



DOI: 10.22092/im.2019.120090

تاریخ دریافت ۱۴۰۵/۰۲/۳۱
تاریخ پذیرش ۱۴۰۵/۰۷/۱۹

چالش‌های تعیین موقعیت نمونه‌های آموزشی توده‌های خالص جنگلی و بازیابی آن بر تصاویر ماهواره‌ای

رمضانعلی خرمی^{۱*}، زهرا نعیمی^۲، محمد حجازیان^۳ و مجتبی ایمانی راستایی^۴

چکیده

شناسایی دقیق گونه‌های درختی، یکی از ارکان اساسی مدیریت پایدار جنگل، حفاظت از تنوع زیستی و پایش اکولوژیکی است. در این فرایند، نمونه‌های آموزشی، نقش تعیین‌کننده‌ای در یادگیری الگوریتم‌های طبقه‌بندی دارند و کیفیت آن‌ها تأثیر مستقیمی بر دقت شناسایی و طبقه‌بندی پدیده‌ها در تصاویر ماهواره‌ای دارد. در پژوهش «هوشمندسازی تشخیص راش شرقی»، توده‌های خالص راش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و بر مبنای طبقه‌بندی در سطح پیکسل شناسایی شدند. برای این منظور، قطعه‌نمونه‌های زمینی به صورت مربع و با اضلاعی تقریباً موازی با اضلاع پیکسل‌های تصاویر سنتینل-۲، طراحی و برداشت شدند. با این حال، به دلیل خطاهای تعیین موقعیت سامانه GPS و خطاهای هندسی تصاویر، مراکز قطعه‌نمونه‌ها هنگام انتقال به تصاویر ماهواره‌ای معمولاً بر مراکز پیکسل‌های متناظر منطبق نمی‌شدند، موضوعی که می‌توانست موجب کاهش خلوص نمونه‌های آموزشی و در نتیجه کاهش دقت طبقه‌بندی شود. از این رو، نمونه‌های آموزشی به گونه‌ای انتخاب شدند که افزون بر قطعه‌نمونه مرکزی، هشت قطعه‌نمونه مجاور آن نیز از نظر ترکیب گونه‌ای، کاملاً همگن و متعلق به توده خالص راش باشند. همچنین، ابعاد قطعه‌نمونه‌ها بین ۴۰ تا ۶۰ متر در نظر گرفته شد تا حتی در صورت بروز خطاهای مکانی، پیکسل متناظر همچنان نماینده یک توده خالص راش باقی بماند.

واژه‌های کلیدی: نمونه آموزشی، پیکسل‌های ماهواره‌ای، راش، سنتینل-۲

Challenges in determining the location of training samples of pure forest stands and their recovery on satellite images

R. A. Khorami^{1*}, Z. Naemi², M. Hejzian³, M. Imani Rastaei⁴

Abstract

In remote sensing, any square sample plot with sides parallel to satellite pixels and dimensions proportional to the image's spatial resolution, which is collected on the ground from forest stands (such as a pure beech stand), can be used as a training sample in discrimination and classification analysis. The position of the center of the said sample plot is usually recorded using a handheld GPS. Factors such as (1) spatial mismatch between the center of the sample plot and the center of the corresponding satellite pixel, (2) GPS error, and (3) image displacement cause the center of the sample plot collected in the forest not to necessarily coincide with its actual location on the image. To ensure that the nature of the training sample does not change during the relocation of the ground sample plot center on the image and the extraction of spectral values, or during the process of detecting phenomena in remote sensing images, it is necessary that the phenomenon present in its eight neighboring plots also be homogeneous and similar to that of the central plot. Accordingly, the spectral values extracted from a single band for the training sample plot and the eight neighboring pixels belonging to pure beech are largely similar. To reduce the error of pixel displacement relative to the actual location of ground features, using satellite images with high spatial resolution is an effective strategy, because the pixel size is smaller and alignment with ground features is performed more accurately.

Keywords: training sample, satellite pixels, Sentinel-2, beech

*- نویسنده مسئول، استادیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران. پست الکترونیک: khorami20166@gmail.com

۲- گروه فیزیک دانشگاه تهران

۳- رئیس طرح و برنامه اداره کل منابع طبیعی مازندران، ساری

۴- کارشناس پژوهش، بخش تحقیقات جنگل و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران

1*-Corresponding author, Assistant Professor, Research Division of Forests and Rangelands Research Department, Mazandaran Agricultural Research, Education and Extension Organization, Sari, Iran. E-mail: khorami20166@gmail.com

2- Physics Department, University of Tehran

3- Mazandaran General Office of Natural Resources and Watershed Management

4- Research Division of Forests and Rangelands Research Department, Mazandaran Agricultural Research, Education and Extension Organization, Sari, Iran



● مقدمه

یکی از مؤلفه‌های بنیادین که نتایج هوشمندسازی تشخیص پدیده‌ها در تصاویر سکوها فضای به آن وابسته است، تعیین دقیق موقعیت مکانی پدیده‌ها بر سطح زمین و امکان بازیابی آن‌ها در تصاویر است. تعیین موقعیت دقیق یک نقطه یا محدوده چندضلعی متناظر با یک پدیده، به‌عنوان نمونه آموزشی، این امکان را فراهم می‌آورد که موقعیت آن پدیده در تصاویر ماهواره‌ای شناسایی و مقادیر طیفی متناظر با آن استخراج شود و در تحلیل‌های تشخیصی به کار رود (Lillesand et al., 2015).

نمونه‌های آموزشی از ارکان اصلی یادگیری الگوریتم‌های طبقه‌بندی‌کننده به‌شمار می‌روند و در فرایند تفکیک، شناسایی و طبقه‌بندی پدیده‌ها در تصاویر ماهواره‌ای نقشی محوری دارند. به‌عبارت دیگر، این نمونه‌ها مبنای آموزش الگوریتم‌های طبقه‌بندی را تشکیل می‌دهند و الگوریتم‌های نظارت‌شده بر پایه آن‌ها، رابطه میان مقادیر طیفی پیکسل‌ها و پدیده‌های واقعی سطح زمین را مشخص می‌سازند (Lillesand et al., 2015). نمونه‌های آموزشی به الگوریتم کمک می‌کنند تا مرز میان طبقات را بیاموزد، ویژگی‌های تفکیک‌کننده را استخراج کند و درنهایت، هر پیکسل یا ناحیه را به طبقه مناسب نسبت دهد. به بیان ساده، چنانچه داده‌های آموزشی، کیفیت لازم را نداشته باشند، نتایج طبقه‌بندی نیز قابل اعتماد نخواهد بود (Congalton and Green, 2019). درواقع، الگوریتم‌های طبقه‌بندی‌کننده از طریق همین نمونه‌ها می‌آموزند که هر الگوی طیفی و مکانی به کدام پدیده تعلق دارد. نمونه آموزشی به الگوریتم نشان می‌دهد، هر پدیده چه میزان بازتاب در باندهای مختلف طیفی دارد، دارای چه الگوی مکانی و بافتی است و تفاوت آن با طبقات مشابه در چیست (Richards and Jia, 2006). برای نمونه، مقدار بازتاب طیفی آب معمولاً در باندهای مادون قرمز کم است، درحالی‌که پوشش گیاهی و توده‌های راش خالص در مادون قرمز نزدیک، بازتاب طیفی بسیار زیادی دارند، اما مناطق انسان‌ساخت دارای الگوهای طیفی و بافتی متمایزی هستند (Jensen, 2016). بنابراین، نمونه‌های آموزشی

مبنای شکل‌گیری مدل تصمیم‌گیری به‌شمار می‌روند. هرچه این نمونه‌های نماینده، دقیق‌تر و از نظر مکانی خالص‌تر باشند، توانایی مدل در شناسایی پدیده‌هایی مانند توده‌های خالص راش، آب، خاک و مناطق انسان‌ساخت، افزایش خواهد یافت (Li et al., 2020). این نمونه‌ها به مدل می‌آموزند که هر پدیده زمینی چه ویژگی‌های طیفی، بافتی و مکانی دارد تا بتواند آن را از سایر پدیده‌ها تفکیک کند.

تطابق میان نمونه زمینی و پیکسل متناظر در تصویر ماهواره‌ای، یکی از الزامات اساسی در فرایند نمونه‌برداری و طبقه‌بندی تصاویر سنجنش‌ازدور به‌شمار می‌رود (Lillesand et al., 2015)، زیرا هر پیکسل نماینده بخش مشخصی از سطح زمین است. اگر موقعیت نمونه زمینی با پیکسل متناظر به‌درستی منطبق نباشد یا ناحیه موردنظر با پدیده هدف همخوانی نداشته باشد، برچسب نادرست به پیکسل اختصاص می‌یابد و درنتیجه، فرایند آموزش مدل بر مبنای داده‌های نامعتبر انجام می‌شود که این امر به‌طور مستقیم موجب افت دقت یادگیری می‌شود (Gao et al., 2023). برای مثال، چنانچه نقطه‌ای به‌عنوان مرتع انتخاب شود، اما پیکسل متناظر در تصویر شامل بخشی از جاده، ساختمان یا ناحیه مرزی میان دو طبقه باشد، آن پیکسل برچسبی نادرست دریافت خواهد کرد. از این رو، هر نمونه آموزشی باید نماینده دقیق پدیده‌ای باشد که هدف طبقه‌بندی قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه، اگر نمونه زمینی از توده خالص راش برداشت شود، اما پیکسل متناظر در تصویر ماهواره‌ای به‌جای آن بخشی از گونه‌های دیگر، رودخانه یا جاده را نمایش دهد، الگوریتم بر پایه اطلاعاتی ناصحیح آموزش خواهد دید. چنین عدم‌انطباقی موجب ورود نمونه‌های نامعتبر به فرایند یادگیری می‌شود و درنهایت دقت طبقه‌بندی نهایی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. افزون‌براین، در نواحی مرزی یا پیکسل‌های مختلط، ممکن است ارزش طیفی ثبت‌شده حاصل ترکیب بازتاب چندین پدیده باشد، درنتیجه، مقدار ثبت‌شده دیگر معرف یک پوشش منفرد نخواهد بود (خرمی و همکاران، ۱۴۰۳). از سوی دیگر، در صورت نبود تصحیح هندسی یا ژئورفرنس دقیق تصویر، انطباق مکانی میان قطعه‌نمونه زمینی و پیکسل متناظر مخدوش و کل فرایند نمونه‌برداری با خطا مواجه می‌شود (Jensen, 2016). بنابراین،

دقت مکانی، خلوص و یکنواختی نمونه‌های آموزشی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در موفقیت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای به‌شمار می‌آیند و کیفیت نهایی طبقه‌بندی در سنجنش‌ازدور به‌طور مستقیم به کیفیت همین نمونه‌ها وابسته است (Congalton and Green, 2019). برای نمونه، در یک فریم تصویر ماهواره‌ای سنیتل ۲ با توان تفکیک مکانی ۲۰ متر، بیش از ۲۰ میلیون پیکسل وجود دارد که تعیین ماهیت هر یک از این پیکسل‌ها کاملاً وابسته به تعداد بسیار محدودی از نمونه‌های آموزشی است. براین اساس، نمونه زمینی باید تا حد امکان خالص، یکنواخت و منطبق با پیکسل متناظر باشد تا نتایج حاصل از طبقه‌بندی از اعتبار و دقت لازم برخوردار شود. به‌طور خلاصه می‌توان گفت، عواملی نظیر عدم انطباق مکانی مرکز قطعه‌نمونه با مرکز پیکسل متناظر ماهواره‌ای، خطای جی‌پی‌اس و جابه‌جایی تصویر موجب می‌شوند، مرکز قطعه‌نمونه برداشت‌شده در جنگل لزوماً بر موقعیت واقعی خود در تصویر منطبق نباشد.

تصویر ماهواره‌ای در حقیقت بازنمایی رقومی از سطح زمین است که به‌وسیله سنجنده‌های نصب‌شده بر ماهواره‌ها ثبت می‌شود. واژه پیکسل از ترکیب دو واژه Picture و Element تشکیل شده است و به کوچک‌ترین جزء سازنده یک تصویر رقومی اشاره دارد (Gonzalez and Woods, 2018). از این منظر، تصویر رقومی شبکه‌ای از میلیون‌ها واحد رقومی و رنگی است که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند تا یک کل معنادار (مانند یک درخت) را شکل دهند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های تصاویر ماهواره‌ای، توان تفکیک مکانی آن‌هاست که بیان می‌کند هر پیکسل چه مساحتی از سطح زمین را پوشش می‌دهد، به‌بیان دیگر، هر پیکسل نماینده یک ناحیه مشخص روی زمین است. پیکسل‌ها در قالب ساختاری شبکه‌ای و موزائیکی (Grid) در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و راستای آن‌ها تقریباً با جهت‌های شمال-جنوب و شرق-غرب جغرافیایی منطبق است (شکل ۱-الف و ب). برای نمونه، اگر توان تفکیک مکانی یک تصویر ۱۰ متر باشد، هر پیکسل در آن تصویر، نماینده ناحیه ۱۰×۱۰ متر بر سطح زمین خواهد بود. ماهواره‌های مختلف، تصاویر با توان تفکیک مکانی متفاوتی تولید می‌کنند، به‌گونه‌ای که

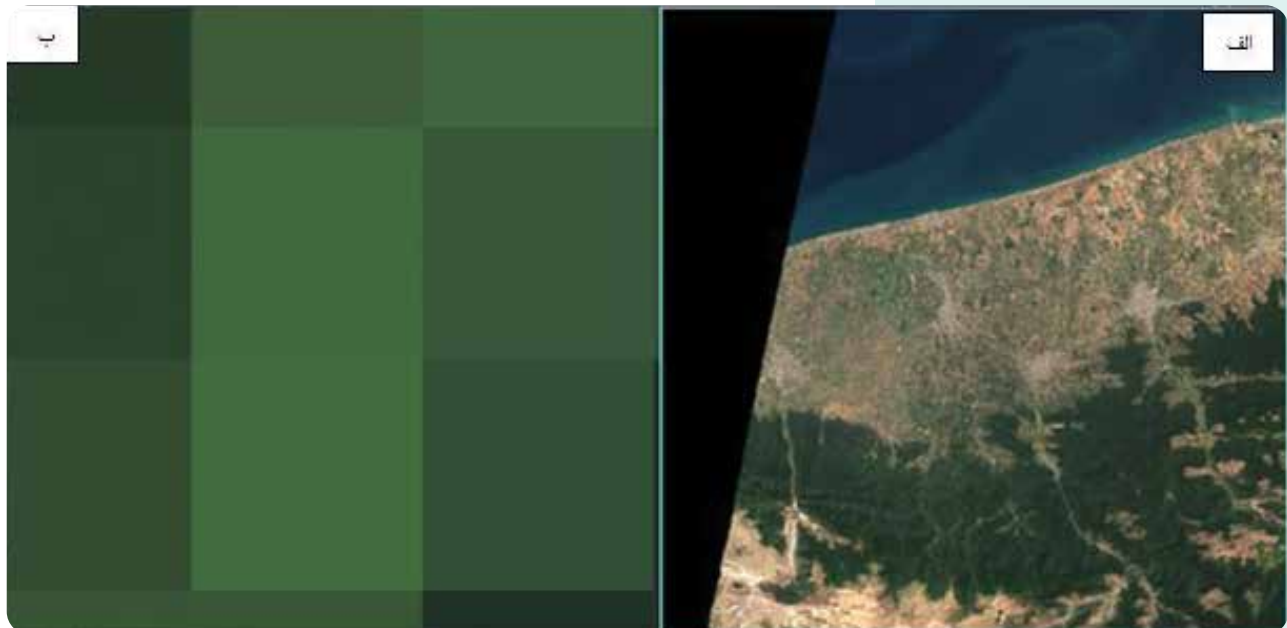
WorldView-3، Sentinel-2، Landsat و MODIS به ترتیب تصاویری را با تفکیک مکانی حدود ۳۰/۱۰ متر، ۱۰ تا ۶۰ متر، ۱۵ تا ۱۲۰ متر و ۲۵۰ متر تا یک کیلومتر فراهم می‌کنند (USGS، 2023؛ ESA، 2023؛ NASA، 2022). هرچه مقدار تفکیک مکانی کوچک‌تر باشد، جزئیات بیشتری در تصویر قابل مشاهده خواهد بود، به عنوان نمونه، در تصاویر با تفکیک مکانی ۳۰ سانتی‌متر، ساختمان‌ها و اجزای کوچک سطح زمین با وضوح بیشتری قابل تشخیص هستند. یک تصویر ماهواره‌ای افزون‌بر تفکیک مکانی، دارای سه ویژگی مهم دیگر شامل تفکیک طیفی، تفکیک زمانی و تفکیک رادیومتریک است (Chilveri, et al., 2023). در یک تصویر عادی، هر پیکسل معمولاً شامل سه مؤلفه رنگی RGB است که فقط اطلاعات مربوط به رنگ را نمایش می‌دهند (Kumar and Verma, 2010). در چنین تصاویری، شناسایی اشیاء مستلزم تحلیل الگوهای فضایی حاصل از مجموعه‌ای از پیکسل‌های مجاور است، بنابراین، پیکسل بیش از آن‌که واحد شناسایی باشد، واحد ساختاری تصویر محسوب می‌شود (Blinn, 2005). در مقابل، در سنجش از دور و به ویژه در تصاویر چندطیفی و ابرطیفی، هر پیکسل تنها یک رنگ را نمایش نمی‌دهد، بلکه به صورت یک بردار طیفی تعریف می‌شود (Cheung and

Ortega, 2009):

$$pixel = (b1, b2, b3, b4, ..., bn)$$

در این حالت، هر پیکسل می‌تواند به عنوان یک واحد شناسایی در نظر گرفته شود. مقدار عددی هر یک از مؤلفه‌های پیکسل، بیانگر میزان انرژی بازتاب‌شده از پدیده در یک طول موج یا باند طیفی خاص است و میان هر مؤلفه و یک باند طیفی، تناظر یک‌به‌یک وجود دارد. به این معنا که تمام نقاط واقع در سطح یک پیکسل، در هر باند طیفی، تنها یک مقدار عددی را نشان می‌دهند (Lillesand et al., 2016؛ Jensen, 2016). در طبقه‌بندی طیفی و تشخیص پدیده‌هایی مانند توده‌های راش خالص، آب، خاک، پوشش گیاهی و مناطق شهری، تصمیم‌گیری بیشتر در سطح پیکسل منفرد انجام می‌شود و هر پیکسل به طور مستقل طبقه‌بندی می‌شود. در این فرایند، الگوریتم‌ها مقدار بازتاب طیفی پیکسل را با الگوهای از پیش شناخته‌شده مقایسه می‌کنند. برای نمونه، برگ‌های سالم درختان راش در باند مادون قرمز بازتاب طیفی زیادی دارند، در حالی که آب در همین باند بازتاب طیفی بسیار اندکی نشان می‌دهد و خاک نیز الگوی بازتاب متفاوتی دارد (Campbell and Richards and Jia, Wynne, 2011؛ Jensen, Lillesand et al., 2015؛ 2006

2016). از این رو، در بسیاری از موارد می‌توان تنها براساس ویژگی‌های طیفی یک پیکسل، آن را به عنوان پوشش گیاهی یا سایر طبقات شناسایی کرد. بنابراین، در شناسایی طیفی، پیکسل بیش از آن‌که تنها واحدی ساختاری باشد، نقش یک واحد تصمیم‌گیری و تشخیص را ایفا می‌کند (Richards and Jia, 2006). با این حال، این نقش به طور مستقیم به تفکیک مکانی تصویر نیز وابسته است. چنانچه اندازه پیکسل بزرگ باشد (مانند تصاویر لندست با تفکیک مکانی ۳۰ تا ۱۲۰ متر)، هر پیکسل ممکن است بیش از یک پدیده یا یک توده جنگلی خالص را دربرگیرد که در این صورت پدیده پیکسل آمیخته رخ می‌دهد. در چنین شرایطی، پیکسل دیگر نماینده یک واحد خالص برای شناسایی نیست. در مقابل، هرچه توان تفکیک مکانی بیشتر باشد، هر پیکسل بخش کوچک‌تری از سطح زمین را پوشش می‌دهد و احتمال همگنی آن افزایش می‌یابد (Lillesand et al., 2015). در نتیجه، نقش آن به عنوان واحد شناسایی تقویت می‌شود. اگر ابعاد پیکسل بزرگ‌تر از ابعاد یک پدیده باشد، آن پیکسل نه از نظر طیفی و نه از نظر هندسی نمی‌تواند نماینده مناسبی برای آن پدیده تلقی شود (Hengl, 2006). در این حالت، مقدار بازتاب ثبت‌شده در پیکسل، حاصل ترکیب بازتاب چند پدیده و چند توده جنگلی مختلف



شکل ۱- الف) تصویر رنگی (RGB) ماهواره سنتینل-۲ مربوط به بخش مرکزی استان مازندران و ب) موزائیک پیکسل‌های تصویر ماهواره‌ای با امتداد اضلاع شمالی-جنوبی و شرقی-غربی



است و به صورت یک مخلوط طیفی ظاهر می‌شود. پدیده‌ای است که برای سنجش دقیق یک پدیده، واحدهای اندازه‌گیری باید از خود پدیده کوچک‌تر و ریزتر باشند تا بتوان با ترکیب آن‌ها ویژگی‌های پدیده را با دقت بیشتری برآورد کرد (Woodcock and Strahler, 1987). به بیان دیگر، همان‌گونه که در اندازه‌گیری‌های فیزیکی از واحدهای کوچک‌تر برای دستیابی به دقت بالاتر استفاده می‌شود، در محیط رقومی نیز پیکسل نقش واحد پایه و سنجه بنیادی تصویر را ایفا می‌کند.

در ترازو، مجموع سنجه‌های کوچک، جرم کل یک جسم بزرگ را تشکیل می‌دهد. به همین قیاس، در تصویر رقومی نیز پیکسل‌ها در کنار یکدیگر تصویر نهایی را می‌سازند. همان‌گونه که سنجه‌های درشت‌تر دقت اندازه‌گیری را کاهش می‌دهند، کاهش توان تفکیک مکانی نیز به از دست رفتن جزئیات و افت قابلیت تشخیص لبه‌ها، بافت‌های ظریف و مرز اشیاء می‌انجامد. از این رو، در بسیاری از مسائل شناسایی، یک پیکسل منفرد کافی نیست، زیرا پیکسل اغلب واحد ساختاری تصویر است، نه واحد شناسایی. در شناسایی اشیاء، سامانه‌های هوشمند ناگزیرند الگوهای حاصل از پیکسل‌های مجاور را تحلیل کنند تا به وجود یک پدیده پی ببرند. با این حال، در شناسایی طیفی (مانند سنجش از دور)، نقش پیکسل تفاوت اساسی با عکاسی معمولی دارد. در تصویر عادی، پیکسل تنها سه مؤلفه رنگی دارد، اما در تصاویر چندطیفی و ابرطیفی، هر

پیکسل، براداری از بازتاب در باندهای مختلف است (Blinn, 2005). بنابراین، در بسیاری موارد می‌توان تنها براساس یک پیکسل، نوع پوشش سطحی را تشخیص داد (Richards and Jia, 2006). شایان ذکر است، مؤلفه‌های طیفی پیکسل‌های مربوط به گیاهان و توده‌های راش خالص تحت تأثیر فنولوژی تغییر می‌کند (Ciocirlan et al., 2022). با این وجود، این ویژگی به تفکیک مکانی وابسته است. اگر اندازه پیکسل بزرگ باشد (مانند لندست ۳۰ تا ۱۲۰ متر)، ممکن است بیش از یک پدیده را دربرگیرد (پیکسل آمیخته) و دیگر واحد خالصی برای شناسایی نخواهد بود (Aplin et al., 1999). در مقابل، هرچه تفکیک مکانی بیشتر باشد، پیکسل همگن‌تر است و نقش آن به عنوان واحد شناسایی تقویت می‌شود. بنابراین، در شناسایی طیفی، پیکسل به عنوان واحد تصمیم‌گیری عمل می‌کند، مشروط بر آن‌که تفکیک مکانی به اندازه‌ای باشد که پیکسل نماینده پدیده به نسبت همگنی (مانند توده راش خالص) باشد (Lillesand et al., 2015).

● اقدامات و یافته‌ها

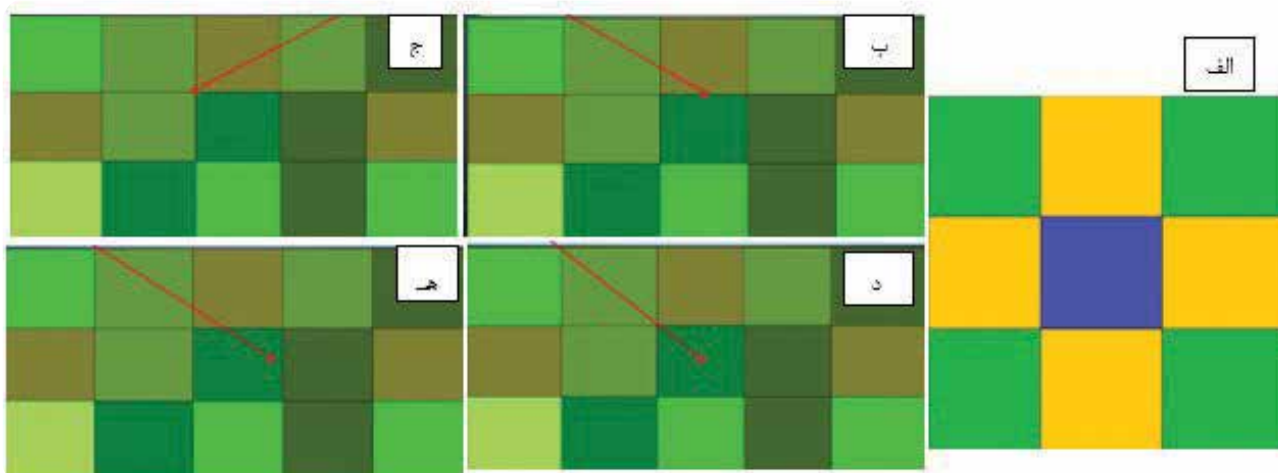
– تعیین موقعیت مکانی نمونه‌های آموزشی در زمین

هر پیکسل در تصاویر ماهواره‌ای، هوایی، پهپادی و سایر داده‌های سنجش از دور، توسط هشت پیکسل مجاور احاطه می‌شود (شکل ۲-الف). مقدار عددی هر پیکسل که توسط سنجنده در یک طول موج یا باند طیفی خاص ثبت می‌شود،

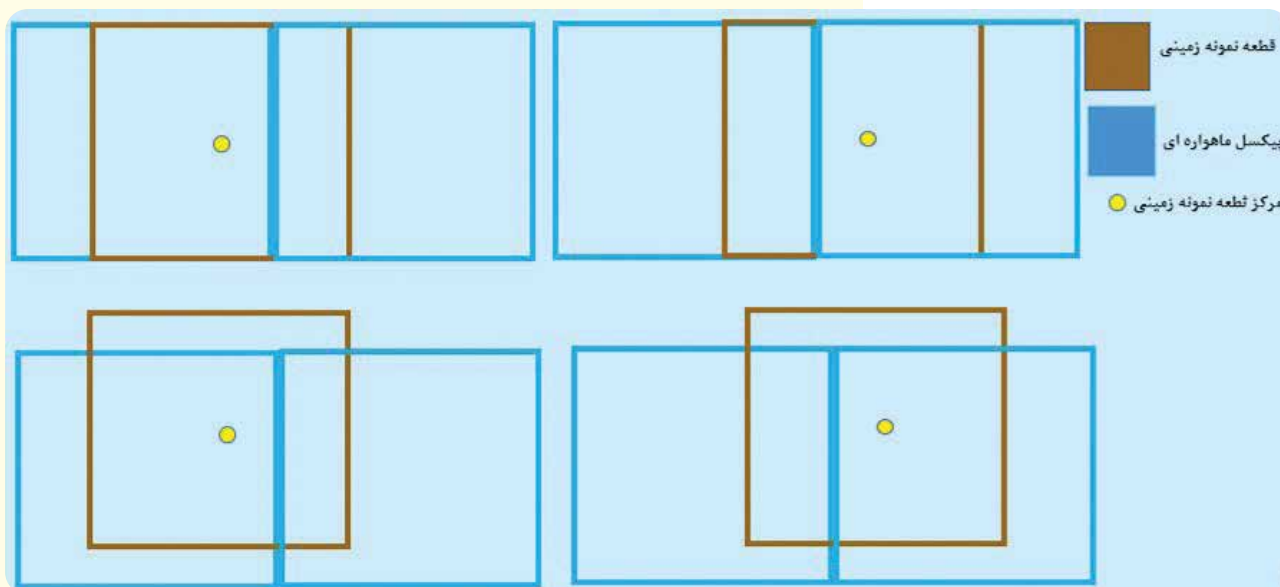
برآیند انرژی بازتاب یافته از یک یا چند پدیده واقع بر سطح زمین است که در محدوده همان پیکسل و تا حدودی پیکسل‌های مجاور آن قرار دارند (Jensen, 2016). پدیده‌ای است که پیکسل‌های که سطح اصلی یک پیکسل را پوشش می‌دهد، معمولاً بیشترین سهم را در تعیین مقدار بازتاب و در نتیجه در شکل‌گیری ارزش طیفی آن پیکسل ایفا می‌کند. با این حال، در شرایط طبیعی، موقعیت نسبی مرکز نمونه‌های آموزشی نسبت به مرز پیکسل‌ها برای فردی که در زمین اقدام به برداشت نمونه می‌کند، غالباً نامعلوم است. از این رو، هنگام برداشت نمونه زمینی، حالت‌های مختلفی برای قرارگیری نقطه نمونه‌برداری نسبت به شبکه پیکسلی تصویر ماهواره‌ای قابل تصور است (شکل ۲ ب، ج، د و ه).

به طور کلی، سه حالت اصلی برای موقعیت‌یابی نقطه زمینی نسبت به شبکه پیکسلی قابل تصور است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. الف) قرارگیری نقطه زمینی بر رأس مشترک چهار پیکسل

در این حالت، نقطه زمینی به طور دقیق بر محل تلاقی چهار پیکسل مجاور قرار می‌گیرد. اگر مختصات این نقطه با استفاده از جی‌پی‌اس دستی برداشت شود، به دلیل وجود خطای مکانی در دستگاه، نقطه ثبت شده هنگام بازیابی روی تصویر ممکن است در یکی از هشت پیکسل مجاور قرار گیرد. در نتیجه، مقادیر طیفی استخراج شده لزوماً متعلق به پیکسل واقعی هدف نخواهد بود و احتمال استخراج اطلاعات طیفی از پیکسل‌های پیرامونی وجود دارد.



شکل ۲- احاطه یک پیکسل در تصویر ماهواره‌ای، هوایی، پهپاد توسط هشت پیکسل مجاور (الف)، موقعیت نسبی یک نقطه زمینی روی یک پیکسل ماهواره‌ای، (ب) نقطه زمینی واقع بر ضلع پیکسل، (ج) نقطه زمینی واقع بر رأس پیکسل، (د) نقطه زمینی واقع بر مرکز پیکسل و (ه) نقطه زمینی داخل پیکسل.



شکل ۳- عدم انطباق و هم‌پوشانی دقیق قطعه‌های نمونه زمینی با پیکسل‌های تصاویر ماهواره‌ای و نمایش چند وضعیت نسبی از یک پیکسل تصویر ماهواره‌ای و قطعه نمونه زمینی مجاور آن

نباشد (شکل ۳). از آنجایی که در عملیات میدانی، تعیین دقیق موقعیت نسبی نقاط برداشت شده زمینی نسبت به شبکه پیکسلی تصویر با چالش مواجه است، اگر نقطه برداشت روی مرز پیکسل یا در فاصله کمتر از ۳ متر از آن قرار گیرد، احتمال جابه‌جایی نقطه به پیکسل مجاور به شدت افزایش می‌یابد. این مسئله، به‌ویژه در مناطق دارای ناهمگنی مکانی بالا (مانند جنگل‌های هیرکانی واقع در بازه ارتفاعی ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ متر از سطح دریا) اهمیت بیشتری می‌یابد. در این نواحی، آمیختگی گونه‌های درختی و تغییرپذیری بالای ترکیب پوشش گیاهی می‌تواند منجر به تغییر در ماهیت و نسبت فراوانی عناصر تشکیل دهنده نمونه آموزشی شود و در نهایت خطای قابل توجهی در فرایند طبقه‌بندی توسط سامانه‌های هوشمند ایجاد کند (Jensen, 2016). ذکر این نکته ضروری است که برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با ابعاد پیکسل کمتر از ۵ متر، استفاده از جی‌پی‌اس دستی برای برداشت موقعیت مکانی قطعات نمونه آموزشی در زمین مناسب نیست (Schug et al., 2020). در مقابل، استفاده از سامانه DGPS که قادر به ثبت موقعیت مراکز نمونه‌ها با خطایی کمتر از ۱۰ سانتی‌متر است، امکان بازیابی دقیق‌تر مختصات روی تصاویر ماهواره‌ای و تعیین منطقی‌تر مراکز پیکسل‌ها را روی زمین فراهم می‌آورد. این امر در نهایت به برداشت نمونه‌های

2015؛ Jensen, 2016؛ Toutin, 2004؛ Brown, 1992).

از آنجایی که در طبقه‌بندی پیکسل پایه، دقت نمونه‌های آموزشی نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی طبقه‌بندی دارد، برداشت نمونه‌های زمینی از پدیده‌های همگن (مانند توده‌های خالص راش) باید با دقت و رعایت، توجه به ابعاد و جهت اضلاع پیکسل در تصویر مورد استفاده و توجه به پدیده‌های موجود در همسایگی هشت قطعه نمونه زمینی، به منظور کاهش احتمال آمیختگی طیفی و خطای برچسب‌گذاری انجام شود.

خطاهای مکانی در تعیین موقعیت نمونه‌های آموزشی با GPS دستی

استفاده از دستگاه‌های جی‌پی‌اس دستی برای تعیین موقعیت مراکز نمونه‌های آموزشی، معمولاً با خطای مکانی قابل توجهی همراه است که به‌طور میانگین در حدود ۳ تا ۵ متر به صورت شعاعی بروز می‌کند (Kaplan and Hegarty, 2017). این بدان معناست که مختصات ثبت شده توسط دستگاه، لزوماً منطبق بر موقعیت واقعی محل استقرار آن نیست، بلکه به نقطه‌ای در فاصله‌ای قابل ملاحظه از محل واقعی برداشت اشاره دارد. افزون‌براین، قطعه نمونه آموزشی که به صورت مربعی و با ابعادی متناسب با اندازه پیکسل تصویر در زمین برداشت می‌شود، ممکن است به‌طور کامل بر هیچ یک از پیکسل‌های متناظر در تصویر منطبق

ب) قرارگیری نقطه زمینی در داخل پیکسل و در فاصله‌ای کمتر از سه متر از مرزهای آن در این وضعیت نیز، با وجود آن که نقطه در داخل پیکسل قرار دارد، نزدیکی آن به لبه‌های پیکسل باعث می‌شود، خطای جی‌پی‌اس یا خطای جابه‌جایی مکانی، هنگام بازیابی نقطه روی تصویر، موجب انتقال آن به یکی از پیکسل‌های مجاور شود. بنابراین، ارزش‌های طیفی استخراج شده ممکن است به جای پیکسل هدف، از پیکسل‌های همسایه به دست آیند.

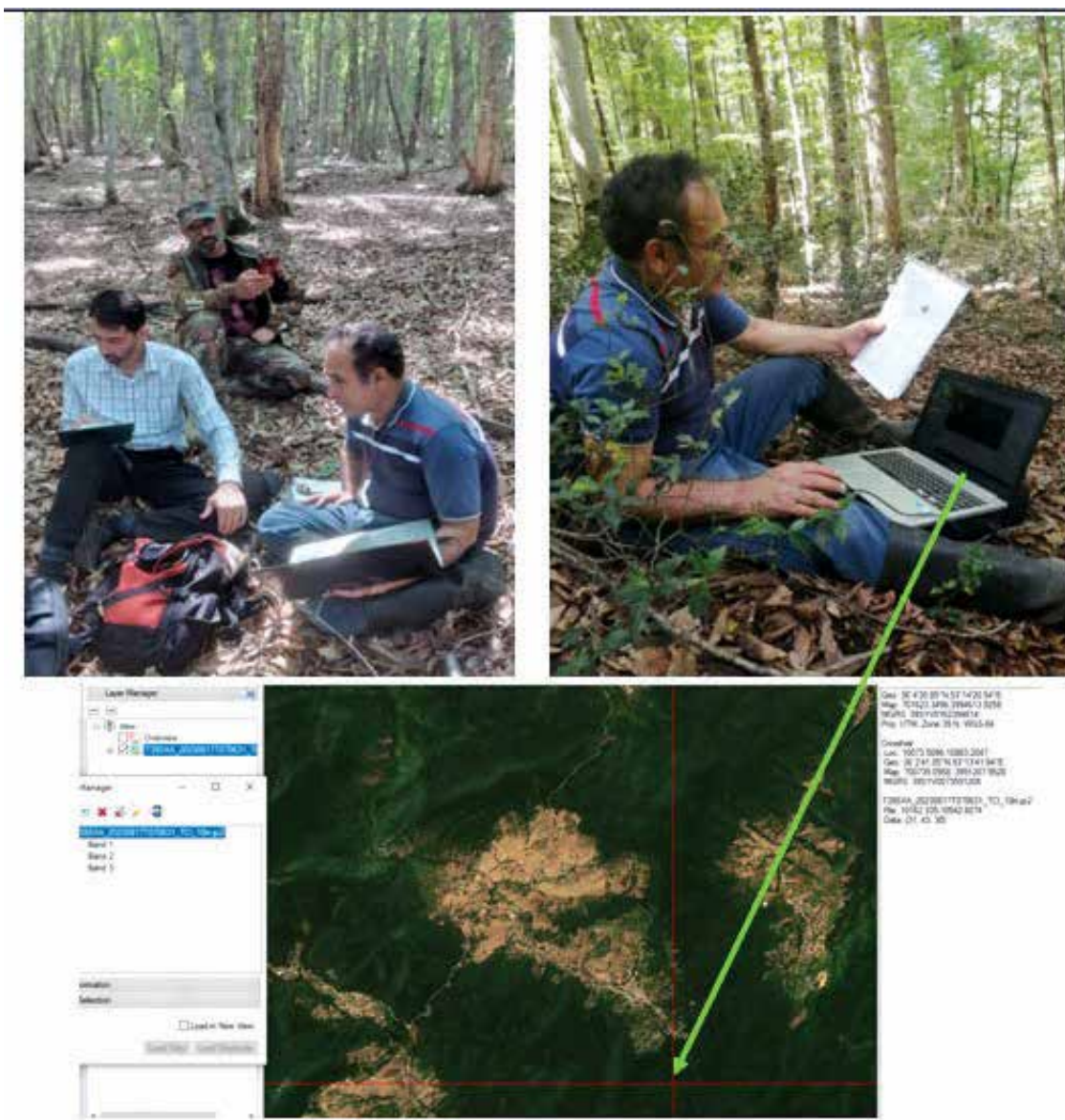
ج) قرارگیری نقطه زمینی در مرکز پیکسل در این حالت، اگر تصویر مورد استفاده دارای تفکیک مکانی ۱۰ یا ۲۰ متر (مانند تصاویر سنتینل-۲) باشد و نقطه زمینی نیز با دقت مناسبی برداشت شده باشد، هنگام بازیابی موقعیت روی تصویر، احتمال قرارگیری آن در داخل همان پیکسل هدف بیشتر است و در نتیجه، مقادیر طیفی از همان پیکسل استخراج می‌شود. با این وجود، حتی در این حالت نیز خطای موقعیت‌یابی جی‌پی‌اس یا خطای ناشی از جابه‌جایی مکانی تصویر می‌تواند موجب شود که نقطه برداشت شده در یکی از پیکسل‌های مجاور قرار گیرد و در نتیجه، اطلاعات طیفی از پیکسل دیگری استخراج شود. در اینجا چند نمونه از وضعیت نسبی یک پیکسل در تصویر ماهواره‌ای و قطعه نمونه زمینی مجاور در شکل ۳ نمایش داده شده است (Lillesand et al.,



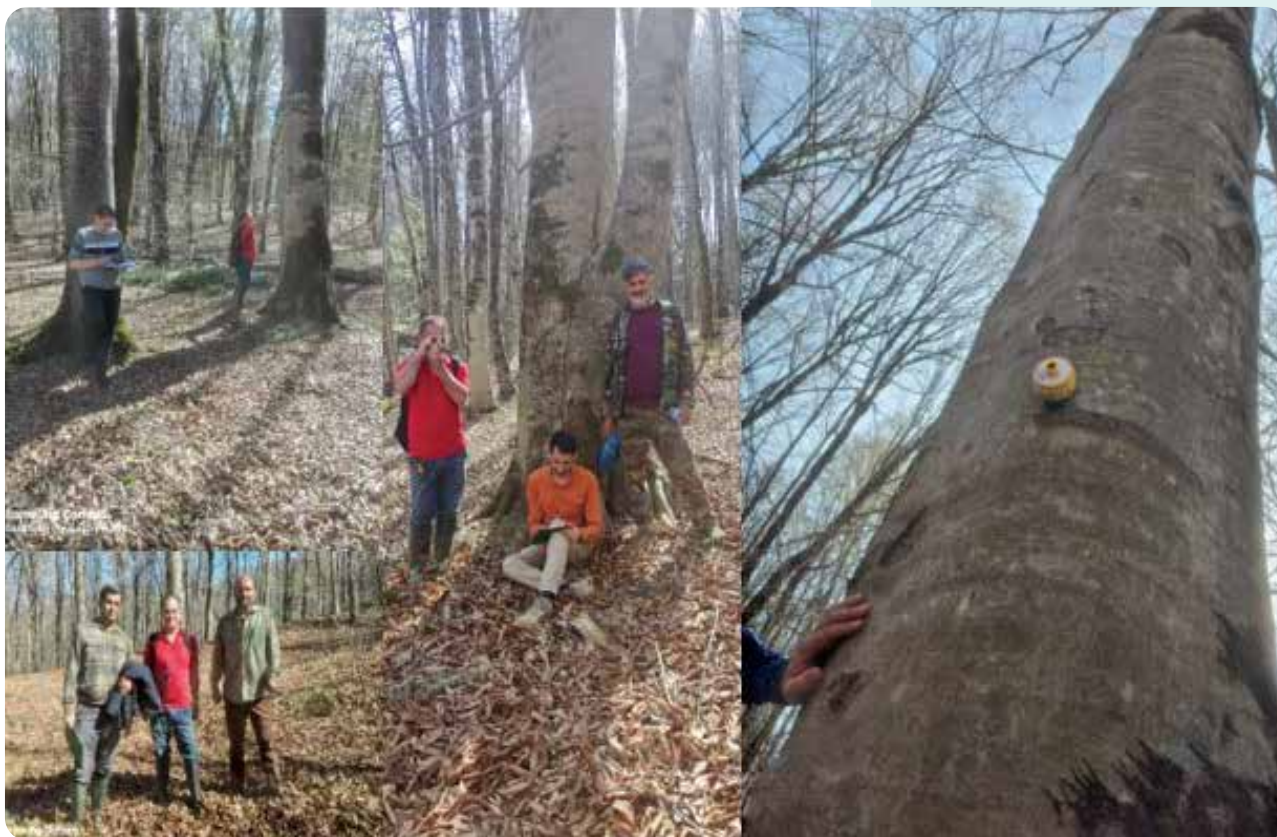
آموزشی با دقت بیشتر منجر خواهد شد. قطعه نمونه‌ای که در زمین به صورت مربع و با اضلاعی موازی با پیکسل‌های ماهواره سنیتل ۲ برداشت می‌شود، به عنوان نمونه آموزشی متعلق به پدیده‌ای خاص در نظر گرفته می‌شود. هنگام بازیابی این قطعه نمونه روی تصویر ماهواره‌ای، به دلیل خطای جی‌پی‌اس و جابه‌جایی تصویر، مرکز قطعه نمونه زمینی برداشت شده و پیکسل متناظر آن جابه‌جا می‌شوند. بنابراین، برای آن‌که هنگام بازیابی مرکز قطعه نمونه زمینی روی تصویر، ماهیت نمونه آموزشی (که در اینجا راش خالص است) تغییر نکند، لازم است پدیده مربوط به

هشت قطعه مجاور چسبیده به آن نیز همگن و مشابه با پدیده قطعه نمونه مرکزی برداشت شده در زمین باشد (شکل ۲). از این رو می‌توان گفت، ارزش‌های طیفی مربوط به قطعه نمونه آموزشی و هشت پیکسل مجاور متعلق به توده راش خالص، که از یک باند طیفی استخراج می‌شوند، باید تا حد زیادی مشابه باشند. نتیجه آن‌که، در هوشمندسازی دقیق تشخیص پدیده‌ها در تصاویر سکویهای سنجش از دور ضروری است، نمونه آموزشی برداشت شده از سطح زمین و هشت نمونه مجاور چسبیده به آن، همگن باشند و به یک پدیده واحد (مانند توده راش، مرتع، زمین زراعی، باغ‌های میوه و

موارد مشابه) تعلق داشته باشند (Liu et al., 2023). از سوی دیگر، مسئله جابه‌جایی پیکسل در تصاویر ماهواره‌ای نسبت به زمین نیز همچنان مطرح است و به نظر می‌رسد برای کاهش این نوع خطا، مهم‌ترین راهکار استفاده از تصاویر با توان تفکیک مکانی زیاد (مانند پلانت اسکپ (Planet Escape)، وردویو ۳ (worldview 3)، آیکنوس (Ikonos)، کوئیک برد (Quick-Bird)) باشد، زیرا در چنین تصاویری، ابعاد پیکسل کوچک‌تر بوده و تطابق آن با عوارض زمینی با دقت بیشتری قابل انجام است. شکل‌های ۴ و ۵، تهیه نمونه آموزشی را از توده‌های خالص راش در جنگل‌های سنگده



شکل ۴- تهیه نمونه‌های آموزشی در سری ۳ جنگل سنگده و بازیابی آن‌ها روی تصویر سنیتل ۲- در نرم‌افزار ENVI



شکل ۵- تهیه نمونه‌های آموزشی از جنگل‌های دارابکلا در ساری برای طرح «هوشمندسازی تشخیص راش شرقی با استفاده از ماشین ابداعی پردازشگر تصویر و سری زمانی تصاویر سنتینل-۲»

آموزشی شود و در نتیجه عملکرد الگوریتم‌های طبقه‌بندی‌کننده را به‌طور محسوسی کاهش دهد. *

برداشت نمونه‌های آموزشی فقط در توده‌های کاملاً همگن و با فاصله مناسب از مرز سایر طبقات انجام شود. *

در پژوهش یادشده نشان داده شد، در تصاویر سنتینل-۲، استفاده از قطعه‌نمونه‌هایی با ابعاد ۴۰ تا ۶۰ متر و انتخاب نمونه‌ها در توده‌های کاملاً خالص، به‌گونه‌ای که علاوه بر قطعه مرکزی، هشت قطعه مجاور نیز از همان

پدیده تشکیل شده باشد، می‌تواند اثر ناشی از خطاهای مکانی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. در چنین شرایطی، حتی اگر به دلیل خطای موقعیت‌یابی، محل بازیابی نمونه تا یک پیکسل جابه‌جا شود، احتمال استخراج اطلاعات طیفی متعلق به همان کلاس پوشش زمینی همچنان زیاد خواهد بود و از ورود نمونه‌های آلوده به فرایند آموزش جلوگیری می‌شود. براین اساس، برای افزایش دقت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای برای تولید نقشه پراکنش مکانی توده‌های خالص درختان، رعایت راهکارهای زیر پیشنهاد می‌شود:

پدیده تشکیل شده باشد، می‌تواند اثر ناشی از خطاهای مکانی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. در چنین شرایطی، حتی اگر به دلیل خطای موقعیت‌یابی، محل بازیابی نمونه تا یک پیکسل جابه‌جا شود، احتمال استخراج اطلاعات طیفی متعلق به همان کلاس پوشش زمینی همچنان زیاد خواهد بود و از ورود نمونه‌های آلوده به فرایند آموزش جلوگیری می‌شود. براین اساس، برای افزایش دقت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای برای تولید نقشه پراکنش مکانی توده‌های خالص درختان، رعایت راهکارهای زیر پیشنهاد می‌شود:

برداشت نمونه‌های آموزشی فقط در توده‌های کاملاً همگن و با فاصله مناسب از مرز سایر طبقات انجام شود. *

در پژوهش یادشده نشان داده شد، در تصاویر سنتینل-۲، استفاده از قطعه‌نمونه‌هایی با ابعاد ۴۰ تا ۶۰ متر و انتخاب نمونه‌ها در توده‌های کاملاً خالص، به‌گونه‌ای که علاوه بر قطعه مرکزی، هشت قطعه مجاور نیز از همان پدیده تشکیل شده باشد، می‌تواند اثر ناشی از خطاهای مکانی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. در چنین شرایطی، حتی اگر به دلیل خطای موقعیت‌یابی، محل بازیابی نمونه تا یک پیکسل جابه‌جا شود، احتمال استخراج اطلاعات طیفی متعلق به همان کلاس پوشش زمینی همچنان زیاد خواهد بود و از ورود نمونه‌های آلوده به فرایند آموزش جلوگیری می‌شود. براین اساس، برای افزایش دقت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای برای تولید نقشه پراکنش مکانی توده‌های خالص درختان، رعایت راهکارهای زیر پیشنهاد می‌شود:

و دارابکلا در ساری نشان می‌دهند. این برداشت‌ها در چهارچوب طرح پژوهشی «هوشمندسازی تشخیص راش شرقی با استفاده از سری زمانی تصاویر سنتینل ۲ و ماشین ابداعی پردازشگر تصویر خرمی-نعمی» انجام شده است.

● نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادها

نتایج پژوهش هوشمندسازی تشخیص راش هیرکانی نشان داد، دقت طبقه‌بندی پیکسل پایه در تصاویر ماهواره‌ای، تنها به توان الگوریتم‌های هوشمند وابسته نیست، بلکه به میزان زیادی تحت تأثیر کیفیت، خلوص و دقت مکانی نمونه‌های آموزشی قرار دارد. هرگونه عدم انطباق میان موقعیت واقعی نمونه زمینی و پیکسل متناظر در تصویر، ناشی از خطای GPS، خطاهای اختصاص دادن مختصات جغرافیایی به یک تصویر، جابه‌جایی تصاویر یا پدیده پیکسل‌های آمیخته، می‌تواند سبب تخصیص برچسب نادرست به نمونه‌های



زیاد خودداری شود.

در مجموع می توان نتیجه گرفت، مهم ترین شرط موفقیت سامانه های هوشمند در شناسایی گونه های درختی در جنگل، کیفیت نمونه های آموزشی است. افزایش پیچیدگی الگوریتم های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، بدون تأمین نمونه های آموزشی دقیق، همگن و دارای موقعیت مکانی صحیح، الزاماً به افزایش دقت طبقه بندی منجر نخواهد شد. از این رو، توجه به اصول طراحی و برداشت نمونه های آموزشی باید به عنوان یکی از مراحل اساسی در کلیه مطالعات هوشمندسازی مبتنی بر تصاویر سنجش از دور مورد توجه قرار گیرد.

منابع

خرمی، ر.، نعیمی، ز.، محمودی، م.، محمودی پاردکلایی، م.، فلاح میری، ح.، نظیفی، م.، مافی، ش. و مختارپور، ا.، ۱۴۰۳. نقشه دقیق باغات مرکبات تولیدشده از تصاویر ماهواره ای مبنایی برای تعیین مرز جنگل. مجله ترویجی مدیریت پایدار جنگل های هیرکانی، ۱۵-۲۳: (۲) ۶.

Aplin, P., Atkinson, P.M. and Curran, P.J., 1999. Fine spatial resolution simulated satellite sensor imagery for land cover mapping in the United Kingdom. *Remote sensing of Environment*, 68(3): 206-216.

Blinn, J.F., 2005. What is a pixel? *IEEE computer graphics and applications*, 25(5): 82-87.

Campbell, J.B. and Wynne, R.H., 2011. *Introduction to Remote Sensing* (5th ed.). Guilford Press, 667p.

Cheung, N.M. and Ortega, A., 2009. Distributed compression of hyperspectral imagery. *Distributed Source Coding*, 269-292.

Chilveri, S., Jain, T. and Mhaske, P.H., 2023. Satellite image processing using radiometric resolution and spectral resolution. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(3): 112-120.

Ciocirlan, M.I.C., Curtu, A.L. and Radu, G.R., 2022. Predicting leaf phenology in forest tree species using UAVs and satellite images: A case study for European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Remote Sensing*, 14(24), p.6198.

Congalton, R.G. and Green, K., 2019. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. CRC press, 346 p.

European Space Agency (ESA), 2023. *Sentinel-2 User Handbook*. Euro-

pean Space Agency, 64p. Available at: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook

Gao, F., Wang, H. and Li, X., 2023. The role of precise georeferencing in training robust deep learning models for remote sensing. *Remote Sensing Letters*, 14(5): 456-467.

H. Liu, Zhang, L. and Wang, Q., 2023. Integrating spatial homogeneity and spectral similarity for robust classification of agricultural landscapes. *Comput. Electron. Agriculture*, 107620. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107620>.

Gonzalez, R.C. and Woods, R.E., 2018. *Digital Image Processing* (4th ed.). Pearson, 1022p. Available at: <https://www.cl72.org/090imagePLib/books/Gonzales,Woods-Digital.Image.Processing.4th.Edition.pdf>.

Hengl, T., 2006. Finding the right pixel size. *Computers and geosciences*, 32(9): 1283-1298.

Jensen, J.R., 2016. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* (4th ed.). Pearson, 544 p.

Kaplan, E.D. and Hegarty, C.J. (2017). *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications* (3rd ed.). Artech House, 102p. Available at: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781630814427_A37804737/preview-9781630814427_A37804737.pdf

Kumar, T. and Verma, K., 2010. A Theory Based on Conversion of RGB image to Gray image. *International Journal of Computer Applications*, 7(2): 7-10.

Li, L., Han, L., Ding, M., Liu, Z. and Cao, H., 2020. Remote sensing image registration based on deep learning regression model. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 1-5.

Lillesand, T., Kiefer, R.W. and Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley and Sons, 720 p.

National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2022. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Available at: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

Richards, J.A. and Jia, X., 2006. *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 363 p.

Schug, F., Frantz, D., van der Linden, S. and Hostert, P. 2020. Spatial and semantic effects of LUCAS samples on fully automated land use/land cover classification in high-resolution

Sentinel-2 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 88, 102065.

Toutin, T. 2004. Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25(10): 1893-1924.

United States Geological Survey (USGS), 2023. *Landsat 8-9 Data Users Handbook*. U.S. Geological Survey. Available at: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-data-user-handbooks>

Woodcock, C.E. and Strahler, A.H., 1987. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 21(3): 311-332.