب، خاک، پوشش

^{۳۳} Overall accuracy

^{۳۴} Kappa coefficient

گیاهی، مناطق شهری و مناطق کشاورزی) تهیه شده است. لازم به ذکر است برای تمام حالات طبقه‌بندی، هایپر پارامترهای مدل RF با ۴۰۰ درخت، عمق حداکثر ۱۰، حداقل تقسیم گره ۵ نمونه و حداقل ۲ نمونه در برگ تنظیم شده‌اند. نتایج هر منطقه به‌طور مجزا در ادامه ارائه خواهد شد.

۳-۱- شهر مرند

نتایج طبقه‌بندی پنج کلاسه شهر مرند در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۳. پارامترهای ارزیابی صحت طبقه‌بندی شهر مرند در حالات مختلف

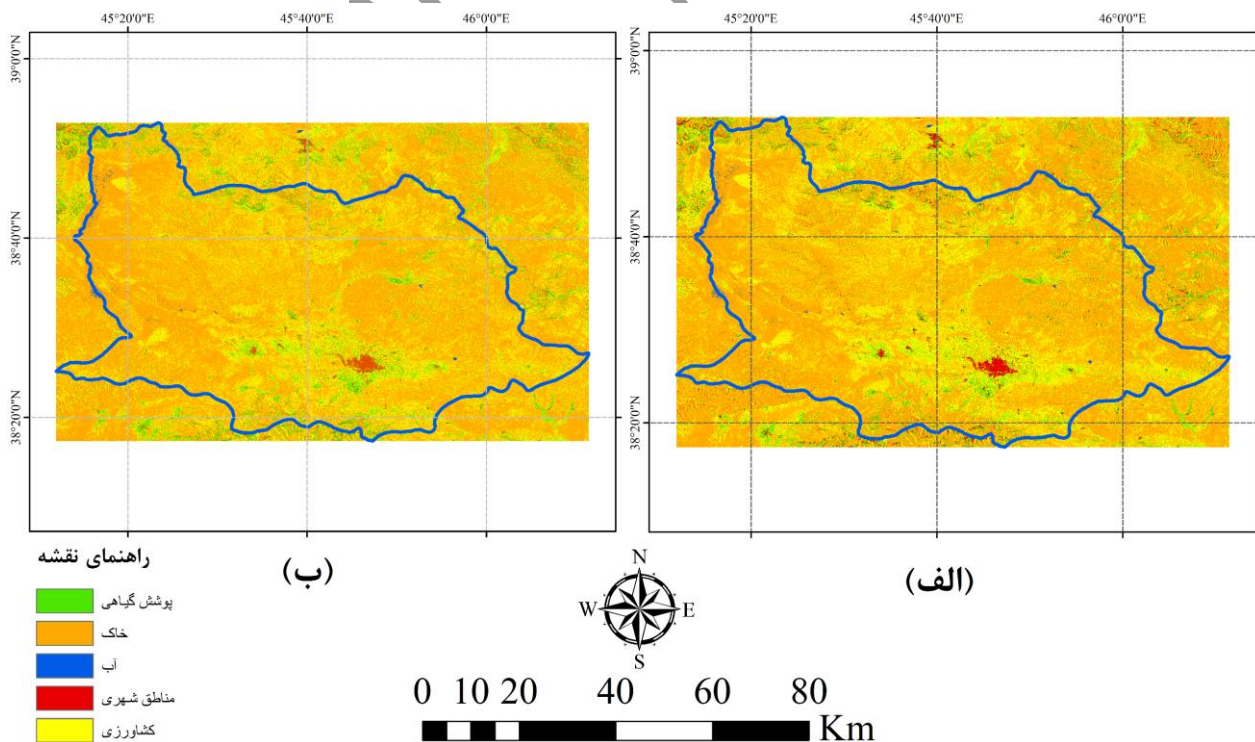
داده استفاده شده	صحت کلی (%)	ضریب کاپا	صحت کلاس پوشش گیاهی (%)	صحت کلاس خاک (%)	صحت کلاس آب (%)	صحت مناطق شهری (%)	صحت کلاس کشاورزی (%)
تصویر بالارونده	۶۵.۳۳	۰.۵۰۳۹	۳۱.۲۹	۶۷.۴۸	۷۷.۵۰	۸۴.۵۳	۵۹.۱۸
تصویر پایین‌رونده	۶۶.۳۵	۰.۵۱۰۶	۴۳.۴۱	۷۴.۸۳	۸۷.۸۲	۸۲.۸۴	۴۵.۱۷
ترکیب دو تصویر	۷۹.۱۷	۰.۷۰۰۰	۶۹.۶۴	۸۱.۸۴	۹۲.۲۱	۹۲.۲۴	۶۷.۲۵
تصویر بالارونده تصحیح شده	۶۶.۶۵	۰.۵۱۳۴	۴۳.۹۶	۷۴.۸۶	۷۴.۲۰	۸۴.۰۲	۴۷.۴۲
تصویر پایین‌رونده تصحیح شده	۶۷.۴۳	۰.۵۱۵۴	۵۸.۹۶	۸۴.۲۷	۸۸.۰۴	۸۳.۶۲	۲۶.۳۲
ترکیب دو تصویر تصحیح شده	۷۶.۲۷	۰.۶۵۵۷	۶۹.۳۱	۸۱.۷۲	۹۱.۳۳	۹۲.۰۹	۵۶.۲۸

جدول ۳ نشان می‌دهد که ترکیب دو تصویر بدون اعمال تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، بهترین حالت طبقه‌بندی را برای شهر مرند فراهم می‌آورد. در این حالت، صحت طبقه‌بندی برای تمامی کلاس‌ها از پنج حالت دیگر برتر است. همچنین، زمانی که از تک تصویر استفاده می‌شود، تصاویر تصحیح‌شده نتایج بهتری ارائه می‌دهند. اما تصویر تصحیح‌شده در مدار پایین‌رونده، صحت بسیار پایینی در کلاس کشاورزی پس از تصحیح از خود نشان می‌دهد به‌طوری که اعمال تصحیح رادیومتریک توپوگرافی باعث کاهش حدود ۲۰ درصدی صحت کلاس کشاورزی شده است. برای بررسی دقیق‌تر، ماتریس ابهام مربوط به این دو حالت در شکل ۷ ارائه شده است.

برجسب پیش‌بینی شده	پوشش گیاهی	1270	211	0	203	470
	خاک	418	9244	43	196	1068
	آب	0	109	802	0	0
	مناطق شهری	402	171	0	3308	75
	کشاورزی	507	3824	0	135	1595
(ب)						
برجسب پیش‌بینی شده	پوشش گیاهی	935	117	0	440	662
	خاک	299	8208	50	644	1768
	آب	0	111	800	0	0
	مناطق شهری	357	199	0	3277	123
	کشاورزی	350	2841	2	130	2738
(الف)						

شکل ۷. ماتریس ابهام طبقه‌بندی شهر مرند. الف) تصویر پایین‌رونده، ب) تصویر تصحیح شده پایین‌رونده

بر اساس ماتریس ابهام و جدول ۳، تصحیح رادیومتریکی توپوگرافی در تصویر مدار پایین‌رونده موجب بهبود صحت در طبقه‌بندی کلاس‌های پوشش گیاهی و خاک شده است. با این حال، صحت طبقه‌بندی کلاس کشاورزی کاهش یافته است. علت این کاهش آن است که در تصویر تصحیح‌شده، حدود ۱۰۰۰ نمونه بیشتر نسبت به حالت بدون تصحیح، به اشتباه در کلاس خاک قرار گرفته‌اند. به بیان دیگر، تصحیح رادیومتریکی توپوگرافی باعث شده است نمونه‌های کشاورزی بیش از حد به کلاس خاک شبیه شوند و در نتیجه، خطای طبقه‌بندی در این کلاس افزایش یابد. در انتها، تصویر طبقه‌بندی‌شده شهر مرند برای دو حالت ترکیب تصاویر، که بهترین نتایج را ارائه داده‌اند، در شکل ۸ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۸. نقشه طبقه‌بندی شهر مرند با استفاده از الف) ترکیب دو تصویر، ب) ترکیب دو تصویر تصحیح شده

۳-۲- شهر ساری

با توجه به اینکه یک تصویر از ماهواره سنتینل-۱ به تنهایی قادر به پوشش کامل شهر ساری نیست، از دو تصویر برای دستیابی به پوشش جامع کل منطقه استفاده شده است. نتایج طبقه‌بندی پنج کلاسه شهر ساری در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. پارامترهای ارزیابی صحت طبقه‌بندی شهر ساری در حالات مختلف

داده استفاده شده	صحت کلی (%)	ضریب کاپا	صحت کلاس پوشش گیاهی (%)	صحت کلاس خاک (%)	صحت کلاس آب (%)	صحت کلاس مناطق شهری (%)	صحت کلاس کشاورزی (%)
تصویر بالارونده	۵۴.۴۴	۰.۳۳۰۴	۸۵.۹۷	۱۹.۵۷	۶۸.۰۳	۴۰.۷۲	۴۱.۷۷
تصویر پایین‌رونده	۵۵.۶۷	۰.۳۶۳۱	۷۴.۶۷	۱۱.۵۲	۷۵.۴۴	۲۳.۴۳	۷۷.۸۳
ترکیب دو تصویر	۷۵.۴۱	۰.۶۵۵۱	۸۲.۹۸	۴۶.۴۰	۹۴.۵۵	۸۴.۵۴	۸۶.۶۹
تصویر بالارونده تصحیح شده	۵۹.۲۷	۰.۴۰۷۶	۸۷.۹۴	۳۷.۰۱	۷۱.۶۸	۶۵.۱۰	۳۱.۹۴
تصویر پایین‌رونده تصحیح شده	۵۵.۶۸	۰.۳۷۰۹	۷۲.۱۸	۱۱.۸۶	۸۵.۳۷	۵۴.۳۰	۶۹.۵۸
ترکیب دو تصویر تصحیح شده	۷۲.۴۲	۰.۶۰۸۷	۸۶.۶۵	۴۱.۱۷	۹۵.۲۶	۸۴.۲۹	۷۳.۷۸

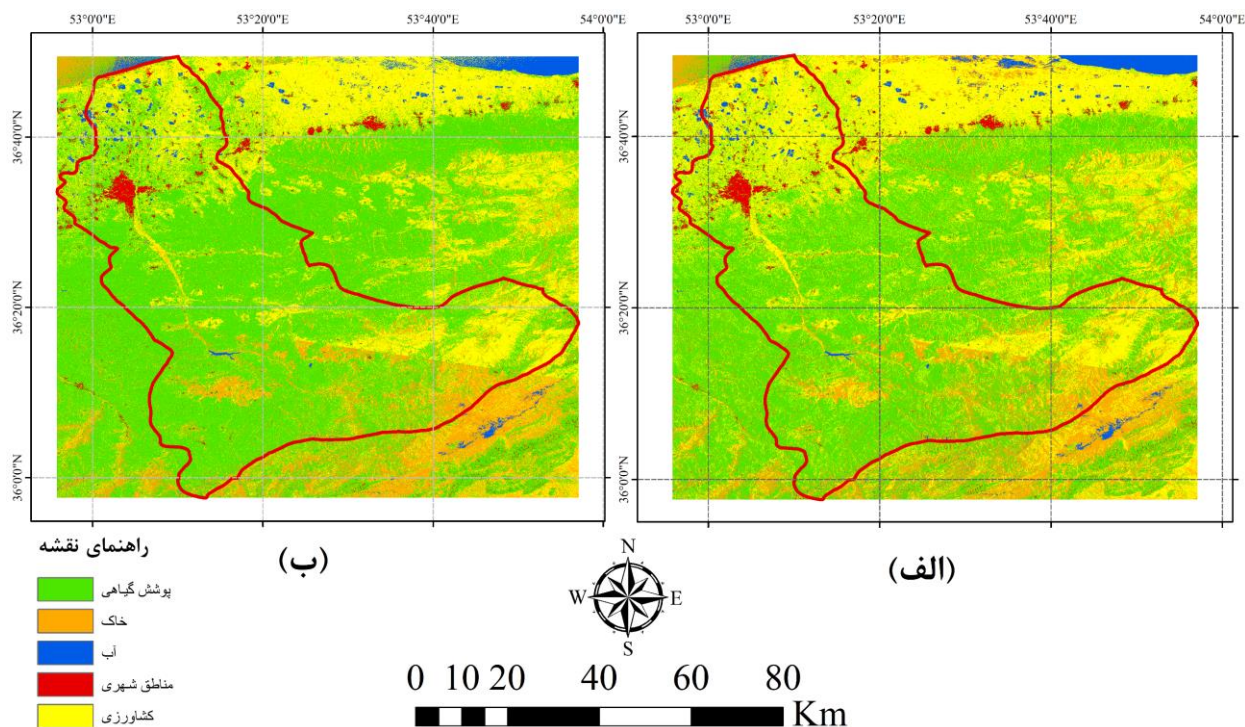
نتایج نشان می‌دهد که ترکیب دو تصویر بدون تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، بهترین صحت و بالاترین ضریب کاپا را به همراه داشته است در حالی که در حالت استفاده از تک تصویر، اعمال تصحیح رادیومتریک توپوگرافی باعث بهبود قابل توجه طبقه‌بندی شده است. مهم‌ترین چالش این طبقه‌بندی در شهر ساری، صحت شناسایی کلاس خاک بوده است. با وجود اینکه ترکیب دو تصویر در چهار کلاس دیگر صحت مناسبی ارائه داده است، عدم توانایی در تفکیک کلاس خاک منجر به کاهش ضریب کاپا و صحت کلی شده است. برای درک بهتر این موضوع، از ماتریس ابهام ارائه شده در شکل ۹ استفاده می‌کنیم.

پوشش گیاهی	22279	1993	72	210	2294
خاک	5314	7901	38	376	3400
آب	22	98	2514	0	25
مناطق شهری	462	156	0	4752	251
کشاورزی	1846	352	0	25	14479
	پوشش گیاهی	خاک	آب	مناطق شهری	کشاورزی

برچسب پیش‌بینی شده

شکل ۹. ماتریس ابهام طبقه‌بندی شهر ساری در حالت ترکیب دو تصویر

همان طور که از ماتریس ابهام مشاهده می شود، ۵۳۱۴ نمونه از کلاس خاک به اشتباه به کلاس پوشش گیاهی تخصیص یافته و ۳۴۰۰ نمونه نیز به کلاس کشاورزی منتقل شده اند. جدول ۴ نشان می دهد که حتی اعمال تصحیح رادیومتریکی توپوگرافی نیز موفق به افزایش صحت این کلاس نشده است. در نهایت، نقشه های طبقه بندی در دو حالت ترکیب تصاویر در شکل ۱۰ به نمایش گذاشته شده اند.



شکل ۱۰. نقشه طبقه بندی شهر ساری با استفاده از (الف) ترکیب دو تصویر، (ب) ترکیب دو تصویر تصحیح شده

۳-۳- شهر چادگان

نتایج طبقه بندی پنج کلاس شهر چادگان در جدول ۵ قابل مشاهده می باشد.

جدول ۵. پارامترهای ارزیابی صحت طبقه بندی شهر چادگان در حالات مختلف

داده استفاده شده	صحت کلی (%)	ضریب کاپا	صحت کلاس پوشش گیاهی (%)	صحت کلاس خاک (%)	صحت کلاس آب (%)	صحت کلاس مناطق شهری (%)	صحت کلاس کشاورزی (%)
تصویر بالارونده	۵۵.۹۴	۰.۳۴۶۸	۶۱.۴	۶۱.۴۶	۹۸.۶۶	۳۹.۴۱	۵۳.۳۲
تصویر پایین رونده	۵۶.۸۸	۰.۳۵۷۴	۱۳.۳۴	۶۵.۲۹	۹۹.۳۵	۳۲.۹۳	۵۱.۱۳
ترکیب دو تصویر	۶۸.۰۶	۰.۵۴۴۳	۴۰.۷۷	۶۵.۱۵	۹۹.۵۴	۶۲.۴۶	۷۰.۹۱
تصویر بالارونده تصحیح شده	۵۵.۲۷	۰.۳۱۹۴	۰.۰۱	۶۷.۸۵	۹۸.۶۶	۲۵.۴۳	۴۸.۱۸
تصویر پایین رونده تصحیح شده	۵۶.۲۰	۰.۳۴۱۰	۰.۰۷	۷۰.۵۶	۹۹.۴۹	۴۰.۱۷	۴۲.۱۲

۵۸.۸۱	۵۹.۳۲	۹۹.۵۸	۶۷.۲۳	۳۰.۵۸	۰.۴۷۶۴	۶۳.۸۳	ترکیب دو تصویر تصحیح شده
-------	-------	-------	-------	-------	--------	-------	-----------------------------

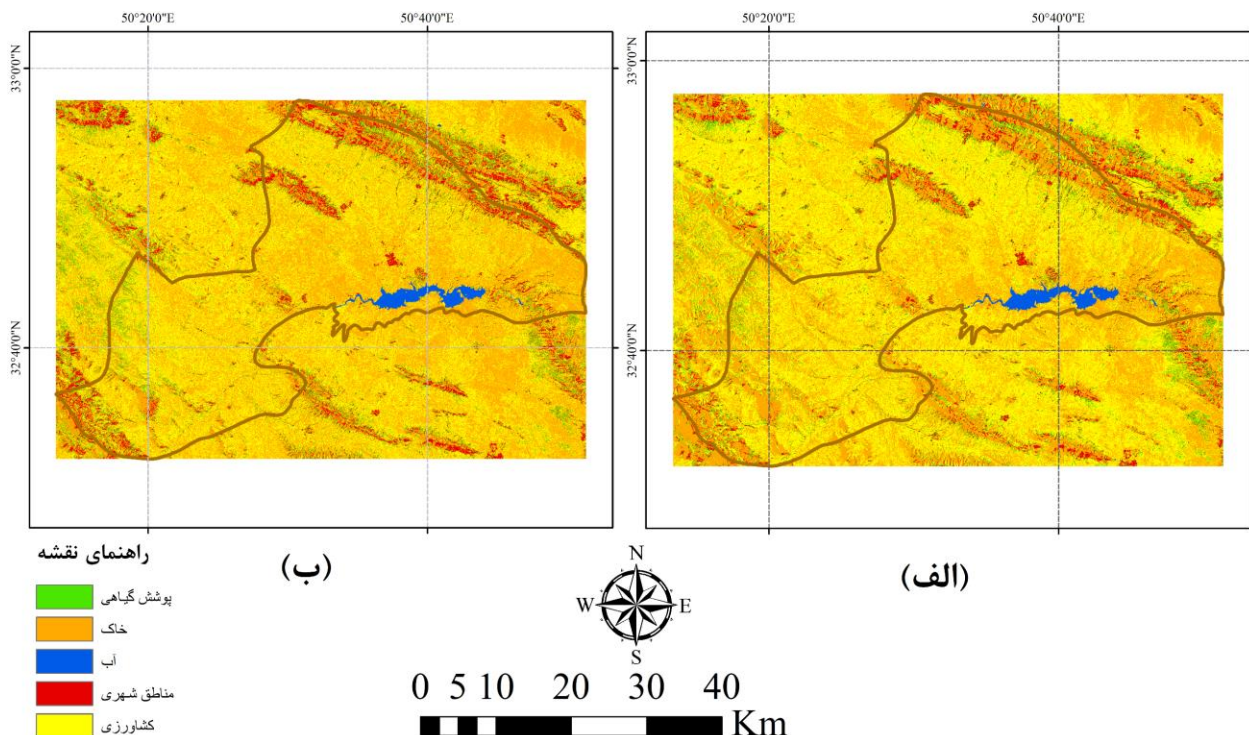
در طبقه‌بندی چادگان، چالش اصلی مربوط به کلاس پوشش گیاهی محسوب می‌شود. علاوه بر این، مشابه نتایج به‌دست‌آمده در طبقه‌بندی شهرهای مرند و ساری، بهترین عملکرد زمانی حاصل شده که ترکیب دو تصویر بدون استفاده از تصحیح رادیومتریک توپوگرافی انجام گرفته است. برای بررسی دقیق‌تر، ماتریس ابهام مربوط به این حالت در شکل ۱۱ ارائه شده است.

برچسب حقیقی	پوشش گیاهی	764	371	0	240	499
	خاک	429	6370	1	459	2519
	آب	0	10	2157	0	0
	مناطق شهری	344	278	0	1233	119
	کشاورزی	295	1828	0	173	5596
		پوشش گیاهی	آب	خاک	مناطق شهری	کشاورزی

برچسب پیش‌بینی شده

شکل ۱۱. ماتریس ابهام طبقه‌بندی شهر چادگان در حالت ترکیب دو تصویر بدون استفاده از تصحیح رادیومتریک توپوگرافی

با توجه به ماتریس ابهام، می‌توان بیان نمود که در شهر چادگان بیشترین چالش این طبقه‌بندی، تفکیک دو کلاس خاک و کشاورزی از یکدیگر می‌باشد. در نهایت، نقشه‌های طبقه‌بندی مربوط به دو حالت با بهترین صحت، برای شهر چادگان در شکل ۱۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۱۲. نقشه طبقه‌بندی شهر چادگان با استفاده از (الف) ترکیب دو تصویر، (ب) ترکیب دو تصویر تصحیح شده

۳-۴- بحث و تحلیل یافته

۳-۴-۱- تأثیر ترکیب تصاویر بر صحت طبقه‌بندی

با بررسی نتایج شش حالت طبقه‌بندی در هر سه منطقه، مشخص می‌شود که استفاده همزمان از دو تصویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ در مدارهای مختلف، صحت طبقه‌بندی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. به عنوان مثال، در شهر مرنده، ترکیب دو تصویر بدون تصحیح رادیومتریک توپوگرافی موجب افزایش صحت کلی به میزان ۱۳ درصد و با استفاده از تصویر تصحیح‌شده به میزان ۱۰ درصد نسبت به حالت تک‌تصویری شده است. در شهر ساری، افزایش صحت کلی به ترتیب ۲۰ درصد بدون تصحیح رادیومتریک توپوگرافی و ۱۳ درصد با تصحیح رادیومتریک توپوگرافی نسبت به حالت تک‌تصویری حاصل شده است. همچنین در شهر چادگان، استفاده از ترکیب دو تصویر بدون تصحیح رادیومتریک توپوگرافی صحت را به میزان ۱۲ درصد و با تصحیح رادیومتریک توپوگرافی به میزان ۷ درصد افزایش داده است. علاوه بر این، تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در شهر مرنده، چالش اصلی طبقه‌بندی مربوط به کلاس پوشش گیاهی بوده و با ترکیب دو تصویر، صحت این کلاس از ۴۳.۴۱ درصد به ۶۹.۶۴ درصد ارتقا یافته است. در شهر چادگان نیز صحت کلاس پوشش گیاهی از ۱۳.۳۴ درصد به ۴۰.۷۷ درصد افزایش یافته در حالی که در شهر ساری، کلاس خاک به عنوان چالش‌برانگیزترین کلاس، با ترکیب دو تصویر صحت خود را از ۱۹.۵۷ درصد به ۴۶.۴۰ درصد رسانده است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب تصاویر در مدارهای بالارونده و پایین‌رونده تأثیر بسزایی در افزایش صحت طبقه‌بندی دارد و منجر به بهبود قابل‌توجهی در عملکرد مدل می‌شود. یافته‌های تحقیق حاضر از نتایج تحقیق Sayedain و همکاران (۲۰۲۰) پشتیبانی می‌کند، که نشان دادند استفاده همزمان از تصاویر بالارونده و پایین‌رونده صحت طبقه‌بندی پوشش زمین با داده‌های سنتینل-۱ را نسبت به به‌کارگیری تصاویر تک‌مدار به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. علاوه بر این، مطالعه Wang و همکاران (۲۰۲۳) نیز گزارش کرده است که ترکیب تصاویر بالارونده و پایین‌رونده ماهواره Gaofen-۳ منجر به افزایش ۵ درصدی در صحت کلی طبقه‌بندی و بهبود ۶ درصدی در ضریب کاپا شده است. در عین حال، نتایج نشان می‌دهد که

اعمال تصحیح رادیومتریکی توپوگرافی، به ویژه در مناطق کوهستانی، تأثیر دوگانه‌ای دارد. در حالت تک‌تصویری می‌تواند به بهبود صحت برخی کلاس‌ها کمک کند، اما در ترکیب دو تصویر ممکن است باعث شباهت بیش از حد بین نمونه‌های کلاس‌های خاص (مانند کشاورزی و خاک) شده و در نهایت عملکرد کلی را کاهش دهد.

۳-۴-۲- تأثیر توپوگرافی بر نتایج طبقه‌بندی

در این بخش از تحقیق، تأثیر توپوگرافی منطقه بر صحت طبقه‌بندی بررسی شده است. با توجه به استفاده از سه منطقه مختلف در این مطالعه، برای ساده‌سازی تحلیل، از چهار حالت کلیدی ارتفاع و شیب استفاده شده است. طبقه‌بندی مناطق مورد مطالعه به چهار کلاس توپوگرافی (کم‌ارتفاع و ملایم، کم‌ارتفاع و تند، مرتفع و ملایم، مرتفع و تند) بر اساس دو معیار ارتفاع (آستانه ۱۵۰۰ متر) و شیب (آستانه ۱۰ درجه) انجام گرفت. این آستانه‌ها با استانداردهای جهانی انتخاب شده‌اند (Rahbek et al. ۲۰۰۶; Jahn et al. ۲۰۱۹). با توجه به عدم حضور کلاس‌های مناطق شهری، آب و کشاورزی در برخی از حالت‌های توپوگرافی، در این تحلیل تنها نتایج طبقه‌بندی برای دو کلاس خاک و پوشش گیاهی محاسبه و ارائه شده است. نتایج به تفکیک هر کلاس در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. لازم به ذکر است که در منطقه چادگان کلاس‌های «کم‌ارتفاع» به علت نبود نواحی با ارتفاع کمتر از ۱۵۰۰ متر تعریف نشده‌اند و در جدول‌های زیر با خط تیره نمایش داده شده‌اند.

جدول ۶. صحت کلاس پوشش گیاهی به درصد بر اساس کلاس ارتفاع و شیب

منطقه	کلاس	تصویر بالارونده	تصویر پایین رونده	ترکیب دو تصویر	تصویر بالارونده تصحیح شده	تصویر پایین رونده تصحیح شده	ترکیب دو تصویر تصحیح شده
مرند	کم ارتفاع و ملایم	۴۴.۷۲	۴۲.۰۸	۳۸.۹۵	۴۴.۰۲	۴۲.۰۷	۳۸.۶۹
مرند	کم ارتفاع و تند	۴۰.۰۱	۳۰.۵۳	۳۳.۲۸	۴۵.۸۳	۴۹.۴۲	۳۹.۳۰
مرند	مرتفع و ملایم	۴۳.۵۶	۴۱.۱۴	۴۴.۷۷	۴۸.۱۲	۴۶.۹۱	۵۰.۰۲
مرند	مرتفع و تند	۴۱.۰۲	۳۸.۸۳	۴۱.۸۸	۴۸.۱۵	۴۷.۸۳	۵۱.۹۷
ساری	کم ارتفاع و ملایم	۶۷.۳۱	۲۸.۰۰	۲۴.۸۷	۷۴.۴۱	۴۸.۸۳	۵۳.۴۶
ساری	کم ارتفاع و تند	۸۱.۸۷	۶۱.۰۴	۶۸.۹۶	۸۹.۲۵	۸۱.۸۵	۸۹.۳۰
ساری	مرتفع و ملایم	۶۳.۰۷	۵۰.۵۷	۵۹.۵۲	۶۲.۵۷	۵۷.۷۲	۶۰.۱۷
ساری	مرتفع و تند	۶۲.۱۸	۵۲.۳۲	۳۷.۱۷	۶۶.۶۴	۵۵.۲۰	۴۷.۱۲
چادگان	کم ارتفاع و ملایم	—	—	—	—	—	—
چادگان	کم ارتفاع و تند	۱۴.۵۶	۲۵.۱۴	۵۰.۲۵	۴.۶۴	۸.۶۵	۳۸.۶۴
چادگان	مرتفع و ملایم	۱.۵۶	۵.۶۴	۱۵.۱	۳.۶۴	۱۲.۹۴	۲۶.۴۶
چادگان	مرتفع و تند	—	—	—	—	—	—

جدول ۷. صحت کلاس خاک به درصد بر اساس کلاس ارتفاع و شیب

منطقه	کلاس	تصویر بالارونده	تصویر پایین رونده	ترکیب دو تصویر	تصویر بالارونده تصحیح شده	تصویر پایین رونده تصحیح شده	ترکیب دو تصویر تصحیح شده
-------	------	-----------------	-------------------	----------------	---------------------------	-----------------------------	--------------------------

مرد	کم ارتفاع و	۷۳.۳۶	۷۹.۳۶	۷۱.۰۰	۸۰.۶۴	۹۰.۵۹	۷۷.۳۰
مرد	ملايم	۶۵.۱۲	۶۸.۱۹	۶۱.۴۸	۷۳.۳۴	۸۴.۰۱	۶۴.۱۵
مرد	کم ارتفاع و تند	۷۳.۷۴	۴۶.۱۶	۷۱.۷۲	۷۳.۳۷	۷۵.۴۴	۷۱.۶۹
مرد	مرتفع و ملايم	۶۰.۵۲	۶۰.۳۵	۶۳.۶۷	۶۷.۰۳	۷۳.۱۲	۶۵.۲۹
	مرتفع و تند						
ساری	کم ارتفاع و	۱۲.۷۶	۱۲.۴۱	۳۹.۶۴	۲۸.۰۲	۲۳.۱۲	۳۵.۷۶
ساری	ملايم	۱۴.۱۲	۶.۸۹	۲۸.۱۴	۲۵.۰۶	۶.۶۴	۲۹.۵۹
ساری	کم ارتفاع و تند	۶.۵۴	۱۵.۹۲	۴۸.۱۲	۴۹.۳۶	۲۳.۵۴	۵۹.۸۷
ساری	مرتفع و ملايم	۱۶.۲۸	۱۱.۱۴	۴۱.۷۱	۲۹.۱۰	۲۶.۳۹	۴۴.۶۷
	مرتفع و تند						
چادگان	کم ارتفاع و	—	—	—	—	—	—
چادگان	ملايم	۴۹.۴۷	۵۰.۹۴	۲۸.۱۳	۵۸.۶۰	۶۷.۹۷	۴۴.۳۴
چادگان	کم ارتفاع و تند	—	—	—	—	—	—
چادگان	مرتفع و ملايم	۴۴.۸۸	۵۶.۹۷	۴۸.۲۷	۶۴.۵۲	۶۵.۰۵	۶۰.۸۳
	مرتفع و تند						

نتایج این بخش نشان می‌دهد که تصحیح رادیومتریکی توپوگرافی، به‌ویژه در نواحی کوهستانی با ارتفاع و شیب زیاد، صحت طبقه‌بندی را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. بر خلاف نتایج کلی که در ترکیب دو تصویر گاهی منجر به کاهش صحت می‌شد، در مناطق مرتفع و پرشیب، اعمال این تصحیح تقریباً در تمامی موارد موجب افزایش صحت شده است. برای نمونه، در کلاس پوشش گیاهی شهر چادگان، در حالی که صحت ترکیب دو تصویر تصحیح‌شده در مقایسه با حالت بدون تصحیح برای کل منطقه ۱۰.۱۹ درصد کاهش یافته بود، در نواحی با شیب تند، این ترکیب نسبت به حالت بدون تصحیح ۱۱.۳۶ درصد افزایش صحت را نشان داد. بررسی تصاویر تکی نیز نشان داد که در این مناطق، اعمال تصحیح توپوگرافی (در هر دو حالت بالارونده و پایین‌رونده) منجر به افزایش چشمگیری در صحت کلاس‌های پوشش گیاهی و خاک در مقایسه با صحت کلی منطقه شده است. این نتایج مشابه یافته‌های Dostalova و همکاران (۲۰۲۲) است که در آن تصحیح رادیومتریکی توپوگرافی در طبقه‌بندی جنگل و غیرجنگل به ترتیب ۲ و ۴ درصد بهبود کلی و در مناطق با ناهمواری شدید توپوگرافی به حدود ۱۶ و ۲۰ درصد ارتقاء صحت انجامیده است.

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق به وضوح نشان می‌دهد که به‌کارگیری همزمان تصاویر سنتینل-۱ از مدارهای بالارونده و پایین‌رونده، باعث ارتقای چشمگیر صحت طبقه‌بندی پوشش زمین می‌شود. به‌ویژه در مناطق دارای توپوگرافی پیچیده مانند مناطق کوهستانی، ترکیب تصاویر بدون استفاده از تصحیح رادیومتریکی توپوگرافی، توانسته است چالش‌های ناشی از اعوجاج‌های هندسی و محدودیت‌های زاویه دید راداری را تا حدودی جبران کند. در مقابل، اعمال تصحیح رادیومتریکی توپوگرافی تأثیر دوگانه‌ای دارد. در حالتی که، تمام منطقه صرف نظر از ویژگی‌های توپوگرافی تحلیل می‌شود، این تصحیح، در حالت استفاده از تصویر تک مدار تنها در برخی کلاس‌ها به بهبود جزئی عملکرد منجر شده است اما در حالت ترکیب تصاویر، این رویکرد ممکن است باعث انتقال اشتباه نمونه‌ها بین کلاس‌ها، به‌ویژه در حوزه کشاورزی، شود. اما زمانی که طبقه‌بندی محدود به نواحی با ارتفاع و شیب بالا باشد، تصحیح رادیومتریکی توپوگرافی عملکرد بسیار مناسبی در افزایش صحت طبقه‌بندی دارد و نتایج این تحقیق در دو کلاس پوشش گیاهی و خاک در هر سه منطقه این را به وضوح از خود نشان داده است. علاوه بر این، یافته‌های به‌دست‌آمده اهمیت استفاده از تصاویر سنتینل-۱ در مدارهای مختلف را برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از استراتژی‌های پیش‌پردازشی بهینه و

ترکیب این تصاویر، می‌توان به نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتری دست یافت. این تحقیق زمینه‌ساز ارتقای روند طبقه‌بندی پوشش زمین در مطالعات آینده بوده و می‌تواند به توسعه روش‌های نوین در حوزه کاربردهای محیط‌زیستی و کشاورزی کمک کند، به‌طوری که ارزیابی صحیح و به‌موقع تغییرات سطح زمین، مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای را تسهیل نماید.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند صمیمانه‌ترین مراتب تشکر خود را از آژانس فضایی اروپا (ESA) و پژوهشکده‌ی سنجش از دور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی که تصاویر را به منظور انجام این مطالعه در اختیارشان قرار داده‌اند، اعلام نمایند.

۶- منابع

- Army, E. K., & Saepuloh, A. (۲۰۲۰). Field verifications of geological structures related to SAR detected lineaments. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. ۴۱۲, No. ۱, p. ۰۱۲۰۱۲). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/412/1/012012>.
- Belgiu, M., & Drăguț, L. (۲۰۱۶). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, ۱۱۴, ۲۴-۳۱. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>.
- Chan, Y. K., & Koo, V. (۲۰۰۸). An introduction to synthetic aperture radar (SAR). Progress In Electromagnetics Research B, ۲, ۲۷-۶۰. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERB07110101>.
- Chen, X., Sun, Q., & Hu, J. (۲۰۱۸). Generation of complete SAR geometric distortion maps based on DEM and neighbor gradient algorithm. Applied Sciences, ۸(۱۱), ۲۲۰۶. <https://doi.org/10.3390/app8112206>.
- Cigna, F., Bateson, L. B., Jordan, C. J., & Dashwood, C. (۲۰۱۴). Simulating SAR geometric distortions and predicting Persistent Scatterer densities for ERS-۱/۲ and ENVISAT C-band SAR and InSAR applications: Nationwide feasibility assessment to monitor the landmass of Great Britain with SAR imagery. Remote Sensing of Environment, ۱۵۲, ۴۴۱-۴۶۶. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.025>.
- Congalton, R. G., & Green, K. (۲۰۱۹). Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9780429052729>.
- De Luca, G., Silva, J. M., & Modica, G. (۲۰۲۱). A workflow based on Sentinel-۱ SAR data and open-source algorithms for unsupervised burned area detection in Mediterranean ecosystems. GIScience & Remote Sensing, ۵۸(۴), ۵۱۶-۵۴۱. <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1907896>.
- Dostalova, Alena, Claudio Navacchi, Isabella Greimeister-Pfeil, David Small, and Wolfgang Wagner. ۲۰۲۲. "The effects of radiometric terrain flattening on SAR-based forest mapping and classification." Remote Sensing Letters ۱۳ (۹):۸۵۵-۸۶۴. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2022.2092911>.
- Dubois-Fernandez, P. C., Souyris, J. C., Angelliaume, S., & Garestier, F. (۲۰۰۸). The compact polarimetry alternative for spaceborne SAR at low frequency. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, ۴۶(۱۰), ۳۲۰۸-۳۲۲۲. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.919143>.
- Filipponi, F. (۲۰۱۹, June). Sentinel-۱ GRD preprocessing workflow. In Proceedings (Vol. ۱۸, No. ۱, p. ۱۱). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06201>.

Foody, G. M. (۲۰۰۲). Status of land cover classification accuracy assessment. Remote sensing of environment, ۸۰(۱), ۱۸۵-۲۰۱. [https://doi.org/1۰.۱۰۱۶/S۰۰۳۴-۴۲۵۷\(۰۱\)۰۰۲۹۵-۴](https://doi.org/1۰.۱۰۱۶/S۰۰۳۴-۴۲۵۷(۰۱)۰۰۲۹۵-۴).

Freeman, A. (۱۹۹۲). SAR calibration: An overview. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, ۳۰(۶), ۱۱۰۷-۱۱۲۱. <https://doi.org/1۰.۱۱۰۹/۳۶.۱۹۳۷۸۶>.

Grandini, M., Bagli, E., & Visani, G. (۲۰۲۰). Metrics for multi-class classification: an overview. arXiv preprint arXiv:۲۰۰۸.۰۵۷۵۶. <https://doi.org/1۰.۴۸۵۵۰/arXiv.۲۰۰۸.۰۵۷۵۶>.

Hu, B., Xu, Y., Huang, X., Cheng, Q., Ding, Q., Bai, L., & Li, Y. (۲۰۲۱). Improving urban land cover classification with combined use of sentinel-۲ and sentinel-۱ imagery. ISPRS International Journal of Geo-Information, ۱۰(۸), ۵۳۳. <https://doi.org/1۰.۳۳۹۰/ijgi۱۰۰۸.۵۳۳>.

Jahn, R., Hans-Peter Blume, VB Asio, Otto Spaargaren, and Péter Schad. ۲۰۰۶. Guidelines for soil description: Fao.

Lee, Jong-Sen. ۱۹۸۱. "Refined filtering of image noise using local statistics." Computer graphics and image processing ۱۵ (۴):۳۸۰-۳۸۹. [https://doi.org/1۰.۱۰۱۶/S۰۱۴۶-۶۶۴۸\(۸۱\)۸۰۰۱۸-۴](https://doi.org/1۰.۱۰۱۶/S۰۱۴۶-۶۶۴۸(۸۱)۸۰۰۱۸-۴).

Masoomi, A., Hamzehyan, R., & Shirazi, N. C. (۲۰۱۲). Speckle reduction approach for SAR image in satellite communication. International Journal of Machine Learning and Computing, ۲(۱), ۶۲. <http://doi.org/1۰.۷۷۶۳/IJMLC.۲۰۱۲.۷۲.۹۰>.

Ndikumana, E., Ho Tong Minh, D., Baghdadi, N., Courault, D., & Hossard, L. (۲۰۱۸). Deep recurrent neural network for agricultural classification using multitemporal SAR Sentinel-۱ for Camargue, France. Remote Sensing, ۱۰(۸), ۱۲۱۷. <https://doi.org/1۰.۳۳۹۰/rs۱۰۰۸۱۲۱۷>.

Qadir, A., Skakun, S., Kussul, N., Shelestov, A., & Becker-Reshef, I. (۲۰۲۴). A generalized model for mapping sunflower areas using Sentinel-۱ SAR data. Remote Sensing of Environment, ۳۰۶, ۱۱۴۱۳۲. <https://doi.org/1۰.۱۰۱۶/j.rse.۲۰۲۴.۱۱۴۱۳۲>.

Rahbek, C, MK Borregaard, B Hermansen, D Nogues-Bravo, and J Fjeldsø. ۲۰۱۹. "Definition and description of the montane regions of the World." See https://macroecology.ku.dk/resources/mountain_regions.

Sayedain, S. A., Maghsoudi, Y., & Eini-Zinab, S. (۲۰۲۰). Assessing the use of cross-orbit Sentinel-۱ images in land cover classification. International Journal of Remote Sensing, ۴۱(۲۰), ۷۸۰۱-۷۸۱۹. <https://doi.org/1۰.۱۰۸۰/۰۱۴۳۱۱۶۱,۲۰۲۰,۱۷۶۳۵۱۲>.

Šćepanović, S., Antropov, O., Laurila, P., Rauste, Y., Ignatenko, V., & Praks, J. (۲۰۲۱). Wide-area land cover mapping with Sentinel-۱ imagery using deep learning semantic segmentation models. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, ۱۴, ۱۰۳۵۷-۱۰۳۷۴. <https://doi.org/1۰.۱۱۰۹/JSTARS.۲۰۲۱.۳۱۱۶.۹۴>.

Small, D. (۲۰۱۱). Flattening gamma: Radiometric terrain correction for SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, ۴۹(۸), ۳۰۸۱-۳۰۹۳. <https://doi.org/1۰.۱۱۰۹/TGRS.۲۰۱۱.۲۱۲.۶۱۶>.

Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... & Rostan, F. (۲۰۱۲). GMES Sentinel-۱ mission. Remote sensing of environment, ۱۲۰, ۹-۲۴. <https://doi.org/1۰.۱۰۱۶/j.rse.۲۰۱۱.۰۵.۰۲۸>.

Van Zyl, J. J. (۲۰۱۱). Synthetic aperture radar polarimetry. John Wiley & Sons.
<https://doi.org/10.1002/9781118116104>.

Wang, H., Yang, H., Huang, Y., Wu, L., Guo, Z., & Li, N. (۲۰۲۳). Classification of land cover in complex terrain using gaofen-۳ SAR ascending and descending orbit data. Remote Sensing, ۱۵(۸), ۲۱۷۷.
<https://doi.org/10.3390/rs15082177>.

نسخه پیش انتشار