کنفرانس ملی فن‌آوری‌ها و کاربردهای نوین ژئوماتیک

تخمین قدرت تفکیک مکانی مناسب داده حرارتی هوایی سنجنده TELOPS به منظور بررسی نسبت سیگنال به نویز این داده‌ها

سجاد موسی‌خانی[۱]، مهرداد اسلامی[۲]، فریدون ملایی کشکی[۳]

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، گروه فتوگرامتری، دانشکده نقشه‌برداری و فناوری اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران

Sajad.mousakhani@gmail.com ،

[۲] دانشجوی دکتری فتوگرامتری، گروه فتوگرامتری، دانشکده نقشه‌برداری و فناوری اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران

Meslami2000@gmail.com ،

[۳] مدیر امور معادن، شرکت صنایع خاک چینی ایران

fmkoshki77@yahoo.com ،

چکیده: امروزه گسترش تکنولوژی‌های جدید سنجش‌ازدوری و فتوگرامتری با پیدایش فنّاوری‌های نوین پیشرفت‌های شگرفی را به خود دیده است. سنسورهای حرارتی از دیرباز موردتوجه محققان حوزه‌های مختلف علوم ژئوماتیک قرارگرفته است. با تحول بزرگ در قدرت تفکیک مکانی سنسورهای حرارتی در سال‌های اخیر و بهبود آن تا حد متر، انقلابی عظیم در حوزه استفاده از این داده‌ها در کاربردهای متفاوت ازجمله شناسایی عوارض شهری، ادغام با دیگر داده‌ها و غیره به وجود آمده است. تحقیقات گذشته نشان داده است، با افزایش قدرت تفکیک مکانی یک داده تصویری اطلاعات رادیو متریکی ثبت‌شده در آن با کاهش محتوای طیفی (کاهش نسبت سیگنال به نویز) همراه خواهد شد. لذا با توجه به حساسیت بالای سنسورهای حرارتی به مقدار انرژی دریافتی از اجسام، در این مقاله ارزیابی جامعی از مقدار مناسب قدرت تفکیک مکانی این داده‌ها به جهت افزایش بزرگی نسبت سیگنال به نویز آن‌ها انجام پذیرفته است. برای این منظور ابتدا بر روی داده مورد مطالعه یک طبقه‌بندی جهت استخراج شش کلاس هدف انجام پذیرفت. سپس، تأثیر استفاده از فیلتر پایین گذر جهت بهبود محتوای طیفی تصویر مورد آزمایش قرار گرفت که بهبود آن‌چنانی را در افزایش دقت طبقه‌بندی به همراه نداشت. درنتیجه تخمین قدرت تفکیک مکانی مناسب که حاوی محتوای طیفی بالا باشد مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور رزولوشن‌های متفاوتی از تصویر از طریق هرم‌های تصویری ساخته و طبقه‌بندی بر روی آن‌ها انجام شد. نتایج ارزیابی‌های این تحقیق نشان داد، در صورت استفاده از تصویر با پیکسل سایز زمینی چهار برابر تصویر اصلی جهت اخذ داده‌ها محتوای طیفی داده‌های حرارتی سنجنده **TELOPS** جهت طبقه‌بندی و شناسایی عوارض با بهبود همراه خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: نسبت سیگنال به نویز، سنجش‌ازدور، سنجنده‌های حرارتی، سنجنده TELOPS

Instructions and Formatting Rules for Confrance

Sajad Mousakhani[1], Mehrdad Eslami[1], Fereydon Mollae Koshki [2] , Abolfazl Ranjbar [1]

[1] School of Surveying and Geospatial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

[2] Iran China Clay Industries Company

[1] School of Surveying and Geospatial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract : Thermal InfraRed (TIR) data spatial resolution enhancement is an important challenge for many researchers. High spatial and spectral resolution TIR data is a crucial need for Geomatics applications. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Airborne very high spatial resolution TIR is an innovative data nowadays. Recent developments in spatial resolution of the TIR sensors have been an interesting topic for scientists. These kind of the data are captured by the emitted energies from objects. As a known criterion, Signal to Noise Ratio (SNR) will reduce by increasing the spatial resolution of an image and will drop the spectral content. This paper will estimate an appropriate spatial resolution of the TIR data (TELOPS TIR data) in consideration of the SNR. So fallowing steps have been applied. First, on TELOPS TIR data a low pass filter is applied and achieved results fed to maximum likelihood classification to evaluate the accuracy improvement. The obtained results show that there is not significant improvement in classification accuracy by applying low-pass filter. Second, different spatial resolution of the TELOPS TIR images is estimated to obtain higher spectral content and SNR. For this purpose, altered spatial resolutions of the TELOPS TIR images are estimated and fed to the maximum likelihood classification technique separately. Not only, is classification accuracy not decreased by using images with four times greater Ground Sampling Distance (GSD) but also, SNR and spectral contents are improved.

Keywords: Thermal InfraRed, SNR, Image processing, Classification, Spatial resolution, Spectral content.

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های فراوان در علوم فضایی و علوم مرتبط با مهندسی ژئوماتیک بخصوص در فنّاوری‌های نوین سنجش‌ازدوری و فتوگرامتری اطلاعات و داده‌های مکانی مختلفی را برای استفاده در سازمان‌ها و نهادها به وجود آورده است [۱]. ازاین‌رو روش‌های سنتی شناسایی و استخراج داده‌های مکانی عوارض، از طریق برداشت‌های زمینی و استخراج اطلاعات فقط از تصاویر اپتیک دیگر جواب گوی نیازهای جوامع امروزی نیست. ازاین‌رو استفاده از سنسورهای مختلف که داده‌های متفاوتی را در اختیار قرار می‌دهند؛ روز به‌روز در حال افزایش هست. داده‌های مادون‌قرمز حرارتی از دیرباز مورداستفاده محققان علوم مختلف بوده است [۲] و [۳]. این داده‌ها به‌طور سنتی به جهت ماهیت تشعشعی آن‌ها دارای قدرت تفکیک‌های مکانی پایین و در حد چندین متر بوده‌اند. امروزه به دلیل اهمیت سنجش‌ازدور حرارتی در مطالعات محیطی، بسیاری از محققان، تحقیقات پایه درزمینه‌ی سنجش‌ازدور حرارتی و توسعه فناوری سنجنده‌ها و کاربرد-های جدید داده‌های حرارتی را ضروری می‌دانند. ازجمله کاربردهای تصاویر حرارتی شناسایی جزایر حرارتی شهری، تهیه نقشه حرارتی، کاربرهای متنوع نظامی و شناسایی انرژی خروجی از ساختمان‌ها (هدر رفت انرژی) جهت عایق‌بندی می-توان اشاره کرد[4]

در سال‌های اخیر با رشد سنسورهای مادون‌قرمز حرارتی هوایی جدید که قدرت تفکیک مکانی آن‌ها بهبودیافته است؛ مطالعاتی جدیدی به جهت استفاده از این داده‌ها جهت شناسایی و استخراج عوارض انجام پذیرفته است [۵]. قدرت تفکیک مکانی بالای داده‌های اخیر حرارتی این امکان را به محققان می‌دهد تا با ارزیابی روش‌های متفاوت و نوین به شناسایی عوارض بپردازند. یکی از این روش‌ها تلفیق تصاویر حرارتی با قدرت تفکیک مکانی و طیفی بالا جهت دست‌یابی به دقت کمی و کیفی مناسب با داده‌های اپتیک در شناسایی عوارض شهری هست[6] . ازجمله تولیدکنندگان سنسورهای حرارتی می‌توان به سنسور حرارتی شرکت Telops کانادا اشاره کرد که به‌طور وسیعی از سال ۲۰۱۴ با قدرت تفکیک مکانی یک متر مورد توجه محققان حوزه طبقه‌بندی و استخراج عوارض شهری قرار گرفته است [۷]. بر مبنای داده‌های تولیدشده توسط این سنجنده مسابقه‌ای در سال ۲۰۱۴ توسط گروه آنالیز و تلفیق داده جامعه سنجش‌ازدور IEEE برگزار شد که نتایج آن در مقاله‌ای منتشر شده است [۵].

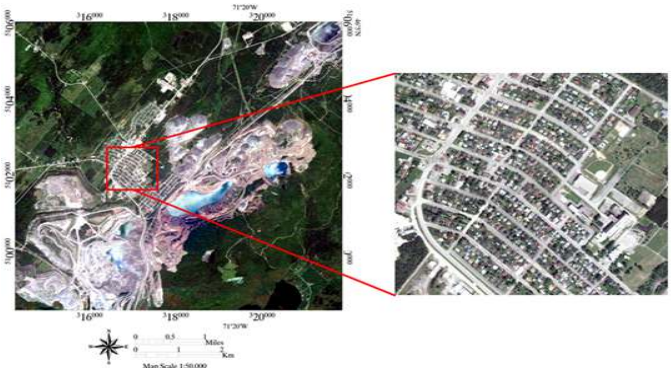
وجود قدرت تفکیک مکانی بالا در بحث استخراج عوارض امری ضروری است، اما در تصاویر سنجش‌ازدوری و فتوگرامتری به دلیل محدودیت سیگنال به نویز سنجنده، امکان اخذ تصاویر با قدرت تفکیک هم‌زمان طیفی و مکانی بالا تقریباً مقدور نیست [۸]. اگر قدرت تفکیک طیفی بالا موردنظر باشد، باید قدرت تفکیک مکانی سنجنده کاهش یابد. بلعکس، برای اخذ تصاویر با دقت مکانی بالا، دقت طیفی تصویر ازدست‌رفته و تصویر پانکروماتیک مدنظر قرار می‌گیرد [۸]. لذا با توجه به تازه بودن سنجنده‌های حرارتی دارای قدرت تفکیک مکانی بالا (در این مطالعه سنجنده حرارتی Telops) در کاربردهایی که بیشتر اطلاعات غیر کمی را مدنظر قرار داده‌اند، بررسی قدرت تفکیک مکانی مناسب به جهت حفظ حداکثری نسبت سیگنال به نویز ضروری به نظر می‌رسد. لذا در این تحقیق با تولید هرم‌های مختلف از دو باند تصویر حرارتی سنجنده Telops به ارزیابی جامعی از قدرت تفکیک مکانی مناسب جهت اخذ داده با حداکثر حفظ محتوای طیفی داده، مورد انجام قرارگرفته است. تصویر اصلی دارای قدرت تفکیک مکانی یک متر هست؛ که از آن با استفاده از فرایند تولید هرم تصویر به ترتیب دو داده جدید باقدرت تفکیک‌های مکانی ۲ و ۴ متر تولید گردید. سپس، این داده‌ها به شیوه‌های مختلف جهت بررسی محتوای طیفی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲. مواد و روش تحقیق

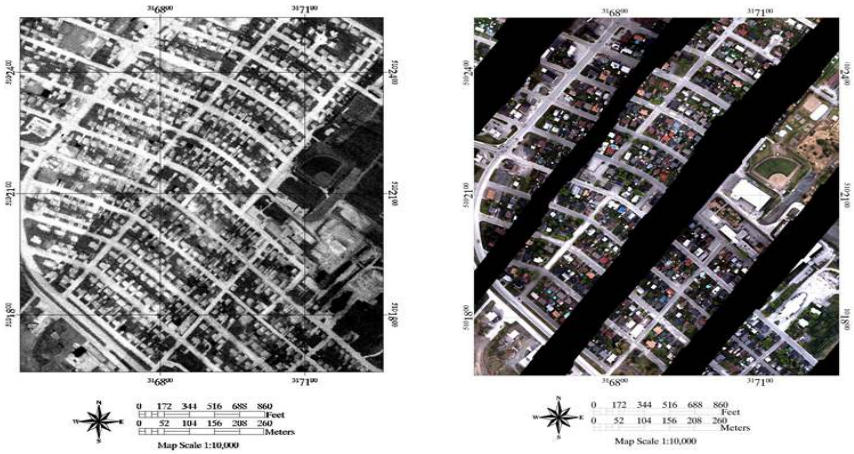
فرآیند پژوهش در این مقاله مبتنی بر یک فرایند سه مرحله ای است، بدین صورت که ابتدا با تعریف مسأله معیارهای مورد سنجش را معرفی کرده، سپس مراحل زیر با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدوری به بررسی محتوا و قدرت سیگنال به نویز در تصویر ذکرشده پرداخته است. برای این منظور ابتدا بر روی داده مورد مطالعه یک طبقه‌بندی جهت استخراج شش کلاس هدف انجام پذیرفت. سپس، تأثیر استفاده از فیلتر پایین گذر جهت بهبود محتوای طیفی تصویر مورد آزمایش قرار گرفت. سپس، تخمین قدرت تفکیک مکانی مناسب که حاوی محتوای طیفی بالا باشد مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور رزولوشن‌های متفاوتی از تصویر از طریق هرم‌های تصویری ساخته و طبقه‌بندی بر روی آن‌ها انجام شد. برای ارزیابی نتایج، خروجی تمام هرم‌های تصویری طبقه‌بندی شده با داده‌های تست مورد ارزیابی قرار گرفت.

۱-۲- منطقه مطالعاتی و داده مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه ناحیه از شهر تتفورد واقع در استان کبک در میان انبوهی از درختان، معادن و دریاچه‌ها در کنار منطقه معدنی تتفورد در کشور کانادا هست. در شکل ۱ این منطقه شهری نمایش داده‌شده است. مجموعه داده مورداستفاده در این تحقیق شامل دو سری تصویر مرئی و داده فرا طیفی مادون‌قرمز حرارتی هوایی هست. این داده‌ها گردآوری‌شده توسط گروه فنی آنالیز تصویر و تلفیق داده[۱] (IADF)، مربوط به جامعه سنجش‌ازدور و علوم زمین IEEE[۲] برای مسابقه تلفیق داده سال ۲۰۱۴ می‌باشد. داده‌های موردنظر توسط سنجنده هوایی TELOPS در تاریخ ۲۱ ماه می ۲۰۱۳ به‌وسیله سکوی هوایی با ارتفاع متوسط ۸۰۷ متر اخذ گردیده است. تصویر مرئی در سه باند آبی، قرمز و سبز باقدرت تفکیک مکانی ۲۰ سانتیمتر در اندازه تصویری ۳۷۶۹×۴۳۸۶ پیکسل در محدوده طیفی ۰/۴ تا ۰.۷ می‌باشد. همچنین داده مادون‌قرمز حرارتی فراطیفی در ۸۴ باند، در محدوده طیفی ۷/۸ تا ۱۱/۵ میکرومتر با رزولوشن طیفی ۰/۰۴۴ میکرومتر و قدرت تفکیک مکانی ۱ متر می‌باشد. شکل ۲ نشان‌دهنده تصویر مرئی (راست) و تصاویر فراطیفی مادون‌قرمز حرارتی (چپ) است [۷].



شکل ۱. منطقه مورد مطالعاتی



شکل ۲. داده مورداستفاده، تصویر مرئی (راست) و تصویر فراطیفی مادون‌قرمز حرارتی (چپ)

[۱] Image Analysis and Data Fusion
[۲] IEEE Geoscience and Remote Sensing Society

۳. بحث و ارزیابی

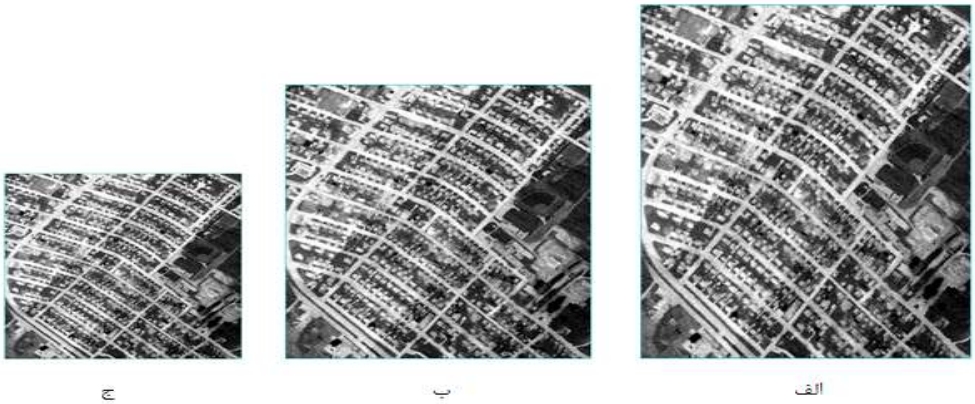
در ادامه به بررسی و ارزیابی نتایج بدست آمده پرداخته خواهد شد.

۳-۱- ارزیابی با اعمال فیلتر پایین گذر

تصاویر ماهواره‌ای همواره به دلایل مختلفی، دارای نویز می باشند، منابع اصلی نویز در تصاویر دیجیتال، در اثنای تصویر برداری یا انتقال تصاویر از کانالهای مخابراتی بوجود می‌آیند. کارایی حسگرهای تصویر برداری تحت تاثیر عوامل مختلفی، مثل شرایط محیطی در لحظه تصویر برداری و خود عناصر حس‌کننده قرار دارند. به عنوان مثال، در تصویر برداری با دوربین CCD، سطوح نور و حرارت حسگر، عوامل اصلی تاثیر گذاری در میزان نویز در تصویر نتیجه است[۹]. لذا جهت بررسی و مقایسه تاثیر کاهش نویز با اعمال یک فیلتر میانگین بر تصویر حرارتی و ادغام با تصویر مرئی، طبقه بندی را انجام داده و نتایج در جدول ۱. و جدول ۲. نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از این مرحله نشان داد، کلاس‌های طبقه‌بندی شده از لحاظ آماری با افزایش یا بهبود فاحش در دقت طبقه‌بندی همراه نیست. مطابق جدول ۱. و جدول ۲. مقایسه دقت کلاسی و بر اساس نتایج بدست آمده در جدول ۲. و ۳. دقت کل و ضریب کاپا محاسبه گردیده، حاکی از آن است نسبت سیگنال به نویز در تصاویر حرارتی با بهبود رزولوشن مکانی، افزایش می-یابد. همچنین نتایج بدست آمده نشان داد استفاده از فرایندهای بهبود تصاویر بر اساس استفاده از فیلتر پایین‌گذر با افزایش دقت طبقه-بندی همراه نیست.

۳-۲- ارزیابی ادغام هرم‌های اول و دوم با باندهای منتخب

برای بررسی رزولوشن مکانی مناسب داده‌های حرارتی با دارا بودن محتوای طیفی بالا به صورت زیر اقدام گردید. در مرحله اول دو باند (در محدوده ۷ و ۹ میکرمتر) تصویر حرارتی مورد نظر به عنوان داده‌های مورد مطالعه انتخاب شد. سپس از روی باند اصلی به صورت مجزا برای هر باند هرم اول و نیز از روی هرم اول، هرم دوم آن باند تشکیل شد. در ادامه ترکیب مجزای آن هرم‌ها با تصویر مرئی برای انجام فرایند طبقه‌بندی اتخاذ گردید. نتیجه تولید هرم‌های اول و دوم تصویر حرارتی و ادغام مجزای آن‌ها (به عنوان دو داده تست) با تصویر مرئی به منظور بررسی افزایش محتوای طیفی این داده به صورت جدول ۱. تا ۳. نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان داده استفاده از داده با قدرت تفکیک مکانی کمتر از داده اصلی با کاهش دقت محصولات تولید شده همره نیست.



شکل ۳. .هرم‌های تشکیل شده از تصویر مادون قرمز حرارتی (تصویر اصلی (الف)، هرم اول (ب) و هرم دوم (ج))

همچنین نتایج بدست آمده نشان داد، مطابق جدول ۱. در دقت کلاسی؛ مربوط به هر کلاس تغییر قابل توجهی دیده نمی‌شود. لذا، به نظر می‌رسد می‌توان به جای استفاده از تصویر با قدرت تفکیک مکانی ۱ متر از ۲ یا ۴ متر استفاده کرد، زیرا تصویر با رزولوشن مکانی ۴ متر دارای محتوای طیفی بیشتری می‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده از امکان تصویربرداری با ارتفاع بالاتر را نیز تاکید دارد.

جدول ۱. دقت طبقه‌بندی کلاس‌ها (به درصد)

نوع کلاس	اعمال فیلتر پایین گذرباند دوم ومرئی	دقت کلاس هرم اول باند اول ومرئی	دقت کلاس هرم دوم باند اول و مرئی
خیابان	۷۷	۷۷/۷۳	۷۸/۰۷
گیاهان	۹۱/۷۳	۹۲/۸۳	۹۲/۲۲
خاک	۸۹/۰۰	۸۸/۸۰	۸۶/۷۵
ساختمان با سقف قرمز	۹۱/۹۳	۹۱/۶۹	۹۱/۳۴
ساختمان با سقف خاکستری	۶۹/۴۹	۶۹/۵۷	۶۷/۵۲
ساختمان با سقف بتنی	۹۵/۲۷	۹۵/۲۹	۹۵/۲۸
دقت کل	۸۱/۸۱	۸۲/۰۹	۸۱/۹۰
ضریب کاپا	۰/۷۳۵۵	۰/۷۳۹۲	۰/۷۳۵۷

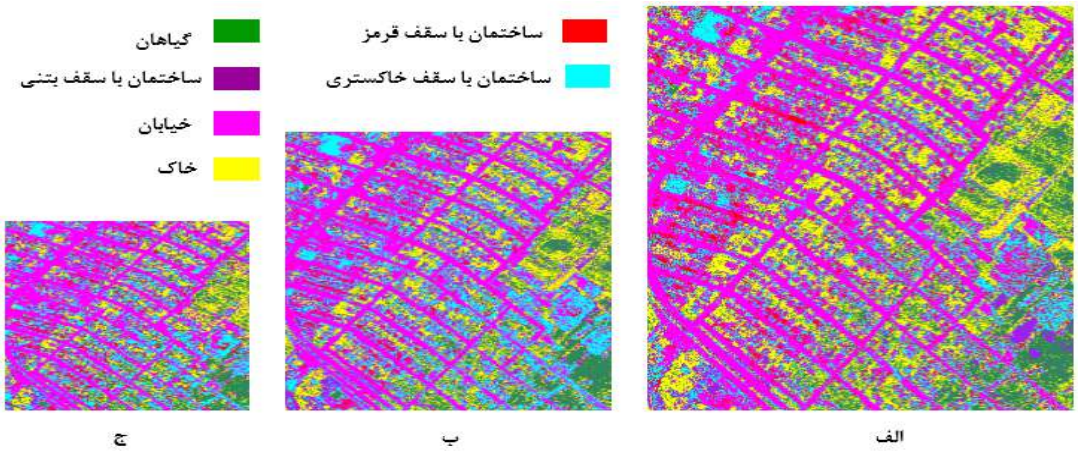
همچنین با بررسی نتایج به دست آمده از باند دوم (داده تست دوم) داده حرارتی مطابق جدول۲. به طور متوسط در دقت طبقه‌بندی، تغییر آنچنانی مشاهده نمی‌شود. در طبقه‌بندی اشیا بیشتر تشخیص نوع عارضه مطرح می‌باشد، لذا قدرت تفکیک مکانی بالا برای این نوع از کاربردها شاید لزومی نداشته باشد. با مشاهده نتایج جدول ۲. برخی از کلاس‌ها در اثر کاهش رزولوشن مکانی با بهبود دقت همراه بوده و برخی از کلاس ها تغییر نکرده و برخی نیز با کاهش جزئی دقت روبرو هستند.

جدول(۲): دقت طبقه‌بندی کلاس‌ها

نوع کلاس	اعمال فیلتر پایین گذرباند دوم ومرئی	دقت کلاس هرم اول باندوم ومرئی	دقت کلاس هرم دوم باند دوم و مرئی
خیابان	۷۶/۰۷	۷۶/۴۶	۷۷/۰۷
گیاهان	۹۳/۲۳	۹۴/۰۸	۹۳/۲۵
خاک	۸۷/۶۶	۸۶/۸۱	۸۵/۶۱
ساختمان با سقف قرمز	۹۱/۷۴	۹۱/۵۵	۹۱/۷۱
ساختمان با سقف خاکستری	۷۲/۹۰	۷۲/۷۰	۷۱/۰۳
ساختمان با سقف بتنی	۹۵/۳۳	۹۵/۳۳	۹۵/۳۳
دقت کل	۸۱/۴۹	۸۱/۷۶	۸۱/۸۱
ضریب کاپا	۰/۷۳۲۶	۰/۷۳۲۶	۰/۷۳۵۹

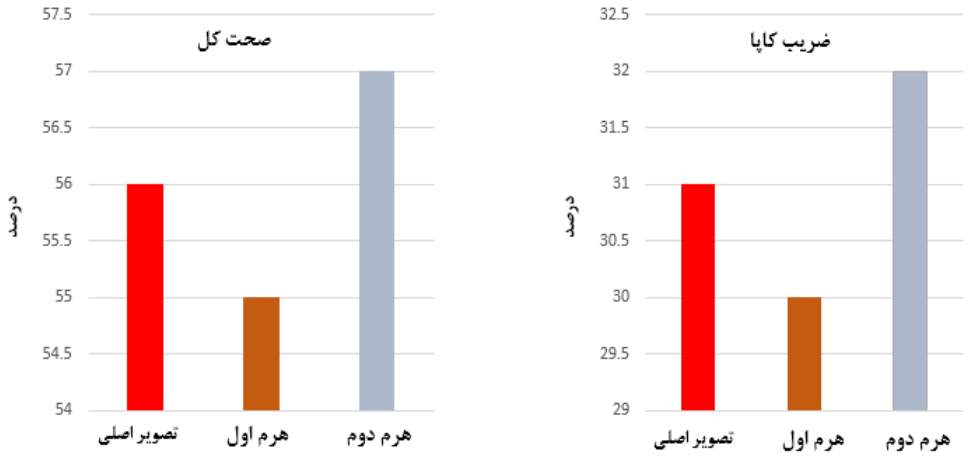
۳-۳- ارزیابی فقط بر روی داده‌های حرارتی

به منظور ارزیابی بیشتر، دو باند مورد مطالعه حرارتی با هم ادغام و طی سه طبقه‌بندی مجزا قدرت تفکیک مکانی مناسب جهت داشتن بیشترین نسبت سیگنال به نویز در این تصاویر مورد بررسی قرار گرفت. در اولین طبقه‌بندی دو باند اصلی وارد طبقه‌بندی کننده بیشترین شباهت گردید (شکل ۴. الف). به منظور انجام طبقه‌بندی دوم، با استفاده از مفهوم تولید هرم تصویر قدرت تفکیک مکانی تصاویر حرارتی مورد استفاده به دو متر کاهش داده شده و داده محاسبه گردیده برای تولید شش کلاس هدف به فرایند طبقه بندی وارد گردید (شکل ۴. ب). در نهایت طبقه‌بندی دیگری بر روی داده مورد مطالعه با قدرت تفکیک مکانی چهار متر انجام پذیرفت (شکل ۴. ج).



شکل ۴. نتیجه طبقه‌بندی تصویر حرارتی اصلی (الف)، هرم اول تصویر (ب) و هرم دوم تصویر (ج)

هدف از انجام این بخش، تاثیر قدرت تفکیک مکانی تصویر حرارتیدر کاهش یا افزایش دقت محصول طبقه‌بندی شده خروجی است. نتایج بدست آمده برای ۳ طبقه‌بندی مطرح شده در این بخش نشان داد با کاهش قدرت تفکیک مکانی داده حرارتی با افزایش دقت کل و ضریب کاپای طبقه‌بندی همراه هست. لذا استفاده از داده حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۴ متر به جای ۱ متر برای شناسایی عوارض شهری با کاهش دقت همراه نیست. همچنین با کاهش قدرت تفکیک مکانی با افزایش یا بهبود نسبت سیگنال به نویز این تصاویر روبرو هستیم.



شکل ۵. نمودار ارزیابی دقت طبقه‌بندی

۴. نتیجه‌گیری

تنوع بالای داده‌های دنیای فتوگرامتری و سنجش‌ازدور شناخت بیشتر این داده‌ها را امری اجتناب ناپذیر می‌کند. داده‌های حرارتی از جمله داده‌های پرکاربرد در حوزه سنجش از دور می‌باشند. در سال‌های اخیر بهبود قدرت تفکیک مکانی این داده‌ها مورد توجه محققان حوزه فتوگرامتری و علوم ژئوماتیک قرار دارد. از این در این مقاله ارزیابی جامعی از قدرت تفکیک مکانی مناسب این داده‌ها برای داشتن نسبت بالای سیگنال به نویز تصاویر حرارتی جهت انجم طبقه‌بندی عوارض و شناسایی اشیا انجام پذیرفت. برای این منظور برای در اختیار داشتن داده با قدرت تفکیک مکانی مختلف هرم تصویری اول و دوم آن‌ها تولید گردید، سپس طی فرایندهای مختلف طبقه‌بندی و ارزیابی نشان داده شد؛ برای کاربردهای مختلف شناسایی و طبقه‌بندی عوارض شهری در استفاده از داده‌های حرارتی رزولوشن مکانی با قدرت تفکیک ۴ متر دارای نتایج مشابه در مقایسه با تصویر با قدرت تفکیک مکانی ۱ متر می‌باشد. لذا با توجه به این مهم که داده با قدرت تفکیک مکانی بالا با کاهش محتوای طیفی و نسبت سیگنال به نویز همراه است؛ استفاده از داده حرارتی با قدرت تفکیک مکانی بالاتر لزوماً به معنای افزایش دقت نتایج محصولات تولیدی نیست. در کارهای آتی استفاده از داده‌های با قدرت تفکیک مکانی و سنسورهای متنوع برای ارزیابی‌های مشابه با کار این مقاله، انجام خواهد شد.

۵. مراجع

[۱] M. A. Aguilar, A. Fernández, F. J. Aguilar, F. Bianconi, and A. G. Lorca, "Classification of urban areas from GeoEye-1 imagery through texture features based on Histograms of Equivalent Patterns," European Journal of Remote Sensing, vol. 49, pp. 93-12.۲۰۱۶ ,۰

[۲] C. Kuenzer and S. Dech, Thermal Infrared Remote Sensing. Springer, 2013.

[۳] A. Prakash, "Thermal remote sensing: concepts, issues and applications," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 33, no. B1; PART 1, pp. 23.۲۰۰۰ ,۲۴۳-۹

[٤] Q. Weng, "Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 64, no. 4, pp. 335-344, 2009.

[٥] W. Liao et al., "Processing of multiresolution thermal hyperspectral and digital color data: Outcome of the 2014 IEEE GRSS data fusion contest," IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sensing., 2015.

[٦] A. Brook, M. Vandewal, and E. Ben-Dor, "Fusion of optical and thermal imagery and lidar data for application to 3-d urban environment and structure monitoring," REMOTE SENSING–ADVANCED TECHNIQUES AND PLATFORMS, p. 29, 2012.

[٧] M. Eslami and A. Mohammadzadeh, "Developing a Spectral-Based Strategy for Urban Object Detection From Airborne Hyperspectral TIR and Visible Data," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 9, no. 5, pp. 1808-1816, 2016.

[٨] M. Fauvel, Y. Tarabalka, J. A. Benediktsson, J. Chanussot, and J. C. Tilton, "Advances in spectral-spatial classification of hyperspectral images," Proceedings of the IEEE, vol. 101, no. 3, pp. 652-675, 2013.

[٩] G. Aubert and P. Kornprobst, Mathematical problems in image processing: partial differential equations and the calculus of variations. Springer Science & Business Media, 2006.