



ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها بر اساس آنالیز عدم قطعیت با استفاده از معیار حداکثر انحراف نسبی

روزبه خانبلوکی^{۱*}، مهدی مختارزاده^۲

۱- کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری

چکیده:

استفاده از ترکیب نتایج چند طبقه‌بندی کننده‌یکی از روش‌های مرسوم جهت افزایش کارایی سیستم‌های تشخیص الگو می‌باشد که در سال‌های اخیر موردنظر محققین قرار گرفته است. برای اینکه ترکیب منجر به افزایش دقت طبقه‌بندی شود لازم است که طبقه‌بندی کننده‌های منفرد صحیح و متتنوع باشند. همچنین قواعد ترکیب باید به گونه‌ای باشد که نقاط ضعف طبقه‌بندی کننده‌ها را بیوشاند. در این مقاله یک روش جدید ترکیب پیشنهادشده است که بر اساس آنالیز عدم قطعیت، نتایج طبقه‌بندی کننده‌های منفرد باهم ترکیب می‌شوند. در این روش برای انجام آنالیز عدم قطعیت از معیار حداکثر انحراف نسبی استفاده شد. با اجرای طبقه‌بندی کننده‌های منفرد بیشترین شباهت، ماشین بردار پشتیبان، شبکه‌های عصبی و جنگل تصادفی، خروجی نتایج بر اساس آنالیز عدم قطعیت در ترکیبات مختلف طبقه‌بندی کننده‌ها (ترکیبات دوتایی، سه‌تایی، چهارتایی)، باهم ترکیب شدند. در این بین ترکیب چهارتایی (ML, SVM, NN, RF)، نسبت به ترکیبات دوتایی و سه‌تایی طبقه‌بندی کننده‌های مختلف و نیز طبقه‌بندی کننده‌های منفرد دارای دقت بهتری می‌باشد بطوریکه برای طبقه‌بندی کننده‌های بیشترین شباهت، ماشین بردار پشتیبان، شبکه‌های عصبی، جنگل تصادفی و روش پیشنهادی ترکیب در حالت ترکیب چهارتایی، به ترتیب دقت کلی برابر ۷۷.۹۵٪، ۸۰.۰۱٪، ۷۹.۷۰٪ و ۸۰.۵۶٪ و ۸۳.۹۸٪ حاصل شد. در پایان روش پیشنهادی ترکیب (حالت چهارتایی) با روش‌های ترکیب سنتی مانند مکزیمم، مینیمم، میانگین هندسی، میانگین حسابی، رأی اکثریت و نیز ترکیب بر اساس دقت تولید کننده مقایسه شد؛ بطوریکه به ترتیب دقت کلی معادل ۸۰.۱۱٪، ۸۱.۱۴٪، ۸۰.۹۴٪ و ۸۱.۹۲٪ به دست آمد. مقایسه دقت روش پیشنهادی بیانگر برتری این روش نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد. با توجه به نتایج، روش پیشنهادی ترکیب می‌تواند منجر به افزایش دقت طبقه‌بندی کننده‌ها شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بیشترین شباهت، ماشین بردار پشتیبان، شبکه‌های عصبی، جنگل تصادفی، آنالیز عدم قطعیت

۱- مقدمه

استخراج اطلاعات از تصاویر سنجش از دور در حال حاضر بر عامل انسانی و به صورت دستی متکی می‌باشد که با توجه به حجم زیاد داده‌ها، زمان بر و هزینه بر هستند. لذا باید روش‌های قوی و اتوماتیکی برای استخراج اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای وجود داشته باشد تا بتوان به طور سریع به این اطلاعات دست پیدا کرد. یکی از روش‌های مرسوم برای استخراج اطلاعات استفاده از روش‌های مختلف طبقه‌بندی تصاویر می‌باشد [۱]. طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، به جداسازی مجموعه‌های طیفی مشابه و تقسیم‌بندی طبقاتی آن‌ها که دارای رفتار طیفی یکسانی باشد گفته می‌شود و می‌تواند به عنوان یک اقدام مشترک از پردازش تصاویر و تکنیک‌های طبقه‌بندی تلقی نمود که با توجه به انتخاب تکنیک‌های مناسب، می‌توان نتایج قابل قبولی را انتظار داشت [۲].

طبقه‌بندی تصاویر، از مهم‌ترین مراحل از فرآیند سنجش از دور هست که در بحث عدم قطعیت مورد توجه می‌باشد [۳]. به طور کلی فرآیند سنجش از دور شامل سه مرحله جمع‌آوری داده، تولید تصویر و تفسیر می‌باشد که در هر کدام از این مراحل عوامل مختلفی باعث ایجاد خطأ و عدم قطعیت می‌شود. در مرحله جمع‌آوری داده، عواملی نظریه‌تأثیرات اتمسفر، حرکت سکو، چرخش زمین، اثر پانورامیک، در مرحله تولید تصویر، عواملی نظریه دیجیتالی کردن تصویر، انتقال تصویر به ایستگاه زمینی و در مرحله تفسیر، استخراج اطلاعات از تصویر که مستلزم استفاده از یک سری الگوریتم‌های طبقه‌بندی می‌باشد. نتیجه نهایی این مراحل، شکل‌گیری یک فضای داده‌ای همراه با عدم قطعیت می‌باشد [۳، ۴].

بررسی تحقیقات انجام شده در حوزه‌ی طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که اکثر موارد از یک روش برای طبقه‌بندی کل تصویر استفاده شده است. هرچند که این روش‌ها نتایج قابل قبولی دارند اما نمی‌توان ادعا کرد که یک روش برای طبقه‌بندی کل تصویر مناسب است زیرا همه‌ی روش‌های طبقه‌بندی با داده‌ی آموزشی یکسان نتایج متفاوتی را ارائه می‌دهند. لذا هیچ طبقه‌بندی کننده‌ای کامل و بدون نقص نیست [۵]. به عبارتی دیگر طبقه‌بندی کننده‌ها ممکن‌اند در برخی موارد نسبت به بقیه نتایج بهتری تولید کنند ولی هیچ یک از آن‌ها بر سایرین برتری نداشته و هر کدام نقاط قوت و ضعف‌های خاص خود را دارند و نمی‌توانند تمام داده‌ها را بدون هیچ خطای طبقه‌بندی کند؛ بنابراین ترکیب مناسب طبقه‌بندی کننده‌ها، می‌تواند نتایج طبقه‌بندی بهتری نسبت به هر طبقه‌بندی کننده و حتی بهترین آن‌ها را تولید کند [۶].

با توجه به مطالعه ذکر شده، این انگیزه می‌تواند شکل بگیرد؛ که بجای استفاده از یک طبقه‌بندی کننده از چندین طبقه‌بندی کننده استفاده شود؛ بطوریکه نتایج روش‌های تکی با یکدیگر ترکیب شوند. ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها سعی بر این هستند که آن قسمتی از عدم قطعیت که در فرآیند طبقه‌بندی ایجاد می‌شود را کاهش دهند. برای این منظور از ترکیب نتایج طبقه‌بندی کننده‌های اولیه استفاده می‌شود تا با ترکیب عدم قطعیت‌های محلی تولید شده در طبقه‌بندی کننده‌های اولیه، عدم قطعیت نهایی درنتیجه طبقه‌بندی کاهش داده شود. این نحوه‌ی عمل کرد می‌تواند تا حد زیادی اثر غیردقیق بودن مدل‌های استفاده شده در طبقه‌بندی کننده‌های اولیه را جبران کند.

مطالعه بر روی ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها از اوایل دهه ۹۰ آغاز شد و محققین مختلف بانام‌های مختلفی از آن استفاده نموده‌اند. طرح ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها اولین بار توسط Hansen و Salomon در سال ۱۹۹۰ ارائه گردید. آن‌ها ثابت کردند در صورتی که هر یک از طبقه‌بندی کننده‌های اولیه مستقل باشند و نرخ خطای آن کمتر از ۵۰٪ باشد در این صورت ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها دارای دقت بالاتری نسبت به هر یک از طبقه‌بندی کننده‌های منفرد خواهد بود [۷].

تحقیقات گسترده‌ای در حوزه ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها با روش‌های مختلف در داخل و خارج کشور انجام گرفته است که در ادامه به مواردی چند اشاره شده است.

در [۸] دو رویکرد چندگانه در سطح مفهوم (رأی اکثربیت به صورت وزن دار) و سطح اندازه‌گیری (میانگین حسابی) بر روی تصویر لندست TM مورد آزمایش قرار گرفت. با ترکیب خروجی طبقه‌بندی کننده‌های اولیه^۱, SEDC^۲, SMDC, MLC, FCMC, NNC^۳ نتایج نشان داد که ترکیب خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها، افزایش دقت طبقه‌بندی را به همراه دارد.

در [۹] به منظور طبقه‌بندی تصاویر ابر طیفی سنجنده‌ی آویریس با ۲۲۴ باند طیفی از یک منطقه‌ی شهری، با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی چندگانه را انجام گرفته است. در این مطالعه یک سیستم مجموعی مبتنی بر ماشین‌های بردار پشتیبان معرفی شد. درروش پیشنهادی تحقیق، ابتدا دو زیرمجموعه از بهترین زیرمجموعه‌های ویژگی‌های بالارزش و مفید از کل ویژگی‌ها استخراج شدند. سپس زیرمجموعه‌های استخراج شده با دو روش جداساز SVM چند کلاسه به ۳ کلاس موردنظر طبقه‌بندی شدند. همچنین با استفاده از سیستم طبقه‌بندی چندگانه مبتنی بر SVM چند کلاسه این طبقه‌بندی انجام گرفت. نتایج دقت کلی طبقه‌بندی حاصل از استراتژی پیشنهادی، با نتایج به دست آمده از SVM های تکی و همچنین مجموعه‌های طبقه‌بندی دیگر، از قبیل Boosting, Bagging و Random Forests مقایسه گردید. نتایج حاصل از روش‌های پیاده شده روی آن نشان از توانایی کم‌نظیر این روش‌ها در طبقه‌بندی تصاویر ابر طیفی را دارد.

در [۱۰] به منظور شناسایی دقیق انواع پوشش اراضی و کاربری زمین^۴، از سه سیستم‌های طبقه‌بندی چندگانه استفاده شد. در این تحقیق با به کارگیری طبقه‌بندی کننده‌های پایه ML, SVM, NN, FCM, MID اقدام به ترکیب خروجی‌ها در سطح اندازه‌گیری (میانگین بیزین)^۵، سطح مفهوم (رأی اکثربیت نسبی)^۶ و نیز یک روش جدید بنام میانگین وزن دار بر اساس آنالیز سلسه مراتبی^۷ (WA-AHP) شد. نتایج نشان داد که سه سیستم‌های طبقه‌بندی چندگانه توانایی بهبود دقت نتایج طبقه‌بندی در مقایسه با طبقه‌بندی کننده‌های منفرد را دارند. در این میان روش جدید WA-AHP از نظر آماری و بصری نسبت به بقیه روش‌های ترکیبی و منفرد برتری قابل ملاحظه‌ای داشت.

همچنین در [۱۱] یک روش نوین برای طبقه‌بندی داده‌های فرا طیفی با به کارگیری یک سیستم چندگانه ماشین‌های بردار پشتیبان^۸ که شامل گروه‌بندی باندهای طیفی است، معرفی شد. در اولین گام برای گروه‌بندی باندهای طیفی از روشی بر اساس اطلاعات دوطرفه یا متقابل^۹ استفاده کرد. در دومین گام، از ماشین بردار پشتیبان به منظور طبقه‌بندی هر گروه از باندهای طیفی استفاده شد تا مجموعه‌ای از طبقه‌بندی کننده‌ها حاصل شود. سرانجام یک الگوریتم ادغام طبقه‌بندی کننده‌ها بر اساس تئوری بیز با نام Naive Bayes (NB) را بکار برد. نتایج حاصل از روش پیشنهادی برای دو نمونه از داده‌های فرا طیفی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقایسه با SVM استاندارد طبقه‌بندی کننده‌ای که همه باندها را در یک زمان طبقه‌بندی می‌کند نتایج بهتری را ایجاد می‌کند. این نتایج همچنین کارایی مفهوم گروه‌بندی باندها و سیستم‌های طبقه‌بندی کننده چندگانه را در مقایسه با روش‌های معمول پیشین نشان می‌دهد.

^۱ the shortest Euclidean distance classifier

^۲ the shortest Mahalanobis distance classifier

^۳ the fuzzy c-mean classifier

^۴ land use land cover

^۵ Bayesian Average

^۶ Comparative Major Voting

^۷ Weighted Average - Analytic Hierarchy Process

^۸ Multiple Support Vector Machine

^۹ Mutual Information

بررسی کلی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که در این روش‌ها استفاده از مفاهیم عدم قطعیت نتایج طبقه‌بندی کننده‌ها برای ترکیب خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها مورد توجه قرار نگرفته است و از آنجایی که اطلاع از عدم قطعیت و استفاده از آن در فرآیند طبقه‌بندی می‌توان باعث بهبود دقت طبقه‌بندی شود [۱۲]؛ این انگیزه به وجود می‌آید که روشی مبتنی بر آنالیز عدم قطعیت برای ترکیب خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها مطرح شود.

این مقاله شامل پنج بخش می‌باشد. بخش اول که از نظر گذشت شامل مقدمه، پیشینه تحقیق، انگیزه و هدف تحقیق بود. در بخش دوم مبانی نظری تحقیق، بیان شده و بخش سوم به معرفی روش انجام تحقیق اختصاص یافته است. در بخش چهارم پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج انجام می‌شود و در بخش پنجم نتیجه‌گیری پژوهش پیش رو ارائه می‌گردد.

۲- مبانی نظری ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها

۲-۱- ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها

یک ترکیب از طبقه‌بندی کننده‌ها مجموعه‌ای از طبقه‌بندی کننده‌ها می‌باشد که تصمیمات منفرد هر یک از آن‌ها به روش‌های مختلف با یکدیگر ترکیب می‌شوند. شرط لازم و کافی برای اینکه ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها دارای صحت بیشتری نسبت به هریک از طبقه‌بندی کننده‌های منفرد باشد این است که طبقه‌بندی کننده‌های منفرد صحیح و متنوع باشند [۱۳]. منظور از صحیح بودن یک طبقه‌بندی کننده این است که دارای دقتی بالاتر از ۵۰٪ باشد و یا به عبارتی دیگر دقت آن از یک حدس تصادفی بیشتر باشد. منظور از تنوع طبقه‌بندی کننده‌ها این است که خطاهای آن‌ها در یک جهت نباشد. در واقع طبقه‌بندی کننده‌ها دارای خطای مستقل از هم باشند. بدین معنی که اگر الگوهایی (پیکسل‌هایی)، در یک طبقه‌بندی کننده اشتباه طبقه‌بندی شده باشد، همان الگو در طبقه‌بندی کننده‌ی دیگر درست طبقه‌بندی شده باشد. لذا ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها می‌تواند مفید واقع شوند.

۲-۲- اجزا ترکیب

ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها شامل دو جز اساسی است. جز اول ایجاد و یا ساختن یکسری طبقه‌بندی کننده است که هدف آن ایجاد یکسری طبقه‌بندی کننده است که دارای دو ویژگی صحت و تنوع باشند. جز دوم، در نظر گرفتن یکتابع ترکیب است که منظور از آن ایجاد یک مکانیزم ترکیب است که بتواند به طور بهینه‌ای خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها را با یکدیگر ترکیب نماید [۱۴]. هر دو جز به طور مستقیم بر روی کارایی ترکیب تأثیر مستقیم دارد. تحقیقات انجام شده بیشتر بر روی جز دوم تمرکز کرده‌اند.

۳-۲- روش‌های ترکیب خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها

روش‌هایی که برای ترکیب خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها بکار می‌روند بسته به نوع خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها، می‌توان در سه سطح مفهوم (در این روش‌ها خروجی هر طبقه‌بندی کننده تنها یک لیستی از کلاس به ازای هر پیکسل ورودی است)، سطح رتبه (در این روش‌ها خروجی هر طبقه‌بندی کننده لیستی از کلاس‌های ممکن به همراه رتبه‌های آن‌ها به ازای هر پیکسل ورودی است) و سطح اندازه‌گیری (در این روش‌ها خروجی هر طبقه‌بندی کننده یک لیستی از سطوح اطمینان (درجه تعلقات) به ازای هر پیکسل ورودی است) مطرح کرد. از میان این سه سطح، سطح اندازه‌گیری به دلیل داشتن خروجی چند کلاسه دارای بیشترین اطلاعات و سطح مفهوم به دلیل داشتن خروجی تک کلاسه دارای کمترین اطلاعات می‌باشد از طرفی اکثر طبقه‌بندی کننده‌ها قادرند اطلاعات خروجی در سطح اندازه‌گیری را تولید کنند [۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹].

در این مقاله برای مقایسه با روش پیشنهادی ترکیب، روش‌های در سطح اندازه‌گیری (ماکزیمم، مینیمم، میانگین هندسی، میانگین حسابی) و در سطح مفهوم (رأی اکثریت) و نیز روش ترکیب بر اساس دقت تولیدکننده اجرا شد. لذا در ادامه توضیحاتی در مورد عمل کرد این روش‌ها تشریح می‌گردد.

۲-۳-۱- روش‌های در سطح اندازه‌گیری

در این روش‌ها با محاسبه سطوح اطمینان جدید، کلاس با بیشترین سطح اطمینان به عنوان کلاس برنده انتخاب می‌شود [۲۰]. (N تعداد طبقه‌بندی کننده‌ها و K تعداد کلاس‌ها)

- ✓ روش میانگین حسابی: سطوح اطمینان به دست آمده برای هر کلاس توسط طبقه‌بندی کننده‌های مختلف در هم ضرب می‌شوند و به عنوان احتمالات جدید کلاس‌ها (رابطه (۱)) انتخاب می‌شوند [۲۱].

$$P_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_i^j \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, K \quad \text{رابطه (۱)}$$

- ✓ روش میانگین هندسی: از سطوح اطمینان به دست آمده برای هر کلاس، توسط طبقه‌بندی کننده‌های مختلف یک میانگین گرفته می‌شود و آن‌ها را به عنوان احتمالات جدید کلاس‌ها (رابطه (۲)) در نظر می‌گیرد [۲۱].

$$P_i = \prod_{j=1}^N P_i^j \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, K \quad \text{رابطه (۲)}$$

- ✓ روش مینیمم: از میان سطوح اطمینان به دست آمده برای هر کلاس توسط طبقه‌بندی کننده‌های مختلف کمترین آن‌ها در نظر گرفته می‌شود (رابطه (۳)). سپس از میان احتمالات جدید به وجود آمده برای کلاس‌ها، بیشترین آن‌ها انتخاب شده و کلاس موردنظر به عنوان کلاس نهایی در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

$$P_i = \min_{i=1}^N (P_i^{(j)}) \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, K \quad \text{رابطه (۳)}$$

- ✓ روش ماکزیمم: از میان سطوح اطمینان به دست آمده برای هر کلاس توسط طبقه‌بندی کننده‌های مختلف بیشترین آن‌ها در نظر گرفته می‌شود (رابطه (۴)). سپس از میان احتمالات جدید به وجود آمده برای کلاس‌ها، بیشترین آن‌ها انتخاب شده و کلاس موردنظر به عنوان کلاس نهایی در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

$$P_i = \max_{i=1}^N (P_i^{(j)}) \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, K \quad \text{رابطه (۴)}$$

۲-۳-۲- روش‌های در سطح مفهوم

روش‌های در سطح مفهوم، خروجی هر طبقه‌بندی کننده تنها یک برچسب به ازای هر پیکسل ورودی می‌باشد [۱۷، ۱۸].

- ✓ رأی اکثریت

اگر خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها برای نمونه x به صورت $T^{(1)}, T^{(2)}, T^{(3)}, \dots, T^{(N)}$ باشند، آنگاه کلاسی به عنوان کلاس نهایی انتخاب می‌شود که دارای بیشترین رأی در بین خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها باشد. در این روش خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها به طور یکسان باهم ترکیب می‌شوند [۲۱].

۳-۳-۲- روش ترکیب بر اساس دقت تولیدکننده

دقت تولیدکننده بیانگر دقت طبقه‌بندی پیکسل‌های مربوط به یک کلاس خاص در نقشه‌ی واقعیت زمینی است؛ یعنی طبقه‌بندی کننده پیکسلی را به یک کلاس خاص نسبت داده باشد، به‌طوری‌که کلاس واقعی آن کلاس باشد. این دقت بصورت رابطه (۵) بیان می‌شود (x_{jj} المان مربوط به ماتریس ابهام می‌باشد) [۱، ۲]:

$$\text{Producer Accuracy} = \frac{x_{jj}}{\sum_{i=1}^r x_{ij}} \quad (5)$$

روش ترکیب بر اساس دقت تولیدکننده بدین صورت خواهد بود که با مقایسه دقت تولیدکننده کلاس‌ها، برای هر پیکسل روشی که منجر به دقت تولیدکننده‌ی بالاتر گردد برچسب خود را به آن پیکسل نسبت دهد.

۴-۲- آنالیز عدم قطعیت

برای انجام آنالیز عدم قطعیت از معیار حداقل انحراف نسبی^۱ استفاده شده است. این معیار می‌تواند اطلاعات قابل استخراج از بردار احتمالات در مورد عدم قطعیت را در یک عدد خلاصه کند. مقادیر به دست آمده از این معیار در بازه [۰، ۱] قرار می‌گیرند. این معیار توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$RMD = 1 - \frac{\max[P_i(x)] - \frac{\sum_{j=1}^n P_j(x)}{N}}{1 - \frac{1}{k}} \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, K \quad (6)$$

که در آن ($P_i(x)$) نشان‌دهنده‌ی درجه تعلق پیکسل x به کلاس i و K نیز تعداد کلاس موردنظر می‌باشد. این معیار به مجموع تعداد کل کلاس‌ها و مراکزیم مقدار احتمال ثانویه بستگی دارد. جدول (۱) رفتار معیار RMD، برای محاسبه عدم قطعیت نتایج طبقه‌بندی را نشان می‌دهد.

جدول ۱: محاسبه معیار RMD

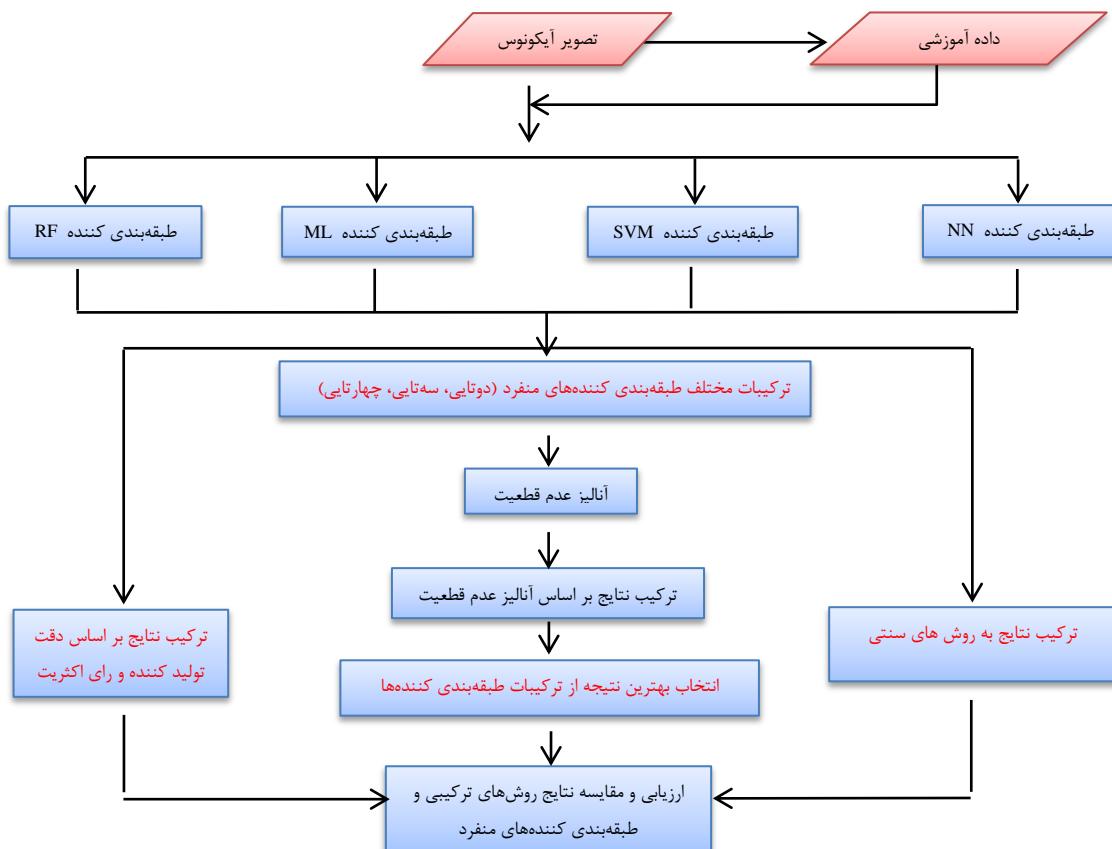
i	درجه تعلقات	Max(P_i)	n	RMD
۱	۱،۰،۰	۱	۳	۰
۲	۰،۹،۰،۱،۰	۰،۹	۳	۰،۱۵
۳	۰،۸،۰،۱،۰،۱	۰،۸	۳	۰،۳۰
۴	۰،۴،۰،۴،۰،۲	۰،۴	۳	۰،۹۰
۵	۰،۸،۰،۱،۰،۱،۰،۰	۰،۸	۵	۰،۲۵
۶	۰،۴،۰،۴،۰،۲،۰،۰	۰،۴	۵	۰،۷۵
۷	۰،۴،۰،۴،۰،۲،۰،۰،۰،۰	۰،۴	۸	۰،۶۸۶
۸	۰،۸،۰،۱،۰،۱،۰،۰،۰،۰	۰،۸	۸	۰،۲۲۹
۹	۰،۴،۰،۳،۰،۲،۰،۱،۰،۰،۰،۰	۰،۴	۱۰	۰،۶۶۷
۱۰	۰،۱،۰،۱،۰،۱،۰،۱،۰،۱،۰،۱،۰،۱	۰،۱	۱۰	۱
۱۱	۰،۴،۰،۳،۰،۲،۰،۱،۰،۰،۰،۰،۰،۰،۰	۰،۴	۱۵	۰،۶۴۳
۱۲	۰،۸،۰،۱،۰،۱،۰،۰،۰،۰،۰،۰،۰،۰	۰،۸	۱۵	۰،۲۴۳
۱۳	۰،۸،۰،۱،۰،۰،۰،۰،۰،۰،۰،۰،۰،۰	۰،۸	۲۰	۰،۲۰۶

با توجه به جدول (۱)، ملاحظه می‌شود زمانی که درجه تعلقات پیکسل نزدیک به هم باشند آن پیکسل همواره دچار عدم قطعیت خواهد بود و در بدترین حالت تمام المان‌ها (درجه تعلقات) باهم مساوی باشند. لذا با در نظر گرفتن بردار احتمالات و معیار RMD می‌توان گفت که هر چه مقدار RMD بیشتر باشد عدم قطعیت زیاد است و بالعکس.

^۱ Relative Maximum Deviation

۳- روش انجام تحقیق

محوریت اصلی این تحقیق ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها بر اساس آنالیز عدم قطعیت جهت بهبود نتایج طبقه‌بندی می‌باشد. فلوچارت کلی تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): فلوچارت کلی تحقیق

با اجرای طبقه‌بندی کننده‌های منفرد بیشترین شباهت، ماشین بردار پشتیبان، شبکه‌های عصبی و جنگل تصادفی، ترکیبات مختلف از طبقه‌بندی کننده‌های اولیه ایجاد می‌شوند. سپس با داشتن درجه تعلقات کلیه روش‌های طبقه‌بندی، اقدام به آنالیز عدم قطعیت توسط معیار RMD خواهد شد. درنهایت در تمامی ترکیبات مختلف ایجاد شده، برای هر پیکسل روشی که منجر به RMD کمتری گردد، برچسب خود را به آن پیکسل نسبت می‌دهد. در پایان از بین ترکیبات طبقه‌بندی ایجاد شده، بهترین ترکیب با دقت بالاتر انتخاب شده و با روش‌های طبقه‌بندی کننده‌های منفرد و نیز روش معمول ماکریم، مینیم، میانگین حسابی، هندسی، رأی اکثربت و دقت تولید کننده مقایسه خواهد شد.

۴- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

۴-۱- داده‌های ورودی و پیش‌پردازش‌ها

منطقه موردمطالعه و تصویر ورودی: تصویر استفاده شده (شکل (۲)) در این تحقیق مربوط به یک منطقه نیمه‌شهری (آیکونوس) در کشور تاسمانی شهر هوبارت هست که شامل ۴ باند طیفی (R, G, B, NIR) و ۲ باند پانکروماتیک با دقت رادیومتریکی ۱۱ بیت می‌باشد. برای استفاده از قابلیت مکانی باند Pan و قابلیت چند طیفی به صورت همزمان از

الگوریتم Pan Sharpening – Spectral Sharpening استفاده شد همچنین عمل تصحیح هندسی بر روی تصویر انجام شد که RMSD مربوط به تصحیح هندسی برابر ۰.۳۲۹۷ متر حاصل شد.



شکل ۲: تصویر منطقه مورد مطالعه

کلاس‌های موردنظر: داده‌های آموزشی و تست در شش کلاس (آب، خاک، جاده، ساختمان، چمن، درخت)، انتخاب شدند. تعداد داده‌های آموزشی و تست باهم خیلی اختلاف نداشته و در کل تصویر از پراکندگی مناسبی برخوردارند. تعداد داده‌های آموزشی و تست در جدول (۲) ملاحظه می‌شود.

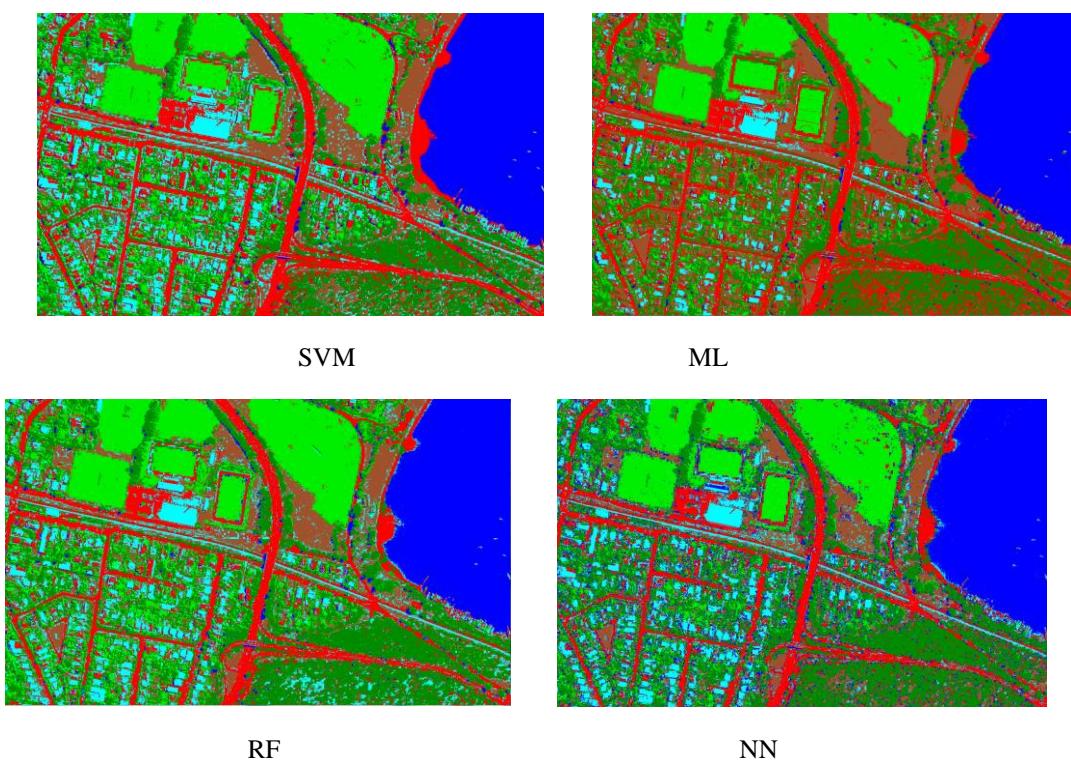
جدول ۲: تعداد داده‌های آموزشی و تست

نام کلاس	تعداد داده‌های آموزشی	تعداد داده‌های تست
آب	۱۰۷۱	۱۱۴۸
خاک	۱۳۳۸	۱۴۹۳
جاده	۱۷۲۲	۱۵۴۱
ساختمان	۱۳۹۵	۱۴۶۹
چمن	۱۱۳۰	۱۰۲۲
درخت	۱۳۱۰	۱۱۷۰

۴-۲- طبقه‌بندی کننده‌های اولیه

طبقه‌بندی کننده‌های اولیه RF، ML، NN، SVM به عنوان طبقه‌بندی کننده‌های اولیه (مبنای) در نظر گرفته شدند. با اجرای طبقه‌بندی کننده‌های اولیه، درجه تعلق تمامی پیکسل‌ها در هر چهار روش RF، ML، NN، SVM و محاسبه شدند. نتیجه نهایی (شکل (۳)) هر کدام از این طبقه‌بندی کننده‌ها و ارزیابی دقت این آن‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

با توجه به ارزیابی دقت طبقه‌بندی کننده‌های اولیه (جدول (۳)) و نیز تفسیر بصری می‌توان گفت که طبقه‌بندی کننده‌ها با داده‌ی آموزشی یکسان نتایج متفاوتی ارائه می‌دهند بطوریکه روش ML دارای کمترین دقت و روش RF دارای بیشترین دقت می‌باشد. لذا هیچ طبقه‌بندی کننده‌ای کامل و بدون نقص نیست. بدین معنی که طبقه‌بندی کننده‌ها ممکن‌اند در برخی موارد نسبت به بقیه نتایج بهتری تولید کنند ولی هیچ‌یک از آن‌ها بر سایرین برتری نداشته و هر کدام نقاط قوت و ضعف‌های خاص خود را دارند و نمی‌توانند تمام داده‌ها را بدون هیچ خطای طبقه‌بندی کند. درواقع هر طبقه‌بندی کننده‌ای یکسری از پیکسل‌ها را خوب و یکسری از پیکسل‌ها را بد طبقه‌بندی می‌کند. به عبارتی دیگر برخی از پیکسل‌ها با قطعیت بالا و برخی دیگر با قطعیت پایین برچسب‌گذاری می‌شوند (در این حالت پیکسل‌ها دارای عدم قطعیت هستند). از این‌رو ترکیب مناسب طبقه‌بندی کننده‌ها، می‌تواند نتایج طبقه‌بندی بهتری نسبت به هر طبقه‌بندی کننده و حتی بهترین آن‌ها را تولید کند.



شکل ۳: نتیجه حاصل از طبقه‌بندی کننده‌های منفرد

جدول ۳: ارزیابی دقیق طبقه‌بندی کننده‌های منفرد

RF	SVM	NN	ML	نتائج
٨٠.٥٦	٨٠.٠١	٧٩.٧٠	٧٧.٩٥	دقت کلی (%)
٠.٧٦٧	٠.٧٦٠	٠.٧٥١	٠.٧٣٤	ضریب کاپا (%)
٠.٦١٢	٠.٦٥٦	٠.٦٩٥	٠.٧١٥	میانگین RMD

از آنجایی که نتایج طبقه‌بندی همواره اطلاع از عدم قطعیت در فرآیند طبقه‌بندی می‌تواند منجر به بهبود دقت طبقه‌بندی می‌دهد [۱۲] این امید وجود دارد که با شناسایی عدم قطعیت‌های موجود در نتایج طبقه‌بندی کنده‌ها و ترکیب نتایج بر اساس آنالیز عدم قطعیت، پیکسل‌هایی که دارای قطعیت کمتری هستند با انجام این ترکیب از قطعیت بیشتری پرخور دار شوند و درنهایت دقت طبقه‌بندی را افزایش یابد.

۴-۳- ترکیب خروجی‌ها بر اساس آنالیز عدم قطعیت

به منظور بررسی دقیق تر روش پیشنهادی ترکیب، ترکیبات مختلفی از طبقه‌بندی کننده‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. این ترکیبات شامل دسته‌های مختلف دوتایی، سه‌تایی و چهارتایی از طبقه‌بندی کننده‌ها منفرد می‌باشد. با داشتن درجه تعلقات مربوط به روش‌های مختلف NN، SVM، RF و ML، اقدام به آنالیز عدم قطعیت (توسط معیار RMD) بر روی تمامی ترکیبات مختلف طبقه‌بندی کننده‌ها شد (بسته به نوع ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها، هر پیکسل دارای دو، سه و یا چهار مقدار RMD می‌باشد). درنهایت با داشتن RMD، برای هر پیکسل روشی که منجر به RMD کمتری گردد، برچسب خود را به آن پیکسل نسبت می‌دهد. نتیجه به دست آمده برای تمامی ترکیبات در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴: ارزیابی دقیق مربوط به ترکیبات طبقه‌بندی کننده‌ها

میانگین RMD	ترکیب خروجی‌ها بر اساس آنالیز عدم قطعیت		ترکیبات	شماره ترکیبات
	ضریب کاپا (%)	دقیق کلی (%)		
۰.۵۸۹	۰.۷۵۱	۷۹.۹۲	ML+NN	۱
۰.۵۶۲	۰.۷۶۱	۸۰.۳۳	ML+SVM	۲
۰.۵۶۲	۰.۷۶۸	۸۰.۵۹	ML+RF	۳
۰.۵۴۸	۰.۷۶۴	۸۰.۸۸	NN+SVM	۴
۰.۵۰۱	۰.۷۷۲	۸۱.۰۸	NN+RF	۵
۰.۵۴۹	۰.۷۷۰	۸۰.۹۷	SVM+RF	۶
۰.۴۹۸	۰.۷۷۵	۸۱.۸۵	ML+NN+SVM	۷
۰.۴۱۱	۰.۷۸۲	۸۲.۸۹	NN+SVM+RF	۸
۰.۴۳۴	۰.۷۸۰	۸۲.۶۵	ML+SVM+RF	۹
۰.۴۹۱	۰.۷۷۸	۸۱.۳۵	ML+NN+RF	۱۰
۰.۳۸۵	۰.۸۲۹	۸۳.۹۸	ML+SVM+NN+RF	۱۱

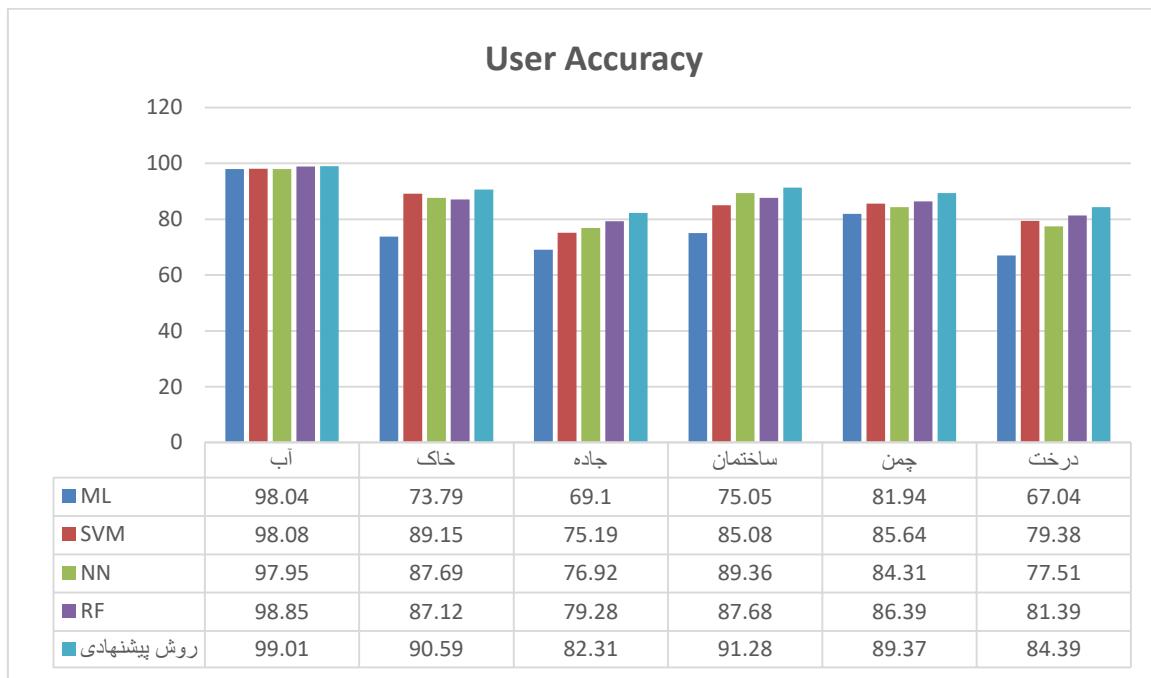
نتایج حاصل از جدول (۴) نشان می‌دهد که ترکیب طبقه‌بندی کننده بر اساس آنالیز عدم قطعیت همواره منجر به بهبود دقیق طبقه‌بندی می‌شود. بطوریکه با افزایش تعداد الگوریتم‌های طبقه‌بندی، این دقیق را به افزایش خواهد بود، بطوریکه ترکیب چهارتایی (ML+SVM+NN+RF) با دقیق کلی ۸۳.۹۸ درصد و ضریب کاپای ۰.۸۲۹ درصد دارای بیشترین دقیق می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که روش پیشنهادی ترکیب منجر به کاهش عدم قطعیت طبقه‌بندی می‌شود به طوریکه نسبت به طبقه‌بندی کننده‌های منفرد (جدول (۳)، مقدار RMD کاهش یافته است.



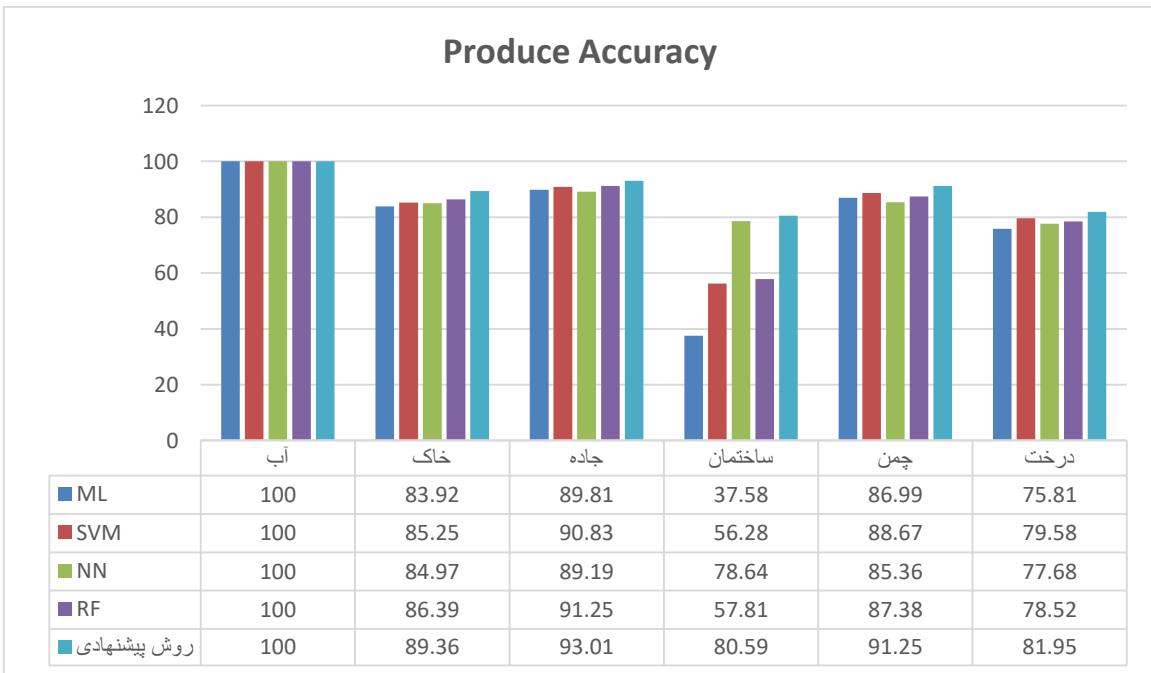
شکل ۴: نتیجه ترکیب خروجی‌ها بر اساس آنالیز عدم قطعیت

نتایج حاصل از شکل (۴) نشان می‌دهد پیکسل‌هایی که به صورت مختلط در طبقه‌بندی کننده‌های اولیه ایجاد شدند، کاهش یافته است. همچنین بهبود قابل ملاحظه‌ای در مناطق جنگلی و شهری دیده می‌شود. در صورتی که در طبقه‌بندی کننده‌ی اولیه مانند ML، این مناطق به درستی طبقه‌بندی نشده‌اند.

در پایان دقیق کاربری و تولید کننده‌ی مربوط به طبقه‌بندی کننده‌های منفرد و روش پیشنهادی ترکیب باهم مقایسه شدند که در اشکال (۵) و (۶) قابل ملاحظه می‌باشد.



شکل ۵: دقت کاربری مربوط به طبقه کننده‌های منفرد و روش پیشنهادی ترکیب



شکل ۶: دقت تولیدکننده مربوط به طبقه کننده‌های منفرد و روش پیشنهادی ترکیب

نتایج حاصل از شکل‌های (۵) و (۶) نشان می‌دهد که روش پیشنهادی ترکیب منجر به بهبود دقت تولیدکننده و دقت کاربری کلاس‌ها می‌شود.

۴-۴- پیاده‌سازی روش‌های سنتی و مقایسه نتایج

به منظور پیاده‌سازی روش‌های سنتی، نتیجه بهترین ترکیب (ترکیب چهارتایی) انتخاب شد. درنهایت نتایج خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها با روش‌های ماکزیمم، مینیمم، میانگین حسابی، میانگین هندسی، دقต تولیدکننده و رأی اکثربت ترکیب شدند. نتیجه موردنظر در جدول (۵) ملاحظه می‌شود.

جدول ۵: نتایج روش‌های ترکیب

نتایج	ماکزیمم	مینیمم	میانگین هندسی	میانگین حسابی	دقت تولیدکننده	رأی اکثربت
دقت کلی (%)	۸۰.۱۱	۸۰.۹۴	۸۲.۱۴	۸۱.۱۴	۷۹.۹۴	۸۱.۹۲
ضریب کاپا (%)	۰.۷۶۵	۰.۷۷۱	۰.۷۸۵	۰.۷۷۲	۰.۷۵۱	۰.۷۸۰
RMD	۰.۶۴۶	۰.۵۹۹	۰.۵۲۱	۰.۵۶۴	۰.۷۰۱	۰.۵۴۲

نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که برخی روش‌های ترکیب منجر به بهبود دقت می‌شود. دراین‌بین روش میانگین هندسی با دقت کلی ۸۲.۱۴ درصد و ضریب کاپا ۰.۷۸۱ درصد دارای بیشترین دقت و روش ماکزیمم و ترکیب بر اساس دقت تولیدکننده به ترتیب با دقت کلی ۸۰.۱۱ درصد و ۷۹.۹۴ درصد کمترین دقت مشاهده شد.

در پایان روش پیشنهادی ترکیب با روش‌های منفرد طبقه‌بندی کننده و روش‌های ماکزیمم، مینیمم، میانگین حسابی، میانگین هندسی، دقت تولیدکننده و رأی اکثربت مقایسه شد که نتایج بدست آمده در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶: مقایسه روش پیشنهادی ترکیب با سایر روش‌های پیشین

روش	دقت کلی (%)	ضریب کاپا (%)	میانگین RMD
ML	۷۷.۹۵	۰.۷۳۴	۰.۷۱۵
SVM	۸۰.۰۱	۰.۷۶۰	۰.۶۵۶
NN	۷۹.۷۰	۰.۷۵۱	۰.۶۹۵
RF	۸۰.۵۶	۰.۷۶۷	۰.۶۱۲
Min	۸۰.۹۴	۰.۷۷۱	۰.۵۹۹
Max	۸۰.۱۱	۰.۷۶۵	۰.۶۴۶
Product	۸۲.۱۴	۰.۷۸۵	۰.۵۲۱
Mean	۸۱.۱۴	۰.۷۷۲	۰.۵۶۴
Maximum Voting	۸۱.۹۲	۰.۷۸۰	۰.۵۴۲
Producer Accuracy	۷۹.۹۴	۰.۷۵۱	۰.۷۰۱
Analysis Uncertainty	۸۳.۹۸	۰.۸۲۹	۰.۳۸۵

با توجه نتایج جدول (۶) می‌توان گفت، روش پیشنهادی دارای دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌های طبقه‌بندی کننده‌های منفرد و نیز روش‌های ترکیب پیشین دارد.

لازم به ذکر است پیرو چنین تحقیقی بر اساس معیار آنتروپی در [۲۲] انجام گرفته است که نتایج مشابهی مشاهده شد. در این تحقیق نیز ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها بر اساس آنالیز عدم قطعیت با استفاده از معیار آنتروپی منجر به بهبود دقت نسبت به طبقه‌بندی کننده‌های اولیه و روش‌های پیشین شده است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق خروجی طبقه‌بندی کننده‌های منفرد RF، ML، NN، SVM و RF، بر اساس آنالیز عدم قطعیت در ترکیبات مختلف طبقه‌بندی باهم ترکیب شدند. با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان گفت:

ترکیب خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها بر اساس آنالیز عدم قطعیت باعث کاهش عدم قطعیت و درنهایت بهبود نتایج طبقه‌بندی می‌شود.

ترکیب خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها بر اساس آنالیز عدم قطعیت می‌تواند به عنوان یک قانون ترکیب جدید، برای ترکیب طبقه‌بندی کننده‌های منفرد مطرح شود.

مقایسه نتایج آنالیز عدم قطعیت بر اساس کمینه RMD، می‌تواند به عنوان یک معیار تصمیم‌گیری جدید برای برچسب دهی پیکسل‌ها استفاده شود.

نتیجه عملکرد یک طبقه‌بندی کننده با معیارهای صحت کلی و ضریب کاپا ارزیابی می‌شود اما این پارامترها به طور کامل منعکس کننده عملکرد طبقه‌بندی کننده‌ها نیستند. برای نشان دادن رفتار طبقه‌بندی کننده‌ها می‌توان از اطلاع عدم قطعیت استفاده کرد. همچنین عدم قطعیت نشان‌دهنده کیفیت نتایج طبقه‌بندی کننده‌ها می‌باشد. لذا معیار RMD را می‌توان به عنوان معیاری مناسب برای ارزیابی کیفیت نتایج طبقه‌بندی کننده‌ها در نظر گرفت. بدین معنی که کاهش میزان RMD نشان‌دهنده عملکرد مطلوب طبقه‌بندی کننده می‌باشد و بالعکس.

ترکیب خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها همیشه تضمین کننده افزایش کارایی طبقه‌بندی نیست (ترکیب به کارایی طبقه‌بندی کننده‌های تکی و اثرات آن‌ها در طول فرایند ترکیب بستگی دارد).

به دلیل اینکه دقیقت تولید کننده کلاس‌ها متأثر از دقیقت سایر کلاس‌های دیگر می‌باشد (دقیقت سایر کلاس‌ها در گیر هستند) ممکن است روش ترکیب بر اساس مقایسه بیشینه دقیقت تولید کننده مناسب نباشد و منجر به کاهش دقیقت طبقه‌بندی شود.

در پایان پیشنهاداتی ارائه می‌شود که می‌تواند به عنوان فعالیت‌های آتی مطرح کرد.

با استفاده از معیار RMD پیکسل‌های دارای عدم قطعیت شناسایی و با انتخاب یک حد آستانه گذاری مناسب، پیکسل‌های با قطعیت بالا، قطعیت متوسط و قطعیت پایین مشخص شوند و درنهایت با استفاده از پیکسل‌های دارای قطعیت بالا، اقدام به تولید داده‌های آموزشی جدید (مکمل) گردد. لذا با انجام این کار هزینه تولید داده‌های آموزشی به شدت کاهش می‌یابد.

استفاده از قانون ترکیب پیشنهادی (ترکیب بر اساس آنالیز عدم قطعیت) در سیستم‌های طبقه‌بندی چندگانه به منظور کاهش عدم قطعیت نتایج طبقه‌بندی می‌باشد.

مراجع

- [1] Richard O.Duda,Peter E.Hart,David G.Stork,"pattern classification"1998.
- [2] Robert A. Schowengerdt, " Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing", 2010.
- [3] G.M. Foody & P.M. Atkinson, Uncertainty in Remote Sensing and GIS, England: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [4] H. Ghassemian and H. Dehghani, "An Adaptive Hyperspectral Data Classification Model with Limited Training Sampels", Proceeding of ISPRS , Commission IV Joint Workshop, Sept 2003.

[5] Xue-Hua Liu , A.K. Skidmore , H. Van Oosten, "Integration of classification methods for improvement of land-cover map accuracy", ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing vol:18, PP:257– 268. 2002.

[6] João Manuel Portela da Gama, "Combining Classification Algorithms", Departamento de Ciéncia de Computadores Faculdade de Ciéncias da Universidade do Porto 1999.

[7] L. Hansen and P. Salamon, "Neural network ensembles". IEEE Transaction, Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp.993-1001,1990.

[8] Quanhua Zhao,Weidong Song," Remote Sensing Image Classification Based On Multiple Classifiers Fusion", 3rd International Congress on Image and Signal Processing, IEEE, 2010.

[۹] مجید محمد بیگی، ایمان خسروی، مجید چراغعلی، "طبقه‌بندی تصاویر ابر طیفی سنجش از دور با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی چندگانه"، مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - ۱۳۹۱ - دوره: ۳ - شماره: ۲ - صفحه: ۴۹-۵۱

[10] Bin Yang, Chunxiang Cao, Ying Xing and Xiaowen Li,"Automatic classification of remote sensing image using multiple classifier systems", athematical Problems in Engineering. Volume, Article ID 954086, 10 pages. 2015.

[11] Behnaz Bigdeli & Farhad Samadzadegan & Peter Reinartz," A Multiple SVM System for Classification of Hyperspectral Remote Sensing Data", Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, JGST;4(3):253-286, 2015.

[12] Luisa M S Gonçalves, Cidalia Fonte, Eduardo N B S Júlio, and Mario Caetano, "A Method to Incorporate Uncertainty in the Classification of Remote Sensing Images", Shanghai, P. R. China, pp. 179-185, 2008.

[13] T.G Dietterich. Machine learning research: four current directions. American Association for Artificial Intelligence, pp.97-105,1997.

[14] A. Al-Ani, A New Technique for Combining Multiple Classifiers using The Dempster-shafer of Evidence. Journal of Artificial intelligence Research 17, pp. 333-361, 2002.

[15] Briem, G.J., Benediktsson, J.A., and Sveinsson, J.R." Multiple classifiers applied to multisource remote sensing data". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,40 (10), 2291–2299. 2002.

[16]- Mathieu Fauvel, Jocelyn Chanussot, Jon Atli Benediktsson," Decision Fusion for the Classification of Urban Remote Sensing Images", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 44, pp.2828-2838, 2006.

[17] H. T. Chu, and L. Ge," Combination of Genetic Algorithm and Dempster-Shafer Theory of Evidence for Land Cover Classification Using Integration of SAR and Optical Satellite imagery" International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume 2, 4014-4018, 2012.

[18] Aiying zhang,ping tang," Fusion algorithm of pixel-based and object-based classifier for remote sensing image classification", IEEE. 2013.

[19] Jui-Sheng Chou, Min-Yuan Cheng, Yu-Wei Wu," Improving classification accuracy of project dispute resolution using hybrid artificial intelligence and support vector machine models", Expert Systems with Applications 40 ,2263–2274, 2013.

[20] Luísa M S Gonçalves , Cidália Fonte , Eduardo N B S Júlio , and Mario Caetano, A Method to Incorporate Uncertainty in the Classification of Remote Sensing Images, Shanghai, P. R. China, June 25-27, pp. 179-185. 2008.

[21] Yasser.M " using a combination of classification to classify hyperspectral images", Geodesy and Geomatics Faculty, K.N Toosi University of technology 2006.

[۲۲] روزبه خانبلوکی، مهدی مختارزاده،"ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها بر اساس آنالیز عدم قطعیت" اولین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، ۱۳۹۴.