

Original Article



Monitoring Land Cover Changes in Northwestern Iran Using Training Samples Migration Method

Meysam Moharrami¹, Sara Attarchi^{2*}, Richard Gloaguen³, Seyed Kazem Alavipanah⁴

Affiliation

1. Ph.D. Candidate, Dep. of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Associate Prof., Dep. of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Head dep. of Exploration Technology, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology (HiF), Freiberg, Germany
4. Prof. of Dep. of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT

Introduction: Land cover maps are essential elements in geographical analysis and spatial planning. The accuracy and effectiveness of these maps rely on three factors: Satellite imagery, classification algorithms and training samples. The quality of the training dataset significantly impacts the accuracy of classification results. This study aims to generate reliable training samples using the training sample migration method to monitor land cover changes in northwestern Iran from 2002 to 2022.

Materials and Methods: The study area covers 7653 square kilometers in northwestern Iran, situated between 44°35'59" to 46°01'25" longitude and 38°38'46" to 38°47'48" latitude. Data utilized in this research include satellite images and ground truth data, specifically Landsat images. The research methodology comprises five main steps. Initially, satellite images were obtained, followed by pre-processing steps involving radiometric and geometric corrections. Subsequently, training samples were prepared using high-resolution satellite images (Google Earth images) and ground surveys. The third step involved training sample migration, where spectral similarity between training samples from reference and target years was assessed using two parameters: Euclidean distance (ED) and spectral angle distance (SAD). After determining a suitable threshold, migrated training samples were distinguished from non-migrated samples. Evaluation of the accuracy of migrated training samples was conducted using reference data derived from Google Earth. In the fourth step, classification of satellite images from different years was performed using the migrated training samples. Finally, the accuracy of the classified images was assessed through the calculation of a confusion matrix in the fifth step.

Results and Discussion: The results indicate that a threshold of 0.9 to 1.1 is optimal for distinguishing migrated training samples from non-migrated training samples across different years. It can be observed that there is an inverse relationship between the accuracy of migrated training samples and the percentage of migrated training samples, with an increase in the percentage leading to decreased accuracy. Evaluation of the accuracy of migrated training samples based on each parameter (SAD and ED) reveals that migrated training samples based on the SAD parameter exhibit higher accuracy than those based on the ED parameter. Furthermore, the use of migrated samples based on both parameters has resulted in a 10.45% increase in accuracy compared to using the ED parameter alone, and a 5% increase compared to using the SAD parameter alone. Analysis of the percentage of migrated training samples in different land cover classes demonstrates that, on average, 80.6% of water class training samples, 75.4% of bare land class samples, 71.2% of built-up class samples, 64.6% of grassland class samples, 60.2% of cropland class samples, and 54.4% of wetland class samples were migrated from the reference year (2022) to each of the target years (2002, 2007, 2012, and 2017). The accuracy assessment of migrated training samples in different land cover classes also reveals that the water, built-up, bare land, grassland, cropland, and wetland classes had the highest accuracy in the migrated training samples, in that order. Analysis of land cover changes between 2002 and 2022 indicates a decrease in the area of bare land, water, and wetland classes from 2002 to 2022, while the area of the built-up class has increased during this period. Additionally, the grassland and cropland classes did not exhibit a consistent trend of change during this period, with their trends differing in different years. However, overall, the area of these two classes increased in 2022 compared to 2002.

Conclusion: Future studies should consider using other satellite images (including Sentinel-2) for migrating training samples to evaluate the impact of different spectral bands and satellite images on the migration process. Furthermore, investigating the effectiveness of the training sample migration method for migrating training samples of other land covers could be a potential research topic for future studies.

Keywords: Training samples migration, Land cover, Spectral similarity, Classification, landsat.

Citation: Moharrami, M., Attarchi, S., Gloaguen, R., Alavipanah, S. K., Monitoring Land Cover Changes in Northwestern Iran Using Training Samples Migration Method, *Iran J Remote Sens GIS*. 16(1):129-154.





پایش تغییرات پوشش زمین در شمال غرب ایران با استفاده از روش انتقال نمونه‌های آموزشی

میثم محرمی^۱، سارا عطارچی^۲، ریچارد کلاگون^۳، سید کاظم علوی پناه^۴

سمت

۱. دانشجوی دکتری گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. مدیر بخش فناوری اکتشاف، مرکز هلم هولتز درسدن - روسندورف، مؤسسه فناوری منابع هلم هولتز فرایبرگ، فرایبرگ، آلمان
۴. استاد گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

سابقه و هدف: نقشه پوشش زمین یکی از پارامترهای اساسی در تحلیل‌های جغرافیایی و برنامه‌ریزی‌های مکانی محسوب می‌شود. به‌طور کلی، تصویر ماهواره‌ای، الگوریتم طبقه‌بندی و نمونه آموزشی سه پارامتر اصلی در تهیه نقشه‌های پوشش زمین به‌شمار می‌روند و مهم‌ترین نقش را در زمینه صحت، هزینه و منابع محاسباتی مورد نیاز برای تهیه این نقشه‌ها ایفا می‌کنند. کیفیت نمونه آموزشی تأثیر شایان توجهی در صحت نتایج طبقه‌بندی دارد. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش تهیه نمونه‌های آموزشی معتبر، با استفاده از روش انتقال نمونه‌های آموزشی برای پایش تغییرات پوشش زمین در شمال غرب ایران، بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲ است.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه، با مساحتی بالغ بر ۷۶۵۳ کیلومتر مربع، در شمال غرب ایران واقع شده است. از لحاظ جغرافیایی، این محدوده در مختصات ۳۵° ۵۹' ۴۴" تا ۲۵° ۰۱' ۴۶" طول شرقی و ۴۶° ۰۲' ۳۸" تا ۴۸° ۴۸' ۳۸" عرض شمالی قرار دارد. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مرجع زمینی است و تصاویر به‌کاررفته در این پژوهش شامل تصاویر ماهواره‌ای سری لندست می‌شود. روش پژوهش پنج مرحله کلی را در برمی‌گیرد. در مرحله اول، تصاویر ماهواره‌ای لندست از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا دریافت و مراحل پیش‌پردازش تصاویر (تصحیح رادیومتریک و هندسی) روی آنها انجام شد. در مرحله دوم، با استفاده از تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی بالا (تصاویر سامانه Google Earth) و برداشت زمینی، نمونه‌های آموزشی مورد نظر تهیه شدند. مرحله سوم شامل انتقال نمونه‌های آموزشی است. برای این کار، در ابتدا، با استفاده از دو پارامتر فاصله اقلیدسی (ED) و فاصله زاویه طیفی (SAD)، شباهت طیفی نمونه‌های آموزشی در سال‌های مرجع و هدف بررسی شد. در ادامه، با تعیین آستانه مورد نظر، نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته از نمونه‌های انتقال‌نیافته تفکیک شدند. در انتهای مرحله سوم، صحت نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته ارزیابی شد؛ بدین‌منظور داده‌های مرجع تهیه‌شده از سامانه Google Earth به‌کار رفت. در مرحله چهارم، با استفاده از نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته، تصاویر ماهواره‌ای در سال‌های گوناگون طبقه‌بندی شد و در نهایت در مرحله پنجم، با به‌کارگیری شاخص‌های حاصل از ماتریس خطا، صحت تصاویر طبقه‌بندی‌شده ارزیابی شد.

نتایج و بحث: نتایج به‌دست‌آمده نشان داد آستانه ۰/۹ تا ۱/۱ مناسب‌ترین آستانه برای تفکیک نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته از نمونه‌های آموزشی انتقال‌نیافته در سال‌های گوناگون است. بر این اساس، می‌توان گفت بین صحت و درصد نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته رابطه‌ای معکوس وجود دارد و با افزایش درصد نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته، از صحت آنها کاسته می‌شود. بررسی صحت نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته، براساس هریک از پارامترها (فاصله زاویه طیفی و فاصله اقلیدسی)، نشان داد صحت نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته براساس پارامتر فاصله زاویه طیفی بیشتر از نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته براساس پارامتر فاصله اقلیدسی است. همچنین استفاده از نمونه‌های انتقال‌یافته، براساس هر دو پارامتر، باعث افزایش ۱۰/۴۵ درصدی صحت در مقایسه با حالتی شده است که از پارامتر فاصله اقلیدسی برای انتقال نمونه‌های آموزشی استفاده شده و نیز افزایش ۵ درصدی صحت را در قیاس با وضعیتی دربرداشته که از پارامتر فاصله زاویه طیفی برای انتقال نمونه‌های آموزشی استفاده شده است. بررسی درصد انتقال نمونه‌های آموزشی در کلاس‌های کاربری گوناگون نشان داد، به‌طور میانگین، ۸۰/۶٪ از نمونه‌های آموزشی کلاس آب، ۷۵/۴٪ از نمونه‌های آموزشی کلاس اراضی باير، ۷۱/۲٪ از نمونه‌های آموزشی کلاس اراضی انسان‌ساخت، ۶۴/۶٪ از نمونه‌های آموزشی کلاس مرتع، ۶۰/۲٪ از نمونه‌های آموزشی کلاس اراضی زراعی و ۵۴/۴٪ از نمونه‌های آموزشی کلاس تالاب از سال مرجع (۱۴۰۱) به هریک از سال‌های هدف (۱۳۸۱، ۱۳۸۷، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۶) انتقال پیدا کرده‌اند. همچنین ارزیابی صحت نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته در کلاس‌های کاربری گوناگون نشان داد کلاس‌های آب، اراضی انسان‌ساخت، اراضی باير، مرتع، اراضی زراعی و تالاب، به‌ترتیب، بیشترین صحت را در نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته دارا بودند. بررسی تغییرات پوشش زمین بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ نشان داد روند تغییرات مساحت کلاس‌های اراضی باير، آب و تالاب از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ کاهشی و روند تغییرات مساحت اراضی انسان‌ساخت، در این بازه زمانی، افزایشی بوده است؛ همچنین کلاس‌های مرتع و اراضی زراعی، در این بازه زمانی، دارای روند تغییرات ثابت نبوده و روند تغییرات آنها در سال‌های گوناگون، متفاوت بوده است. اما در حالت کلی، مساحت این دو کلاس طی سال ۱۴۰۱، در قیاس با سال ۱۳۸۱ افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری: پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، از سایر تصاویر ماهواره‌ای (از جمله تصاویر ماهواره‌های سنتینل-۲) نیز به‌منظور انتقال نمونه‌های آموزشی استفاده شود تا تأثیر باندهای طیفی و تصاویر ماهواره‌ای گوناگون، در انتقال نمونه‌های آموزشی، ارزیابی شود. همچنین بررسی اثربخشی روش انتقال نمونه‌های آموزشی در انتقال نمونه‌های آموزشی سایر پوشش‌های زمینی می‌تواند در زمره موضوعات پژوهشی در مطالعات بعدی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: انتقال نمونه آموزشی، پوشش زمین، شباهت طیفی، طبقه‌بندی، لندست.

استناد: محرمی، م.، عطارچی، س.، گلاگون، ر.، علوی پناه، س. ک.، پایش تغییرات پوشش زمین در شمال غرب ایران با استفاده از روش انتقال نمونه‌های آموزشی، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۶، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳: ۱۵۴-۱۲۹.



۱- مقدمه

نقشه پوشش زمین^۱ از پارامترهای اساسی در تحلیل‌های جغرافیایی و برنامه‌ریزی‌های مکانی (Rujoiu-Mare & Mihai, 2016) و همچنین از متغیرهای ضروری در مطالعات محیطی گوناگون، از جمله تغییرات آب‌وهوایی و چرخه کربن، محسوب می‌شود (Congalton et al., 2014). سیاست‌گذاران از نقشه‌های پوشش زمین به منظور سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی در مقیاس‌های مکانی متفاوت (جهانی، ملی و محلی) بهره می‌برند (Arabaci & Kuscu, 2023). جوامع علمی و تحقیقاتی گوناگون نیز از این نقشه‌ها، به منظور پیشبرد اهداف علمی خود در زمینه‌های گوناگونی (از جمله مدل‌سازی‌های متفاوت، پیش‌بینی روند تغییرات در آینده و بررسی سری زمانی پوشش زمین) استفاده می‌کنند (Nedd et al., 2021). روش‌های متفاوتی برای تهیه نقشه‌های پوشش زمین وجود دارد که از آن جمله می‌توان به نقشه‌برداری زمینی، استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای اشاره کرد (Fonji & Taff, 2014). تهیه این نقشه‌ها، با استفاده از نقشه‌برداری زمینی و عکس‌برداری هوایی، زمان‌بر و پرهزینه است و به‌روزرسانی نقشه‌ها نیز با استفاده از این دو روش، کار دشواری است (Varga et al., 2014). تصاویر ماهواره‌ای در مقایسه با سایر روش‌ها، به دلیل پوشش مکانی گسترده و برداشت داده‌ها به صورت پیوسته (بازه‌های زمانی مشخص)، در تهیه نقشه پوشش زمین از کارایی بیشتری برخوردارند (Wang et al., 2023). برداشت تصاویر ماهواره‌ای در قدرت‌های تفکیک مکانی و بازه‌های زمانی گوناگون، امکان تهیه نقشه پوشش زمین را در مقیاس‌های مکانی متفاوت و بازه‌های زمانی گوناگون فراهم می‌آورد (Murray et al., 2022). صحت و هزینه مورد نیاز برای تهیه نقشه‌های پوشش زمین از مهم‌ترین پارامترها در انتخاب آنها، با هدف انجام‌دادن مطالعات و برنامه‌ریزی‌های گوناگون است (Chaaban et al., 2022). به‌طور کلی، تصویر ماهواره‌ای، الگوریتم طبقه‌بندی و نمونه آموزشی سه پارامتر اصلی در تهیه این نقشه‌ها به‌شمار می‌روند و مهم‌ترین نقش را در

صحت، هزینه و منابع محاسباتی^۲ مورد نیاز، برای تهیه این نقشه‌ها ایفا می‌کنند (Huang et al., 2020). امروزه با توسعه سامانه‌های پایگاه داده عظیم و سیستم‌های پردازش ابری گوناگون، دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای و پردازش آنها با سهولت بیشتری انجام می‌شود. برای نمونه، سامانه پردازش ابری Google Earth Engine با بایگانی حجم عظیمی از داده‌های سنجش از دور و به‌رایگان در اختیار قرار دادن آنها، نقش مهمی در حل مشکل دردسترس بودن تصاویر ماهواره‌ای و توسعه الگوریتم‌های پردازش تصویر داشته است (Gorelick et al., 2017). با این حال مشکل اصلی که مانع پیشرفت تحقیقات در زمینه تهیه نقشه پوشش زمین شده، فقدان نمونه‌های آموزشی باکیفیت و بهنگام در بسیاری از مناطق سطح باکیفیت نمونه‌ای است که از لحاظ موضوعی، نشان‌دهنده پوشش زمین در آن نقطه باشد؛ همچنین با توجه به تغییر پوشش زمین در طول زمان، بهنگام بودن نمونه‌های آموزشی نیز در طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و تهیه این نقشه‌ها، در بازه‌های زمانی متفاوت، اهمیت بسیاری دارد (Padial-Iglesias et al., 2021).

کیفیت نمونه آموزشی تأثیر شایان توجهی در صحت نتایج طبقه‌بندی دارد. صرف‌نظر از الگوریتم مورد استفاده برای طبقه‌بندی تصویر، نمونه‌های آموزشی ناکافی و کم‌کیفیت منبع اصلی خطا در بسیاری از فرایندهای طبقه‌بندی محسوب می‌شوند (Radoux et al., 2014). از سویی هزینه‌بر و زمان‌بر بودن تهیه نمونه‌های آموزشی موجب محدودیت دسترسی به نمونه‌های آموزشی باکیفیت و بهنگام، به‌منظور تهیه نقشه‌های پوشش زمین شده است (Ebrahimi et al., 2021). در سال‌های اخیر، برای رفع مشکل کمبود نمونه‌های آموزشی باکیفیت و بهنگام از پوشش‌های گوناگون سطح زمین، تلاش‌های بسیاری شده و

1. Land Cover Map
2. Computing Resource

۱۹۹۰ استفاده کردند. بر این اساس، دو پارامتر فاصله اقلیدسی (ED)^۳ و فاصله زاویه طیفی (SAD)^۴، به منظور بررسی شباهت نمونه‌های آموزشی و انتقال آنها، به کار رفت و نمونه‌های آموزشی انتقال یافته و انتقال نیافته نیز بر اساس روش آزمون و خطا تفکیک شدند. بررسی صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته نشان داد صحت این نمونه‌ها، در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۰۵، ۲۰۰۰ و ۱۹۹۵، به ترتیب برابر با ۹۹/۲۵٪، ۹۷/۶۵٪، ۹۵/۰۳٪ و ۹۲/۹۸٪ بوده است. فن^۵ و همکاران (۲۰۲۱) نقشه کاربری اراضی کشور ویتنام، بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰، را با استفاده از نمونه‌های آموزشی انتقال یافته تهیه کردند. آنها بدین منظور از دو پارامتر فاصله اقلیدسی و فاصله زاویه طیفی بهره بردند. در این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای لندست در هجده کلاس کاربری و با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی طبقه‌بندی شد. صحت کلی تصاویر طبقه‌بندی شده، با استفاده از نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، بین ۸۵/۷ تا ۹۲٪ متغیر بود که نشان از صحت مناسب نمونه‌های آموزشی انتقال یافته دارد. ژو^۶ و همکاران (۲۰۲۱) تغییرات حوزه رود آمو در کشور چین را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، بررسی کردند. در این مطالعه، از دو پارامتر فاصله اقلیدسی و فاصله زاویه طیفی استفاده شد و با استفاده از روش آزمون و خطا، نمونه‌های آموزشی به دو دسته انتقال یافته و انتقال نیافته تفکیک شدند. مقایسه نمونه‌های آموزشی انتقال یافته با نقشه‌های موجود در سال ۲۰۱۰ نشان دهنده صحت کلی ۹۱ درصدی نمونه‌های آموزشی انتقال یافته بود. نیان^۷ و همکاران (۲۰۲۳) تغییرات

مجموعه داده‌های گوناگونی نیز بدین منظور ایجاد شده است. از جمله این داده‌ها می‌توان به مجموعه داده‌های فصلی (FAST)^۱ و Geo-Wiki اشاره کرد. مجموعه داده‌های FAST و Geo-Wiki، به ترتیب، شامل بیش از ۹۰ و ۱۵۰ هزار نمونه آموزشی از نقاط متفاوت دنیا می‌شوند که در بیش از یکصد هزار مکان متفاوت، از شبکه‌ای بین‌المللی جمع‌آوری شده است (Fritz et al., 2017). این مجموعه داده‌ها در سال ۲۰۱۵ م، از طریق تفسیر تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا (تصاویر سامانه Google Earth) تهیه شده است. بدون شک این مجموعه داده‌های آموزشی منبع ارزشمندی برای کسب اطلاعات در زمانی مشخص به شمار می‌آیند. با وجود این به سختی می‌توان آنها را مستقیماً، برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای در زمان‌های گوناگون، به کار برد.

یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر، به منظور رفع این مشکل و تهیه نمونه‌های آموزشی با کیفیت مطرح شده استفاده از روش انتقال نمونه‌های آموزشی است. در این روش، نمونه‌های آموزشی با کیفیت، از زمان آغاز گردآوری نمونه‌های آموزشی معتبر (زمان مرجع) به زمان مورد نظر که فاقد نمونه آموزشی با کیفیت است (زمان هدف)، انتقال می‌یابند (Ghorbanian et al., 2020). در این روش، با بررسی شباهت نمونه‌های آموزشی در باندهای طیفی گوناگون، آن دسته از نمونه‌ها به منزله نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در نظر گرفته می‌شوند که بیشترین شباهت طیفی را در باندهای متفاوت دارند (Naboureh et al., 2021). تا کنون، در مطالعات گوناگونی، از روش انتقال نمونه‌های آموزشی برای تهیه نمونه‌های آموزشی در بازه‌های زمانی متفاوت استفاده شده که در ادامه، به برخی از مهم‌ترین آنها اشاره شده است.

هوانگ^۲ و همکاران (۲۰۲۰) نقشه جهانی پوشش زمین را با استفاده از روش انتقال نمونه‌های آموزشی، تهیه کردند. این پژوهشگران از تصاویر ماهواره‌ای لندست، به منظور انتقال نمونه‌های آموزشی از سال ۲۰۱۵ به سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۰۵، ۲۰۰۰ و ۱۹۹۵ و

1. First All-Season Sample Sets
2. Huang
3. Euclidean Distance
4. Spectral Angle Distance
5. Phan
6. Zhu
7. Nian

به علاوه، به منظور تفکیک نمونه‌های آموزشی انتقال یافته و انتقال نیافته، روش آستانه‌گذاری مبتنی بر هیستوگرام به کار رفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، با مساحتی بالغ بر ۷۶۵۳ کیلومتر مربع، در شمال غرب ایران قرار دارد. از لحاظ جغرافیایی، این محدوده در مختصات $35^{\circ} 59' 44''$ تا $25^{\circ} 01' 46''$ طول شرقی و $46^{\circ} 02' 38''$ تا $48^{\circ} 47' 38''$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع منطقه مورد مطالعه، از ۷۹۸ تا ۳۳۴۴ متر بالاتر از سطح آب‌های آزاد، متغیر است و شامل انواع گوناگون پوشش‌های سطحی می‌شود. دریاچه ارومیه در جنوب غرب این منطقه واقع شده است. این دریاچه یکی از دریاچه‌های شور و بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و همچنین زیستگاه گونه‌های گیاهی و جانوری متفاوت است (Feizizadeh et al., 2022). با توجه به پوشش‌های گوناگون اراضی (آب، اراضی کشاورزی و ...) در منطقه مورد مطالعه، بررسی تغییرات پوشش زمین در این منطقه اهمیت دارد و می‌تواند، در مدیریت بهتر منابع و مدل‌سازی تغییرات رخ داده در این منطقه، به تصمیم‌گیران کمک کند.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌های به کاررفته در این پژوهش شامل تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مرجع زمینی و تصاویر مورد استفاده در این پژوهش شامل تصاویر ماهواره‌ای سری لندست (لندست-۵ و ۸) می‌شود. با توجه به بازه بیست ساله پژوهش (۱۴۰۱-۱۳۸۱) و در نظر گرفتن این نکته که ماهواره لندست-۷، از تاریخ ۳۱ می ۲۰۰۳ (دهم خرداد ۱۳۸۲)، دارای نقص در سیستم تصویربرداری است، در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۵ و ۸، به منظور تهیه نقشه پوشش زمین استفاده شد (جدول ۱). معمولاً در طول فصل رشد،

پوشش زمین پارک ملی کیلیان در شمال غرب کشور چین، بین سال‌های ۱۹۹۰ تا را بررسی کردند. این پژوهشگران از روش انتقال نمونه‌های آموزشی برای تهیه نمونه‌های آموزشی استفاده کردند تا تصاویر ماهواره‌ای لندست در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۱۰، ۲۰۰۰ و ۱۹۹۰ را طبقه‌بندی کنند. در این پژوهش، از پارامتر فاصله زاویه طیفی به منظور بررسی شباهت نمونه‌های آموزشی استفاده شد. در ادامه، روش آزمون و خطا، برای تفکیک نمونه‌ها به دو دسته انتقال یافته و انتقال نیافته، به کار رفت. نتایج بیانگر صحت بالای نمونه‌های آموزشی انتقال یافته بود؛ به طوری که صحت کلی تصاویر طبقه‌بندی شده، با استفاده از نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در سال‌های متفاوت، بیش از ۸۳/۹٪ بود.

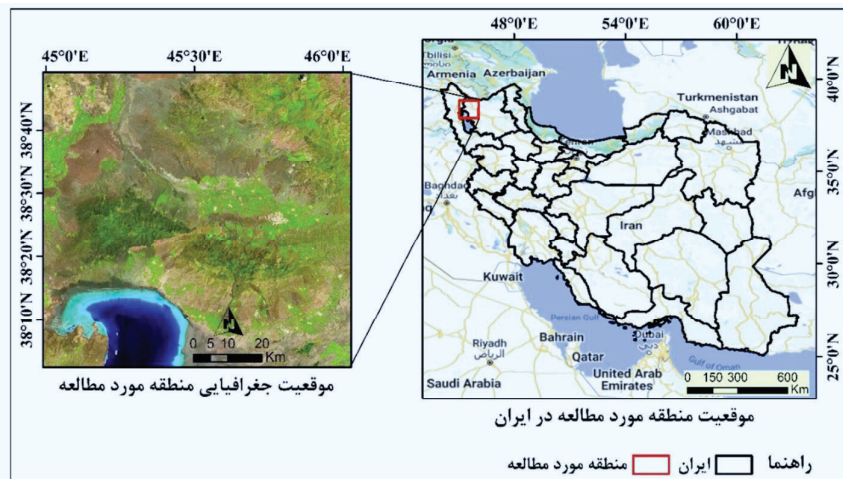
بررسی پیشینه پژوهش نشان داد در بیشتر مطالعات، به منظور پایش تغییرات پوشش زمین، از تصاویر ماهواره‌ای لندست استفاده شده است که بازه طولانی در دسترس بودن این تصاویر می‌تواند یکی از مهم‌ترین علل انتخاب آنها در این مورد باشد. همچنین در مطالعات مورد اشاره، اغلب از دو پارامتر فاصله اقلیدسی و فاصله زاویه طیفی، برای بررسی شباهت طیفی نمونه‌های آموزشی و انتقال آنها استفاده شده و تفکیک نمونه‌های آموزشی انتقال یافته و انتقال نیافته نیز براساس روش آزمون و خطا انجام شده است. در پژوهش‌های انجام شده، معمولاً صحت انتقال نمونه‌ها به صورت کلی بررسی شده و نقش هریک از باندهای طیفی، در میزان صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در هریک از کلاس‌های کاربری، جداگانه بررسی نشده است. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش تهیه نمونه‌های آموزشی معتبر، با استفاده از روش انتقال نمونه‌های آموزشی برای پایش تغییرات پوشش زمین در شمال غرب ایران، بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ است. در پژوهش حاضر، نقش هریک از باندهای طیفی در انتقال نمونه‌های آموزشی، در مورد هریک از پوشش‌های زمینی به صورت جداگانه بررسی شده است.

(تصاویر موجود در سامانه Google Earth) و برداشت زمینی (متعلق به سال ۱۴۰۱) استفاده شد.

۳-۲- شیوه پژوهش

روش پژوهش شامل پنج مرحله کلی است (شکل ۲). در مرحله اول، تصاویر ماهواره‌ای لندست-۵ و ۸ از سایت سازمان زمین‌شناسی امریکا^۱ دریافت و مراحل پیش‌پردازش تصاویر (تصحیح رادیومتریک و هندسی) روی آنها انجام شد. در مرحله دوم، با استفاده از تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی بالا (تصاویر سامانه Google Earth) و برداشت زمینی، نمونه‌های آموزشی مورد نظر تهیه شدند. مرحله سوم شامل انتقال نمونه‌های آموزشی می‌شود؛ برای این کار، در ابتدا، با استفاده از دو پارامتر فاصله اقلیدسی و فاصله زاویه طیفی، شباهت

تفکیک انواع پوشش‌های سطحی (شامل پوشش‌های گیاهی گوناگون) با صحت بیشتری انجام می‌شود (Huang et al., 2020; Li et al., 2022)؛ در این پژوهش نیز، تمامی تصاویر در طول فصل رشد (خردادماه) دریافت شدند. از طرفی، دریافت تصاویر در روز از سال (DOY)^۱ یکسان موجب می‌شود تصاویر شرایط نوری و محیطی نسبتاً مشابهی داشته باشند؛ این نکته، در بررسی شباهت طیفی نمونه‌های آموزشی، اهمیت فراوانی دارد. بر این اساس، تمامی تصاویر تا حد امکان در روز از سال یکسان دریافت شدند؛ علاوه بر این، میزان پوشش ابر در تصاویر ماهواره‌ای کمتر از ۵٪ بود تا وجود ابر مانع طبقه‌بندی صحیح پوشش‌های متفاوت سطح زمین نشود. برای تهیه نمونه‌های آموزشی (داده‌های مرجع زمینی) در سال‌های متفاوت، از تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی بالا



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. تصاویر ماهواره‌ای به‌کاررفته در پژوهش

ماهواره	گذر	ردیف	تاریخ
لندست-۵	۱۶۹	۳۳	۱۳۸۱/۰۳/۲۷
لندست-۵	۱۶۹	۳۳	۱۳۸۷/۰۳/۱۲
لندست-۸	۱۶۹	۳۳	۱۳۹۲/۰۳/۲۵
لندست-۸	۱۶۹	۳۳	۱۳۹۶/۰۳/۲۰
لندست-۸	۱۶۹	۳۳	۱۴۰۱/۰۳/۱۸

1. Day-Of-Year

2. United States Geological Survey (USGS)

Radiometric Calibration، مقادیر عددی پیکسل‌ها^۱ به بازتابش طیفی^۲ تبدیل شد؛ در ادامه، با استفاده از الگوریتم تصحیح اتمسفری FLAASH، از تأثیرات اتمسفر در تصاویر کاسته شد. از آنجاکه تصاویر ماهواره‌ای در سال‌های گوناگون به‌کار رفته است، تصحیح هندسی به‌منظور انطباق دقیق تصاویر بر یکدیگر ضروری است. بر این اساس، با توجه به زمین مرجع بودن تصاویر ماهواره‌ای لندست، از روش تصویر به تصویر^۳ به‌منظور تصحیح هندسی استفاده شد. برای این کار، تصویر ماهواره‌ای متعلق به سال ۱۴۰۱ به‌منزله تصویر پایه^۴ به‌کار رفت و سایر تصاویر به‌نسبت آن تصحیح شدند. برای این کار، از بیست نقطه کنترل زمینی^۵ با پراکنش مناسب استفاده و تصاویر ماهواره‌ای، با حداکثر خطای متوسط ریشه مربعی^۶ ۰/۳۹ پیکسل، تصحیح هندسی شدند. نمونه‌برداری مجدد^۷ مقادیر پیکسل‌های تصحیح هندسی شده با روش نزدیک‌ترین همسایه^۸ انجام شد و مقادیر عددی پیکسل‌ها در مختصات تصحیح شده به آنها اختصاص یافت.

طیفی نمونه‌های آموزشی در سال‌های مرجع و هدف بررسی شد. در ادامه، با تعیین آستانه مورد نظر، نمونه‌های آموزشی انتقال یافته از نمونه‌های انتقال نیافته تفکیک شدند. در انتهای مرحله سوم، صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته ارزیابی شد؛ بدین‌منظور داده‌های مرجع تهیه شده از سامانه Google Earth به‌کار رفت. در مرحله چهارم، با استفاده از نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، تصاویر ماهواره‌ای متعلق به سال‌های گوناگون طبقه‌بندی شد و در نهایت در مرحله پنجم، با استفاده از شاخص‌های حاصل از ماتریس خطا، صحت تصاویر طبقه‌بندی شده ارزیابی شد.

۱-۳-۲- پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست- ۵ و ۸ در محیط نرم‌افزار ENVI 5.6 و طی دو مرحله کلی، شامل تصحیح رادیومتریک و تصحیح هندسی، انجام شد. به‌منظور تصحیح رادیومتریک، ابتدا با استفاده از دستور



شکل ۲. روندنمای مراحل پژوهش

1. Digital Number
2. Radiance
3. Image to Image Registration
4. Base
5. Ground Control Points (GCP)
6. Root Mean Square Error (RMSE)
7. Resampling
8. Nearest Neighbor

۲-۳-۲- تهیه نمونه‌های آموزشی مرجع

تهیه نمونه‌های آموزشی مرجع، برای شش کلاس کاربری متفاوت (اراضی انسان‌ساخت، اراضی بایر، اراضی زراعی، مرتع، تالاب، آب) و با استفاده از تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی بالا (تصاویر سامانه Google Earth) و برداشت زمینی (درمورد سال ۱۴۰۱) انجام شد. نمونه‌های مورد نظر به روش طبقه‌بندی شده تصادفی^۱ تهیه شدند. در این روش، منطقه مورد نظر به کلاس یا طبقات متفاوتی (براساس کلاس‌های مورد نظر برای طبقه‌بندی) تقسیم می‌شود و سپس نمونه‌های آموزشی، به صورت تصادفی، داخل هر یک از طبقات انتخاب می‌شوند (Li et al., 2021). کلاس‌های مورد نظر، برای برداشت نمونه به روش طبقه‌بندی شده تصادفی، با استفاده از نقشه‌های پوشش زمینی که شرکت ESRI (ESRI Land Cover) آنها را تهیه کرده است، تعیین و نمونه‌های آموزشی براساس آنها تهیه شدند. در زمان جمع‌آوری نمونه‌های زمینی از تصاویر گوگل ارث، پیکسل‌هایی انتخاب شدند که حداقل هشت پیکسل اطراف آنها دارای کلاس کاربری مشابه با پیکسل مرکزی بودند. این فرایند موجب دسترسی به داده‌های زمینی همگون و نیز قابل مقایسه شدن نمونه‌های برداشت شده با پیکسل‌های تصاویر لندست می‌شود. برای ارزیابی دقیق‌تر صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته به هر یک از سال‌های هدف (۱۳۸۱، ۱۳۸۷، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۶)، تعدادی نمونه آموزشی نیز در هر یک از این سال‌ها، با استفاده از تصاویر سامانه Google Earth تهیه شد. در نهایت، ۴۰۰۰ نمونه آموزشی تهیه شد که ۷۰٪ آنها در آموزش و ۳۰٪ در اعتبارسنجی به کار رفت.

۲-۳-۳- انتقال نمونه‌های آموزشی

به منظور انتقال نمونه‌های آموزشی، ابتدا شباهت طیفی نمونه‌های (پیکسل) آموزشی در سال‌های مرجع (۱۴۰۱) و هدف (سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۲، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۱)، با استفاده از دو پارامتر فاصله اقلیدسی و فاصله زاویه طیفی، بررسی شد. مطالعات قبلی نشان داده است که

این دو پارامتر، برای بررسی شباهت طیفی نمونه‌ها در تصاویر ماهواره‌ای دوزمانه، عملکرد مناسبی دارند (Huang et al., 2020; Chen et al., 2021). در این راستا، ابتدا مقادیر بازتاب پیکسل‌ها در هر یک از باندهای تصویر لندست، برای هر یک از نمونه‌های آموزشی در سال‌های مرجع و هدف، استخراج شد و پارامترهای فاصله اقلیدسی و فاصله زاویه طیفی براساس آن به دست آمد.

فاصله اقلیدسی بیانگر فاصله (اندازه) بین دو بردار طیفی است. در واقع، این پارامتر اختلاف طول بین دو بردار طیفی را اندازه‌گیری می‌کند (Yang & Everitt, 2012). با محاسبه فاصله اقلیدسی بین دو پیکسل در زمان‌های متفاوت، درجه اختلاف بین دو پیکسل مشخص می‌شود. مقدار عددی فاصله اقلیدسی هر قدر کوچک‌تر باشد، یعنی دو پیکسل شباهت طیفی بسیاری به یکدیگر دارند و مقدار عددی صفر نشان‌دهنده شباهت کامل دو پیکسل به یکدیگر است (Huang et al., 2020). در رابطه (۱)، نحوه محاسبه فاصله اقلیدسی بیان شده است. در این معادله، ED نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی بین طیف مرجع و طیف هدف است که به صورت ریشه مربع مجموع باندها از مربع تفاوت‌ها بیان می‌شود. $X_{i(t_1)}$ طیف مرجع پیکسل نمونه آموزشی در زمان t_1 ، $Y_{i(t_2)}$ طیف هدف پیکسل نمونه آموزشی در زمان t_2 و i مربوط به باند طیفی است و مقدار آن از ۱ تا N (تعداد باندها) متغیر است.

$$ED = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{i(t_1)} - Y_{i(t_2)})^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

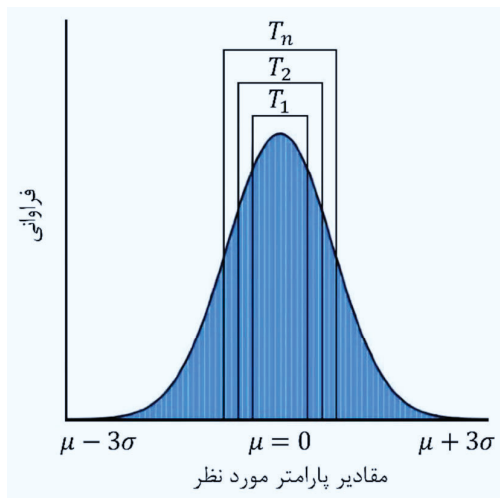
فاصله زاویه طیفی نشان‌دهنده جهت تغییرات در دو بردار طیفی است. این پارامتر زاویه بین دو بردار طیفی را محاسبه و از این طریق، میزان شباهت دو بردار طیفی را مشخص می‌کند (Yang & Everitt, 2012). پارامتر فاصله زاویه طیفی به تغییرات سایه^۲ و روشنایی^۳ حساس نیست و می‌تواند ویژگی‌های

1. Stratified Random Sampling
2. Shade
3. Illumination

شوند. بر این اساس در این پژوهش، نمونه‌های قرارگرفته در دو طرف میانگین، به تدریج به نسبت‌های مساوی (بازه یا گام) تقسیم شد و مقدار آستانه براساس این بازه‌ها به دست آمد (رابطه (۳)). در ادامه، صحت نمونه‌های آموزشی در هریک از آستانه‌ها بررسی شد (رابطه (۴)) و در نهایت، آستانه‌ای که صحت نمونه‌های آموزشی در آن بیشترین مقدار بود و تعداد نمونه‌های کافی نیز در آن آستانه وجود داشت، به‌منزله آستانه بهینه انتخاب شد و آن دسته از نمونه‌ها که در این آستانه حضور داشتند، نمونه‌های بدون تغییر (انتقال یافته) در نظر گرفته شدند.

$$\mu - a_i \times \sigma < T_i < \mu + a_i \times \sigma \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این معادله، i مقدار بازه (گام)، μ مقدار میانگین، σ انحراف معیار، a_i بازه (گام) T_i و μ مقدار آستانه در بازه (گام) T_i است. نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، درمورد هریک از باندهای طیفی تصویر لندست و هریک از سال‌های هدف، جداگانه بررسی شد.



شکل ۳. نحوه تعیین آستانه با روش مبتنی بر هیستوگرام

شکل طیفی هدف^۱ را برجسته کند (Haug et al., 2020). در صورت تشابه کامل دو پیکسل نمونه آموزشی، مقدار عددی فاصله زاویه طیفی برابر با ۱ خواهد بود (Yan & Niu, 2021). رابطه (۲) محاسبه فاصله زاویه طیفی را بیان می‌کند. در این معادله، θ زاویه طیفی، $X_{i(t_1)}$ طیف مرجع پیکسل نمونه آموزشی در زمان t_1 ، $Y_{i(t_2)}$ طیف هدف پیکسل نمونه آموزشی در زمان t_2 و i مربوط به باند طیفی است و مقدار آن از ۱ تا N (تعداد باندها) متغیر است.

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^N X_{i(t_1)} Y_{i(t_2)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{i(t_1)})^2 \sum_{i=1}^N (Y_{i(t_2)})^2}}$$

$$SAD = \cos(\theta) \quad \text{رابطه (۲)}$$

پس از بررسی شباهت طیفی نمونه‌های آموزشی، با اعمال آستانه‌گذاری، مقدار عددی مورد نظر برای تفکیک نمونه‌های آموزشی انتقال یافته (دارای شباهت طیفی زیاد در دو زمان متفاوت) از نمونه‌های آموزشی انتقال نیافته (دارای شباهت طیفی اندک در دو زمان متفاوت) مشخص شد. تعیین آستانه بهینه یکی از مهم‌ترین مراحل فرایند بررسی تغییرات است و در نتایج به دست آمده تأثیر مستقیم خواهد گذاشت (Zhu, 2017). در این پژوهش، برای تعیین آستانه عددی مورد نظر، از روش آستانه‌گذاری مبتنی بر هیستوگرام استفاده شد (شکل ۳). شکل هیستوگرام، بنابر توزیع داده‌ها، متفاوت است (Patra et al., 2011). اگر مقادیر عددی نمونه‌ها دارای توزیع نرمال باشند، به احتمال بسیار، نمونه‌های بدون تغییر با مقادیر نزدیک به صفر در هر دو طرف میانگین قرار می‌گیرند (Lu et al., 2004). در این پژوهش، برای بررسی نرمال بودن مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده، از دو آزمون گرافیکی استفاده شد: (۱) نمودار چندک-چندک و (۲) انطباق تابع چگالی احتمال داده‌ها با هیستوگرام داده‌ها. شناسایی محتمل‌ترین نمونه‌های بدون تغییر، در چنین هیستوگرام‌هایی چالش برانگیز است زیرا این نمونه‌ها ممکن است در هر انحراف معیاری^۲ از میانگین توزیع

1. Target Spectra-Shape Characteristics
2. Standard Deviation

ماهیت ناپارامتریک الگوریتم جنگل تصادفی موجب می‌شود این الگوریتم بر محدودیت‌هایی همچون وجود نویز در داده‌ها، داده‌های از دست‌رفته^۱ و داده‌هایی با ابعاد بزرگ غلبه کند و نتایج بهتری در طبقه‌بندی این نوع از داده‌ها به دست دهد (Rodriguez-Galiano et al., 2012). این الگوریتم، در ابتدا، از نقاطی که تصادفی و به منظور آموزش مدل انتخاب شده‌اند (متغیر پاسخ) و نیز نمونه‌هایی از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده استفاده می‌کند؛ در نتیجه، تعدادی درخت مستقل از یکدیگر طبقه‌بندی می‌شوند. این روند چندصد بار تکرار می‌شود و جنگلی شامل صدها طبقه‌بندی‌کننده تشکیل می‌شود؛ در این حالت، هر درخت با یک رأی منحصر به فرد، کلاس مورد نظر را برمی‌گزیند. نتایج نهایی طبقه‌بندی بر اساس رأی اکثریت درختان تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود (Breiman, 2001). بر این اساس، تعداد درختان (ntree) و تعداد متغیرها (mtry) دو پارامتر اساسی در عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی محسوب می‌شوند (Steinhausen et al., 2018). به منظور طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، از یک‌صد درخت تصمیم‌گیری استفاده شد. تعداد درختان تصمیم‌گیری بر پایه روش آزمون و خطا و پایدار (ثابت) ماندن میزان خطا در این تعداد از درخت‌ها تعیین شد. جذر تعداد ویژگی‌ها (تعداد باندهای تصویر لندست) نیز، به منزله تعداد متغیرها در الگوریتم جنگل تصادفی به کار رفت. بر این اساس، طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از ۷۰٪ نمونه‌ها، در شش کلاس کاربری متفاوت (اراضی انسان‌ساخت، اراضی بایر، اراضی زراعی، مرتع، تالاب، آب) و با به کارگیری الگوریتم جنگل تصادفی انجام شد.

۵-۳-۲- ارزیابی صحت تصاویر طبقه‌بندی شده

نقشه‌های ایجاد شده با استفاده از داده‌های سنجش از دور همواره شامل مقداری خطا می‌شوند. ارزیابی صحت طبقه‌بندی می‌تواند این خطاها را شناسایی و میزان صحت

برای تعیین آستانه بهینه، نمونه‌های آموزشی در هر بازه از تابع توزیع نرمال بررسی شد؛ صحت نمونه‌های آموزشی و درصد نمونه‌های آموزشی موجود در هر بازه مورد بررسی قرار گرفت تا اطمینان حاصل شود، علاوه بر نمونه‌های آموزشی با صحت بالا، تعداد نسبتاً مناسبی از نمونه‌های آموزشی برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای انتقال خواهند یافت. با توجه به اینکه بیشتر نمونه‌ها (تقریباً ۹۵٪) در فاصله ۲ انحراف معیار فاصله از میانگین قرار دارند، بازه آستانه‌ها از انحراف معیار ۰/۱ تا ۲، با فاصله‌های ۰/۱ بررسی شد.

پس از تعیین آستانه مورد نظر و تفکیک نمونه‌های آموزشی به دو دسته انتقال یافته و انتقال نیافته، صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته ارزیابی شد. برای این کار، ابتدا نمونه‌هایی با عنوان نمونه‌های آموزشی با کیفیت در نظر گرفته شد. نمونه‌های آموزشی مورد نظر برای ارزیابی صحت با استفاده از تفسیر بصری تصاویر ماهواره‌ای دارای قدرت تفکیک مکانی بالا (تصاویر سامانه Google Earth) تهیه شدند. نمونه آموزشی انتقال یافته‌ای که با نمونه آموزشی مورد استفاده در ارزیابی صحت هم‌خوانی داشت (از لحاظ نوع کلاس کاربری)، با عنوان نمونه‌های آموزشی صحیح، علامت‌گذاری و با N^T مشخص شد؛ سایر نمونه‌های آموزشی که با نمونه‌های آموزشی مورد استفاده برای ارزیابی صحت هم‌خوانی نداشتند، با عنوان نمونه‌های آموزشی ناصحیح علامت‌گذاری و با N^W مشخص شدند. در نهایت، با استفاده از رابطه (۴)، صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته به دست آمد.

$$\text{رابطه (۴)} \quad Accuracy = \frac{N^T}{N^T + N^W}$$

۴-۳-۲- طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

این طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی انجام شد. الگوریتم جنگل تصادفی یکی از الگوریتم‌های قدرتمند ناپارامتریک یادگیری ماشین است که در طبقه‌بندی پوشش زمین، کاربرد گسترده‌ای دارد (Calderón-Loor et al., 2021; Som-ard et al., 2022).

1. Missing Data

استفاده شد. در این معادله، p_{jj} مساحت کلاس‌ها، W_j مساحتی است که به‌منزله کلاس طبقه‌بندی شده، n_{jj} تعداد نمونه‌هایی است که به‌صورت کلاس j طبقه‌بندی شده و درواقعیت نیز جزء کلاس j محسوب می‌شود و n_j تعداد نمونه‌های واقعیت زمینی متعلق به کلاس j است.

۳- نتایج

۳-۱- انتقال نمونه‌های آموزشی

نتایج آزمون نرمال بودن داده‌ها (شکل ۴) نشان داد مقادیر مورد نظر دارای توزیع نرمال است و می‌توان از آنها در مراحل بعدی، برای تعیین آستانه براساس هیستوگرام، بهره برد. بر این اساس، مقادیر تابع چگالی احتمال و انطباق آن با هیستوگرام داده‌ها نشان داد هیستوگرام مورد نظر دارای شکل زنگوله‌ای است و از توزیع نرمال پیروی می‌کند. علاوه‌براین نمودار چندک-چندک داده‌ها گویای خطی تقریباً مستقیم است که نشان از توزیع نرمال مقادیر مورد نظر دارد. پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها، نمونه‌های آموزشی انتقال یافته و انتقال نیافته براساس روش آستانه‌گذاری مبتنی بر هیستوگرام، تفکیک شد. در نهایت، آن دسته از نمونه‌های آموزشی که طبق هر دو پارامتر جزء نمونه‌های آموزشی، انتقال یافته محسوب می‌شدند به‌منزله نمونه‌های نهایی انتقال یافته در نظر گرفته شدند. نتایج به‌دست آمده نشان داد (جدول ۲) آستانه ۰/۹ تا ۱/۱ (اختلاف انحراف معیار از میانگین) مناسب‌ترین آستانه، برای تفکیک نمونه‌های آموزشی انتقال یافته از نمونه‌های آموزشی انتقال نیافته در سال‌های متفاوت است. این آستانه‌ها بر مبنای صحت و درصد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در سال‌های گوناگون (شکل ۵ و ۶) تعیین شد. بنابراین می‌توان گفت، بین صحت و درصد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته رابطه‌ای معکوس وجود دارد و با افزایش درصد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته،

طبقه‌بندی را مشخص کند (Strahler et al., 2006). در این پژوهش، صحت تصاویر طبقه‌بندی شده با استفاده از سه پارامتر صحت کلی، صحت تولیدکننده و صحت کاربر ارزیابی شد. روش به‌کاررفته برای محاسبه این سه پارامتر مطابق روش پیشنهادی آلفسن^۱ و همکاران (۲۰۱۴) است. بدین ترتیب ۳۰٪ نمونه‌ها، برای ارزیابی صحت تصاویر طبقه‌بندی شده به کار رفت. طبق شیوه این محققان، مساحت هریک از کلاس‌ها (p) نیز، به‌منزله فاکتوری برای محاسبه صحت طبقه‌بندی به کار می‌رود و پارامترهای صحت کلی، صحت تولیدکننده و صحت کاربر، بر مبنای آن (روابط (۵) تا (۸)) و با استفاده از ماتریس خطا محاسبه می‌شوند. استفاده از نسبت مساحت کلاس‌ها در برآورد پارامترهای صحت طبقه‌بندی موجب می‌شود صحت برآوردشده، درمورد کلاس‌های کاربری متفاوت، با مساحت آنها تناسب داشته باشد و تأثیر کلاس‌هایی با مساحت بسیار کم و بسیار زیاد، در میزان صحت طبقه‌بندی در نظر گرفته شود.

$$O = \sum_{j=1}^q p_{jj} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$P_i = p_{jj}/p_j \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$U_i = p_{jj}/p_i \quad \text{رابطه (۷)}$$

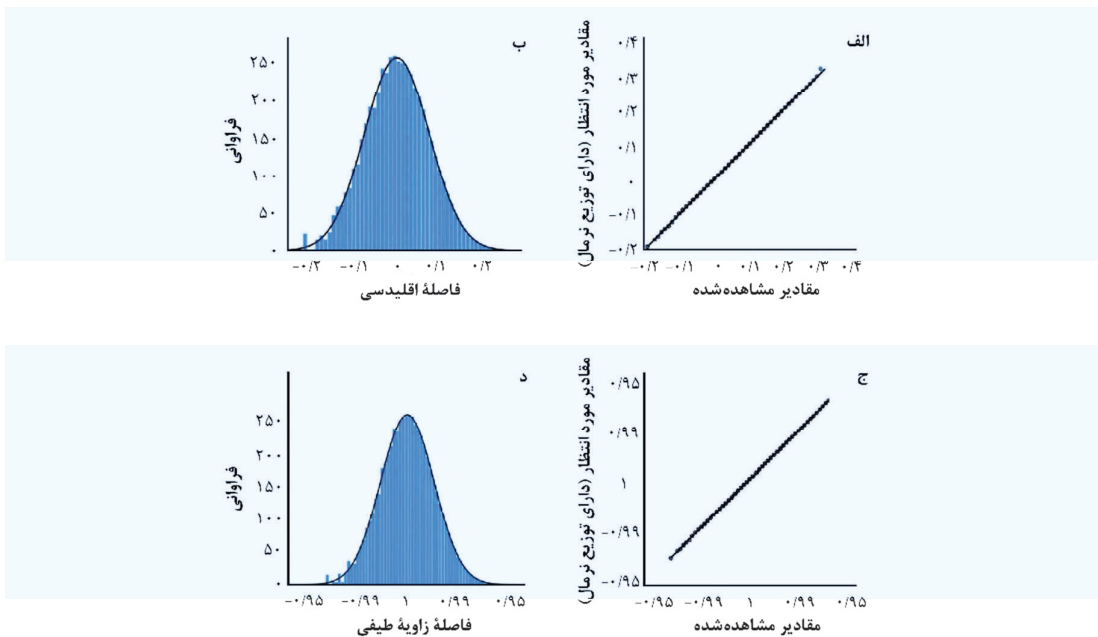
$$p_{jj} = W_j \frac{n_{jj}}{n_j} \quad \text{رابطه (۸)}$$

در رابطه (۵)، O صحت کلی، q تعداد کلاس‌ها و مساحت طبقه‌بندی صحیح در کلاس‌هاست (مساحتی که جزء کلاس j طبقه‌بندی شده و درواقعیت نیز، جزء کلاس j است). در رابطه (۶)، P_i صحت تولیدکننده و p_{jj} مساحتی است که درواقعیت، جزء کلاس j محسوب می‌شود و جزء کلاس j نیز طبقه‌بندی شده است. p_j مساحتی است که درواقعیت، جزء کلاس j است. در رابطه (۷)، U_i صحت کاربر و p_i مساحتی است که به‌منزله کلاس j طبقه‌بندی شده و درواقعیت نیز جزء کلاس j است و p_i نیز مساحتی است که درواقعیت، جزء کلاس i محسوب می‌شود. برای محاسبه مساحت کلاس‌ها (p_{jj}) در روابط (۵) تا (۷)، از رابطه (۸)

1. Olofsson

است، اختلاف رادیومتریکی انواع پوشش زمین در تصاویر لندست- ۸ بیشتر از لندست- ۵ باشد و از یکدیگر بهتر تفکیک شوند. این موضوع باعث شده است نمونه‌های آموزشی انتقال یافته به سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۶ (در آنها از تصاویر لندست- ۸ استفاده شده است) صحت بیشتری (و درصد انتقال کمتر) در قیاس با نمونه‌های آموزشی انتقال یافته به سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۷ (در آنها از تصاویر لندست- ۵ استفاده شده است) داشته باشند.

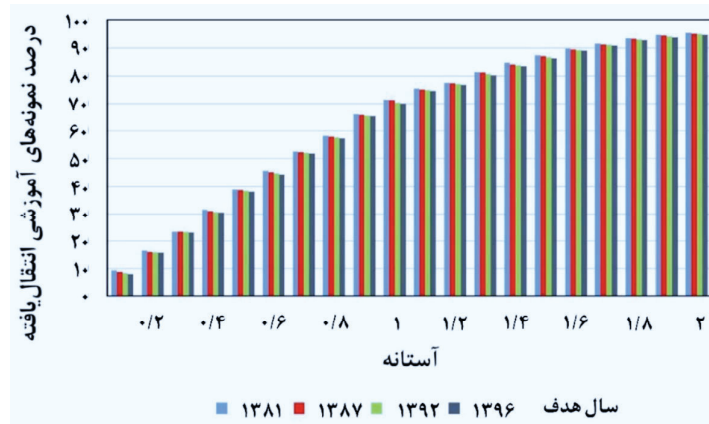
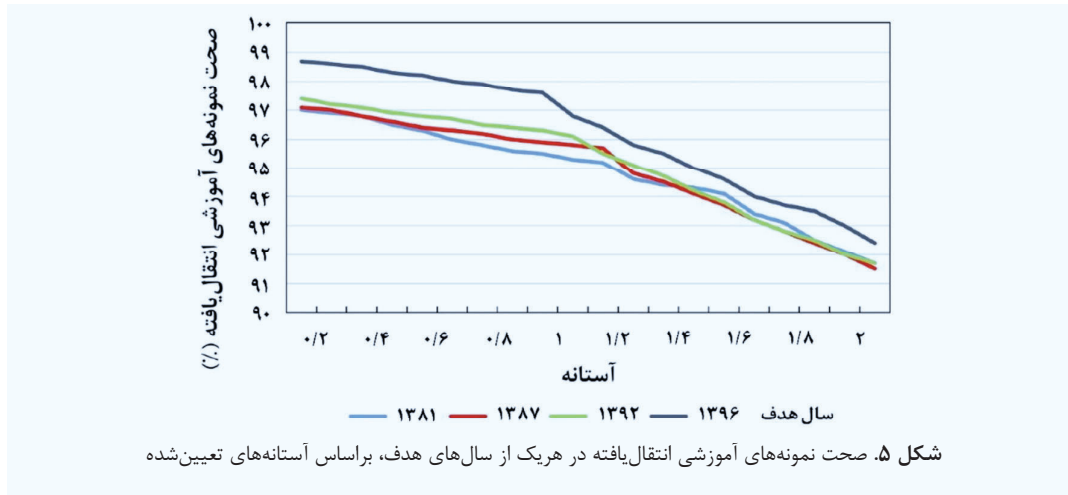
از صحت آنها کاسته می‌شود. این نکته نشان می‌دهد افزایش آستانه عددی باعث افزایش تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته می‌شود که در این میان، ممکن است نمونه‌هایی با تشابه طیفی کمتر نیز انتقال بیابند و از صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته کاسته شود. همچنین با توجه به اینکه تصاویر لندست- ۵ دارای قدرت تفکیک رادیومتریکی هشت بیت و تصاویر لندست- ۸ دارای قدرت تفکیک رادیومتریکی دوازده بیت هستند و نسبت سیگنال به نویز در تصاویر لندست- ۸، در قیاس با لندست- ۵ بهبود پیدا کرده



شکل ۴. بررسی نرمال بودن مقادیر نمونه‌های آموزشی در باند سبز تصاویر لندست، در سال مرجع (۱۴۰۱) و هدف (۱۳۹۶): نمودار چندک-چندک داده‌های فاصله اقلیدسی (الف)؛ انطباق تابع چگالی احتمال داده‌ها با هیستوگرام داده‌های فاصله اقلیدسی (ب)؛ نمودار چندک-چندک داده‌های فاصله زاویه طیفی (ج)؛ انطباق تابع چگالی احتمال داده‌ها با هیستوگرام داده‌های فاصله زاویه طیفی (د)

جدول ۲. آستانه بهینه برای هریک از سال‌های هدف

سال	آستانه بهینه	صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته	درصد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته
۱۳۸۱	۱/۱	۹۵/۲	۷۵/۵
۱۳۸۷	۱/۱	۹۵/۷	۷۵/۱
۱۳۹۲	۱	۹۶/۱	۷۰/۴
۱۳۹۶	۰/۹	۹۷/۶	۶۵/۲

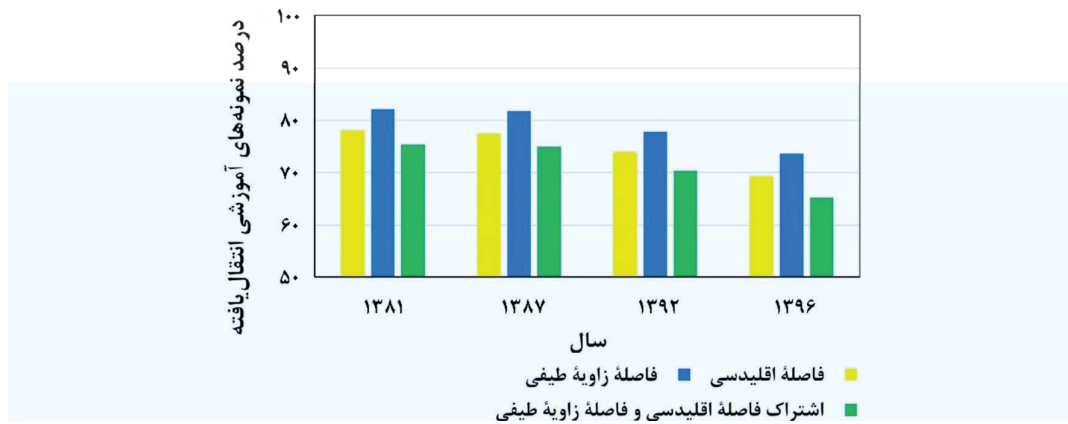


اینکه این دو عامل می‌توانند موجب تغییر در اندازه (فاصله) طیفی دو پیکسل شوند (که با استفاده از پارامتر فاصله اقلیدسی محاسبه می‌شود)، تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس فاصله اقلیدسی کمتر از تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس فاصله زاویه طیفی بوده است. بررسی نمونه‌های آموزشی انتقال یافته بر مبنای هریک از پارامترها (فاصله زاویه طیفی و فاصله اقلیدسی) نشان داد (شکل ۸) صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس پارامتر فاصله زاویه طیفی بیشتر از نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس پارامتر دیگر است. همچنین استفاده از نمونه‌های انتقال یافته، بر پایه هر دو پارامتر،

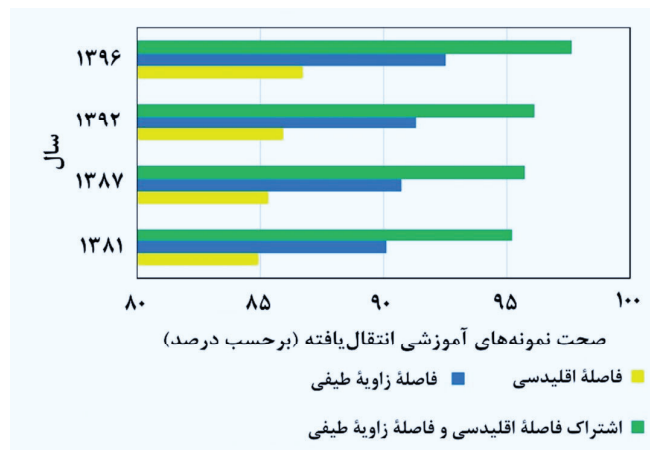
براساس نتایج (جدول ۲)، با افزایش فاصله زمانی بین سال مرجع و هدف، از صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته تا حدودی کاسته می‌شود؛ این اختلاف در صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، در بیشترین مقدار، ۲/۴٪ بود. این کاهش نسبی در نمونه‌های مورد اشاره را می‌توان ناشی از تغییر شرایط محیطی و پوشش‌های سطحی در طول زمان دانست. نتایج نشان داد (شکل ۷) درصد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، براساس پارامتر فاصله زاویه طیفی، بیشتر از نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس پارامتر فاصله اقلیدسی بوده است. با توجه به حساسیت نداشتن پارامتر فاصله زاویه طیفی به تغییرات سایه و روشنایی و با توجه به

بررسی تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، در کلاس‌های کاربری متفاوت، نشان داد کلاس‌های آب، اراضی بایر، اراضی انسان‌ساخت، مرتع، اراضی زراعی و تالاب، به ترتیب، بیشترین تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته را داشتند. تعداد بیشتر نمونه‌های انتقال یافته در کلاس آب می‌تواند ناشی از همگن بودن این کلاس و مساحت نسبتاً زیاد آن، در قیاس با کل منطقه مورد مطالعه باشد. از سویی تعداد کمتر نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در کلاس تالاب چه بسا نتیجه ناهمگن بودن این نوع پوشش سطحی و مساحت کمتر آن از دیگر پوشش‌های منطقه باشد. بررسی

باعث افزایش ۱۰/۴۵ درصدی صحت در مقایسه با حالتی شده است که پارامتر فاصله اقلیدسی برای انتقال نمونه‌های آموزشی به کار رفته و همچنین افزایش ۵ درصدی صحت را در قیاس با حالتی نشان می‌دهد که از پارامتر فاصله زاویه طیفی برای انتقال نمونه‌های آموزشی استفاده شده است. بر این مبنای، برای اطمینان بیشتر از صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، فقط نمونه‌هایی در طبقه‌بندی نهایی تصاویر ماهواره‌ای به کار رفتند که طبق هر دو پارامتر (فاصله اقلیدسی و فاصله زاویه طیفی)، جزء نمونه‌های آموزشی انتقال یافته محسوب می‌شدند.



شکل ۷. درصد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته بر اساس پارامترهای متفاوت



شکل ۸. صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته بر اساس پارامترهای متفاوت

آب، عملکردی مناسب‌تر دارند و صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس این باندها، در قیاس با دیگر باندها در کلاس آب، بیشتر است. این موضوع تاحدودی با منحنی رفتار طیفی پوشش‌های سطحی متفاوت هم‌خوانی دارد؛ برای نمونه، بازتاب از سطح آب در باند قرمز و بازتاب‌نداشتن (بازتاب بسیار اندک) از سطح آب، در باند مادون قرمز میانی، موجب تأثیر در صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس این باندهای طیفی شده و این وضعیت به ایجاد تفاوت در صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در کلاس‌های کاربری متفاوت، براساس باندهای طیفی متفاوت تصاویر لندست، منجر شده است.

جدول ۳. صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در هر یک از

کلاس‌های کاربری، در سال‌های متفاوت

کلاس کاربری	۱۳۸۱	۱۳۸۷	۱۳۹۲	۱۳۹۶
اراضی انسان‌ساخت	٪ ۹۷/۲	٪ ۹۷/۸	٪ ۹۸/۲	٪ ۹۸/۹
اراضی بایر	٪ ۹۶	٪ ۹۶/۴	٪ ۹۶/۹	٪ ۹۸/۲
اراضی زراعی	٪ ۹۳/۱	٪ ۹۳/۹	٪ ۹۴/۵	٪ ۹۶/۹
مرتع	٪ ۹۵	٪ ۹۵/۵	٪ ۹۵/۸	٪ ۹۷/۷
تالاب	٪ ۹۱/۱	٪ ۹۱/۶	٪ ۹۲/۱	٪ ۹۴/۶
آب	٪ ۹۸/۸	٪ ۹۹	٪ ۹۹/۱	٪ ۹۹/۳

جدول ۴. مناسب‌ترین باندها برای انتقال نمونه‌های آموزشی، در

کلاس‌های کاربری متفاوت

کلاس کاربری	باند طیفی
اراضی انسان‌ساخت	آبی و مادون قرمز نزدیک
اراضی بایر	آبی و مادون قرمز میانی
اراضی زراعی	قرمز و مادون قرمز نزدیک
مرتع	قرمز و مادون قرمز نزدیک
تالاب	مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی
آب	قرمز و مادون قرمز میانی

درصد انتقال نمونه‌های آموزشی در کلاس‌های کاربری متفاوت نیز نشان داد، به‌طور میانگین، ٪ ۸۰/۶ نمونه‌های آموزشی کلاس آب، ٪ ۷۵/۴ نمونه‌های آموزشی کلاس اراضی بایر، ٪ ۷۱/۲ نمونه‌های آموزشی کلاس اراضی انسان‌ساخت، ٪ ۶۴/۶ از نمونه‌های آموزشی کلاس مرتع، ٪ ۶۰/۲ از نمونه‌های آموزشی کلاس اراضی زراعی و ٪ ۵۴/۴ نمونه‌های آموزشی کلاس تالاب، از سال مرجع (۱۴۰۱) به هر یک از سال‌های هدف (۱۳۸۱، ۱۳۸۷، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۶) انتقال یافته است.

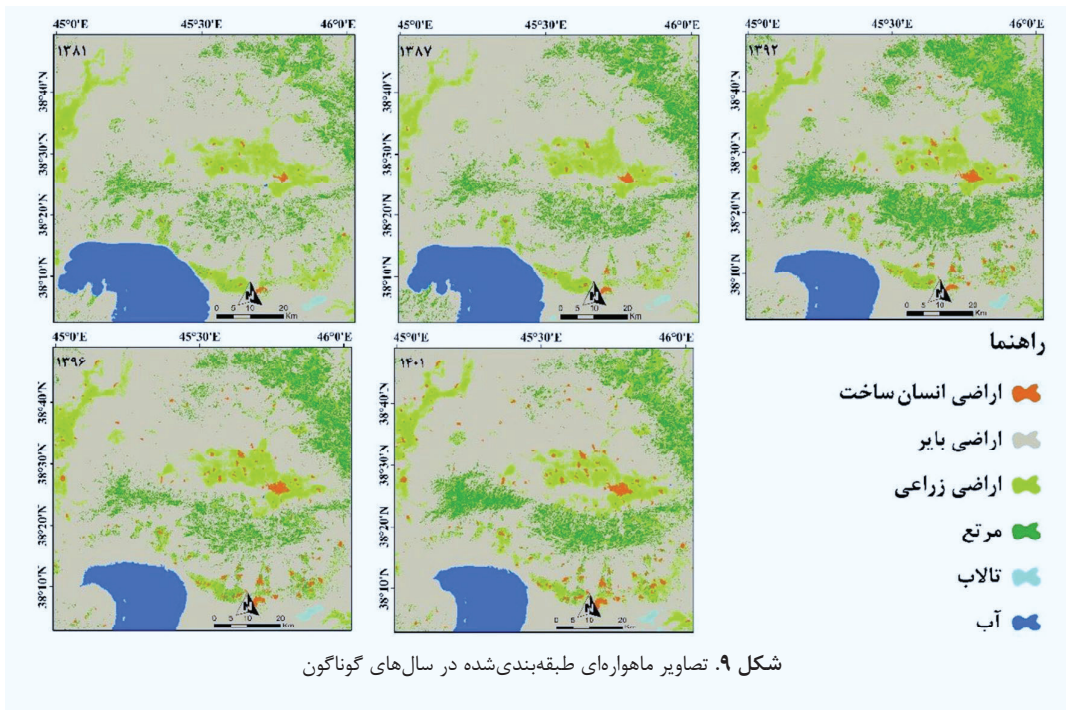
ارزیابی صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در کلاس‌های کاربری متفاوت نشان داد (جدول ۳) کلاس‌های آب، اراضی انسان‌ساخت، اراضی بایر، مرتع، اراضی زراعی و تالاب، به ترتیب، بیشترین صحت در نمونه‌های آموزشی انتقال یافته را داشتند. همگن‌بودن کلاس کاربری آب و اختلاف در رفتار طیفی باندهای گوناگون تصویر لندست در این کلاس (بازتابندگی زیاد در باندهای مرئی و بازتابندگی کم در باندهای مادون قرمز نزدیک) موجب تفکیک و انتقال بهتر نمونه‌های آموزشی در این کلاس شده است. رفتار طیفی نسبتاً ثابت کلاس آب در طول زمان و تفاوت در شکل منحنی رفتار طیفی این کلاس با سایر کلاس‌های کاربری موجب شده است نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در این کلاس دارای ناسازگاری کمتر و صحتی بیشتر از نمونه‌های آموزشی دیگر کلاس‌های کاربری باشند. با توجه به تغییرپذیری طیفی بیشتر پوشش تالاب در طول زمان، ناهمگن‌بودن این کلاس کاربری و تشابه نسبی رفتار طیفی آن با دیگر کلاس‌های مختص پوشش گیاهی، نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در این کلاس دارای صحت کمتر از کلاس‌های دیگر است.

بررسی عملکرد باندهای طیفی، در انتقال نمونه‌های آموزشی کلاس‌های کاربری متفاوت، نشان داد (جدول ۴) هر یک از باندها در انتقال نمونه‌های آموزشی، دارای عملکرد متفاوتی است؛ به‌طوری که باندهای قرمز و مادون قرمز میانی، در انتقال نمونه‌های آموزشی کلاس

۳-۲- طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

این طبقه‌بندی (شکل ۹) با استفاده از تصاویر لندست بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ انجام شد. بر این اساس، پوشش‌های سطحی زمین در شش کلاس کاربری متفاوت قرار گرفت. نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی (جدول ۵) نشان داد صحت کلی تصاویر طبقه‌بندی‌شده در سال‌های ۱۴۰۱، ۱۳۹۶، ۱۳۹۲، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۱ به ترتیب ۹۴/۹۴٪، ۹۱/۹۳٪، ۹۰/۷۴٪، ۸۹/۴۵٪ و ۸۸/۹۴٪ است. بررسی صحت طبقه‌بندی کلاس‌های کاربری متفاوت، براساس دو پارامتر صحت تولیدکننده و صحت کاربر، نشان داد کلاس آب دارای بیشترین صحت تولیدکننده و کاربر در میان کلاس‌های متفاوت است؛ به گونه‌ای که صحت تولیدکننده و کاربر آن، در تصویر طبقه‌بندی‌شده سال ۱۴۰۱، به ترتیب ۹۸/۲٪ و ۹۹/۳۴٪ است. از طرفی کمترین صحت تولیدکننده و کاربر در مورد کلاس تالاب به دست آمد؛ به صورتی که

صحت تولیدکننده و کاربر آن، در تصویر طبقه‌بندی‌شده سال ۱۴۰۱، به ترتیب ۹۰/۱٪ و ۹۱/۲۵٪ است. بررسی تغییرات پوشش زمین، بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱، نشان داد (جدول ۶) روند تغییرات مساحت کلاس‌های اراضی بایر، آب و تالاب، طی این سال‌ها کاهش و روند تغییرات مساحت اراضی انسان‌ساخت افزایشی بوده است. همچنین کلاس‌های مرتع و اراضی زراعی دارای روند تغییرات ثابت در این بازه زمانی نبودند و روند تغییرات آنها، در سال‌های گوناگون، متفاوت بوده است. اما در حالت کلی، مساحت این دو کلاس در سال ۱۴۰۱ در قیاس با سال ۱۳۸۱، افزایش یافته است. بررسی تغییرات مساحت اراضی انسان‌ساخت، در این بازه زمانی، نشان‌دهنده افزایش محسوس مساحت این کلاس کاربری است؛ به طوری که مساحت آن از ۲۰۳۸ کیلومترمربع در سال ۱۳۸۱ به ۱۲۲/۹۸ کیلومترمربع در سال ۱۴۰۱ افزایش یافته است.



شکل ۹. تصاویر ماهواره‌ای طبقه‌بندی‌شده در سال‌های گوناگون

جدول ۵. ارزیابی صحت (برحسب درصد) تصاویر ماهواره‌ای طبقه‌بندی شده در سال‌های گوناگون

۱۴۰۱		۱۳۹۶		۱۳۹۲		۱۳۸۷		۱۳۸۱		کلاس کاربری
صحت کلی:		صحت کلی:		صحت کلی:		صحت کلی:		صحت کلی:		
۹۴/۹۵		۹۱/۹۳		۹۰/۷۴		۸۹/۴۵		۸۸/۹۴		
U.A.	P.A.	U.A.	P.A.	U.A.	P.A.	U.A.	P.A.	U.A.	P.A.	
۹۵/۴	۹۶/۲	۹۵/۱	۹۴/۲	۹۴/۴	۹۳/۲۳	۹۲/۲	۹۳/۳۷	۹۲/۵	۹۱/۲	اراضی انسان‌ساخت
۹۶/۴	۹۵/۹	۹۴/۴	۹۳/۲	۹۳/۱	۹۲/۲۶	۹۱/۲	۹۲/۳۵	۹۱/۱	۹۰/۲۵	اراضی بایر
۹۳/۹	۹۳/۳	۹۱/۳	۹۰/۱۲	۹۰/۱۴	۸۹/۲۵	۸۸/۴۵	۸۹/۲	۸۸/۴۳	۸۷/۵	اراضی زراعی
۹۴/۷	۹۴/۳	۹۲/۹	۹۱/۲	۹۱/۳	۹۰/۲۴	۸۹/۵۴	۹۰/۴۱	۸۹/۱۴	۸۸/۱۲	مرتع
۹۱/۲۵	۹۰/۱	۸۹/۲	۸۸/۲۷	۸۸/۷۱	۸۷/۲	۸۶/۷	۸۷/۴۵	۸۶/۵	۸۵/۴	تالاب
۹۹/۳۴	۹۸/۲	۹۶/۱	۹۷/۲	۹۵/۲	۹۶/۱	۹۵/۳۴	۹۴/۴	۹۳/۲	۹۴/۲۵	آب

*در ارقام بیان شده برای ارزیابی صحت، P.A. نشان‌دهنده صحت تولیدکننده و U.A. نشان‌دهنده صحت کاربر است.

جدول ۶. تغییرات مساحت (برحسب کیلومتر مربع) کاربری اراضی در سال‌های متفاوت

۱۴۰۱		۱۳۹۶		۱۳۹۲		۱۳۸۷		۱۳۸۱	
۱۲۳/۹۸	۹۹/۷۲	۷۷/۹۴	۳۲/۰۶	۲۰/۳۸	اراضی انسان‌ساخت				
۵۳۳۹/۴۱	۵۶۰۸/۷۴	۵۶۱۶/۲۵	۵۶۷۱/۶۸	۵۷۰۸/۰۱	اراضی بایر				
۶۸۶/۰۶	۵۶۴/۳۶	۶۶۱/۷۳	۵۴۸/۹۲	۶۱۰/۶۴	اراضی زراعی				
۷۹۲/۹۵	۸۲۵/۷۳	۱۱۲۴/۰۹	۷۸۶/۰۲	۵۸۷/۹۹	مرتع				
۷/۵۶	۸/۴۱	۸/۶	۱۰/۳۶	۱۱/۳۳	تالاب				
۴۳۵/۱	۴۵۳/۱۳	۴۵۵/۵۵	۶۸۱/۴۱	۷۶۵/۴	آب				

۴- بحث

۴-۱- انتقال نمونه‌های آموزشی

انتقال یافته در آستانه ۰/۱، برابر با ۹/۳٪ و در آستانه ۰/۲، برابر ۹۵/۵٪ بوده است (اختلاف ۸۶/۲ درصدی). این اختلاف در درصد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته طی سال ۱۳۸۷ برابر با ۸۶/۳٪، در سال ۱۳۹۲ برابر با ۸۶/۷٪ و در سال ۱۳۹۶، برابر با ۸۶/۸٪ بوده است. بدین ترتیب نقطه اشتراک بین کاهش محسوس در صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته و افزایش محسوس در درصد این نمونه‌ها به منزله آستانه بهینه برای انتقال نمونه‌های آموزشی در نظر گرفته شد. این آستانه بهینه، در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۷ برابر با ۱/۱، در سال ۱۳۹۲ برابر با ۱ و در سال ۱۳۹۶ برابر با ۰/۹ بود. نتایج حاصل از انتقال نمونه‌های آموزشی نشان داد، علاوه بر دو پارامتر فاصله و زاویه طیفی به منزله دو پارامتر به کاررفته در بررسی شباهت طیفی نمونه‌های آموزشی، عامل دیگری به نام زمان (اختلاف زمانی بین

براساس نتایج پژوهش می‌توان گفت، با افزایش مقدار عددی آستانه از ۰/۱ به ۲ (فاصله از میانگین)، از صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته کاسته می‌شود؛ به طوری که در سال ۱۳۸۱، صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در آستانه ۰/۱، برابر با ۹۷٪ و در آستانه ۰/۲، برابر با ۹۱/۷٪ بود. این نکته کاهش ۵/۳ درصدی در صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته بین این دو آستانه را بیان می‌کند. این اختلاف صحت در نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، در سال ۱۳۸۷ برابر با ۵/۶٪، در سال ۱۳۹۲ برابر با ۵/۷٪ و در سال ۱۳۹۶ برابر با ۶/۳٪ است. از سویی با افزایش مقدار عددی آستانه از ۰/۱ به ۰/۲، بر درصد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته افزوده می‌شود. بر این اساس در سال ۱۳۸۱، درصد نمونه‌های آموزشی

آموزشی انتقال یافته براساس پارامتر فاصله زاویه طیفی بیشتر از صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس پارامتر فاصله اقلیدسی است. بررسی صحت نمونه‌های آموزشی در هر یک از کلاس‌های کاربری نیز، براساس هر یک از این دو پارامتر، نشان می‌داد در کلاس‌هایی که اختلاف طیفی آنها با سایر کلاس‌ها بیشتر است (مانند کلاس آب)، هر دو پارامتر عملکرد نسبتاً مورد قبولی ارائه داده‌اند و میانگین صحت انتقال نمونه‌های آموزشی در کلاس آب، براساس پارامتر فاصله اقلیدسی، $0.90/4$ و براساس فاصله زاویه طیفی، $0.95/2$ بوده است. از طرفی با افزایش شباهت طیفی بین کلاس‌های کاربری گوناگون، از عملکرد پارامتر فاصله اقلیدسی کاسته شده و پارامتر فاصله زاویه طیفی عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. بر این اساس، میانگین صحت انتقال نمونه‌های آموزشی طبق پارامتر فاصله اقلیدسی در کلاس‌های اراضی انسان ساخت، اراضی بایر، مرتع، اراضی زراعی و تالاب، به ترتیب $0.86/9$ ، $0.85/7$ ، $0.82/9$ ، $0.80/4$ و $0.78/4$ و صحت انتقال نمونه‌های آموزشی در این کلاس‌ها، با استفاده از پارامتر فاصله زاویه طیفی نیز، به ترتیب $0.91/8$ ، $0.90/2$ ، $0.89/8$ ، $0.88/2$ و $0.86/3$ است. این نکته نشان می‌دهد اختلاف صحت بین نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در کلاس‌های کاربری متفاوت، با استفاده از این دو پارامتر، از $0.4/8$ در کلاس آب به $0.7/9$ در کلاس تالاب افزایش یافته است. از سویی استفاده از نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس هر دو پارامتر باعث شده است میانگین صحت این نمونه‌ها در کلاس‌های کاربری متفاوت، افزایش یابد و صحت آنها در کلاس‌های آب، اراضی انسان ساخت، اراضی بایر، مرتع، اراضی زراعی و تالاب، به ترتیب برابر با $0.99/05$ ، $0.98/02$ ، $0.96/87$ ، 0.96 ، $0.94/6$ و $0.92/35$ باشد. بررسی مقادیر صحت انتقال نمونه‌های آموزشی براساس پارامتر فاصله زاویه طیفی و استفاده مشترک از هر دو پارامتر نشان می‌دهد اختلاف صحت بین

تصاویر ماهواره‌ای) نیز تاحدودی در صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته تأثیرگذار بوده است؛ به گونه‌ای که با افزایش فاصله زمانی بین سال مرجع و هدف، از صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته مقداری کاسته می‌شود. این اختلاف در صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، در بیشترین مقدار، $0.2/4$ بود. مقایسه این نتایج با نتایج پژوهش یو^۱ و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهد، با افزایش فاصله زمانی بین دو تصویر به دلیل تغییر شرایط محیطی و شرایط تصویربرداری سنجنده، از صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته تاحدودی کاسته می‌شود. یو و همکاران (۲۰۲۲) نیز، طی پژوهشی در زمینه انتقال نمونه‌های آموزشی، به این نتیجه رسیدند که با افزایش فاصله زمانی بین سال مرجع و هدف، صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته قدری کاهش می‌یابد. یان^۲ و همکاران (۲۰۲۳) نیز با انجام دادن پژوهشی درباره انتقال نمونه‌های آموزشی به منظور تهیه نقشه پوشش زمین به صورت سری زمانی، نتیجه گرفتند که با افزایش فاصله زمانی بین سال مرجع (۲۰۲۲) و سال هدف (۱۹۸۶)، صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته دچار کاهش می‌شود. از سویی تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس فاصله اقلیدسی کمتر از تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس فاصله زاویه طیفی بوده که علت آن حساسیت نداشتن پارامتر فاصله زاویه طیفی به تغییرات سایه و روشنایی است. نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش هوانگ و همکاران (۲۰۲۰) هم خوانی دارد؛ نتایج محققان در این پژوهش نیز تعداد بیشتر نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، با استفاده از پارامتر فاصله زاویه طیفی را در قیاس با فاصله اقلیدسی، نشان می‌دهد. طبق نتایج پژوهش فن و همکاران (۲۰۲۱) نیز، تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس فاصله اقلیدسی کمتر از تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته براساس فاصله زاویه طیفی است.

بررسی صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته بر مبنای هر یک از پارامترها نشان داد صحت نمونه‌های

1. Yu
2. Yan

طیفی بیشتری با سایر کلاس‌هاست، صحت بیشتری دارد و در کلاس تالاب که نمونه‌های آن با نمونه‌های دیگر کلاس‌ها، مانند آب و پوشش گیاهی، از لحاظ طیفی تاحدودی شباهت دارند، صحت کمتری را نشان می‌دهد. بر این اساس، می‌توان گفت برای دستیابی به حداکثر صحت در این روش، بهتر است کلاس‌های کاربری اختلاف طیفی زیادی با یکدیگر داشته باشند و این شیوه، در کلاس‌هایی با بازتاب‌های طیفی مشابه، دچار کاهش صحت خواهد شد. افزایش صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، در کلاس‌های کاربری متفاوت، باعث می‌شود صحت تصاویر طبقه‌بندی شده نیز تحت تأثیر صحت نمونه‌های آموزشی انتقال یافته قرار بگیرد. این موضوع در نتایج پژوهش هوانگ و همکاران (۲۰۲۰) نیز مشخص شده است؛ به گونه‌ای که صحت بالای نمونه آموزشی انتقال یافته در کلاس آب باعث شده این کلاس، در تصاویر طبقه‌بندی شده نیز، صحت تولیدکننده و کاربر بیشتری داشته باشد. از سویی صحت کمتر نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، در کلاس تالاب، باعث شده است در تصاویر طبقه‌بندی شده نیز این کلاس دارای صحت تولیدکننده و کاربر کمتری باشد.

۲-۴- طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

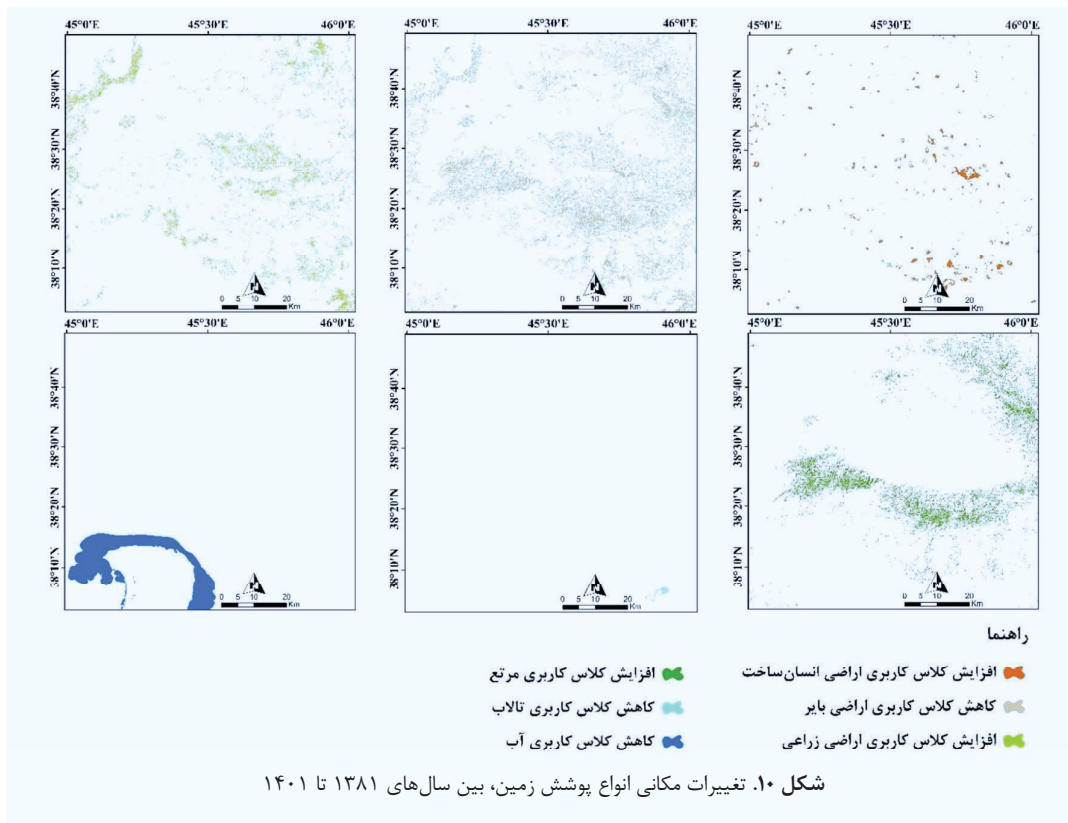
پایش تغییرات پوشش زمین، بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱، (شکل ۱۰) نشان داد روند تغییرات مساحت کلاس کاربری اراضی بایر کاهشی بوده و مساحت آن ۳۶۸/۶ کیلومتر مربع کاهش یافته است. بیشتر این تغییرات ناشی از گسترش اراضی انسان‌ساخت (مناطق شهری) و تبدیل اراضی بایر به اراضی انسان‌ساخت است. برای نمونه، در بخش شرقی، شمالی و شمال شرق دریاچه ارومیه شاهد گسترش مناطق شهری، از جمله شهرهای شبستر، تسوج و مرند، طی این بازه زمانی بیست‌ساله هستیم. از سویی برخی بخش‌های اراضی بایر (اغلب مناطق واقع در بخش‌های شمالی دریاچه ارومیه) نیز، طی این بازه زمانی، به مرتع و اراضی زراعی تبدیل شده که یکی از علت‌های آن توسعه اراضی کشاورزی

نمونه‌های آموزشی انتقال یافته، درحالی که فقط پارامتر فاصله زاویه طیفی به کار می‌رود و استفاده مشترک از هر دو پارامتر در کلاس‌های کاربری متفاوت، به صورت میانگین ۵/۸۹٪ است؛ بر این مبنای می‌توان گفت اگرچه استفاده مشترک از هر دو پارامتر باعث افزایش صحت انتقال نمونه‌ها شده است، به کاربردن صرفاً پارامتر فاصله زاویه طیفی نیز دارای عملکرد مناسبی بوده است و می‌توان از آن، به‌منزله پارامتری مناسب برای انتقال نمونه‌های آموزشی، بهره برد.

بررسی تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته در کلاس‌های کاربری متفاوت نشان داد کلاس آب بیشترین تعداد و کلاس تالاب کمترین تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته را دارند. این مسئله ممکن است تاحدی ناشی از اختلاف طیفی کمتر بین پیکسل‌های گوناگون کلاس آب و مساحت نسبتاً بیشتر این کلاس، در قیاس با دیگر کلاس‌های کاربری باشد. مقایسه این نتایج با نتایج پژوهش هوانگ و همکاران (۲۰۲۰) این موضوع را تأیید می‌کند؛ نتایج این مقاله نیز نشان داد کلاس‌های جنگل و آب بیشترین تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته را دارند و کلاس تالاب دارای کمترین تعداد نمونه‌هاست. مطالعه یو و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داده است کلاس تالاب کمترین تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته را داشته است. در این پژوهش، نقشه جهانی پوشش زمین با استفاده از انتقال نمونه‌های آموزشی تهیه شد و نتایجی که این محققان به دست آوردند نشان داد کلاس تالاب، در بین کلاس‌های گوناگون، دارای کمترین تعداد نمونه‌های آموزشی انتقال یافته بوده است. بررسی صحت این نمونه‌های آموزشی، در کلاس‌های کاربری متفاوت، نیز گویای آن بود که نمونه‌های مورد نظر در کلاس آب دارای بیشترین صحت و نمونه‌های کلاس تالاب دارای کمترین صحت بودند. در روش انتقال نمونه‌های طیفی، مبنای اصلی انتقال نمونه‌ها تفاوت طیفی بین نمونه‌های کلاس‌های گوناگون است؛ با توجه به این نکته، این روش در کلاس آب که نمونه‌های آن دارای تفاوت

بیانگر افزایش ۱۰۳/۶ کیلومترمربعی این کلاس کاربری است. توسعه شهری، به ویژه در بخش‌های شرقی، شمالی و شمال شرق دریاچه ارومیه عامل اصلی افزایش اراضی انسان‌ساخت طی بازه زمانی اشاره شده در منطقه مورد مطالعه بوده است. روند تغییرات کلاس کاربری مرتع، در این بازه زمانی، افزایشی بوده و مساحت آن طی بیست سال، ۲۰۴/۹۶ کیلومترمربع افزایش یافته است. این افزایش بیشتر در مراتع واقع در رشته کوه‌های میشو (بخش‌های شمالی دریاچه ارومیه، مرز بین شهرستان‌های مرنده و شبستر) رخ داده است. افزون‌براین روند تغییرات کلاس اراضی زراعی، در این مدت، افزایشی و مقدار این افزایش ۷۵/۴۲ کیلومترمربع بوده و اغلب در اراضی زراعی واقع در شهرستان مرنده رخ داده است.

در حوضه دریاچه ارومیه، طی بازه زمانی مورد نظر است. بررسی تغییرات کلاس کاربری آب، در این بازه زمانی، گویای کاهش ۳۳۰/۳ کیلومترمربعی این کلاس کاربری است. این کاهش مساحت در سه جهت شمال، غرب و شرق دریاچه ارومیه رخ داده است. کاهش مساحت این دریاچه می‌تواند باعث ایجاد مشکلات گوناگون محیط‌زیستی در منطقه شود که از مهم‌ترین آنها می‌توان به از بین رفتن زیستگاه‌های طبیعی و تالاب‌ها اشاره کرد. بیشتر تالاب‌های منطقه در بخش شرقی دریاچه قرار گرفته‌اند و کاهش ۳/۷۷ کیلومترمربعی مساحت کلاس تالاب در این بازه زمانی را نیز می‌توان از پیامدهای جانبی کاهش مساحت آبی دریاچه ارومیه دانست. بررسی تغییرات مساحت کلاس کاربری اراضی انسان‌ساخت، در بازه زمانی مورد اشاره،



زمین را پایش کرد. از آنجاکه تهیه نمونه‌های آموزشی معتبر، در بازه‌های زمانی متفاوت و مناطق مطالعاتی دارای وسعت نسبتاً زیاد کار دشواری است، روش انتقال نمونه‌های آموزشی برای تهیه نمونه‌های آموزشی در چنین مواقعی، مناسب شمرده می‌شود و با استفاده از آن می‌توان صحت نقشه‌های نهایی پوشش زمین را تاحدی بهبود بخشید.

۵- نتیجه‌گیری

اطلاعات دقیق و بهنگام از نوع پوشش زمین از پارامترهای اساسی در مطالعات و مدل‌سازی‌های محیطی محسوب می‌شود. باین حال کمبود نمونه‌های آموزشی، در بازه‌های زمانی متفاوت، موجب می‌شود بهره‌برداری مؤثر از الگوریتم‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده، در طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و تهیه نقشه پوشش زمین به صورت سری زمانی، به راحتی امکان‌پذیر نباشد. در این پژوهش، با استفاده از روش انتقال نمونه‌های آموزشی، نمونه‌های آموزشی باکیفیت برای کلاس‌های کاربری متفاوت، در بازه‌های زمانی گوناگون ایجاد شد. سپس با استفاده از نمونه‌های آموزشی تهیه‌شده در سال ۱۴۰۱ برای شش کلاس کاربری متفاوت، نمونه‌های آموزشی باکیفیت درمورد سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۲، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۱ انتقال یافت و تهیه شد. بدین منظور از دو پارامتر فاصله اقلیدسی و فاصله زاویه طیفی استفاده شد. براساس نتایج، پارامتر فاصله زاویه طیفی در انتقال نمونه‌های آموزشی، عملکردی بهتر از فاصله اقلیدسی دارد و استفاده هم‌زمان از این دو باعث افزایش صحت در انتقال نمونه‌های آموزشی می‌شود. نتایج ارزیابی صحت نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته در کلاس‌های کاربری متفاوت نشان داد نمونه‌های آموزشی انتقال‌یافته در کلاس‌های آب، اراضی انسان‌ساخت، اراضی بایر، مرتع، اراضی زراعی و تالاب، به ترتیب،

مقایسه نتایج این پژوهش در زمینه تغییرات کاربری پوشش زمین، با مطالعات مشابهی که در منطقه مورد مطالعه انجام شده است، افزایش اراضی زراعی در منطقه را تأیید می‌کند. نتایج پژوهش نبوره^۱ و همکاران (۲۰۲۱) بیان می‌کند، بین سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۰، مساحت اراضی زراعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه افزایش یافته و از مساحت آب‌های سطحی کاسته شده است. این محققان نتیجه گرفته‌اند که افزایش اراضی زراعی آبی و مدیریت ناصحیح منابع آب عامل اصلی ایجاد این شرایط در منطقه بوده است. همچنین پژوهش فیضی‌زاده^۲ و همکاران (۲۰۲۲)، درباره تغییرات پوشش زمین در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان می‌دهد روند کلی تغییرات مساحت این دریاچه، بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰، کاهش بوده و بیشترین مساحت دریاچه در سال ۱۹۹۵ و کمترین مساحت آن در سال ۲۰۱۵ به ثبت رسیده است. به علاوه، در این بازه زمانی، مساحت اراضی زراعی در منطقه افزایش داشته است. نتایج پژوهش محققان این مقاله نیز بیان می‌کند مساحت اراضی شهری در منطقه افزایش و مساحت تالاب‌ها کاهش یافته است. در نهایت، محققان بیان کرده‌اند که با ادامه روند فعلی، این در منطقه در سال ۲۰۵۰ با کاهش شدید منابع آب مواجه و امنیت غذایی آن دچار خطر جدی خواهد شد.

بررسی نتایج پایش تغییرات پوشش زمین نشان داد، در حالت کلی، نتایج این پژوهش هم‌سو با سایر پژوهش‌های انجام‌شده در منطقه مورد مطالعه است و نقشه‌های تهیه‌شده دارای صحت مناسب‌اند. با توجه به اینکه نمونه‌های آموزشی معتبر، در کنار تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های طبقه‌بندی، سه پارامتر اساسی تأثیرگذار در صحت تصاویر ماهواره‌ای طبقه‌بندی‌شده به‌شمار می‌روند، می‌توان گفت تهیه نمونه‌های آموزشی معتبر، با استفاده از روش انتقال نمونه‌های آموزشی باعث شده است نقشه‌های پوشش زمین تهیه‌شده در منطقه مورد مطالعه دارای صحت مناسبی باشند و براساس آنها بتوان تغییرات پوشش

1. Naboureh
2. Feizizadeh

- Breiman, L., 2001, **Random Forests**, Machine Learning, 45, PP. 5-32, <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Calderón-Loor, M., Hadjikakou, M. & Bryan, B.A., 2021, **High-Resolution wall-to-Wall Land-Cover Mapping and Land Change Assessment for Australia from 1985 to 2015**, Remote Sensing of Environment, 252, PP. 112148-112163, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112148>.
- Chaaban, F., El Khattabi, J. & Darwishe, H., 2022, **Accuracy Assessment of ESA WorldCover 2020 and ESRI 2020 Land Cover Maps for a Region in Syria**, Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, 6(2), PP. 31-49, <https://doi.org/10.1007/s41651-022-00126-w>.
- Chen, Q., Zhong, C., Jing, C., Li, Y., Cao, B. & Cheng, Q., 2021, **Rapid Mapping and Annual Dynamic Evaluation of Quality of Urban Green Spaces on Google Earth Engine**, ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(10), PP. 670-699, <https://doi.org/10.3390/ijgi10100670>.
- Congalton, R.G., Gu, J., Yadav, K., Thenkabail, P. & Ozdogan, M., 2014, **Global Land Cover Mapping: A Review and Uncertainty Analysis**, Remote Sensing, 6(12), PP. 12070-12093, <https://doi.org/10.3390/rs61212070>.
- Ebrahimi, H., Mirbagheri, B., Matkan, A.A. & Azadbakht, M., 2021, **Per-Pixel Land Cover Accuracy Prediction: A Random Forest-Based Method with Limited Reference Sample Data**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 172, PP. 17-27, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.11.024>.
- Feizizadeh, B., Lakes, T., Omarzadeh, D., Sharifi, A., Blaschke, T. & Karimzadeh, S., 2022, **Scenario-Based Analysis of the Impacts of Lake Drying on Food Production in the Lake Urmia Basin of Northern Iran**, Scientific reports, 12(1), PP. 6237-6253, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10159-2>.

بیشترین صحت در نمونه‌های آموزشی انتقال یافته را داشتند. همچنین برطبق نتایج، هریک از باندهای طیفی تصویر لندست در انتقال نمونه‌های آموزشی کلاس‌های کاربری گوناگون، عملکرد متفاوتی دارند. نتایج این پژوهش گویای آن است که روش انتقال نمونه‌های آموزشی، در تولید نمونه‌های آموزشی باکیفیت برای کلاس‌های کاربری گوناگون و طی بازه‌های زمانی متفاوت، شیوه‌ای کارآمد محسوب می‌شود. بر این اساس، روش انتقال نمونه‌های آموزشی موجب می‌شود بررسی تغییرات پوشش زمین، با استفاده از طبقه‌بندی سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای، با صحت و امکان اطمینان بیشتری انجام شود. به‌رغم نتایج مطلوب در این پژوهش، استفاده از نمونه‌های زمینی گردآمده از طریق تصاویر گوگل ارث را می‌توان از محدودیت‌های این پژوهش به‌شمار آورد. استفاده از این تصاویر، با توجه به اختلاف قدرت تفکیک مکانی زیاد با تصاویر لندست و همچنین خطاهای احتمالی در زمینه تفکیک کلاس‌ها، می‌تواند عدم قطعیت‌هایی را وارد پژوهش کند. در تحقیقات آتی، می‌توان این موضوع را مدنظر قرار داد و برای پاسخ به این مسئله، رویکردهایی مطرح کرد. پیشنهاد می‌شود، در مطالعات آتی، سایر تصاویر ماهواره‌ای (از جمله تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲) نیز به‌منظور انتقال نمونه‌های آموزشی، به‌کار رود تا تأثیر باندهای طیفی و تصاویر ماهواره‌ای متفاوت در انتقال نمونه‌های آموزشی ارزیابی شود. همچنین بررسی اثربخشی روش انتقال نمونه‌های آموزشی در انتقال نمونه‌های آموزشی سایر پوشش‌های زمینی می‌تواند از جمله موضوعات پژوهشی در مطالعات بعدی محسوب شود.

۶- منابع

- Arabacı, D. & Kuşçu Şimşek, Ç., 2023, **Prediction of Climatic Changes Caused by Land Use Changes in Urban Area Using Artificial Neural Networks**, Theoretical and Applied Climatology, 152(2), PP. 265-279, <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04386-4>.

- Fonji, S.F. & Taff, G.N., 2014, **Using Satellite Data to Monitor Land-Use Land-Cover Change in North-Eastern Latvia**, Springerplus, 3, PP. 1-15, <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-61>.
- Friedl, M.A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A. & Huang, X., 2010, **MODIS Collection 5 Global Land Cover: Algorithm Refinements and Characterization of New Datasets**, Remote Sensing of Environment, 114(1), PP. 168-182, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>.
- Fritz, S., See, L., Perger, C., McCallum, I., Schill, C., Schepaschenko, D. et al., 2017, **A Global Dataset of Crowdsourced Land Cover and Land Use Reference Data**, Scientific Data, 4(1), PP. 1-8, <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.75>.
- Ghorbanian, A., Kakooei, M., Amani, M., Mahdavi, S., Mohammadzadeh, A. & Hasanlou, M., 2020, **Improved Land Cover Map of Iran Using Sentinel Imagery within Google Earth Engine and a Novel Automatic Workflow for Land Cover Classification Using Migrated Training Samples**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 167, PP. 276-288, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.07.013>.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. & Moore, R., 2017, **Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone**, Remote Sensing of Environment, 202, PP. 18-27, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Huang, H., Wang, J., Liu, C., Liang, L., Li, C. & Gong, P., 2020, **The Migration of Training Samples towards Dynamic Global Land Cover Mapping**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 161, PP. 27-36, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.01.010>.
- Li, C., Ma, Z., Wang, L., Yu, W., Tan, D., Gao, B. et al., 2021, **Improving the Accuracy of Land Cover Mapping by Distributing Training Samples**, Remote Sensing, 13(22), PP. 4594-4607, <https://doi.org/10.3390/rs13224594>.
- Li, J., Wang, J., Zhang, J., Liu, C., He, S. & Liu, L., 2022, **Growing-Season Vegetation Coverage Patterns and Driving Factors in the China-Myanmar Economic Corridor Based on Google Earth Engine and Geographic Detector**, Ecological Indicators, 136, PP. 108620-108635, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108620>.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E. & Moran, E., 2004, **Change Detection Techniques**, International Journal of Remote Sensing, 25(12), PP. 2365-2401, <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>.
- Murray, N.J., Worthington, T.A., Bunting, P., Duce, S., Hagger, V., Lovelock, C.E. et al., 2022, **High-Resolution Mapping of Losses and Gains of Earth's Tidal Wetlands**, Science, 376(6594), PP. 744-749, <https://doi.org/10.1126/science.abm9583>.
- Naboureh, A., Li, A., Ebrahimi, H., Bian, J., Azadbakht, M., Amani, M. et al., 2021, **Assessing the Effects of Irrigated Agricultural Expansions on Lake Urmia Using Multi-Decadal Landsat Imagery and a Sample Migration Technique within Google Earth Engine**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 105, PP. 102607-102618, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102607>.
- Nedd, R., Light, K., Owens, M., James, N., Johnson, E. & Anandhi, A., 2021, **A Synthesis of Land Use/Land Cover Studies: Definitions, Classification Systems, Meta-Studies, Challenges and Knowledge Gaps on a Global Landscape**, Land, 10(9), PP. 994-1024, <https://doi.org/10.3390/land10090994>.
- Nian, Y., He, Z., Zhang, W. & Chen, L., 2023, **Land Cover Changes of the Qilian Mountain National Park in Northwest China Based on Phenological Features and Sample Migration from 1990 to 2020**, Remote Sensing, 15(4), PP. 1074-1097, <https://doi.org/10.3390/rs15041074>.
- Olofsson, P., Foody, G.M., Herold, M., Stehman, S.V., Woodcock, C.E. & Wulder, M.A.,

- 2014, **Good Practices for Estimating Area and Assessing Accuracy of Land Change**, Remote Sensing of Environment, 148, PP. 42-57, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>.
- Padial-Iglesias, M., Serra, P., Ninyerola, M. & Pons, X., 2021, **A Framework of Filtering Rules over Ground Truth Samples to Achieve Higher Accuracy in Land Cover Maps**, Remote Sensing, 13(14), PP. 2662-2698, <https://doi.org/10.3390/rs13142662>.
- Patra, S., Ghosh, S. & Ghosh, A., 2011, **Histogram Thresholding for Unsupervised Change Detection of Remote Sensing Images**, International Journal of Remote Sensing, 32(21), PP. 6071-6089, <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.507793>.
- Phan, D.C., Trung, T.H., Truong, V.T., Sasagawa, T., Vu, T.P.T., Bui, D.T. et al., 2021, **First Comprehensive Quantification of Annual Land Use/Cover from 1990 to 2020 across Mainland Vietnam**, Scientific Reports, 11(1), PP. 1-20, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89034-5>.
- Radoux, J., Lamarche, C., Van Bogaert, E., Bontemps, S., Brockmann, C. & Defourny, P., 2014, **Automated Training Sample Extraction for Global Land Cover Mapping**, Remote Sensing, 6(5), PP. 3965-3987, <https://doi.org/10.3390/rs6053965>.
- Rodriguez-Galiano, V.F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M. & Rigol-Sanchez, J.P., 2012, **An Assessment of the Effectiveness of a Random Forest Classifier for Land-Cover Classification**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 67, PP. 93-104, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>.
- Rujoiu-Mare, M.R. & Mihai, B.A., 2016, **Mapping Land Cover Using Remote Sensing Data and GIS Techniques: A Case Study of Prahova Subcarpathians**, Procedia Environmental Sciences, 32, PP. 244-255, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.029>.
- Som-ard, J., Immitzer, M., Vuolo, F., Ninsawat, S. & Atzberger, C., 2022, **Mapping of Crop Types in 1989, 1999, 2009 and 2019 to Assess Major Land Cover Trends of the Udon Thani Province, Thailand**, Computers and Electronics in Agriculture, 198, PP. 107083-107098, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107083>.
- Steinhausen, M.J., Wagner, P.D., Narasimhan, B. & Waske, B., 2018, **Combining Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Improved Land Use and Land Cover Mapping of Monsoon Regions**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 73, PP. 595-604, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.011>.
- Strahler, A.H., Boschetti, L., Foody, G.M., Friedl, M.A., Hansen, M.C., Herold, M. et al., 2006, **Global Land Cover Validation: Recommendations for Evaluation and Accuracy Assessment of Global Land Cover Maps**, European Communities, 51(4), PP. 1-60.
- Varga, K., Szabó, S., Szabó, G., Dévai, G. & Tóthmérész, B., 2014, **Improved Land Cover Mapping Using Aerial Photographs and Satellite Images**, Open Geosciences, 7(1), PP. 15-26, <https://doi.org/10.1515/geo-2015-0002>.
- Wang, H., Liu, Y., Wang, Y., Yao, Y. & Wang, C., 2023, **Land Cover Change in Global Drylands: A Review**, Science of The Total Environment, 863, PP. 160943-160956, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160943>.
- Yan, X. & Niu, Z., 2021, **Reliability Evaluation and Migration of Wetland Samples**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14, PP. 8089-8099, <https://doi.org/10.1109/jstars.2021.3102866>.
- Yan, X., Li, J., Smith, A.R., Yang, D., Ma, T. & Su, Y., 2023, **Rapid Land Cover Classification Using a 36-Year Time Series of Multi-Source Remote Sensing Data**, Land, 12, PP. 2149-2163, <https://doi.org/10.3390/land12122149>.
- Yang, C. & Everitt, J.H., 2012, **Using Spectral Distance, Spectral Angle and Plant**

- Abundance Derived from Hyperspectral Imagery to Characterize Crop Yield Variation**, Precision Agriculture, 13, PP. 62-75, <https://doi.org/10.1007/s11119-011-9248-z>.
- Yu, L., Du, Z., Dong, R., Zheng, J., Tu, Y., Chen, X. et al., 2022, **FROM-GLC Plus: Toward Near Real-Time and Multi-Resolution Land Cover Mapping**, GIScience & Remote Sensing, 59(1), PP. 1026-1047, <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2096184>.
- Zhu, Z., 2017, **Change Detection Using Landsat Time Series: A Review of Frequencies, Preprocessing, Algorithms, and Applications**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 130, PP. 370-384, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>.
- Zhu, Q., Wang, Y., Liu, J., Li, X., Pan, H. & Jia, M., 2021, **Tracking Historical Wetland Changes in the China Side of the Amur River Basin Based on Landsat Imagery and Training Samples Migration**, Remote Sensing, 13(11), PP. 2161-2176, <https://doi.org/10.3390/rs13112161>.