

## Original Article

Iranian Remote Sensing GIS  
Journal of

## Improving land Cover Classification in Mountainous Areas by Combining Sentinel-1 Images From Different Orbits and Assessing Radiometric Terrain Flattening Effects

Mohammad Ebrahimi<sup>\*</sup>, & Mahmood Reza Sahebi

### Affiliation

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

### ABSTRACT

**Introduction:** 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 55.67% to 75.41%, 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.

### Citation:

Ebrahimi, M., Sahebi, M. R.,  
Improving land Cover  
Classification in Mountainous  
Areas by Combining Sentinel-  
1 Images From Different  
Orbits and Assessing  
Radiometric Terrain  
Flattening Effects, Iran J  
Remote Sens GIS, 17(4): 161-  
180.

\* Corresponding Author: m.ebrahimi1@email.kntu.ac.ir  
DOI: <https://doi.org/10.48308/gisj.2025.239329.1258>

Received: 2025.04.05

Accepted: 2025.07.22





# بهبود طبقه‌بندی پوشش زمین در نواحی کوهستانی با ترکیب تصاویر سنتینل-۱ از مدارهای گوناگون و ارزیابی تأثیرات تصحیح رادیومتریک توپوگرافی

محمد ابراهیمی<sup>۱\*</sup> و محمود رضا صاحبی

سمت

دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

## چکیده

**سابقه و هدف:** در سال‌های اخیر، پوشش زمین به‌منزله شاخصی کلیدی در بررسی تغییرات اقلیمی، سیستم‌های اکولوژیکی و مدیریت منابع طبیعی مورد توجه قرار گرفته است. محدودیت‌هایی که در مسیر تهیه داده‌های به‌روز و دقیق وجود دارد نیاز به استفاده از فناوری‌های نوین سنجش از دور را افزایش داده است. در این میان، تصاویر راداری سنتینل-۱ که به سامانه رادار با روزه مجازی (SAR) مجهز است، به‌دلیل فناوری میکروویو فعال خود و با امکان عملکرد در هر شرایط جوی، می‌تواند ابزاری مناسب برای تهیه نقشه‌های پوشش زمین به شمار آید. هدف این تحقیق بهبود طبقه‌بندی پوشش زمین، با استفاده هم‌زمان از تصاویر دریاتی از مدارهای بالارونده و پایین‌رونده سنتینل-۱ و بررسی تأثیر تصحیح رادیومتریک توپوگرافی در صحت نتایج طبقه‌بندی است.

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

**نتایج و بحث:** نتایج نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از تصاویر بالارونده و پایین‌رونده، بدون اعمال تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، باعث بهبود شایان توجه صحت طبقه‌بندی در تمامی مناطق مورد مطالعه می‌شود. برای نمونه، در مرند، صحت کلی طبقه‌بندی از ۶۵/۳٪ به ۷۹/۱۷٪ افزایش یافته که معادل با بهبود تقریبی ۱۳٪ است. در ساری، ترکیب تصاویر به افزایش صحت کلی از ۵۵/۶۷٪ به ۷۵/۴۱٪ منجر شده است. همچنین در چادگان، افزایش حدود ۱۲ درصدی صحت کلی از ۵۶/۸۸٪ به ۶۸/۰۶٪ مشاهده شده است. از نظر صحت کلاسی، در مرند، صحت کلاس پوشش گیاهی ارتقای چشمگیری از ۴۳/۴۱٪ به ۶۹/۶۴٪ داشته و در ساری، صحت کلاس خاک از ۱۹/۵۷٪ به ۴۶/۴۰٪ بهبود یافته است. تحلیل عددی نشان می‌دهد ترکیب تصاویر، از مدارهای گوناگون، 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 بیش‌ازحد بین برخی کلاس‌ها شود 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 به‌میزان ۱۳ تا ۲۰٪ در مناطق متفاوت، نشان از پتانسیل بالای این رویکرد در طبقه‌بندی پوشش زمین دارد. از سوی دیگر، نتایج بیان می‌کند که نحوه پیش‌پردازش تصاویر سنتینل-۱ در صحت و کارایی مدل تأثیرگذار است و استفاده از تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، در برخی موارد، باعث کاهش صحت و کارایی مدل می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، ترکیب بهینه داده‌های سنتینل-۱ از مدارهای گوناگون می‌تواند به ارائه نقشه‌های دقیق‌تر و مورد اعتمادتر منجر شود. بنابراین رویکرد مطرح‌شده می‌تواند، به‌منزله مرجعی برای مطالعات آینده در حوزه سنجش از دور، بهبود طبقه‌بندی پوشش زمین و کاربردهای محیط‌زیستی و کشاورزی مطرح شود.

## استناد:

ابراهیمی، م، صاحبی، م.ر.، بهبود طبقه‌بندی پوشش زمین در نواحی کوهستانی با ترکیب تصاویر سنتینل-۱ از مدارهای گوناگون و ارزیابی تأثیرات تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴: ۱۶۱-۱۸۰.

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



## ۱- مقدمه

پوشش زمین یکی از عوامل محیطی بسیار مهمی است که در 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 و این مسئله توانایی ما را در پایش و پیش‌بینی این تغییرات پویا، کاهش می‌دهد. سنجش از دور راهکار ارزشمندی را مطرح می‌کند که با فراهم کردن نقشه‌های موضوعی پیوسته و دارای وضوح بالا در مقیاس‌های مکانی و زمانی متفاوت، این محدودیت را تا حدی برطرف می‌کند (Foody, 2002). سنجش از دور، با توانایی در عرضه اطلاعات دقیق و به‌موقع در مورد تغییرات مکانی سطح زمین، ابزاری حیاتی برای پایش پوشش زمین است. سنتینل-۱ که به سامانه راداری با روزه مجازی (SAR) مجهز است، به‌دلیل فناوری مایکروویو فعال خود که می‌تواند در تمامی شرایط آب‌وهوایی عمل کند، به ابزاری ضروری برای تهیه نقشه پوشش زمین تبدیل شده است. این ویژگی محدودیت‌هایی مانند پوشش ابری و همچنین ممکن نبودن تصویربرداری در طول شب را برطرف می‌کند. علاوه بر این، با پرتاب سنتینل-۱B، دوره بازدید مجدد ماهواره از دوازده روز به شش روز کاهش یافت که این شرایط امکان نقشه‌برداری گسترده و به‌موقع را فراهم می‌کند و برای پایش تغییرات پویای محیطی بسیار حیاتی است (Šćepanović et al., 2021). پیشرفت‌های اخیر فناوری سنجش از دور را از سامانه‌های SAR تک‌پلاریزه (SP) به سامانه‌های SAR تمام‌پلاریتری (FP) ارتقا داده‌اند و بدین ترتیب توانایی تفکیک کلاس‌های پوشش زمین بهبود چشمگیری یافته است. همچنین یکپارچه‌سازی سامانه‌های SAR پلاریتری دوگانه (DP) صحت تهیه نقشه پوشش زمین و خاک را به‌ویژه در کاربردهای کشاورزی، افزایش داده است؛ هرچند چالش‌هایی مانند افزایش صحت و ارزیابی عینی همچنان موضوع

تحقیقات جاری باقی مانده‌اند (Sayedain et al., 2020; Dubois-Fernandez et al., 2008). از سویی یکپارچه‌سازی داده‌ها از منابع گوناگون، مانند سنجنده‌های نوری با قدرت تفکیک مکانی بالا، داده‌های SAR و تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، سبب بهبود معتنا به طبقه‌بندی پوشش زمین شده است. این فرایند ادغام داده‌ها به استخراج اطلاعات مکملی می‌انجامد که از هیچ سنجنده منفردی، به‌تنهایی، امکان دریافت آن وجود ندارد (Hu et al., 2021; Ndikumana, 2018).

تصاویر SAR به‌طور ذاتی دارای هندسه دید جانبی‌اند؛ به این معنی که سامانه راداری زمین را از زاویه‌ای مایل مشاهده می‌کند، نه مستقیماً از بالا. این هندسه جانبی، همراه با تغییرات توپوگرافی، باعث ایجاد اعوجاج‌های هندسی<sup>۵</sup> درخور توجهی می‌شود که شامل کوتاه‌شدگی<sup>۶</sup>، وارونگی<sup>۷</sup> و سایه<sup>۸</sup> است. این اعوجاج‌های هندسی تأثیرات منفی زیادی در تصاویر SAR دارند؛ به‌ویژه در مناطقی با عوارض کوهستانی. به‌همین دلیل بسیاری از محققان روش‌هایی را برای شبیه‌سازی و اصلاح این اعوجاج‌ها توسعه داده‌اند تا این مشکل را برطرف کنند (Chen et al., 2018; Cigna et al., 2014). علاوه بر این سامانه‌های SAR معمولاً تصاویر را از مسیرهای مداری متفاوت، گذرهای بالارونده<sup>۹</sup> و پایین‌رونده<sup>۱۰</sup>، ثبت می‌کنند که به‌دلیل تغییرات در هندسه دید، به الگوهای بازپراکنش بازگشتی متفاوتی منجر می‌شود. در واقع، گذر بالارونده صحنه را از زاویه‌ای متفاوت با گذر پایین‌رونده ثبت می‌کند و در نتیجه، اطلاعات پراکندگی مکملی را به دست می‌دهد.

1. Synthetic Aperture Radar
2. Single Polarimetric
3. Fully Polarimetric
4. Dual Polarimetric
5. Geometric Distortions
6. Foreshortening
7. Layover
8. Shadow
9. Ascending
10. Descending

با ترکیب این تصاویر از مدارهای متقاطع<sup>۱</sup>، محققان می‌توانند محدودیت‌های جهت‌گیری مداری منفرد را جبران کنند و در نهایت، نمایی کامل‌تر و پایدارتر از سطح زمین به دست آورند. این امکان دید دوگانه، در سیستم‌های SAR مدار قطبی، به‌طور گسترده‌ای برای بهبود صحت طبقه‌بندی و تفسیر ویژگی‌های سطحی پیچیده به کار رفته است (Sayedain et al., 2020).

سیدین<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۰) ترکیب تصاویر سنتینل-۱ از مدارهای بالارونده و پایین‌رونده را برای طبقه‌بندی پوشش زمین، بررسی کردند. نتایج نشان داد که این ترکیب عملکرد طبقه‌بندی پوشش زمین را در مقایسه با استفاده از مداری بالارونده یا پایین‌رونده به‌تنهایی، بهبود می‌بخشد. د لوکا<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۱) تصاویر سری زمانی سنتینل-۱ از مدارهای بالارونده و پایین‌رونده را برای تهیه نقشه محدود حریق<sup>۴</sup> با استفاده از روش یادگیری ماشین بدون نظارت K-means به کار بردند. وانگ<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۲۳) نیز چارچوبی نوین برای تهیه نقشه پوشش زمین، در مناطق دارای عوارض پیچیده، مطرح کردند که بر مبنای داده‌های Gaofen-3 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 دارای توپوگرافی پیچیده، عملکرد به‌مراتب بهتری دارد. در تحقیقی دیگر، قدیر<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از داده‌های SAR سنتینل-۱، مدلی برای تهیه نقشه از مناطق زیرکشت آفتاب‌گردان توسعه دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که عملکرد تصاویر مدار پایین‌رونده، برای این منظور، بهتر از مدار بالارونده است زیرا رفتار جهت‌گیری گل آفتاب‌گردان، در مراحل فنولوژیکی خاص، موجب بازپراکنش متمایز در تصاویر راداری می‌شود.

بر پایه پیشنهاد پیشینه پژوهش، به‌کارگیری تصاویر بالارونده و پایین‌رونده در کاربردهای متفاوت، نتایج متنوعی به همراه دارد و ترکیب این دو نوع تصویر می‌تواند کارایی

و صحت نهایی را افزایش چشمگیر دهد. با این حال تحقیقات پیشین کمتر به ارزیابی هم‌زمان اثر ترکیب تصاویر این دو مدار و تصحیح رادیومتریک توپوگرافی<sup>۷</sup> پرداخته‌اند. از این‌رو هدف این تحقیق بهبود طبقه‌بندی پوشش زمین، به‌ویژه 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)<sup>۸</sup> انجام گرفته است. همچنین عملکرد تصحیح رادیومتریک توپوگرافی در بهبود نتایج طبقه‌بندی، در مناطق گوناگون، ارزیابی شده است. این تحقیق تأثیر ترکیب داده‌ها در کاهش اعوجاج‌های هندسی را به‌ویژه در مناطق با توپوگرافی پیچیده و همچنین در نواحی مسطح، بررسی می‌کند و به شناسایی روش‌های پیش‌پردازش مؤثر در 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 بیان و در پی آن، روند پردازش داده‌های سنتینل-۱ مطرح می‌شود. در انتها، معیارهای ارزیابی نقشه‌های پوشش زمین مروری کلی خواهد شد.

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

برای ارزیابی این تحقیق، سه منطقه متفاوت در ایران انتخاب شده که وجه مشترک این سه منطقه وجود نواحی کوهستانی در آن‌هاست. منطقه اول ساری،

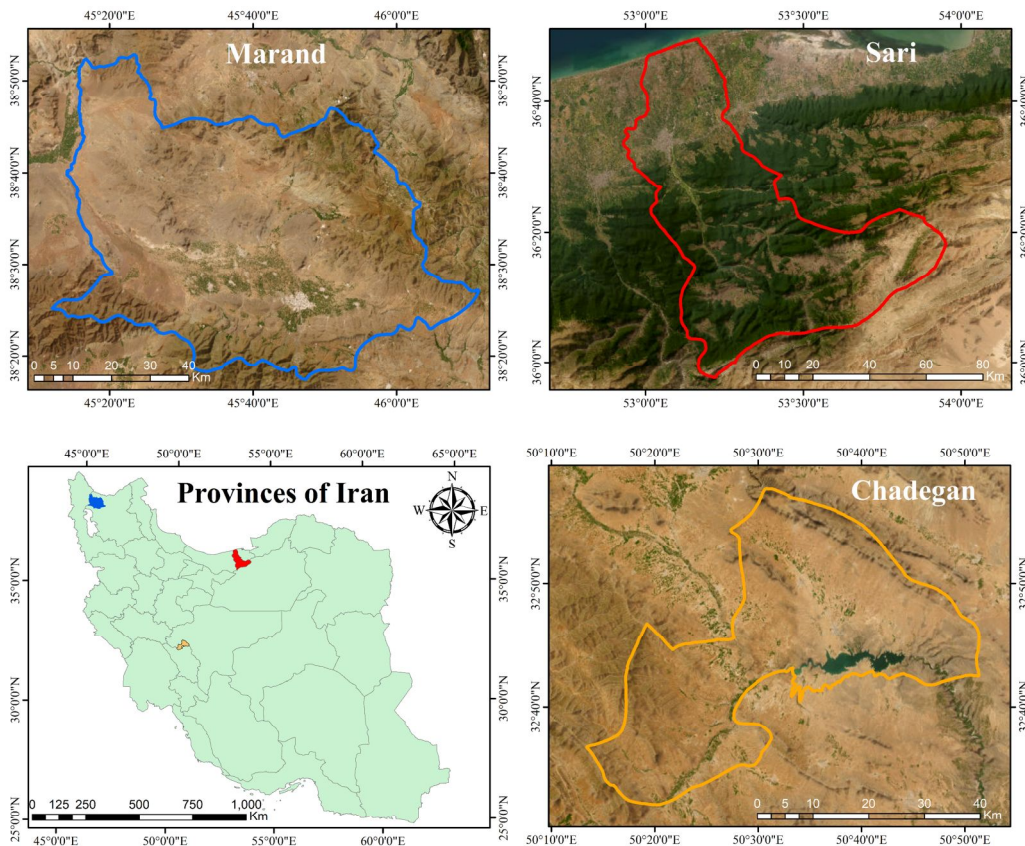
1. Cross Orbit
2. Sayedain
3. De Luca
4. Burned Area
5. Wang
6. Qadir
7. Radiometric Terrain Flattening
8. Random Forest

منطقه سوم چادگان، یکی از شهرستان‌های استان اصفهان در ایران است (واقع در  $32^{\circ}37'$  شمالی و  $50^{\circ}16'$  شرقی). در این منطقه، پوشش زمین اغلب خشک و کشاورزی است و ویژگی‌های محیطی منحصربه‌فرد مناطق مرکزی ایران، از نظر پوشش زمین، به‌خوبی منعکس می‌شود. شکل ۱ موقعیت این مناطق را نشان می‌دهد.

## ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه، از تصاویر SAR DP ماهواره سنتینل-۱ استفاده شده است. مأموریت سنتینل-۱ شامل صورت فلکی از دو ماهواره (سنتینل-۱A و سنتینل-۱B) در مدار قطبی می‌شود. داده‌های این ماهواره‌ها به دو فرمت SLC<sup>۱</sup> و GRD<sup>۲</sup> توزیع می‌شوند (Torres et al., 2012).

مرکز استان مازندران، است و مساحتی برابر با ۳۶۸۵ کیلومترمربع 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 (واقع در  $35^{\circ}56'$  شمالی،  $53^{\circ}06'$  شرقی). علاوه بر این، نواحی اطراف ساری دارای پوشش‌های جنگلی، کشاورزی و شیب‌های تند ناشی از دامنه‌های کوهستانی است. منطقه دوم، مرند، در شمال غرب استان آذربایجان شرقی و در شمالی‌ترین منطقه ایران واقع شده است. این شهر در ناحیه‌ای کوهستانی قرار دارد (واقع در  $38^{\circ}43'$  شمالی و  $45^{\circ}77'$  شرقی) و توپوگرافی آن شامل ارتفاعات متغیر، شیب‌های متعدد و پوشش‌های طبیعی و مراتع است.



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

1. Single Look Complex
2. Ground Range Detected

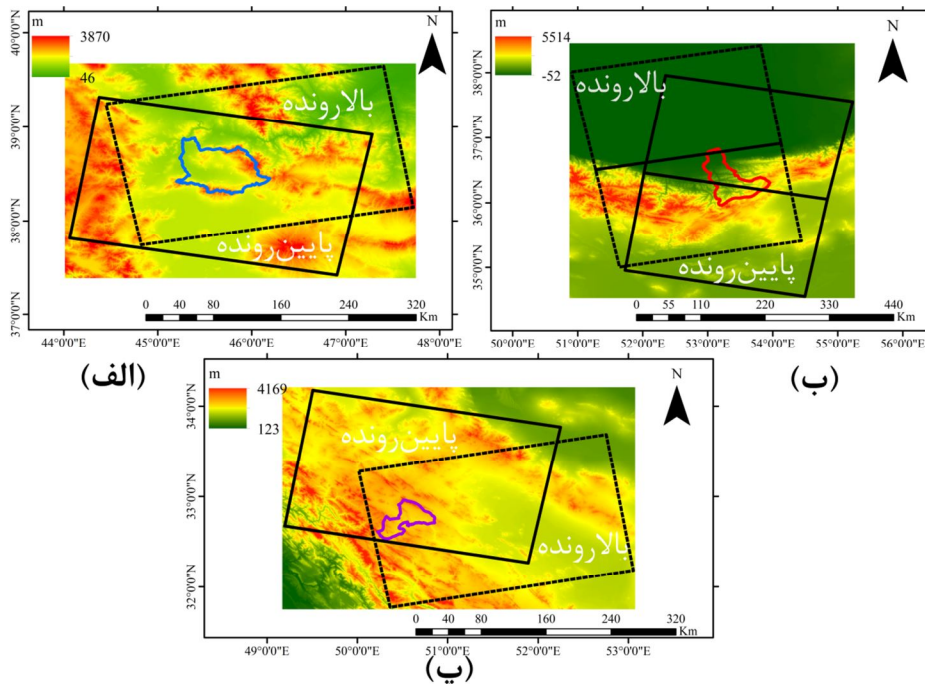


مناطق، شکل ۲ مدل رقومی ارتفاعی (DEM) <sup>۱</sup> مناطق مورد مطالعه را برپایه داده‌های SRTM <sup>۲</sup> با حد تفکیک مکانی سی متر، همراه با محدوده‌های پوشش تصاویر، نمایش می‌دهد.

مشخصات تصاویر مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ بیان شده است. در ادامه، به‌منظور نمایش هم‌پوشانی تصاویر بالارونده و پایین‌رونده سنتینل- ۱ و ساختار توپوگرافی

جدول ۱. مشخصات تصاویر مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه	مدار	زمان دریافت تصویر	زاویه فرود
مرند	بالارونده	۲۰۲۴/۰۶/۱۴	۳۰/۰۷۵-۴۶/۰۱۱
	پایین‌رونده	۲۰۲۴/۰۶/۲۰	۳۰/۰۹۰-۴۶/۰۲۵
ساری	بالارونده	۲۰۲۴/۰۷/۰۵	۳۰/۰۷۵-۴۶/۰۲۷
	بالارونده	۲۰۲۴/۰۷/۰۵	۳۰/۰۴۴-۴۶/۰۰۳
	پایین‌رونده	۲۰۲۴/۰۷/۰۶	۳۰/۰۶۸-۴۶/۰۰۳
	پایین‌رونده	۲۰۲۴/۰۷/۰۶	۳۰/۰۷۳-۴۶/۰۲۵
چادگان	بالارونده	۲۰۲۴/۰۶/۰۴	۳۱/۰۰۳-۴۶/۰۳۹
	پایین‌رونده	۲۰۲۴/۰۶/۰۵	۳۰/۰۹۵-۴۶/۰۳۷



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

1. Digital Elevation Model
2. Shuttle Radar Topography Mission

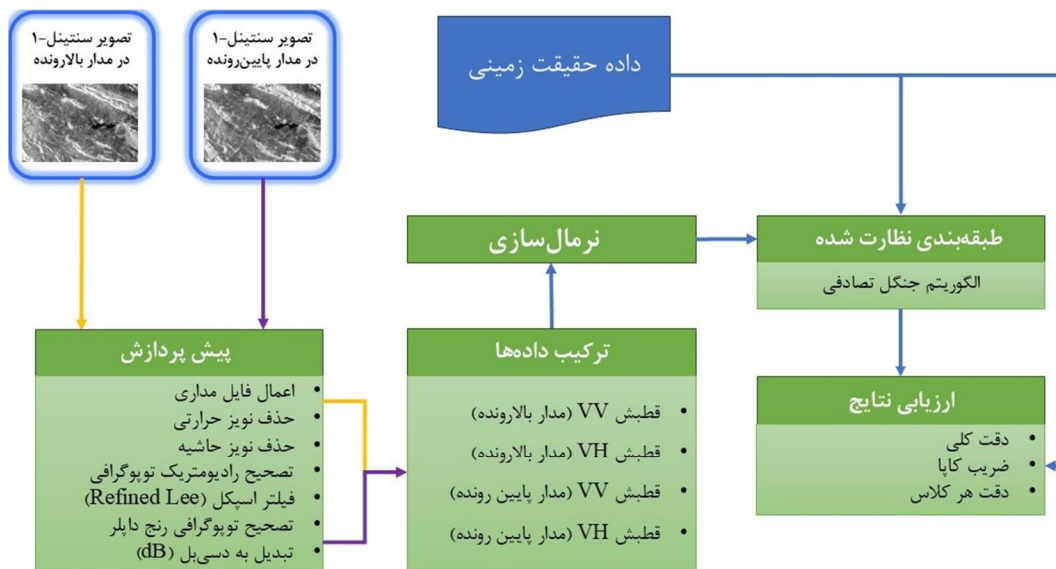
### ۳-۲- روش تحقیق

روش پیشنهادی در این تحقیق (شکل ۳) بر آن است که با به‌کارگیری 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، پیش‌پردازش می‌شود. سپس با ترکیب داده‌ها، اطلاعات لازم برای طبقه‌بندی فراهم می‌آید. در مرحله بعد، الگوریتم RF به‌منظور طبقه‌بندی پوشش زمین به کار می‌رود و در نهایت،

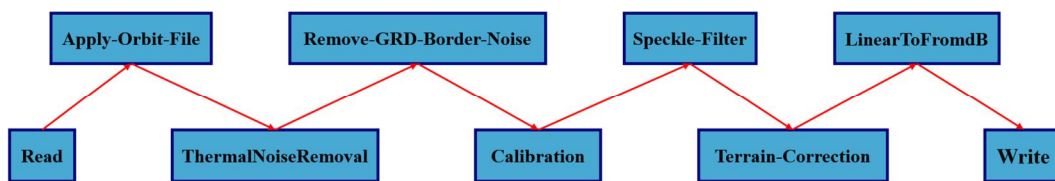
نتایج به‌دست‌آمده به‌دقت ارزیابی می‌شوند. در ادامه، هریک از این مراحل به‌طور جامع شرح داده شده است.

### ۳-۲-۱- پیش‌پردازش

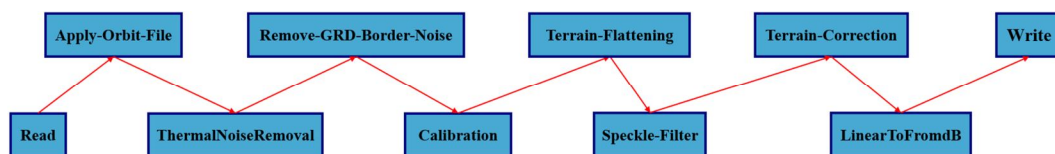
پیش‌پردازشی استاندارد برای داده‌های سنتینل-۱، در فرمت GRD، شامل شش مرحله پردازشی است که این مراحل، به‌ترتیب، در شکل ۴ به نمایش درآمده است (Filipponi, 2019). برای انجام شدن این مراحل، نرم‌افزار SNAP به کار رفته است.



شکل ۳. روندنمای تحقیق پیش‌رو



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



شکل ۵. مراحل پیشنهادی برای پیش‌پردازش تصاویر سنتینل-۱ با فرمت GRD که مناطق کوهستانی را دربردارند

منجر می‌شود. الگوریتم حذف نویز حاشیه<sup>۷</sup> برای حذف نویز کم‌شدت و داده‌های نامعتبر در لبه‌های صحنه طراحی شده است (Filipponi, 2019).

#### ۴-۱-۳-۲- کالیبراسیون

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 شود. کالیبراسیون<sup>۸</sup> فرایندی است که مقادیر خام پیکسلی را به ضریب بازپراکنش راداری کالیبره‌شده از نظر رادیومتریک تبدیل می‌کند. این فرایند، با توجه به نوع سنجنده و سطح پردازش<sup>۹</sup> داده‌های SAR، متفاوت خواهد بود (Freeman, 1992).

#### ۵-۱-۳-۲- تصحیح رادیومتریک توپوگرافی

اگر منطقه مورد مطالعه شامل نواحی کوهستانی باشد، تغییرات ارتفاعی زمین و زاویه دید سنجنده هم در موقعیت مکانی اهداف روی سطح زمین تأثیر می‌گذارند و هم می‌توانند در مقدار بازپراکنش دریافتی از طریق سنجنده نقش داشته باشند. از این رو، به منظور حذف یا کاهش تأثیرات ناشی از ناهمواری‌های زمین و هندسه تصویربرداری در مقادیر بازپراکنش، انجام دادن تصحیح رادیومتریک توپوگرافی ضروری است (Small, 2011). در همین راستا الگوریتمی که اسمال<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۱) پیشنهاد کرد، به منزله روشی پیشنهادی، برای کاهش تغییرات رادیومتریکی در زمینه توپوگرافی به کار می‌رود.

اگر منطقه مورد مطالعه دربرگیرنده مناطق کوهستانی باشد، توصیه می‌شود تصحیح رادیومتریک توپوگرافی روی تصویر انجام شود. روند پیش‌پردازش، در این فرم، در شکل ۵ نشان داده شده است. در ادامه، هر بخش جداگانه توضیح داده شده است.

#### ۱-۳-۲- اعمال فایل مداری

دقت اطلاعات اولیه مدار موجود در فراداده<sup>۱</sup> محصولات سنتینل-۱ اغلب کمتر از فایل‌های مداری<sup>۲</sup> دقیقی است که چند روز تا چند هفته پس از تولید محصول در دسترس قرار می‌گیرند. اعمال فایل مداری اطلاعاتی را درباره موقعیت و سرعت ماهواره، به روزرسانی می‌کند که برای تصحیح هندسی دقیق و زمین مرجع‌سازی در مراحل بعدی بسیار مهم است (Filipponi, 2019).

#### ۲-۳-۱-۲- حذف نویز حرارتی

تصاویر سنتینل-۱ تحت تأثیر نویز حرارتی جمع‌شونده قرار دارند که به‌ویژه، در کانال‌های با قطبش متقاطع (HV، VH)، شایان توجه است. هدف از حذف نویز حرارتی<sup>۳</sup> کاهش تأثیر این نویز، یکنواخت‌سازی سیگنال بازپراکنش در کل صحنه و به حداقل رساندن ناپیوستگی‌ها بین زیرنوارهای موجود در حالت‌های تصویربرداری چندنواری، مانند تداخل گسترده عرض (IW)<sup>۴</sup> است. حذف نویز حرارتی کیفیت تصویر را بهبود می‌بخشد و مقایسه مقادیر پیکسل و تشخیص تغییرات ظریف در بازپراکنش را آسان‌تر می‌کند. نویز حرارتی ممکن است سبب ایجاد ابهام در سیگنال بازپراکنش واقعی از سطح زمین و تفسیرهای نادرست از داده‌ها شود (Filipponi, 2019).

#### ۳-۳-۱-۳- حذف نویز حاشیه

در حین تولید محصولات سنتینل-۱، باید زمان شروع نمونه‌برداری اصلاح شود تا تغییرات انحنای زمین جبران گردد. هم‌زمان، فشرده‌سازی در جهت آزیموت<sup>۵</sup> و رنج<sup>۶</sup> به ایجاد آثار رادیومتریکی در لبه‌های تصویر

1. Metadata
2. Apply Orbit File
3. Thermal Noise Removal
4. Interferometric Wide Swath
5. Azimuth
6. Range
7. Border Noise Removal
8. Calibration
9. Processing Level
10. Small



## ۶-۳-۲- فیلتر اسپکل

اسپکل<sup>۱</sup> به منزله الگویی دانه‌دانه و فلفل‌نمکی، ناشی از تداخل سازنده و مخرب چندین بازپراکنش در هر پیکسل، شناخته می‌شود که می‌تواند در ظاهر عوارض، در تصاویر SAR، تأثیر بگذارد. برای کاهش اسپکل و بهبود کیفیت بصری و امکان تفسیر تصاویر، از فیلترهای اسپکل استفاده می‌شود (Masoomi et al., 2012). در این مطالعه پس از انجام شدن مطالعات اولیه، به منظور کاهش اثر اسپکل، از فیلتر Refined lee با ابعاد پنجره ۷×۷ استفاده شده است زیرا این فیلتر تعادل مناسبی بین حذف نویز و حفظ جزئیات مکانی، مانند لبه، ایجاد می‌کند (Lee, 1981) و در مطالعات مشابه، مانند پژوهش سیدین و همکاران (۲۰۲۰) نیز استفاده شده است.

## ۷-۳-۲- تصحیح توپوگرافی رنج داپلر

تصاویر SAR، به دلیل ماهیت دید مایل حسگر و تغییرات در ارتفاع زمین، اعوجاجاتی از خود نشان می‌دهند. تصحیح هندسی رنج داپلر<sup>۲</sup> از یک مدل رقومی ارتفاعی، برای تصحیح این اعوجاجات و زمین مرجع‌سازی تصویر، استفاده می‌کند و اطمینان می‌دهد که نمایش هندسی آن، تا حد امکان، به دنیای واقعی نزدیک است (Filipponi, 2019).

## ۸-۳-۲- تبدیل به دسی‌بل

طی آخرین مرحله در روند پیش‌پردازش تصاویر سنتینل-۱، در این تحقیق، ضریب بازپراکنش با استفاده از تبدیل لگاریتمی به دسی‌بل (dB) تبدیل می‌شود.

## ۲-۳-۲- ترکیب تصاویر بالارونده و پایین‌رونده

در سامانه‌های SAR، قطبش بیانگر جهت‌گیری بردار میدان الکتریکی سیگنال ارسالی به سطح زمین است. معمولاً در این سامانه‌ها، از قطبش‌های خطی افقی (H)<sup>۳</sup> و عمودی (V)<sup>۴</sup> یا ترکیبی از آن‌ها استفاده می‌شود که چهار حالت اصلی HH، HV، VH و VV را دربرمی‌گیرد (Van Zyl, 2011; Chan & Koo, 2008).

سنتینل-۱ که از سامانه DP SAR بهره می‌برد، محصولاتش معمولاً شامل قطبش‌های VV و VH است. 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 می‌کند و به دلیل جهت‌گیری «راست‌نگر»، سطح زمین را از سمت غرب مشاهده می‌کند؛ در صورتی که در گذر پایین‌رونده، از شمال به جنوب حرکت می‌کند 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؛ این نکته، در کاربردهایی مانند تحلیل تغییرشکل و مطالعات پوشش زمین، اهمیت ویژه‌ای دارد (Sayedain et al., 2020; Army & Saepuloh, 2020). در این تحقیق، به منظور طبقه‌بندی، از تصاویر ثبت‌شده در هر دو گذر بالارونده و پایین‌رونده استفاده شده است. به عبارت دیگر، قطبش‌های VV و VH هم‌زمان از هر دو گذر به کار رفته‌اند.

## ۳-۳-۲- طبقه‌بندی نظارت‌شده

این نوع طبقه‌بندی یکی از شاخه‌های اصلی یادگیری ماشین است. در این رویکرد، مدل‌ها با استفاده از داده‌های برچسب‌گذاری شده آموزش می‌بینند؛ به این مفهوم که هر نمونه آموزشی دارای برچسبی صحیح (یا کلاس) است و این برچسب به دسته‌ای اشاره دارد که نمونه مورد نظر به آن متعلق است. یکی از الگوریتم‌های برجسته، در طبقه‌بندی نظارت‌شده، RF است. این الگوریتم شامل مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم می‌شود که به‌طور تصادفی، از زیرمجموعه‌هایی از داده‌ها و ویژگی‌ها آموزش می‌بینند. سپس با ترکیب

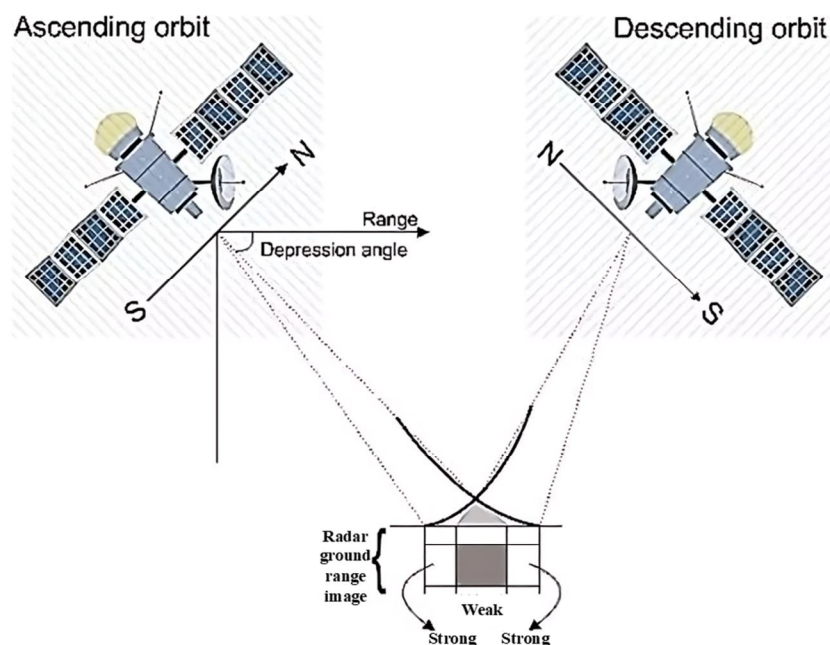
1. Speckle
2. Range Doppler Terrain Correction
3. Horizontal
4. Vertical

نتایج تمامی درختان، معمولاً از طریق رأی‌گیری اکثریت در طبقه‌بندی یا میانگین در رگرسیون، تصمیم نهایی گرفته می‌شود (Belgiu & Drăguț, 2016).

#### ۴-۳-۲- جمع‌آوری داده‌های حقیقت زمینی

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

حقیقت زمینی انتخاب شدند. برای هر کلاس، مجموعه‌ای از نمونه‌ها استخراج و ثبت شد که هم در آموزش مدل و هم در ارزیابی عملکرد، از طریق مقایسه نتایج طبقه‌بندی با داده‌های حقیقت زمینی استفاده شدند. به منظور تضمین اعتبار و تعمیم‌پذیری مدل، نمونه‌های جمع‌آوری شده به گونه‌ای تقسیم شدند که ۷۰٪ برای آموزش مدل و ۳۰٪ به صورت داده‌های ارزیابی به کار رفتند. جدول ۲ تعداد نمونه‌های آموزش و ارزیابی را به تفکیک هر منطقه و هر کلاس، نشان می‌دهد.



شکل ۶. نمایش دو حالت تصویربرداری مدار بالارونده و پایین‌رونده

منبع: Army & Saepuloh, 2020

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

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

### ۵-۳-۲- ارزیابی نتایج

برای ارزیابی عملکرد مدل طبقه‌بندی از دو شاخص اصلی، یعنی صحت کلی<sup>۱</sup> و ضریب کاپا<sup>۲</sup>، استفاده شده است. صحت کلی بیانگر درصد نمونه‌هایی است که به‌درستی شناسایی شده‌اند و دیدگاهی اولیه از عملکرد مدل ارائه می‌دهد؛ اما در شرایطی که توزیع کلاس‌ها نامتوازن باشد، ممکن است این شاخص گمراه‌کننده باشد زیرا مدل می‌تواند، با پیش‌بینی مکرر کلاس غالب، به درصد بالایی دست یابد. ضریب کاپا از طریق مقایسه صحت مشاهده‌شده با صحت مورد انتظار (به‌عبارت‌دیگر، صحت تصادفی) این نقص را جبران می‌کند و ارزیابی دقیق‌تری از مورد اطمینان بودن مدل به دست می‌دهد. روابط محاسبه صحت کلی (OA) و ضریب کاپا (K) به‌ترتیب، در رابطه (۱) و رابطه (۲) بیان شده است (Grandini et al., 2020; Congalton & Green, 2019).

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

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

در این معادلات منظور از  $k$  تعداد کلاس‌ها،  $n_{ii}$  عنصر واقع در قطر اصلی ماتریس ابهام کلاس نام،

$n$  تعداد کل داده‌های ارزیابی،  $p_o$  درستی مشاهده‌شده، و  $p_e$  توافق مورد انتظار است.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج این تحقیق مطرح می‌شود. برای هر سه منطقه مورد بررسی، ابتدا سه حالت طبقه‌بندی بدون تصحیح رادیومتریک توپوگرافی انجام شده است: نخست، با استفاده از مقادیر بازپراکنش VV و VH در تصویر بالارونده، سپس با داده‌های تصویر پایین‌رونده و در نهایت، با ترکیب اطلاعات هر دو گذر. علاوه‌براین همان سه حالت مذکور، پس از اعمال پردازش اولیه، برای تصحیح رادیومتریک توپوگرافی نیز ارزیابی شدند. در نهایت، نقشه‌ای با پنج کلاس (آب، خاک، پوشش گیاهی، مناطق شهری و مناطق کشاورزی) تهیه شد. شایان ذکر است که در مورد تمامی حالات طبقه‌بندی، هایپرپارامترهای مدل RF با ۴۰۰ درخت، عمق حداکثر ۱۰، حداقل تقسیم‌گره ۵ نمونه و حداقل ۲ نمونه در برگ، تنظیم شده‌اند. نتایج هر منطقه، در ادامه، جداگانه بیان خواهد شد.

#### ۱-۳- شهر مرنند

نتایج طبقه‌بندی پنج‌کلاسه شهر مرنند در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

جدول ۳. پارامترهای ارزیابی صحت طبقه‌بندی شهر مرنند در حالت‌های متفاوت

داده استفاده‌شده	صحت کلی (%)	ضریب کاپا	صحت کلاس پوشش گیاهی (%)	صحت کلاس خاک (%)	صحت کلاس آب (%)	صحت کلاس 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 تصحیح‌شده	۶۶/۶۵	۰/۵۱۳۴	۴۳/۹۶	۷۴/۸۶	۷۴/۲۰	۸۴/۰۲	۴۷/۴۲
تصویر پایین‌رونده تصحیح‌شده	۶۷/۴۳	۰/۵۱۵۴	۵۸/۹۶	۸۴/۲۷	۸۸/۰۴	۸۳/۶۲	۲۶/۳۲
ترکیب دو تصویر تصحیح‌شده	۷۶/۲۷	۰/۶۵۵۷	۶۹/۳۱	۸۱/۷۲	۹۱/۳۳	۹۲/۰۹	۵۶/۲۸

1. Overall Accuracy
2. Kappa Coefficient

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 تک‌تصویر استفاده می‌شود، تصاویر تصحیح‌شده نتایج بهتری به دست می‌دهند. اما تصویر تصحیح‌شده در مدار پایین‌رونده، پس از تصحیح، صحت بسیار پایینی در کلاس کشاورزی نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای 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.

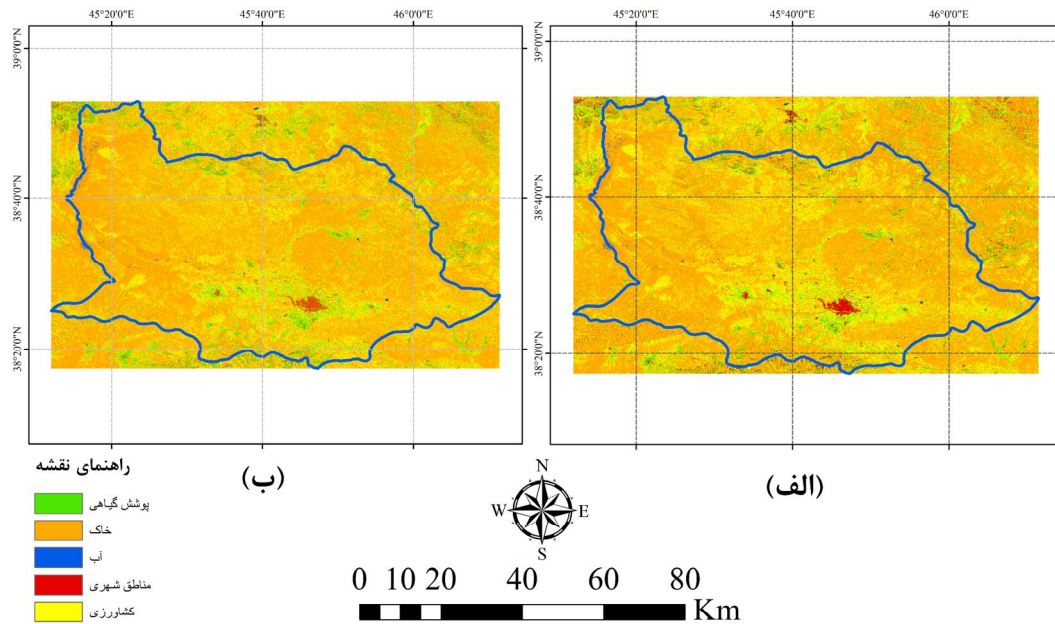
بر اساس ماتریس ابهام و جدول ۳، تصحیح رادیومتریک توپوگرافی در تصویر مدار پایین‌رونده موجب بهبود صحت در طبقه‌بندی کلاس‌های پوشش گیاهی و خاک شده؛ با این حال صحت طبقه‌بندی

### ۲-۳- شهر ساری

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

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

شکل ۷. ماتریس ابهام طبقه‌بندی شهر مرند: تصویر پایین‌رونده (الف)؛ تصویر تصحیح‌شده پایین‌رونده (ب)



شکل ۸. نقشه طبقه‌بندی شهر مرند با استفاده از: ترکیب دو تصویر (الف)؛ ترکیب دو تصویر تصحیح‌شده (ب)

جدول ۴. پارامترهای ارزیابی صحت طبقه‌بندی شهر ساری در حالت‌های متفاوت

داده استفاده شده	صحت کلی (%)	ضریب کاپا	صحت پوشش گیاهی (%)	صحت خاک (%)	صحت کلاس آب (%)	صحت 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 تصحیح‌شده	۵۹/۲۷	۰/۴۰۷۶	۸۷/۹۴	۳۷/۰۱	۷۱/۶۸	۶۵/۱۰	۳۱/۹۴
تصویر پایین‌رونده تصحیح‌شده	۵۵/۶۸	۰/۳۷۰۹	۷۲/۱۸	۱۱/۸۶	۸۵/۳۷	۵۴/۳۰	۶۹/۵۸
ترکیب دو تصویر تصحیح‌شده	۷۲/۴۲	۰/۶۰۸۷	۸۶/۶۵	۴۱/۱۷	۹۵/۲۶	۸۴/۲۹	۷۳/۷۸

در شهر ساری، صحت شناسایی کلاس خاک بود. باینکه ترکیب دو تصویر در چهار کلاس دیگر صحت مناسبی به دست داده، نداشتن توانایی در تفکیک کلاس خاک به کاهش ضریب کاپا و صحت کلی منجر شده است. برای درک بهتر این موضوع، از ماتریس ابهام ارائه‌شده در شکل ۹ استفاده می‌کنیم.

نتایج نشان می‌دهد که ترکیب دو تصویر، بدون تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، بهترین صحت و بالاترین ضریب کاپا را به همراه داشته است؛ درحالی‌که در حالت استفاده از تک‌تصویر، اعمال تصحیح رادیومتریک توپوگرافی باعث بهبود شایان توجه طبقه‌بندی شده است. مهم‌ترین چالش این طبقه‌بندی،

نقشه‌های طبقه‌بندی در دو حالت ترکیب تصاویر، در شکل ۱۰ به نمایش گذاشته شده‌اند.

### ۳-۳- شهر چادگان

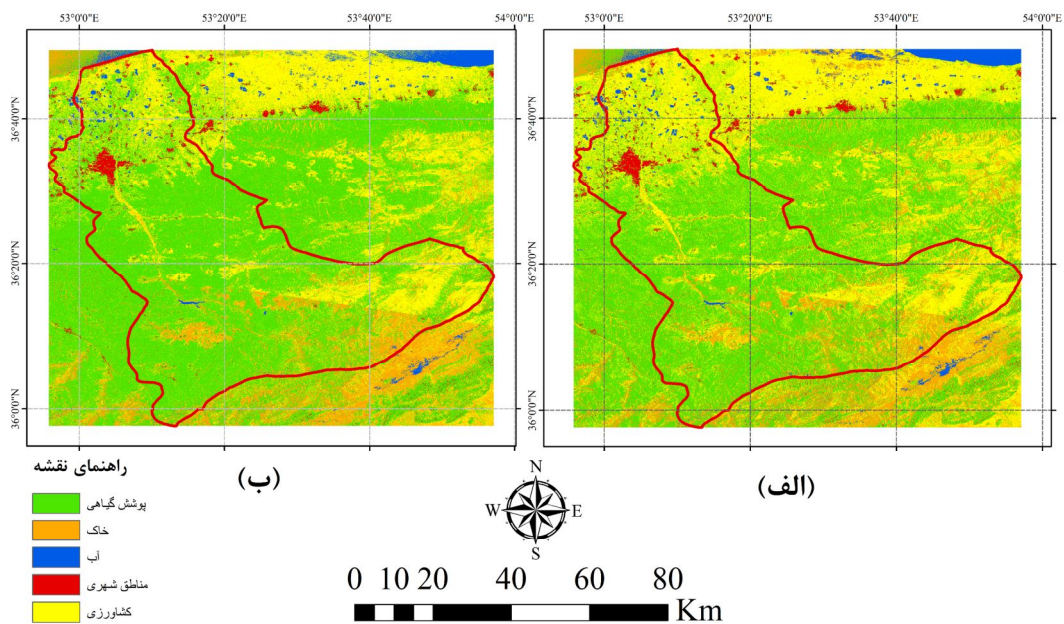
نتایج طبقه‌بندی پنج کلاس شهر چادگان را می‌توان در جدول ۵ مشاهده کرد.

همان‌طور که طبق ماتریس ابهام مشاهده می‌شود، ۵۳۱۴ نمونه از کلاس خاک به اشتباه به کلاس پوشش گیاهی ۳۴۰۰ نمونه نیز به کلاس کشاورزی منتقل شده‌اند. جدول ۴ نشان می‌دهد که حتی اعمال تصحیح رادیومتریک توپوگرافی نیز موفق به افزایش صحت این کلاس نشده است. در نهایت،

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



شکل ۱۰. نقشه طبقه‌بندی شهر ساری، با استفاده از: ترکیب دو تصویر (الف)؛ ترکیب دو تصویر تصحیح‌شده (ب)



جدول ۵. پارامترهای ارزیابی صحت طبقه‌بندی شهر چادگان در حالت‌های متفاوت

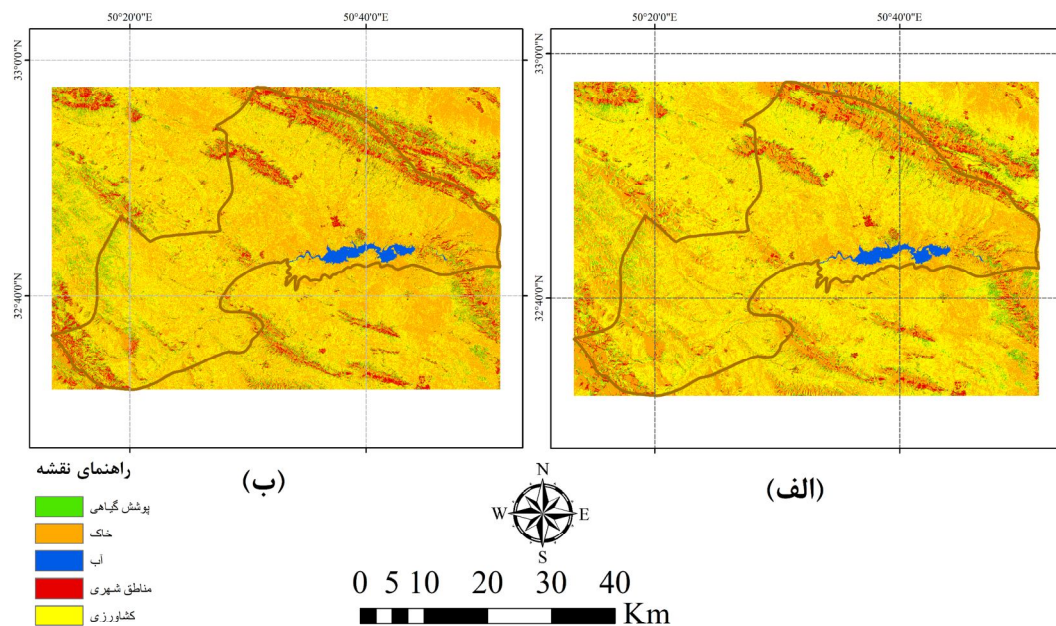
صحت کلاس کشاورزی (%)	صحت کلاس مناطق شهری (%)	صحت کلاس آب (%)	صحت کلاس خاک (%)	صحت کلاس پوشش گیاهی (%)	ضریب کاپا	صحت کلی (%)	داده استفاده شده
۵۳/۳۲	۳۹/۴۱	۹۸/۶۶	۶۱/۴۶	۶/۱۴	۰/۳۴۶۸	۵۵/۹۴	تصویر بالارونده
۵۱/۱۳	۳۲/۹۳	۹۹/۳۵	۶۵/۲۹	۱۳/۳۴	۰/۳۵۷۴	۵۶/۸۸	تصویر پایین‌رونده
۷۰/۹۱	۶۲/۴۶	۹۹/۵۴	۶۵/۱۵	۴۰/۷۷	۰/۵۴۴۳	۶۸/۰۶	ترکیب دو تصویر
۴۸/۱۸	۲۵/۴۳	۹۸/۶۶	۶۷/۸۵	۰/۰۱	۰/۳۱۹۴	۵۵/۲۷	تصویر بالارونده تصحیح شده
۴۲/۱۲	۴۰/۱۷	۹۹/۴۹	۷۰/۵۶	۰/۰۷	۰/۳۴۱۰	۵۶/۲۰	تصویر پایین‌رونده تصحیح شده
۵۸/۸۱	۵۹/۳۲	۹۹/۵۸	۶۷/۲۳	۳۰/۵۸	۰/۳۴۱۰	۶۳/۸۳	ترکیب دو تصویر تصحیح شده

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

در طبقه‌بندی شهر چادگان، چالش اصلی به کلاس پوشش گیاهی بازمی‌گردد. علاوه‌براین، مشابه نتایج به‌دست‌آمده در طبقه‌بندی شهرهای مرنند و ساری، بهترین عملکرد زمانی حاصل شد که ترکیب دو تصویر بدون استفاده از تصحیح رادیومتریک توپوگرافی انجام شده است. برای بررسی دقیق‌تر، ماتریس ابهام نشان‌دهنده این حالت در شکل ۱۱ ارائه می‌شود.

برچسب پیش‌بینی شده	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
		کشاورزی	مناطق شهری	آب	خاک	پوشش گیاهی

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



شکل ۱۲. نقشه طبقه‌بندی شهر چادگان، با استفاده از: ترکیب دو تصویر (الف)؛ ترکیب دو تصویر تصحیح‌شده (ب)

### ۳-۴-۳- بحث و تحلیل یافته

#### ۳-۴-۱- تأثیر ترکیب تصاویر در 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 متفاوت، صحت طبقه‌بندی را افزایش چشمگیری می‌دهد. برای نمونه، در شهر مرنند، ترکیب دو تصویر بدون تصحیح رادیومتریک توپوگرافی موجب افزایش صحت کلی ۱۳ درصدی و با استفاده از تصویر تصحیح‌شده، موجب افزایش ۱۰ درصدی در قیاس با حالت تک‌تصویری شده است. در شهر ساری، افزایش صحت کلی در مقایسه با حالت تک‌تصویری، بدون تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، ۲۰٪ و با تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، ۱۳٪ به دست آمده است. در شهر چادگان نیز استفاده از ترکیب دو تصویر، بدون تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، صحت را به میزان ۱۲٪ و با تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، ۷٪ افزایش داده است. علاوه بر این، تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در شهر مرنند، چالش اصلی طبقه‌بندی به کلاس پوشش گیاهی

بازمی‌گردد و با ترکیب دو تصویر، صحت این کلاس از ۴۱٪ به ۶۹٪ ارتقا یافته است. در شهر چادگان نیز، صحت کلاس پوشش گیاهی از ۳۴٪ به ۷۷٪/۴۰٪ افزایش یافته؛ در حالی که در شهر ساری، کلاس خاک چالش‌برانگیزترین کلاس محسوب می‌شود و با ترکیب دو تصویر، صحت آن از ۵۷٪ به ۴۰٪/۴۶٪ رسیده است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب تصاویر، در مدارهای بالارونده و پایین‌رونده، تأثیر بسزایی در افزایش صحت طبقه‌بندی دارد و به بهبود چشمگیری در عملکرد مدل منجر می‌شود. یافته‌های تحقیق حاضر مؤید نتایج تحقیق سیدین و همکاران (۲۰۲۰) است که نشان دادند استفاده هم‌زمان از تصاویر بالارونده و پایین‌رونده صحت طبقه‌بندی پوشش زمین با داده‌های سنتینل-۱ را در قیاس با به‌کارگیری تصاویر تک‌مدار، بسیار افزایش می‌دهد. علاوه بر این، مطالعه وانگ و همکاران (۲۰۲۳) نیز گزارش کرده است که ترکیب تصاویر بالارونده و پایین‌رونده ماهواره Gaofen-3 به افزایش ۵ درصدی در صحت کلی طبقه‌بندی و بهبود ۶ درصدی در ضریب کاپا منجر شده است. در عین حال

نتایج نشان می‌دهد که اعمال تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، به‌ویژه 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 بیش‌ازحد بین نمونه‌های کلاس‌های خاص (مانند کشاورزی و خاک) شود و در نهایت، عملکرد کلی را کاهش دهد.

#### ۲-۴-۳- تأثیر توپوگرافی در نتایج طبقه‌بندی

در این بخش از تحقیق، تأثیر توپوگرافی منطقه در صحت طبقه‌بندی بررسی شده است. با توجه به استفاده از سه منطقه متفاوت در این مطالعه، برای ساده‌سازی تحلیل، از چهار حالت اصلی ارتفاع و شیب استفاده شده است. قرار دادن مناطق مورد مطالعه در چهار کلاس

توپوگرافی (کم‌ارتفاع و ملایم، کم‌ارتفاع و تند، مرتفع و ملایم، مرتفع و تند) براساس دو معیار ارتفاع (آستانه ۱۵۰۰ متر) و شیب (آستانه ۱۰ درجه) انجام شد. این آستانه‌ها با استناد به استانداردهای جهانی انتخاب شده‌اند (Rahbek et al., 2019; Jahn et al., 2006). با توجه به حضور نداشتن کلاس‌های مناطق شهری، آب و کشاورزی در برخی از حالت‌های توپوگرافی، در این تحلیل صرفاً نتایج طبقه‌بندی برای دو کلاس خاک و پوشش گیاهی محاسبه و مطرح شده و این نتایج، به تفکیک هر کلاس، در جدول‌های ۶ و ۷ آمده است. شایان ذکر است که در منطقه چادگان، کلاس‌های «کم‌ارتفاع» به‌علت نبود نواحی کم‌ارتفاع‌تر از ۱۵۰۰ متر، تعریف نشده‌اند و در جدول‌های یادشده، با تیره نمایش داده شده‌اند.

جدول ۶. صحت کلاس پوشش گیاهی به‌درصد، براساس کلاس ارتفاع و شیب

منطقه	کلاس	تصویر بالارونده	تصویر پایین‌رونده	ترکیب دو تصویر	تصویر بالارونده تصحیح‌شده	تصویر پایین‌رونده تصحیح‌شده	ترکیب دو تصویر تصحیح‌شده
مرند	کم‌ارتفاع و ملایم	۴۴/۷۲	۴۲/۰۸	۳۸/۹۵	۴۴/۰۲	۴۲/۰۷	۳۸/۶۹
	کم‌ارتفاع و تند	۴۰/۰۱	۳/۰۵۳	۳۳/۲۸	۴۵/۸۳	۴۹/۴۲	۳۹/۳۰
	مرتفع و ملایم	۴۳/۵۶	۴۱/۱۴	۴۴/۷۷	۴۸/۱۲	۴۶/۹۱	۵۰/۰۲
	مرتفع و تند	۴۱/۰۲	۳۸/۸۳	۴۱/۸۸	۴۸/۱۵	۴۷/۸۳	۵۱/۹۷
ساری	کم‌ارتفاع و ملایم	۶۷/۳۱	۲۸/۰۰	۲۴/۸۷	۷۴/۴۱	۴۸/۸۳	۵۳/۴۶
	کم‌ارتفاع و تند	۸۱/۸۷	۶۱/۰۴	۶۸/۹۶	۸۹/۲۵	۸۱/۸۵	۸۹/۳۰
	مرتفع و ملایم	۶۳/۰۷	۵۰/۵۷	۵۹/۵۲	۶۲/۵۷	۵۷/۷۲	۶۰/۱۷
	مرتفع و تند	۶۲/۱۸	۵۲/۳۲	۳۷/۱۷	۶۶/۶۴	۵۵/۲۰	۴۷/۱۲
چادگان	کم‌ارتفاع و ملایم	-	-	-	-	-	-
	کم‌ارتفاع و تند	-	-	-	-	-	-
چادگان	مرتفع و ملایم	۱۴/۵۶	۲۵/۱۴	۵۰/۲۵	۴/۶۴	۸/۶۵	۳۸/۶۴
	مرتفع و تند	۱/۵۶	۵/۶۴	۱۵/۱	۳/۶۴	۱۲/۹۴	۲۶/۴۶

جدول ۷. صحت کلاس خاک به درصد، براساس کلاس ارتفاع و شیب

منطقه	کلاس	تصویر بالارونده	تصویر پایین‌رونده	ترکیب دو تصویر	تصویر بالارونده تصحیح شده	تصویر پایین‌رونده تصحیح شده	ترکیب دو تصویر تصحیح شده
مرند	کم‌ارتفاع و ملایم	۷۳/۳۶	۷۹/۳۶	۷۱/۰۰	۸۰/۶۴	۹۰/۵۹	۷۷/۳۰
مرند	کم‌ارتفاع و تند	۶۵/۱۲	۶۸/۱۹	۶۱/۴۸	۷۳/۳۴	۸۴/۰۱	۶۴/۱۵
مرند	مرتفع و ملایم	۷۳/۷۴	۴۶/۱۶	۷۱/۷۲	۷۳/۳۷	۷۵/۴۴	۷۱/۶۹
مرند	مرتفع و تند	۶۰/۵۲	۶۰/۳۵	۶۳/۶۷	۶۷/۰۳	۷۳/۱۲	۶۵/۲۹
ساری	کم‌ارتفاع و ملایم	۱۲/۷۶	۱۲/۴۱	۳۹/۶۴	۲۸/۰۲	۲۳/۱۲	۳۵/۷۶
ساری	کم‌ارتفاع و تند	۱۴/۱۲	۶/۸۹	۲۸/۱۴	۲۵/۰۶	۶/۶۴	۲۹/۵۹
ساری	مرتفع و ملایم	۶/۵۴	۱۵/۹۲	۴۸/۱۲	۴۹/۳۶	۲۳/۵۴	۵۹/۸۷
ساری	مرتفع و تند	۱۶/۲۸	۱۱/۱۴	۴۱/۷۱	۲۹/۱۰	۲۶/۳۹	۴۴/۶۷
چادگان	کم‌ارتفاع و ملایم	-	-	-	-	-	-
چادگان	کم‌ارتفاع و تند	-	-	-	-	-	-
چادگان	مرتفع و ملایم	۴۹/۴۷	۵۰/۹۴	۲۸/۱۳	۵۸/۶۰	۶۷/۹۷	۴۴/۳۴
چادگان	مرتفع و تند	۴۴/۸۸	۵۶/۹۷	۴۸/۲۷	۶۴/۵۲	۶۵/۰۵	۶۰/۸۳

نتایج این بخش نشان می‌دهد که تصحیح رادیومتریک توپوگرافی، به‌ویژه در نواحی کوهستانی دارای ارتفاع و شیب زیاد، صحت طبقه‌بندی را بهبودی چشمگیر می‌بخشد. برخلاف نتایج کلی که در ترکیب دو تصویر، گاه به کاهش صحت منجر می‌شد، اعمال این تصحیح در مناطق مرتفع و پرشیب، تقریباً در تمامی موارد، موجب افزایش صحت شده است. برای نمونه، در کلاس پوشش گیاهی شهر چادگان، صحت ترکیب دو تصویر تصحیح شده در مقایسه با حالت بدون تصحیح برای کل منطقه، ۱۰/۱۹٪ کاهش یافته بود اما، در نواحی با شیب تند، این ترکیب ۱۱/۳۶٪ افزایش صحت را در قیاس با حالت بدون تصحیح، نشان داد. بررسی تصاویر تکی نیز مشخص کرد که در این مناطق، اعمال تصحیح توپوگرافی (در هر دو حالت بالارونده و پایین‌رونده) به افزایش چشمگیری در صحت کلاس‌های پوشش گیاهی و خاک، در مقایسه با صحت کلی منطقه،

منجر شده است. این نتایج به یافته‌های دستالووا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۲) شباهت دارد که در آن، تصحیح رادیومتریک توپوگرافی در طبقه‌بندی جنگل و غیرجنگل، به ترتیب، ۲ و ۴٪ بهبود کلی داشته و در مناطق دارای ناهمواری شدید توپوگرافی به حدود ۱۶ و ۲۰٪ ارتقای صحت انجامیده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق به‌وضوح 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 رادیومتریک توپوگرافی

1. Dostalova

## ۶- منابع

- Army, E.K. & Saepuloh, A., 2020, **Field Verifications of Geological Structures Related to SAR Detected Lineaments**, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 417, No. 1, P. 012012), IOP Publishing, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/417/1/012012>.
- Belgiu, M. & Drăguț, L., 2016, **Random Forest in Remote Sensing: A Review of Applications and Future Directions**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 114, PP. 24-31, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>.
- Chan, Y.K. & Koo, V., 2008, **An Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR)**, Progress In Electromagnetics Research B, 2, PP. 27-60, <http://dx.doi.org/10.2528/PIERB07110101>.
- Chen, X., Sun, Q. & Hu, J., 2018, **Generation of Complete SAR Geometric Distortion Maps Based on DEM and Neighbor Gradient Algorithm**, Applied Sciences, 8(11), P. 2206, <https://doi.org/10.3390/app8112206>.
- Cigna, F., Bateson, L.B., Jordan, C.J. & Dashwood, C., 2014, **Simulating SAR Geometric Distortions and Predicting Persistent Scatterer Densities for ERS-1/2 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, 152, PP. 441-466, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.025>.
- Congalton, R.G. & Green, K., 2019, **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., 2021, **A Workflow Based on Sentinel-1 SAR Data and Open-Source Algorithms for Unsupervised Burned Area Detection in Mediterranean Ecosystems**, GIScience & Remote Sensing, 58(4), PP. 516-541, <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1907896>.
- Dostalova, A., Navacchi, C., Greimeister-Pfeil, I., Small, D. & Wagner, W., 2022, **The Effects of Radiometric Terrain Flattening on SAR-Based Forest Mapping and Classification**, Remote Sensing Letters, 13(9), PP. 855-864, <https://doi.org/10.1080/2150704X.2022.2092911>.

توانسته است چالش‌های ناشی از اعوجاج‌های هندسی و محدودیت‌های زاویه دید راداری را تا حدودی جبران کند. در مقابل، اعمال تصحیح رادیومتریک توپوگرافی تأثیر دوگانه‌ای دارد. در حالتی که تمامی منطقه صرف نظر از ویژگی‌های توپوگرافی تحلیل می‌شود، این تصحیح، با استفاده از تصویر تک‌مدار 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 به نواحی دارای ارتفاع و شیب بالا محدود باشد، تصحیح رادیومتریک 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 نکته را به‌وضوح نشان داده است. علاوه‌براین یافته‌های به‌دست‌آمده اهمیت استفاده از تصاویر سنتینل-۱ در مدارهای متفاوت را برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از استراتژی‌های پیش‌پردازشی بهینه و ترکیب این تصاویر، می‌توان به نتایج دقیق‌تر و مورد اعتمادتری دست یافت. این تحقیق زمینه‌ساز ارتقای روند طبقه‌بندی پوشش زمین در مطالعات آینده است و می‌تواند در توسعه روش‌های نوین، در حوزه کاربردهای محیط‌زیستی و کشاورزی، مؤثر باشد؛ به‌گونه‌ای که ارزیابی صحیح و به‌موقع تغییرات سطح زمین، مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای را تسهیل کند.

## ۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند صمیمانه‌ترین مراتب تشکر خود را از آژانس فضایی اروپا (ESA) و پژوهشکده سنسجس از دور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی که تصاویر را برای انجام دادن این مطالعه در اختیارشان قرار داده‌اند، اعلام کنند.

- Dubois-Fernandez, P.C., Souyris, J.C., Angelliaume, S. & Garestier, F., 2008, **The Compact Polarimetry Alternative for Spaceborne SAR at Low Frequency**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46(10), PP. 3208-3222, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.919143>.
- Filippini, F., 2019, **Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow**, In Proceedings (Vol. 18, No. 1, P. 11), MDPI, <https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06201>.
- Foody, G.M., 2002, **Status of Land Cover Classification Accuracy Assessment**, Remote Sensing of Environment, 80(1), PP. 185-201, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4).
- Freeman, A., 1992, **SAR Calibration: An Overview**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(6), PP. 1107-1121, <https://doi.org/10.1109/36.193786>.
- Grandini, M., Bagli, E. & Visani, G., 2020, **Metrics for Multi-Class Classification: An Overview**, arXiv Preprint arXiv: 2008.05756, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.05756>.
- Hu, B., Xu, Y., Huang, X., Cheng, Q., Ding, Q., Bai, L. & Li, Y., 2021, **Improving Urban Land Cover Classification with Combined Use of Sentinel-2 and Sentinel-1 Imagery**, ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(8), P. 533, <https://doi.org/10.3390/ijgi10080533>.
- Jahn, R., Blume, H.-P., Asio, V.B., Spaargaren, O. & Schad, P., 2006, **Guidelines for Soil Description**, Fao.
- Lee, J.-S., 1981, **Refined Filtering of Image Noise Using Local Statistics**, Computer Graphics and Image Processing, 15(4), PP. 380-389, [https://doi.org/10.1016/S0146-664X\(81\)80018-4](https://doi.org/10.1016/S0146-664X(81)80018-4).
- Masoomi, A., Hamzehyan, R. & Shirazi, N.C., 2012, **Speckle Reduction Approach for SAR Image in Satellite Communication**, International Journal of Machine Learning and Computing, 2(1), P. 62, <http://doi.org/10.7763/IJMLC.2012.V2.90>.
- Ndikumana, E., Ho Tong Minh, D., Baghdadi, N., Courault, D. & Hossard, L., 2018, **Deep Recurrent Neural Network for Agricultural Classification Using Multitemporal SAR Sentinel-1 for Camargue, France**, Remote Sensing, 10(8), P. 1217, <https://doi.org/10.3390/rs10081217>.
- Qadir, A., Skakun, S., Kussul, N., Shelestov, A. & Becker-Reshef, I., 2024, **A Generalized Model for Mapping Sunflower Areas Using Sentinel-1 SAR Data**, Remote Sensing of Environment, 306, P. 114132, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114132>.
- Rahbek, C., Borregaard, M.K., Hermansen, B., Nogues-Bravo, D. & Fjeldså, J., 2019, **Definition and Description of the Montane Regions of the World**, <https://macroecology.ku.dk/resources/mountain-regions>.
- Sayedain, S.A., Maghsoudi, Y. & Eini-Zinab, S., 2020, **Assessing the Use of Cross-Orbit Sentinel-1 Images in Land Cover Classification**, International Journal of Remote Sensing, 41(20), PP. 7801-7819, <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1763512>.
- Šćepanović, S., Antropov, O., Laurila, P., Rauste, Y., Ignatenko, V. & Praks, J., 2021, **Wide-Area Land Cover Mapping with Sentinel-1 Imagery Using Deep Learning Semantic Segmentation Models**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14, PP. 10357-10374, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3116094>.
- Small, D., 2011, **Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(8), PP. 3081-3093, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2120616>.
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... & Rostan, F., 2012, **GMES Sentinel-1 Mission**, Remote Sensing of Environment, 120, PP. 9-24, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>.
- Van Zyl, J.J., 2011, **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., 2023, **Classification of Land Cover in Complex Terrain Using Gaofen-3 SAR Ascending and Descending Orbit Data**, Remote Sensing, 15(8), P. 2177, <https://doi.org/10.3390/rs15082177>.