

مقایسه عملکرد شاخص‌های طیفی با طبقه‌بندی شیء‌گرا در استخراج مناطق ساخته‌شده در مناطق شهری (مطالعه موردی: شهر تهران و شهر گرگان)

سارا عطارجی* - استادیار گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران
مجتبی پوررحیمی - دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران
وحید عیسی‌زاده - دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران

تأیید مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴

چکیده

در پی افزایش جمعیت و رشد شهرنشینی در دهه‌های اخیر، چشم‌اندازهای طبیعی در حال تبدیل شدن به چشم‌اندازهای انسانی است و فضای باز شهری به مناطق ساخته‌شده تبدیل شده است. تغییرات شدید کاربری اراضی، لزوم دسترسی مدیران شهری را به اطلاعات به‌روز بیشتر کرده است. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سبب می‌شود تا مدیران شهری تغییرات را بهتر پایش کنند تا بتوانند در زمان مناسب تصمیم‌گیری کنند. طبقه‌بندی و استفاده از شاخص‌های استخراج‌شده از باندهای طیفی تصاویر ماهواره‌ای، از روش‌های کارآمد و مؤثر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مطالعات شهری است. تاکنون شاخص‌های طیفی زیادی برای تفکیک مناطق ساخته‌شده از سایر کاربری‌ها ایجاد شده است. هدف از این پژوهش، بررسی و عملکرد چهار شاخص طیفی پرکاربرد شهری، به منظور تفکیک مناطق ساخته‌شده از سایر کاربری‌ها در دو شهر متفاوت و مقایسه آن با نتایج طبقه‌بندی شیء‌گرا برای استخراج مناطق ساخته‌شده است. به این منظور، شاخص‌های تفاوت نرمال‌شده مناطق ساخته‌شده، شاخص شهری، شاخص نرمال‌شده مناطق ساخته‌شده و شاخص استخراج مناطق ساخته‌شده از تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ برای دو شهر تهران و گرگان محاسبه شد. برای جداسازی مناطق ساخته‌شده و ساخته‌نشده، از روش آستانه‌گذاری اتوماتیک اتسو استفاده شد. یافته‌های تحقیق نشان داد که شاخص‌های طیفی در مناطق شهری متفاوت، عملکرد یکسانی ندارند و صحت استخراج مناطق ساخته‌شده با اعمال این شاخص‌ها بر صحت طبقه‌بندی شیء‌گرا برتری نمی‌یابد. صحت کلی طبقه‌بندی شیء‌گرا در استخراج مناطق ساخته‌شده در شهر تهران ۹۲ درصد و در شهر گرگان ۹۱ درصد است. بهترین شاخص طیفی مناطق ساخته‌شده برای شهر تهران، شاخص استخراج مناطق ساخته‌شده با صحت کلی ۸۲ درصد و برای شهر گرگان، شاخص نرمال‌شده مناطق ساخته‌شده با صحت کلی ۸۶ درصد بوده است.

واژه‌های کلیدی: شاخص طیفی، شهر تهران، شهر گرگان، طبقه‌بندی شیء‌گرا، مناطق ساخته‌شده.

مقدمه

امروزه تغییرات گسترده شهرها به‌عنوان چالشی اساسی در برنامه‌ریزی شهری مطرح است و بسیاری از کشورهای درحال توسعه به‌طور مستقیم و غیرمستقیم با آن مواجه‌اند. گزارش شده است که در سال ۲۰۱۴، ۴۰۰ هزار کیلومتر مربع از سطح زمین تحت پوشش مناطق ساخته‌شده^۱ قرار داشته است (Jaeger and Schwick, 2014, 294). این مقدار به‌سرعت در حال افزایش است و پیش‌بینی شده است تا سال ۲۰۳۰ به هفتصد تا یک میلیون و دویست هزار کیلومتر مربع افزایش یابد (Angel et al., 2005, 5). در ایران نیز تغییرات عمده در مناطق شهری به‌ویژه شهرهای بزرگ به‌عنوان یکی از مباحث مهم توسعه شهری مطرح است و به‌دلیل وقوع تغییرات اساسی طی دهه‌های گذشته اهمیت بیشتری یافته است (مرکز مطالعات و تحقیقات شهرسازی و معماری ایران، ۱۳۷۰). گفتمانی است شهرنشینی و تکامل ساختارهای شهری، همچنین استفاده از زمین‌های شهری نتیجه توسعه اجتماعی و اقتصادی در شرایط خاصی است که بسیاری از مناطق شهری با آن مواجه هستند (Coison et al., 2014, 38). طی دهه‌های گذشته، توسعه فیزیکی شهرها تهدید اصلی منابع طبیعی در سطح جهان و عامل تغییرات فراوانی نظیر تغییرات کاربری اراضی، افزایش انواع آلودگی و تغییرات آب‌وهوای مناطق شهری بوده است. درواقع، دگرگونی‌های گسترده سکونتگاه‌های انسانی، پیامدهای ناخواسته و ناخوشایندی از قبیل افت کیفی محیط‌زیستی را در مقیاس‌های گوناگون محلی، منطقه‌ای و جهانی به‌همراه داشته است که به کاهش کیفیت زندگی منجر می‌شود (Gago et al., 2013, 750). تعامل بین توسعه اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیست شهری، مناطق ساخته‌شده شهری را گسترش داده (Angel and Bley, 2016, 24) و امروزه تغییرات بدون در نظر گرفتن برنامه توسعه شهری، به مشکلی عمده تبدیل شده است. تحلیل گسترش شهر این امکان را برای تصمیم‌گیران سیاست‌های شهری فراهم می‌کند که بتوانند ضمن ارزیابی سیاست‌های فعلی، گسترش آینده شهر و تغییرات کاربری اراضی را به‌سمت توسعه‌ای پایدار هدایت کنند.

پایش تغییرات مناطق شهری با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور به‌دلیل برداشت دوره‌ای تصاویر و اخذ داده‌ها در مقیاس مورد نیاز مطالعات ناحیه‌ای، به‌طور گسترده توسط برنامه‌ریزان شهری در کاربردهای متفاوتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین کاربرد این تصاویر در مطالعات کاربری اراضی و پوشش زمین (Demir et al., 2013, 301)؛ (Salmon et al., 2013, 1080) و همچنین پایش مخاطرات زیست‌محیطی (Brisco et al., 2013, 105)؛ (Volpi et al., 2013, 25) بوده است. استخراج عوارض شهری از تصاویر ماهواره‌ای به دو روش کلی طبقه‌بندی و استفاده از شاخص‌های طیفی صورت می‌گیرد (Bovolo et al., 2008, 2070). شاخص‌های طیفی که از ترکیب باندهای طیفی تصاویر ماهواره‌ای محاسبه می‌شود، سبب می‌شود تا عوارض با صحت قابل‌قبولی از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شود. شاخص طیفی، ترکیبی از چند باند طیفی است که اطلاعات در آن به‌صورت بهینه‌سازی شده و معنی‌دار نمایش داده می‌شود. با استفاده از شاخص‌های طیفی، تصاویری تولید می‌شود که از میزان اطلاعات بیشتری نسبت به باندهای عادی سنجنده برخوردار است. استفاده از شاخص‌های طیفی مزیت‌های فراوانی دارد، نظیر: بارزسازی یک یا چند پدیده، تولید

اطلاعات جدید، ساده‌سازی فرایند تفسیر و پردازش تصاویر ماهواره‌ای و افزایش صحت طبقه‌بندی در تولید نقشه‌های موضوعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای.

شاخص‌های طیفی انواع متفاوتی دارند و به‌عنوان یک محصول میانی یا محصول نهایی قابل استفاده هستند (XU, 2008, 4271). شاخص‌های طیفی به‌طور گسترده‌ای در بررسی تغییرات پوشش گیاهی (Kaliraj et al., 2012, 261)؛ (Markogianni et al., 2013, 1265)، بررسی گسترش مناطق شهری (Bagan et al., 2012, 211)؛ (Raja et al., 2013, 37)، مدیریت تولید گیاهان زراعی (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۳)، مطالعه خشک‌سالی کشاورزی (رضایی بنفشه و همکاران، ۱۳۹۴)، بررسی تغییرات مکانی-زمانی الگوی حرارتی زمین (زرین و علوی‌پناه، ۱۳۹۵) و همچنین هیدرولوژی (Dronova et al., 2011, 3221) به‌کار رفته‌اند؛ برای مثال، از ویژگی‌های بازتابی گیاهان برای محاسبه شاخص‌های مختلف گیاهی استفاده می‌شود. یکی از پرکاربردترین شاخص‌های گیاهی، شاخص اختلاف نرمال‌شده پوشش گیاهی^۱ (NDVI) است. این شاخص در بررسی تغییرات مکانی-زمانی پوشش گیاهی کاربرد گسترده‌ای دارد. ماتسوشیتا و همکاران^۲ (۲۰۰۷) و ری و همکاران^۳ (۲۰۰۴) با استفاده از شاخص NDVI به بررسی پارامترهای زیست-فیزیکی از قبیل زیست‌توده گیاهی، محتوای آب و ارتفاع گیاه پرداختند. با استفاده از شاخص طیفی می‌توان پوشش گیاهی منطقه را از سایر پوشش‌های زمین جدا کرد یا میزان سلامت و تنش گیاه را آشکار ساخت (Bouzekri et al., 2015, 867). در مطالعه دیگری از شاخص استخراج مناطق ساخته‌شده^۴ (BAEI) برای تشخیص مناطق ساخته‌شده در یکی از شهرهای الجزایر استفاده شد. نتایج نشان داد که این شاخص نسبت به شاخص‌های دیگر مورد استفاده دارای صحت بالاتری است.

در مطالعات شهری نیز استفاده از شاخص‌های طیفی به‌منظور شناسایی فضای سبز شهری یا شناسایی محدوده شهر و جداسازی آن از سایر مناطق همواره مورد توجه بوده است. در زمان استفاده از شاخص‌های طیفی، ضروری است تا برای تفکیک مناطق متفاوت، حد آستانه تعریف شود. زانگ و همکاران^۵ (۲۰۰۹) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های تفاوت نرمال‌شده مناطق ساخته‌شده^۶ (NDBI) و NDVI، مناطق ساخته‌شده و پوشش گیاهی را استخراج و سپس رابطه آن‌ها را با درصد سطوح نفوذناپذیر و دمای سطح زمین نشان دادند. نتایج بیانگر هم‌بستگی مثبت و قوی بین NDBI و درصد سطوح نفوذناپذیر و دمای سطح زمین است. خو^۷ (۲۰۱۰) برای استخراج سطوح نفوذناپذیر در شهر فوج چین و تأثیرات آن بر جزایر حرارتی، از شاخص نرمال سطح نفوذناپذیر^۸ (NDISI) استفاده کرد. در پژوهش یادشده، طبقه‌بندی مناطق ساخته‌شده با شاخص NDISI با روش‌های آنالیز اختلاط طیفی^۹ مقایسه شد و نتایج بیانگر دقت کلی بیشتر شاخص NDISI بود. پلیدروس و کارتالیس (۲۰۱۵) با استفاده از شاخص‌های NDVI و NDBI و شاخص‌های

1. Normalized difference vegetation index (NDVI)
2. Matsushita et al
3. Ray et al
4. Built-up area extraction index (BAEI)
5. Zhang
6. Normalized difference built-up index (NDBI)
7. Xu et al
8. Normalized difference impervious surface index (NDISI)
9. Spectral mixture analysis

مبتنی بر سایر شاخص‌های مناطق ساخته‌شده^۱ (IBI)، مناطق ساخته‌شده در سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۰ را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که این شاخص‌ها توانایی زیادی در شناسایی تغییرات داشته‌اند. برخی از محققان به منظور استخراج مناطق ساخته‌شده، تنها از ترکیب باندهای مرئی با باندهای مادون قرمز نزدیک استفاده کرده‌اند که از آن نمونه می‌توان به ماسک و همکاران^۲ (۲۰۰۰) و ماتپاس و مارتین^۳ (۲۰۰۳) اشاره کرد.

طبقه‌بندی تصاویر، پرکاربردترین روش استخراج عوارض از تصاویر ماهواره‌ای است. روش‌های طبقه‌بندی تصاویر بسیار فراوان است. انواع متفاوت روش‌های طبقه‌بندی براساس نوع استفاده از ویژگی‌های تصویر به دو دسته عمده پیکسل پایه^۴ و شیء پایه^۵ تقسیم می‌شود. طبقه‌بندی مبتنی بر پیکسل از ویژگی‌های طیفی پیکسل‌های منفرد استفاده می‌کند؛ درحالی‌که در روش مبتنی بر شیء، علاوه بر ویژگی طیفی، ویژگی‌های مکانی و بافتی هم در نظر گرفته می‌شود. از این رو، تجزیه و تحلیل شیء‌گرا در بسیاری از پژوهش‌ها کاربرد دارد و در اغلب موارد، نتایج خوبی حاصل شده است (Hu et al., 2013, 6042). طبقه‌بندی شیء‌گرا قطع‌بندی و استخراج ویژگی از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا را فراهم می‌سازد و همچنین یکپارچگی پردازش داده‌های رستریپایه و برداریپایه را آسان‌تر می‌کند. در بسیاری از مطالعات، نتایج طبقه‌بندی پیکسل پایه و شیء‌گرا با یکدیگر مقایسه شده‌اند و در اکثر موارد، صحت طبقه‌بندی شیء‌گرا بیشتر از پیکسل مبنا بوده است؛ برای نمونه می‌توان به تحقیق چن و همکاران (Chen et al., 2009, 483) اشاره کرد که دو روش پیکسل پایه و شیء‌گرا را در طبقه‌بندی تصاویر اسپات مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که الگوریتم طبقه‌بندی فازی در روش طبقه‌بندی شیء‌گرا در مقایسه با الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال در روش طبقه‌بندی پیکسل پایه از دقت بیشتری برخوردار است. در تحقیق دیگری، افزوده‌شدن شاخص‌های گیاهی به‌عنوان یکی از ورودی‌های طبقه‌بندی شیء‌گرا سبب افزایش صحت به میزان ۵/۲ درصد شد (Gao et al., 2009, 220).

هدف اصلی این مطالعه، بررسی کارایی شاخص‌های طیفی مربوط به مناطق ساخته‌شده شامل شاخص‌های NDBI، BAEI، شاخص شهری^۶ (UI) و شاخص نرمال مناطق ساخته‌شده^۷ (NBAI) است. به این منظور، کارایی این شاخص‌ها روی داده‌های سنجنده^۸ OLI لندست در سال ۲۰۱۸ با نتایج طبقه‌بندی تصاویر با روش شیء‌گرا به‌عنوان مبنا مقایسه شد. حد آستانه^۹ مقادیر شاخص‌های طیفی برای تفکیک مناطق ساخته‌شده با سایر کلاس‌های پوشش زمین، با استفاده از الگوریتم آستانه‌گذاری اتوماتیک اتسو^۹ تعیین شد. در این مقاله بررسی می‌شود که آیا کارایی شاخص‌های متفاوت طیفی در شناسایی مناطق ساخته‌شده به ساختار شهر و همگنی بافت شهر و وجود سایر کاربری‌ها وابسته است و عملکرد شاخص‌های مناطق استخراج‌شده در بافت‌های شهری مختلف، متفاوت است. به‌منظور مقایسه در این پژوهش، دو شهر تهران و گرگان در نظر گرفته شدند. تهران به‌عنوان پایتخت ایران، شهری

1. Index-based built-up index (IBI)

2. Masek

3. Matthias & Martin

3. Pixel-based classification

5. Object-based classification

6. Urban index (UI)

7. Normalized built-up area index (NBAI)

8. Operational land imager (OLI)

9. Otsu's thresholding method

متراکم است که عوارض شهری متفاوتی در آن وجود دارد. در این شهر، مناطق بسیار متراکم شهری، ساختمان‌های بلند ساخته‌شده در حاشیه شهر، شبکه بزرگراهی و معابر باریک وجود دارد. مناطق ساخته‌نشده^۱ عموماً یا به صورت زمین‌های بایر یا مناطق دارای پوشش گیاهی با وسعت‌های بسیار متفاوت در شهر پراکنده هستند. منطقه مورد مطالعه دوم، شهر گرگان در شمال ایران است که در آن عموماً منطقه متراکم شهری و ساختمان‌های بلند دیده نمی‌شود. مناطق ساخته‌نشده در این شهر پوشیده از گیاه هستند. مقایسه شاخص‌های طیفی مناطق ساخته‌شده و نشان‌دادن اختلاف عملکرد آن‌ها در دو محیط شهری متفاوت و همچنین اعمال الگوریتم آستانه‌یابی اتوماتیک، نوآوری این تحقیق به‌شمار می‌آید.

مبانی نظری

در گذشته توسعه شهری در سیر تکامل خود دارای روند نسبتاً متعادلی بود (حسینی و سلیمانی‌مقدم، ۱۳۸۵، ۲۸-۲۹). این روند تحت تأثیر شرایط محیطی و جغرافیایی نظیر عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، شکل ناهمواری زمین، آب‌وهوا، خاک و پوشش گیاهی و دسترسی به آب قرار داشت. در واقع پیدایش، شکل‌گیری، وسعت و گسترش مراکز شهری و همچنین نقش آن‌ها در ارتباط با این عوامل تعیین می‌شد (Bullard, 2003, 22؛ رضوانی، ۱۳۷۴، ۱۱۷). اما تحولات فرهنگی-اجتماعی و اقتصادی قرن ۱۹ و ۲۰ متأثر از مدرنیسم، موجب گسترش سریع شهرها و پیدایش کلان‌شهرها شده و تغییراتی بنیادی در سازمان فضایی و کالبدی آن‌ها به‌وجود آورده است (زیاری، ۱۳۸۲، ۱۵۱؛ کاویانی و همکاران، ۱۳۹۴، ۴۲۵). به‌طور کلی دگرگونی‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی در سده اخیر سبب تحولاتی در شهرنشینی کشور شده است. آثار این دگرگونی‌ها در تحول شکل کالبدی و توسعه فضایی شهرها تبلور یافته که پیامد مناسبی در شهرهای کشور نداشته است (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۸، ۷۰۱). در واقع در این دوره، افزایش جمعیت و سیاست دولت‌ها در جنبه‌های مختلف از جمله توسعه شهرهای اداری، سیاسی، حومه‌نشینی، فرسودگی شهر مرکزی و کنترل فرم توسعه شهرها و استفاده بهینه از زمین‌های شهری سبب گسترش سریع مراکز جمعیتی شده است. در این میان، عوامل اقتصادی به‌عنوان پایه اصلی مباحث شهرسازی و طراحی شهری بر اشتغال، جمعیت، درآمد و درنهایت میزان نیاز به فضا اثرگذار است (شیعه، ۱۳۸۰، ۱۱۶).

در اثر رشد فزاینده شهرها، گسترش فیزیکی شهر به مناطق پیرامون و همچنین افزایش تراکم و انباشتگی در درون شهرها اجتناب‌ناپذیر خواهد بود (پناهی و زیاری، ۱۳۸۸، ۱-۲). یکی از موضوعات حیاتی قرن بیست‌ویکم صاحب‌نظران شهری، در ارتباط با پایداری شهر و فرم شهر (فشرده‌گی یا پراکنش) است (رهنما و عباس‌زاده، ۱۳۸۵، ۱۰۱؛ سزایی و جمشیدی، ۱۳۹۷، ۲۸۲). به همین دلیل، توجه به فرم فضایی شهر، ضرورتی اساسی در برنامه‌های توسعه شهری است (حسین‌زاده دلیر و هوشیار، ۱۳۸۵، ۲۱۳).

سنجش‌ازدور در چند دهه اخیر به‌طور فزاینده‌ای در مطالعات شهری کاربرد یافته است؛ زیرا می‌توان از آن در مطالعه گستره و الگوی مناطق ساخته‌شده، چشم‌انداز و برنامه‌ریزی توسعه شهری، ارزیابی ریسک و مدیریت بحران شهری و مدیریت منابع، اطلاعات کسب کرد. تصاویر ماهواره‌ای به‌دلیل برداشت دوره‌ای تصاویر، امکان پردازش رقومی، اخذ

داده‌ها در منطقه وسیع و با هزینه نسبتاً کم در مقیاس مورد نیاز مطالعات ناحیه‌ای، به‌طور گسترده توسط برنامه‌ریزان شهری در کاربردهای متفاوتی استفاده شده‌اند (Xu, 2008, 4269).

یکی از پردازش‌های پرکاربرد تصاویر سنجش‌ازدور، محاسبه شاخص طیفی است که حاصل محاسبه‌ای ریاضی بین دو یا چند باند طیفی است که به‌وسیله آن، اهداف زمینی خاص بهتر شناسایی و بارز می‌شوند. در تصاویر به‌دست‌آمده از شاخص‌های طیفی، اطلاعات جدیدی تولید می‌شود که در تصاویر اصلی وجود ندارد. تصویر شاخص طیفی، ترکیبی از چند تصویر است که اطلاعات در آن به‌صورت بهینه‌سازی شده نمایش داده می‌شود. مقادیر شاخص‌های طیفی در محدوده خاص و قابل تفسیر قرار دارد و اعداد متناسب به هر پدیده، معنی‌دار است. عموماً شاخص‌های طیفی در مطالعات گیاه، خاک، آب و سکونتگاه‌های شهری به‌کار می‌روند؛ برای مثال، با استفاده از یک شاخص طیفی می‌توان پوشش گیاهی منطقه را از سایر پوشش‌ها جدا و متمایز ساخت. شاخص طیفی همچنین می‌تواند میزان سلامت و تنش گیاه را آشکار کند و تغییرات آن به‌طور معناداری به تغییر وضعیت سلامت گیاه وابسته است. از کاربردهای شاخص‌های طیفی می‌توان به شناسایی پدیده، شناسایی تغییرات درونی پدیده‌ها که ممکن است به‌صورت ظاهری نشانه‌هایی از آن‌ها دیده نشود، کاهش اثر توپوگرافی و سایه، و نیز افزایش صحت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای اشاره کرد (Singh, 1989, 989).

تمام شاخص‌های طیفی از جمله شاخص‌های پوشش گیاهی و شاخص‌های خاک براساس داده‌های تجربی، با رویکرد تجربی و براساس ویژگی‌های جذب و بازتاب پدیده‌ها در طول موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیس تعریف شده‌اند (Xu, 2007, 1381). امروزه به‌منظور تشخیص سریع مناطق ساخته‌شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، شاخص‌های طیفی مختلفی ارائه شده است که عبارت‌اند از: شاخص شهری، شاخص تفاوت نرمال شده مناطق ساخته‌شده، شاخص‌های مبتنی بر سایر شاخص‌های مناطق ساخته‌شده، شاخص نرمال سطح نفوذناپذیر و همچنین دو شاخص مبتنی بر باندهای مرئی سبز و قرمز برای مناطق ساخته‌شده (Weng, 2012, 475; Matthias and Martin, 2003, 2). گفتنی است شاخص‌های UI و NDBI از باندهای طیفی در محدوده مادون قرمز کوتاه^۱ (SWIR) و باند مادون قرمز نزدیک^۲ (NIR) استفاده می‌کند. از ترکیب باندهای طیفی مادون قرمز حرارتی^۳ (TIR)، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز کوتاه و باند مرئی، شاخص NDISI به‌دست می‌آید. شاخص‌های طیفی مناطق ساخته‌شده به‌عنوان شاخص و پارامتری در تحقیقات شهری استفاده می‌شوند (Polydor's and Curtails, 2015, 94). در این تحقیق، شاخص‌های UI، NDBI، BAEI و NBAI از باندهای طیفی تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ در سال ۲۰۱۸ استفاده شده است.

شاخص UI از باند مادون قرمز کوتاه در محدوده ۲/۱۱-۲/۲۹ میکرومتر و باند مادون قرمز نزدیک در محدوده طیفی ۰/۸۸-۰/۸۵ میکرومتر) برای استخراج دقیق مناطق شهری و غیرشهری استفاده می‌کند. شاخص BAEI یکی از شاخص‌های جدید استخراج مناطق ساخته‌شده است که در سال ۲۰۱۵ برای شهر الجفله در کشور الجزایر ارائه شد. این

1. Short-wavelength infrared (SWIR)

2. Near-infrared (NIR)

3. Thermal infrared (TIR)

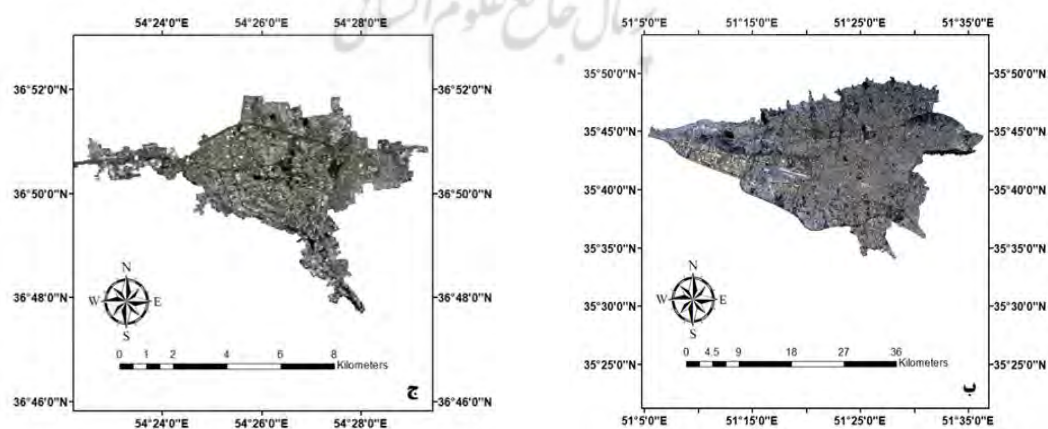
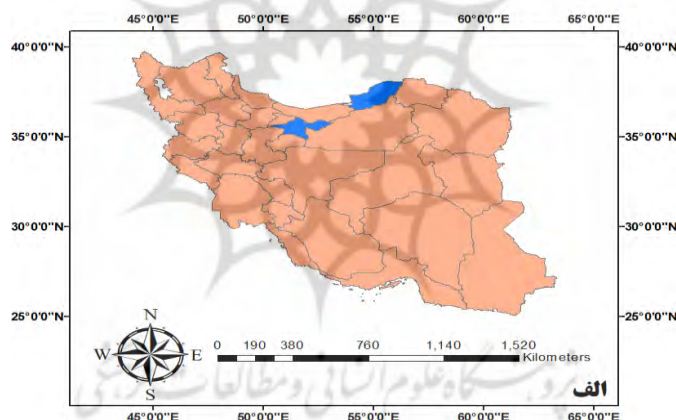
شاخص از باندهای مادون قرمز کوتاه در محدوده ۱/۵۷-۱/۶۵ میکرومتر و باند قرمز در محدوده ۰/۶۴-۰/۶۷ میکرومتر، و باند سبز در محدوده طیفی ۰/۵۳-۰/۵۹ میکرومتر به همراه یک ضریب ثابت استفاده می‌کند. شاخص NBAI از باند مادون قرمز کوتاه در محدوده طول موج ۲/۱۱-۲/۲۹ میکرومتر، باند مادون قرمز نزدیک در محدوده ۰/۸۵-۰/۸۸ میکرومتر و باند آبی در محدوده ۰/۴۵-۰/۵۱ میکرومتر برای جداسازی مناطق ساخته‌شده و ساخته‌نشده استفاده می‌کند. مشخصه ویژه این شاخص، استفاده از باند آبی در استخراج مناطق ساخته‌شده و اهمیت این باند است. شاخص NDBI از باند مادون قرمز کوتاه در محدوده ۱/۵۷-۱/۶۵ میکرومتر و باند مادون قرمز نزدیک در محدوده ۰/۸۵-۰/۸۸ میکرومتر برای تفکیک مناطق شهری استفاده می‌کند. در این شاخص، مناطق ساخته‌شده شهری که بازتاب آن در باند مادون قرمز کوتاه از بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک بیشتر باشد، مقدار مثبت به خود می‌گیرند. پوشش گیاهی به دلیل بالابودن بازتاب در محدوده مادون قرمز نزدیک، مقدار منفی می‌گیرد. در زمان استفاده از مقادیر شاخص‌های طیفی ضروری است تا مقادیر مربوط به پدیده مورد نظر تعیین شود. مشخص کردن مرز بین پدیده‌ها یا تعیین حد آستانه ممکن است به دو روش سعی و خطا^۱ یا اتوماتیک انجام شود. سعی و خطا روشی زمان‌بر است و به دانش کاربر بستگی دارد. به همین علت، استفاده از روش‌های اتوماتیک رواج یافته است. الگوریتم آستانه‌گذاری اتسو، یکی از روش‌های پرکاربرد است که در آن، یک تصویر با مقادیر خاکستری به تصویری باینری تبدیل می‌شود. الگوریتم اتسو، با استفاده از هیستوگرام کلی تصویر، مرز بین هدف و پس‌زمینه را مشخص می‌کند؛ به طوری که در تصویر خروجی، مناطق هدف با مقدار یک (رنگ سفید) و مناطق پس‌زمینه با مقادیر صفر (رنگ سیاه) نمایش داده می‌شوند. علت استفاده از تصاویر لندست در این مطالعه، دسترسی آسان و رایگان به تصاویر، آرشو طولانی‌مدت، قدرت تفکیک طیفی و مکانی سنجنده OLI مطالعه است.

نتایج شاخص‌های طیفی با نتایج طبقه‌بندی تصویر به روش شیء‌گرا مقایسه شدند. طبقه‌بندی شیء‌گرا با بخش‌بندی پیکسل‌ها اشیای همگن تصویر را تولید می‌کند. اشیای با مقیاس‌های مختلف در یک تصویر، هم‌زمان تولید می‌شوند. در روش‌های شیء‌گرا، علاوه بر ویژگی‌های طیفی از ویژگی‌های بافت، ساختار و اندازه عوارض استفاده می‌شود. از طبقه‌بندی تصویر در روش شیء‌گرا انتظار می‌رود که عوارضی که از نظر ویژگی‌های طیفی و شکلی با موقعیت‌های موجود در طبیعت منطبق باشند، استخراج شود.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه اول، شهر تهران است که در ۵۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۶۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۷ دقیقه ۳۵ درجه ۸۳ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. این منطقه در فلات مرکزی، در دامنه جنوبی کوه‌های البرز با جهت شیب کلی از شمال به جنوب و در دشتی نسبتاً هموار واقع شده و مساحتی حدود ۷۳۰ کیلومتر مربع و جمعیتی معادل سیزده میلیون و دویست و شصت هزار نفر دارد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰). اقلیم آن نیمه‌خشک است و بیشتر از ارتفاعات البرز مرکزی تأثیر پذیرفته است. متوسط بارندگی این منطقه نیز ۳۳۳ میلی‌متر در سال است (حجاری‌زاده و پروین، ۱۳۸۸، ۴۵) (شکل ۱).

دومین منطقه مورد مطالعه شهرستان گرگان است. این شهر در طول جغرافیایی ۲۶ درجه ۵۴ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی واقع شده است. شهرستان گرگان با مساحت ۸۱/۱۶۱۵ کیلومتر مربع در بخش جنوب غربی استان گلستان واقع شده است. ارتفاع شهر از سطح دریا ۱۶۰ متر است. نقاط جنوبی این شهرستان دارای آب‌وهوای کوهستانی و نواحی شمالی آن دارای آب‌وهوای نیمه‌مرطوب است. از نظر طبیعی، این شهرستان از دو منطقه کوهپایه‌ای و جلگه‌ای تشکیل شده و جمعیتی ۴۸۰،۵۴۱ نفره دارد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰) (شکل ۱). در حال حاضر جهت توسعه فیزیکی گرگان مناسب نیست و شهر به سوی مناطق کوهستانی و جنگلی که در قسمت جنوبی آن قرار گرفته، گسترش یافته است. همچنین در بخش‌های فراوانی، ساخت‌وسازهای شهری با تبدیل اراضی کشاورزی یا در حریم رودخانه صورت گرفته است. با توجه به تحولات جمعیتی، تقاضا برای مسکن و زیرساخت‌های شهری همچنان رو به افزایش است. ادامه این روند، سبب تخریب بیشتر منابع طبیعی و افزایش انواع مخاطرات نظیر آلودگی آب‌و‌خاک، سیلاب شهری و فرونشست زمین می‌شود. شهر گرگان با توجه به محصور بودن بین اراضی کشاورزی و جنگل، دو گزینه برای توسعه فیزیکی پیش‌رو دارد: ۱. توسعه درون‌شهری و استفاده از فضاهای خالی درون شهر و افزایش طبقات ساختمانی که کمترین خسارت را به محیط‌زیست وارد کند. ۲. توسعه برون‌شهری که باید در مناطقی صورت پذیرد که در منابع طبیعی تعرض نشود (عمادالدین و نامجو، ۱۳۹۳: ۹۸).



شکل ۱. معرفی مناطق مورد مطالعه؛ الف) موقعیت استان تهران و گلستان، ب) تصویر لندست ۸ سنجنده OLI شهر تهران در سپتامبر ۲۰۱۸، ج) تصویر لندست ۸ سنجنده OLI شهر گرگان در جولای ۲۰۱۸

روش پژوهش

۱. داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ سنجنده‌ی OLI استفاده شد. تصاویر در مسیر ۱۶۴، ردیف ۳۵ در سپتامبر ۲۰۱۸ برای شهر تهران و در مسیر ۱۶۲، ردیف ۳۴ در جولای ۲۰۱۸ برای شهر گرگان از مرجع سیستم جهانی^۱ به‌دست آمد و شامل نه باند طیفی است (<http://landsat.usgs.gov>). در این پژوهش، از باندهای ۷، ۶، ۵، ۴، ۳ و ۲ که در محدوده‌ی مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز کوتاه بود، استفاده شد. این باندهای طیفی دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر هستند. به‌منظور بهبود قدرت تفکیک مکانی تصویر، از باند ۸ سنجنده (باند پانکروماتیک) با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر استفاده شد.

۲. پیش‌پردازش تصاویر لندست ۸

پیش از استخراج شاخص‌های طیفی مناطق ساخته‌شده، پیش‌پردازش‌های لازم شامل تصحیحات رادیومتریک و تصحیحات اتمسفری روی تصاویر لندست ۸ سنجنده‌ی OLI صورت گرفت. در این تحقیق، برای تصحیح اتمسفری تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ شهر تهران از الگوریتم ATCOR^۲ در نرم‌افزار Erdas استفاده شد تا آثار ناشی از توپوگرافی منطقه کاهش یابد. برای بهبود قدرت تفکیک مکانی، از باند پانکروماتیک و الگوریتم Gram-schmidt pan sharpening استفاده شد. برای منطقه‌ی مورد مطالعه‌ی دوم، پیش‌پردازش‌های صورت‌گرفته شامل تصحیحات رادیومتریک و تصحیحات اتمسفری است. با توجه به متوسط ارتفاع شهر مورد نظر و نبود اثر ناشی از توپوگرافی، از الگوریتم FLAASH^۳ استفاده شد. مانند منطقه‌ی مورد مطالعه‌ی اول (تهران) بهبود قدرت تفکیک مکانی با بهره‌گیری از الگوریتم Gram-schmidt pan sharpening صورت گرفت.

شاخص‌های NDBI، NBAI، UI و BAEI با دستور Band Math، استخراج، و برای ادامه‌ی مطالعه و استفاده از آستانه‌گذاری مناسب شاخص‌های تهیه‌شده وارد محیط نرم‌افزار ARC GIS شدند. آستانه‌گذاری با الگوریتم Auto-Threshold Difference Raster به روش Otsu انجام گرفت. علت استفاده از الگوریتم اتسو در این تحقیق، باینری کردن کلاس‌ها است (در فرایند باینری کردن، کل پیکسل‌های تصویر به دو مقدار صفر و یک تبدیل می‌شوند). پس از اعمال حد آستانه‌ی معرفی‌شده، تصویر شاخص طیفی به دو کلاس ساخته‌شده و ساخته‌نشده تقسیم می‌شود. برای ارزیابی خروجی به‌دست‌آمده، با بهره‌گیری از نمونه‌های اعتبارسنجی، صحت کلی^۴ (Foody, Congalton, 1991,44) و کلاس ساخته‌شده و ساخته‌نشده از ماتریس خطا^۵ در محیط نرم‌افزار GIS استفاده شد. همچنین طبقه‌بندی شیء‌گرا برای سگمنت‌سازی تصاویر تصحیح‌شده، با بهره‌گیری از الگوریتم Example Based Feature Workflow صورت گرفت.

1. Worldwide reference system (WRS)
 2. Atmospheric and topographic correction (ATCOR)
 3. Fast line-of-sight atmospheric analysis of hypercubes (FLAASH)
 4. Overall accuracy
 5. Confusion matrix

۳. شاخص‌های طیفی

کاوامورا برای تولید اطلاعات به‌روز مناطق شهری به‌کمک تصاویر ماهواره‌ای، شاخص UI (معادله ۱) را معرفی کرد (Kawamura et al., 1996, 321). شاخص UI از باند مادون‌قرمز نزدیک و باند دوم مادون‌قرمز موج‌کوتاه (SWIR2) استفاده می‌کند. باید توجه داشت که این شاخص براساس رابطه معکوس بین روشنایی مناطق شهری در باندهای مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز موج‌کوتاه طراحی شده است (Kawamura et al., 1996, 322). در اوایل سال ۲۰۰۰، شاخص NDBI (معادله ۲) ارائه شد (Zha et al., 2003, 590). این شاخص از واکنش طیفی انحصاری مناطق ساخته‌شده و سایر کاربری‌ها بهره‌گرفت. مانند UI، شاخص NDBI از تفاوت واکنش‌های طیفی مناطق ساخته‌شده با سایر کاربری‌ها در بخش‌های مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز موج‌کوتاه استفاده می‌کند؛ با این تفاوت که در شاخص NDBI از باند اول مادون‌قرمز موج‌کوتاه (SWIR1) استفاده می‌شود. شاخص BAEI (Bouzekri et al., 2015, 869) برای استخراج مناطق ساخته‌شده از باند (۳) در محدوده ۰/۵۳-۰/۵۹ میکرومتر و باند (۴) در محدوده ۰/۶۴-۰/۶۷ میکرومتر و باند (۶) در محدوده ۱/۶۵-۱/۵۷ میکرومتر تصاویر لندست ۸ استفاده می‌کند (معادله ۳). شاخص NBAI (Waqar et al., 2012, 2) به‌عنوان شاخص منطقه‌عادی ساخته‌شده در نظر گرفته می‌شود. برای استخراج این شاخص، باند (۲) در محدوده ۰/۴۵-۰/۵۱ میکرومتر و باند (۶) در محدوده ۱/۶۵-۱/۵۷ میکرومتر و باند (۵) در محدوده ۰/۸۵-۰/۸۸ میکرومتر به‌کار گرفته می‌شود تا به‌کمک آن کاربری‌های اراضی که ساخت عادی دارند، شناسایی شوند (معادله ۴) (جدول ۱).

جدول ۱. نحوه محاسبه شاخص‌های طیفی

شاخص‌ها	فرمول	منبع
UI	$UI = \frac{\rho_{2110\text{ nm}} - \rho_{850\text{ nm}}}{\rho_{2110\text{ nm}} + \rho_{850\text{ nm}}}$	(معادله ۱) Kawamura et al., 1996
NDBI	$NDBI = \frac{\rho_{1570\text{ nm}} - \rho_{850\text{ nm}}}{\rho_{1570\text{ nm}} + \rho_{850\text{ nm}}}$	(معادله ۲) Zha et al., 2003
BAEI	$BAEI = \frac{\rho_{640\text{ nm}} + L}{\rho_{530\text{ nm}} + \rho_{1570\text{ nm}}}$	(معادله ۳) Bouzekri et al., 2015
NBAI	$NBAI = \frac{\rho_{2110\text{ nm}} - \rho_{850\text{ nm}}}{\rho_{2110\text{ nm}} + \rho_{450\text{ nm}}}$	(معادله ۴) Waqar et al., 2012

L: an arithmetic constant

۴. تعیین حد آستانه مطلوب

برای تفکیک مناطق ساخته‌شده از مناطق ساخته‌نشده با استفاده از شاخص‌های طیفی ضروری است تا حد آستانه تعریف شود. حد آستانه معمولاً به روش سعی و خطا تعیین می‌شود و مبتنی بر تجربیات کاربر است (Sezgin, 2004, 148). روش‌های آستانه‌گذاری اتوماتیک، از اطلاعات خود تصویر استفاده می‌کند و به دانش کاربران وابسته نیست. همچنین به‌دلیل اتوماتیک‌بودن، سرعت پردازش را افزایش می‌دهد. روش آستانه‌گذاری اتسو، یکی از پرکاربردترین روش‌های آستانه‌گذاری اتوماتیک است. تحقیقات نشان داده است که روش اتسو برای حد آستانه‌های باینری برای مناطق ساخته‌شده و مناطق ساخته‌نشده از تصاویر ماهواره‌ای مناسب است (Li et al., 2013, 537; Du et al.,)

676, 2014). در این‌گونه مطالعات، محققان دریافته‌اند که یافتن حد آستانه مطلوب امری چالش‌برانگیز است و شاید حتی یک حد آستانه دلخواه نیز نتیجه مطلوب را ارائه نکند؛ بنابراین در این مطالعه از روش اتسو برای جداسازی مکان‌های ساخته‌شده و ساخته‌نشده استفاده شده است. روش اتسو برای تشخیص پیش‌زمینه^۱ و پس‌زمینه^۲ در یک تصویر، با به‌روزرآوری دو سطح با حداقل واریانس طراحی شده است (Otsu, 1979, 63). هدف این الگوریتم در واقع یافتن نقطه‌ای است که کمترین ادغام بین دو کلاس را داشته باشد. اطلاعات بیشتر درباره استفاده از این روش را می‌توان در برنامه‌های کاربردی سنجش‌ازدور و ارزیابی شاخص‌های طیفی در مطالعات دیگر یافت (Li et al., 2013, Arc GIS 5535; Du et al., 2014, 675). در این مطالعه، روش اتسو با استفاده از حد آستانه باینری در نرم‌افزار Arc GIS 10.5 اجرا شده است. این روش بدون هیچ‌گونه فرضی درمورد داده‌ها اقدام به حد آستانه‌گذاری هیستوگرام تصویر اختلاف می‌کند و به جست‌وجوی تمامی مقادیر ممکن برای حد آستانه می‌پردازد. این روش، جست‌وجوی فراگیر^۳ (ES) نیز نامیده می‌شود.

نتایج

به‌منظور ارزیابی نتایج اعمال چهار شاخص طیفی و طبقه‌بندی شیء‌گرا برای جداسازی مناطق ساخته‌شده از مناطق ساخته‌نشده، صحت کلی، صحت تولیدکننده^۴ و صحت کاربر^۵ محاسبه شد. از تصاویر با رزولوشن مکانی بالا که در Google Earth در دسترس است، به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی استفاده شد (Du et al., 2014, 675). از آنجا که شهر تهران و شهر گرگان از نظر ساختاری متفاوت هستند، لزوماً نمی‌توان از آستانه‌ای یکسان برای شاخص طیفی این دو استفاده کرد. در نتیجه استفاده از روش‌های اتوماتیک آستانه‌گذاری، فرایند استخراج مناطق ساخته‌شده را از تصاویر ماهواره‌ای تسریع می‌بخشد. نتایج صحت کلی (جدول ۱) مبنایی برای انتخاب شاخص‌های مناسب‌تر است. باین‌حال باید در نظر داشت که در طول فرایند ارزیابی دقت طبقه‌بندی، اغلب امکان مقایسه تمام پیکسل‌ها در نقشه‌های مناطق ساخته‌شده و مناطق ساخته‌نشده با اطلاعات نمونه‌های ارزیابی (نمونه مرجع) با توجه به برخی محدودیت‌ها وجود ندارد. به همین دلیل در بیشتر موارد، ارزیابی صحت تنها در نقاط نمونه مرجع معتبر است (جدول‌های ۲ و ۳).

نتایج ارزیابی نشان می‌دهد برخی از مناطق ساخته‌نشده به‌عنوان مناطق ساخته‌شده و بالعکس، به‌صورت اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند. به‌دلیل شباهت طیفی مناطق ساخته‌شده با سایر کاربری‌ها در برخی باندها، برخی از شاخص‌ها قادر به تفکیک مناطق ساخته‌شده و ساخته‌نشده نیستند. نتایج ارزیابی شاخص‌های مورد استفاده برای تفکیک کلاس‌های مناطق ساخته‌شده و ساخته‌نشده شهر تهران بیانگر آن است که استفاده از شاخص مبتنی بر دو باند مرئی، مادون‌قرمز کوتاه، یعنی شاخص BAEI، دارای بیشترین صحت کلی (۸۲ درصد) است و کمترین صحت کلی برای شاخص

1. Background
2. Foreground
3. Exhaustive search
4. Producer accuracy
5. User accuracy

NBAI (۶۸ درصد) است که از اطلاعات باند مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه استفاده می‌کند. صحت تولیدکننده و صحت کاربر برای عوارض ساخته شده به ترتیب ۱۷/۶ و ۲۴/۸ درصد برای شاخص NBAI است که بالاترین مقدار خطای مشاهده شده بین تمامی شاخص‌ها است. شاخص UI و شاخص NDBI عملکرد بینابین و نسبتاً مشابه داشتند.

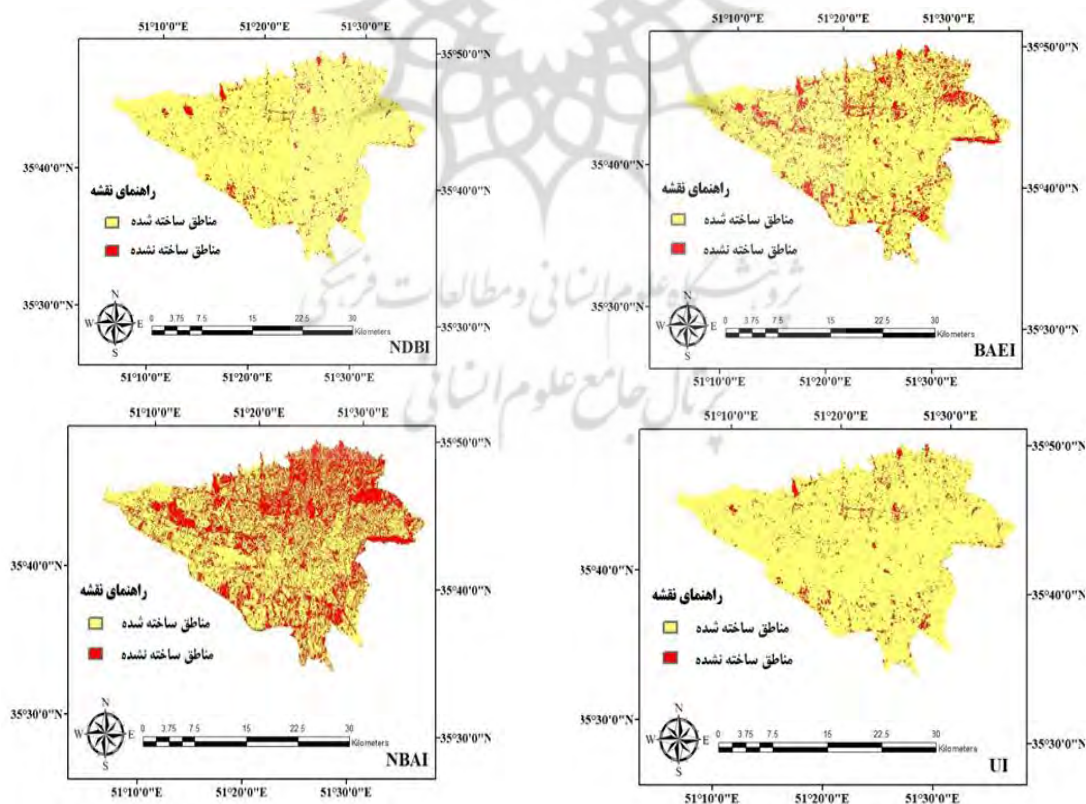
جدول ۲. نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی شاخص‌های طیفی الف) تهران؛ ب) گرگان

الف) نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی شهر تهران					
نتایج (درصد)	کلاس پوشش زمین	NBAI	NDBI	UI	BAEI
صحت کلی	-	۶۸	۷۷	۷۵	۸۲
صحت تولیدکننده	مناطق ساخته شده	۸۲/۳	۹۶/۵	۹۶/۵	۸۴/۷
	مناطق ساخته نشده	۳۰/۱	۱۳/۳	۶/۶	۵۸/۳
صحت کاربر	مناطق ساخته شده	۷۵/۱	۷۸	۷۶/۷	۹۳/۲
	مناطق ساخته نشده	۴۰	۵۴/۵	۳۷/۵	۳۵/۹
ب) نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی شهر گرگان					
صحت کلی (درصد)	-	۸۶	۸۲	۷۸	۷۷
صحت تولیدکننده	مناطق ساخته شده	۹۲/۵	۱۰۰	۹۶/۵	۱۰۰
	مناطق ساخته نشده	۵۸	۲۸	۲۲	۸
صحت کاربر	مناطق ساخته شده	۸۶/۷	۸۰/۳	۷۴/۸	۷۶/۱
	مناطق ساخته نشده	۸۰/۵	۱۰۰	۶۸/۸	۱۰۰

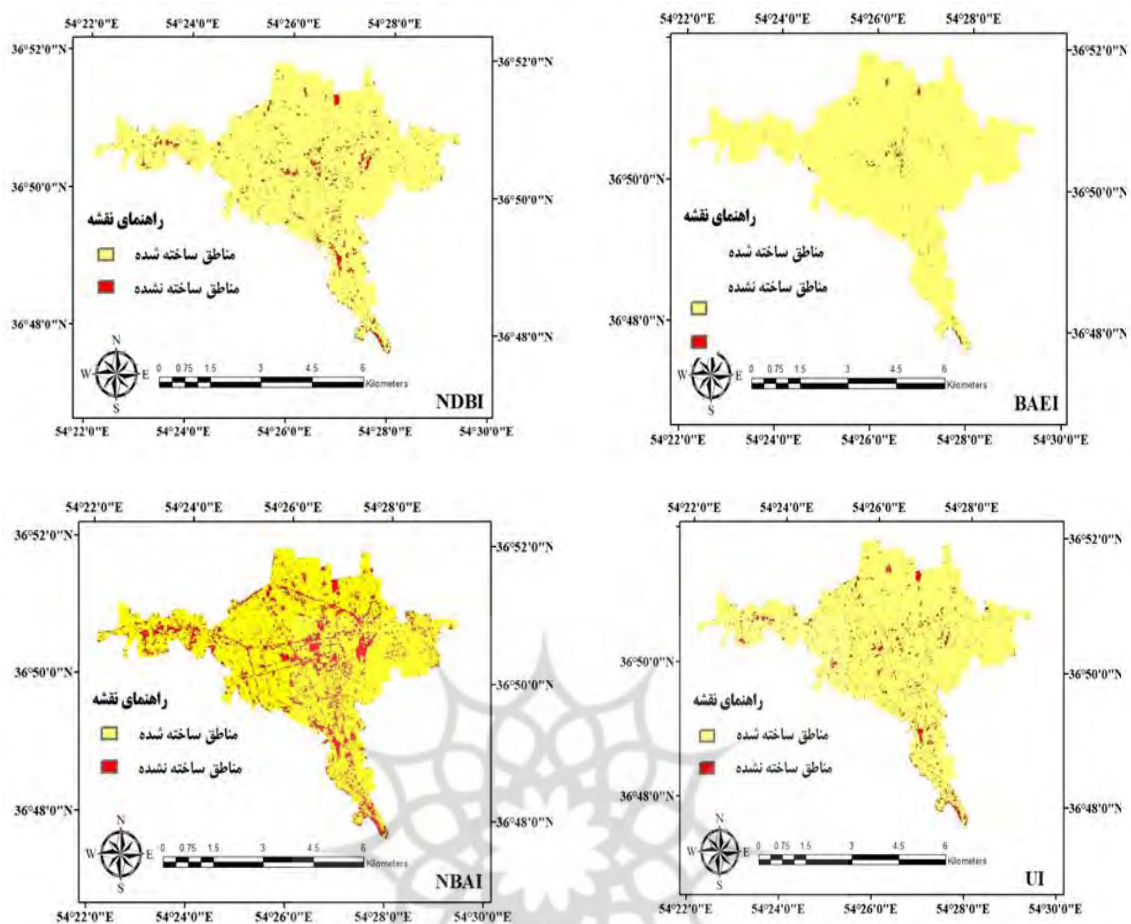
جدول ۳. نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی شیء گرا الف) تهران؛ ب) گرگان

الف) نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی شهر تهران		
نتایج (درصد)	کلاس پوشش زمین	شیء گرا
صحت کلی	-	۹۲/۹
صحت تولیدکننده	مناطق ساخته شده	۹۵/۱
	مناطق ساخته نشده	۸۵/۹
صحت کاربر	مناطق ساخته شده	۹۵/۵
	مناطق ساخته نشده	۸۴/۶
ب) نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی شهر گرگان		
صحت کلی (درصد)	-	۹۱/۲
صحت تولیدکننده	مناطق ساخته شده	۹۴/۶
	مناطق ساخته نشده	۸۳/۱۵
صحت کاربر	مناطق ساخته شده	۹۳/۶
	مناطق ساخته نشده	۸۳/۵

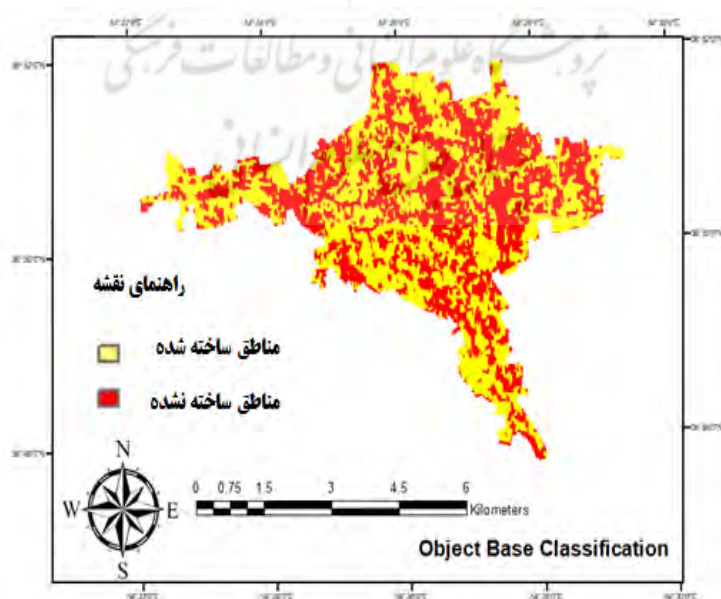
نتایج ارزیابی عملکرد شاخص‌ها در شهر گرگان بیانگر آن است که کلاس مناطق ساخته‌شده با استفاده از شاخص NBAI از اطلاعات بازتاب در باند مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج‌کوتاه با صحت کلی بیشتری (۸۶ درصد) استخراج شده است. کمترین صحت کلی (۷۷ درصد) استخراج مناطق ساخته‌شده با شاخص BAEI به‌دست آمده است. صحت تولیدکننده و صحت کاربر برای عوارض ساخته‌شده گرگان به ترتیب ۴/۷ و ۱۳ برای این شاخص است (شکل‌های ۲ و ۳). شایان ذکر است که شاخص UI عملکرد تقریباً مشابهی داشته است. همچنین شاخص UI در هر دو منطقه مورد مطالعه، عملکرد تقریباً یکسان و متوسطی داشته است؛ در صورتی که صحت به‌دست‌آمده از شاخص NBAI در دو منطقه دارای ۱۸ درصد اختلاف است. علت این امر احتمالاً استفاده از مقادیر بازتاب در باند آبی است که بسیار تحت تأثیر پدیده پخش اتمسفری است. این نتیجه نشان‌دهنده وابستگی شدید عملکرد این شاخص به شرایط منطقه مورد استفاده است. همچنین علت تفاوت عملکرد شاخص BAEI در دو منطقه شهری، استفاده از یک ضریب ثابت است که مختص منطقه‌ای است که برای آن ایجاد شده است (Bouzekri et al., 2015, 870). شباهت این منطقه به تهران می‌تواند علت عملکرد بهتر آن در این منطقه باشد. مقایسه عملکرد کارایی شاخص‌های طیفی با نتایج طبقه‌بندی شیء‌گرا (جدول ۳) نشان می‌دهد طبقه‌بندی شیء‌گرا برای استخراج مناطق ساخته‌شده از شاخص‌هایی که فقط از داده‌های طیفی استفاده می‌کنند، مناسب‌تر است. اگرچه در این نوع طبقه‌بندی نیز برخی از مناطق ساخته‌شده به اشتباه به عنوان مناطق ساخته‌نشده در نظر گرفته شده‌اند (و بالعکس) (شکل ۴)، مقایسه جدول‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد این خطا نسبت به شاخص‌های طیفی مورد استفاده، کمتر است.

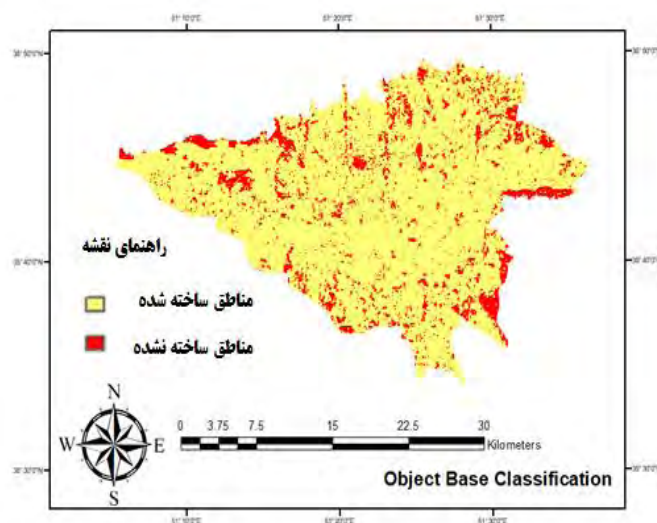


شکل ۲. نقشه مناطق ساخته‌شده و ساخته‌نشده شهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI ۲۰۱۸ تصاویر فوق نتایج استفاده از شاخص‌های مختلف برای مناطق ساخته‌شده و مناطق ساخته‌نشده را نشان می‌دهد



شکل ۳. نقشه مناطق ساخته‌شده و ساخته‌نشده شهر گرگان با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI ۲۰۱۸. تصاویر فوق نتایج استفاده از شاخص‌های مختلف برای مناطق ساخته‌شده و مناطق ساخته‌نشده را نشان می‌دهد.





شکل ۴. نقشه مناطق ساخته‌شده و ساخته‌نشده شهر گرگان با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI ۲۰۱۸
تصاویر فوق نتایج استفاده از طبقه‌بندی شیء‌گرا برای تفکیک مناطق ساخته‌شده و ساخته‌نشده را نشان می‌دهد.

بحث و نتیجه‌گیری

گسترش شهر و تغییرات کاربری اراضی و تبدیل مناطق ساخته‌نشده به مناطق ساخته‌شده از مهم‌ترین مسائل مهم امروز شهرها هستند. پیشرفت‌های روزافزون فناوری سنجش‌ازدور سبب اخذ تصاویر ماهواره‌ای با خصوصیات مورد نیاز در کاربردهای شهری شده است. در سال‌های اخیر، شاخص‌های مختلف طیفی برای استخراج عوارض ساخته‌شده و ساخته‌نشده ایجاد شده‌اند. در این مطالعه، کارایی چهار شاخص طیفی مخصوص استخراج مناطق ساخته‌شده با نتایج طبقه‌بندی شیء‌گرا در دو شهر تهران و گرگان با استفاده از تصاویر لندست ۸ سنجنده OLI مطالعه شد. عملکرد طبقه‌بندی شیء‌گرا نسبت به شاخص‌های طیفی برتری داشته است. از بین شاخص‌های مورد استفاده، بهترین شاخص که کارایی زیادی هم از نظر صحت کلی و هم از نظر صحت کاربر و صحت تولیدکننده دارد، شاخص BAEI برای شهر تهران و شاخص NBAI برای شهر گرگان است. این دو شاخص عوارض ساخته‌شده و ساخته‌نشده را برای دو شهر مورد مطالعه نسبت به دیگر شاخص‌ها بهتر از هم تفکیک کرده‌اند. یافته‌های این تحقیق نشان داد وجود پوشش گیاهی در مناطق ساخته‌نشده سبب تفکیک اشتباه این کلاس پوشش زمین توسط تمامی شاخص‌های طیفی شده است. در صورتی که مناطق ساخته‌نشده که به صورت خاک لخت یا سنگ بوده‌اند به درستی تفکیک شده‌اند. شایان ذکر است که صحت این تفکیک در تمامی شاخص‌های طیفی یکسان نیست. همچنین از بین شاخص‌های مورد استفاده، تنها شاخص NDBI، کلاس آب را به عنوان یک کلاس مجزا تشخیص داده است. در سایر شاخص‌ها، کلاس آب به عنوان مناطق ساخته‌شده در نظر گرفته شده است.

مطالعات پیشین در خصوص استخراج مناطق ساخته‌شده شهر تهران از شاخص‌های طیفی متفاوت با این مطالعه استفاده کرده‌اند و در نتیجه امکان مقایسه با پژوهش حاضر وجود ندارد. همچنین بررسی مطالعات مشابه صورت گرفته در شهر گرگان نشان می‌دهد در خصوص توسعه و گسترش شهری با تکنیک‌های مختلف پژوهش صورت گرفته است، اما

به کارایی شاخص‌های طیفی در شناسایی مناطق شهری پرداخته نشده است. یافته‌های این تحقیق نشان داد طبقه‌بندی شیء‌گرا عملکرد بسیار خوبی در استخراج مناطق ساخته‌شده در بافت‌های پیچیده و متنوع دارند و کارایی شاخص‌های طیفی در مناطق شهری با ساختارهای متفاوت و انواع پوشش‌های زمین یکسان نیست؛ بنابراین ضروری است که شاخص‌های طیفی برای استخراج مناطق ساخته‌شده با توجه به منطقه مورد مطالعه با دقت بیشتری انتخاب و معرفی شود. انتخاب شاخص مناسب به درصد مناطق ساخته‌شده، چگونگی پراکنش آن‌ها در منطقه شهری، وجود و میزان پوشش‌های گیاهی و وجود یا نبود سطوح آبی بستگی دارد. معرفی شاخص بهینه برای انواع مناطق شهری سبب می‌شود تا جامعه کاربران سنجش‌ازدور با صحت زیاد نسبت به استخراج مناطق ساخته‌شده اقدام کنند. این مسئله در شهرهایی که تغییرات سریع دارند، اهمیت بسیاری دارد. براساس این یافته‌ها پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، شاخص‌های طیفی به‌عنوان ورودی به‌همراه باندهای طیفی برای طبقه‌بندی شیء‌گرا برای استخراج مناطق ساخته‌شده به‌کار گرفته شوند. شناسایی این مناطق به‌ویژه برای کلان‌شهرهای ایران که تغییرات کالبدی سریع‌تری نسبت به دیگر شهرها دارند، حائز اهمیت است.



منابع

- بذرافشان، محسن، امام، یحیی و سید رشید فلاح شمسی (۱۳۹۳). «بررسی رفتار سری زمانی بازتاب طیفی و شاخص‌های پوشش گیاهی مزارع چغندرقد با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS»، نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی، دوره ۴، شماره ۱۳، صص ۱۵۹-۱۷۰.
- پناهی، رجب و کرامت‌اله زیاری (۱۳۸۸). «بررسی تأثیر فعالیت‌های کشت و صنعت بر شهر نونبیاد پارس‌آباد»، پژوهش‌های جغرافیای انسانی، دوره ۴۲، شماره ۷۰، صص ۱-۱۴.
- حجاری‌زاده، زهرا و نادر پروین (۱۳۸۸). «بررسی تغییرات دما و بارش تهران طی نیم قرن اخیر»، فصلنامه جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، پیش شماره، صص ۴۳-۵۶.
- حسین‌زاده دلیر، کریم و حسن هوشیار، (۱۳۸۵). «دیدگاه‌ها عوامل و عناصر مؤثر توسعه فیزیکی شهرهای ایران»، مجله جغرافیایی و توسعه ناحیه‌ای، دوره ۱۶، شماره ۶، صص ۲۱۳-۲۲۵.
- حسینی، هادی و سید هادی سلیمانی‌مقدم، (۱۳۸۵). «توسعه شهری و تضعیف مفاهیم محله‌ای»، فصلنامه مسکن و انقلاب، شماره ۱۱۳، صص ۲۸-۲۹.
- رحیمی، هومن، بهزادفر، مصطفی و کرامت‌الله زیاری، (۱۳۹۸). «بازکاوی و تحلیل ساختار شهری با تأکید بر توسعه پایدار با استفاده از روش AHP»، دوره ۱۲، شماره ۱، صص ۶۸۳-۷۰۴.
- رضایی بنفشه، مجید، رضایی، علی و مجتبی فریدیپور، (۱۳۹۴). «تحلیل خشک‌سالی کشاورزی استان آذربایجان شرقی با تأکید بر سنجش‌ازدور و شاخص وضعیت پوشش گیاهی»، نشریه دانش آب‌وخاک، دوره ۲۵، شماره ۱، صص ۱۱۳-۱۲۳.
- رضوانی، علی‌اصغر (۱۳۷۴). *روابط متقابل شهر و روستا با تأکید بر ایران، تهران: انتشارات پیام‌نور.*
- رهنما، محمدرحیم و غلامرضا عباس‌زاده، (۱۳۸۵). «مطالعه تطبیقی سنجش‌درجه پراکنش/افشردگی در کلان‌شهرهای سیدنی و مشهد»، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، دوره ۳، شماره ۶، صص ۱۰۱-۱۲۸.
- زرین، جواد و سید کاظم علوی‌پناه، (۱۳۹۵). *بررسی تغییرات الگوی حرارتی در بازه زمانی ۳۰ ساله با استفاده از باندهای حرارتی تصاویر ماهواره لندست (مطالعه موردی: اراضی جنوبی جزیره آبادان)، اولین همایش بین‌المللی مخاطرات طبیعی و بحران‌های زیست‌محیطی ایران، راهکارها و چالش‌ها، اردبیل: دانشگاه محقق اردبیلی.*
- زیاری، کرامت‌اله (۱۳۸۲). «تحولات اجتماعی-فرهنگی ناشی از انقلاب صنعتی در توسعه فضایی تهران»، مجله جغرافیا و توسعه، دوره ۱، شماره ۱، صص ۱۵۱-۱۶۴.
- سرای، محمدرحیم و زهرا جمشیدی، (۱۳۹۶). «بررسی الگوهای رشد کالبدی شهر ارومیه و ارائه یک الگوی بهینه به‌منظور افزایش فشردگی»، پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری، دوره ۵، شماره ۲، صص ۲۶۵-۲۸۷.
- شبعه، اسماعیل، ۱۳۷۹، *مقدمه‌ای بر مبانی برنامه‌ریزی شهری، تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.*
- عمادالدین، سمیه و فخرالدین نامجو، (۱۳۹۳). «ارزیابی پارامترهای ژئومورفولوژیکی در توسعه فیزیکی شهر گرگان»، فصلنامه جغرافیایی سرزمین، دوره ۱۱، شماره ۴۲، صص ۸۷-۹۸.
- کاوایی، آزاده، فرهودی، رحمت‌الله و آریتا رجبی، (۱۳۹۴). «تحلیل الگوی رشد شهر تهران با رویکرد بوم‌شناسی سیمای سرزمین»، پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری، دوره ۳، شماره ۴، صص ۴۰۷-۴۲۹.

- مجموعه مقالات (۱۳۷۰). مرکز مطالعات و تحقیقات شهرسازی و معماری ایران (طرح‌ریزی کالبدی).
- مرکز آمار ایران (۱۳۹۰). نتایج تفصیلی سرشماری عمومی و نفوس و مسکن.
- Angel, S., & Bley, A. M. (2016). The Spatial Structure of American Cities: The Great Majority of Workplaces Are No Longer in CBDs. *Employment Sub-Centers, or Live-Work Communities, Cities*, 51(1), 21–35.
- Angel, S., & Sheppard, S. (2005). The Dynamics of Global Urban Expansion. *Transport and Urban Development Department*.
- Bagan, H., & Yamagata, Y. (2012). Landsat Analysis of Urban Growth: How Tokyo Became the World's Largest Megacity during the Last 40 Years. *Remote Sensing of Environment*, 127, 210–222.
- Bazrafshan, M., Emam Y., & Fallahshamsi, S. R. (2014). Investigating the Time Series Behavior of Spectral Reflection and Vegetation Indications of Sugar Beet Farms Using MODIS Satellite Data. *Journal of Crop Production and Processing*, 4 (13), 159-170. (In Persian)
- Bouzekri1, S. Lasbet, A. A., & Lachehab, A. (2015). A New Spectral Index for Extraction of Built-Up Area Using Lands at-8 Data. *Indian Society of Remote Sensing*, 43, 867–873.
- Brisco, B., Schmitt, A., Murnaghan, K., Kaya, S., & Roth, A. (2013). SAR Polar Metric Change Detection for Flooded Vegetation. *International Journal of Digital Earth*, 6, 103–114.
- Bovolo, F., Bruzzone, L., & Marconcini, M. (2008). A Novel Approach to Unsupervised Change Detection Based on a Semisupervised SVM and a Similarity Measure. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing*, 46(7), 2070–2082.
- Bullard, R. D. (2003). Atlanta Mega sprawl. *Forum for Applied Research and Public Policy*, 14, 17–23.
- Congalton, R. G. (1991). A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46.
- Chen, M. Su, W., Li, L., Zhang, C., Yue, A., Li, H. (2009). A Comparison of Pixel-Based and Object-Oriented Knowledgebased Classification Methods Using Spot5 Imagery, *WSEAS Transactions On Information Science and Applications*, 13, 321–326.
- Coisson, T., Oueslati, W., & Salanié, J. (2014). Urban Sprawl Occurrence under Spatially Varying Agricultural Amenities. *Regional Science and Urban Economics*, 44(1), 38–49.
- Demir, B., Bovolo, F., & Bruzzone, L. (2013). Updating Land-Cover Maps by Classification of Image Time Series: A Novel Change-Detection-Driven Transfer Learning Approach. *IEEE Trans Geoscience Remote Sensing*, 51, 300–312.
- Dronova, I., Gong, P., & Wang, L. (2011). Object-Based Analysis and Change Detection of Major Wetland Cover Types and Their Classification Uncertainty during the Low Water Period at Poyang Lake, China, *Remote Sensing. Environment*, 115, 3220–3236.
- Du, Z., Li, W., Zhou, D., Tian, L., Ling, F., Wang, H., & Sun, B. (2014). Analysis of Landsat-8 OLI Imagery for Land Surface Water Mapping. *Remote Sensing Letters*, 5(7), 672–681.
- Emaoddin S., & Namjo, F. (2014). Evaluation of Geomorphological Parameters in Physical Development of Gorgan City. *Territorial Geographical Quarterly*, 11(42), 87–98. (In Persian)
- Foody, G. M. (2002). Status of Land Cover Classification Accuracy Assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185–201.
- Gago, E. J. et al. (2013). The City and Urban Heat Islands: A Review of Strategies to Mitigate Adverse Effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25(25), 749–758.

- Gao, Y., Mas, J. F., & Navarrete, A. (2009). The Improvement of An Object-Oriented Classification Using Multi-Temporal MODIS EVI Satellite Data. *International Journal of Digital Earth*, 2, 219–236.
- Hajarizadeh, Z., & Parvin, N. (2009). Investigation of Temperature Changes and Rainfall in Tehran During the Last Half Century. *Geography and Regional Planning*, 0, 43-56. (In Persian)
- Hosseini H., & Soleymani Moghadam, S. H. (2006). Urban Development and Weakening of Neighborhood Concepts. *Housing and Revolution Quarterly*, 113, 28–29. (In Persian)
- Hosseinzadeh Dalir, K., & Houshiyar, H. (2006). Perspectives Factors and Effective Elements of Physical Development of Iranian Cities. *Geographical Journal of Regional Development*, 16(6), 213-225. (In Persian)
- Hu, Q., Wu, W. B., Xia, T., Yu, Q. Y., Yang, P., Li, Z. G., & Song, Q. (2013). Exploring the use of Google Earth imagery and Object-Based Methods in Land Use/Cover Mapping. *Remote Sensing*, 5(11), 6026–6042.
- Jaeger, J. A. G., & Schwick, C. (2014). Improving the Measurement of Urban Sprawl: Weighted Urban Proliferation (WUP) and Its Application to Switzerland. *Ecological Indicators*, 38, 294–308.
- Kaliraj, S., Muthu Meenakshi, S., & Malar, V. K. (2012). Application of Remote Sensing in Detection of Forest Cover Changes Using Geo-Statistical Change Detection Matrices-a Case Study of Devanampatti Reserve Forest, Tamilnadu, India. *Nature Environment and Pollution Technology An International Quarterly Scientific Journal*, 11, 261–269.
- Kaviani A., Farhodi, R. A., & Rajabi, A. (2015). Analysis of the Growth Pattern of Tehran City with the Ecological Approach of the Land Appearance. *Geographical Research of Urban Planning*, 3(4), 407–429. (In Persian)
- Kawamura, M., Jayamanna, S., & Tsujiko, Y. (1996). Relation between Social and Environmental Conditions in Colombo Sri Lanka and the Urban Index Estimated by Satellite Remote Sensing Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 51, 321-326.
- Li, W., Du, Z., Ling, F., Zhou, D., Wang, H., Gui, Y., & Zhang, X. (2013). A Comparison of Land Surface Water Mapping Using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing*, 5(11), 5530–5549.
- Marko Gianni, V., Dimitriou, E., & Kalivas, D. P. (2013). Land-Use and Vegetation Change Detection in Plastira Artificial Lake Catchment (Greece) by Using Remote-Sensing and GIS Techniques. *International Journal Remote Sensing*, 34, 1265–1281.
- Masek, J. G., Lindsay, F. E., & Goward, S. N. (2000). Dynamics of Urban Growth in the Washington DC Metropolitan Area, 1973–1996, from Landsat Observations. *International Journal of Remote Sensing*, 21(18), 3473–3486.
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-Density Cypress Forest. *Sensors*, 7, 2636–2651.
- Matthias, B., & Martin, H. (2003). Mapping Imperviousness Using NDVI and Linear Spectral Unmixing of ASTER Data in the Cologne-Bonn Region (Germany). In: *Proceedings of the SPIE 10th International Symposium on Remote Sensing*, 5239, 274–284.
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66.
- Panahi, R., & Zayyari, K. A. (2009). Investigating the Effect of Cultivation and Industrial Activities on the New City of Parsabad. *Human Geography Research*, 70, 1–14. (In Persian)

- Polydoros, A., & Cartalis, C. (2015). Use of Earth Observation based Indices for the Monitoring of Built-Up Area Features and Dynamics in Support of Urban Energy Studies. *Energy {and} Buildings*, 98, 92–99.
- Rahimi, H., Behzadfar, M., & Zayyari, K. A. (2019). Review and Analysis of Urban Structure with Emphasis on Sustainable Development Using AHP Method. *Scientific-Research Quarterly New Attitudes in Human Geography*, 1, 683–704. (In Persian)
- Rahnama M. R., & Abbaszadeh Gh. (2006). Comparative Study of Degree of Distribution / Compression Measurement in Metropolitan Cities of Sydney and Mashhad. *Geographical and Regional Development Journal*, 12(6), 101-128. (In Persian)
- Raja, R. A. A., Anand, V., Kumar, A. S., Maithani, S., & Kumar, V. A. (2013). Wavelet based Post Classification Change Detection Technique for Urban Growth Monitoring. *Journal of the Indian Society and Remote Sensing*, 41, 35–43.
- Ray, S. S., Singh, J. P., Dasa, G., & Panigrahy, S. (2004). Use of High Resolution Remote Sensing Data for Generating Site Specific Soil Management Plan. In *Proceeding of the 4th International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress*, 35, 12–23.
- Rezae Banafshe, M., Rezae, A., & Faridpoor, M. (2015). Analysis of Agricultural Drought in East Azarbaijan Province with Emphasis on Remote Sensing and Indicator of Vegetation Status. *Journal of Water and Soil Knowledge*, 25(1), 113–123. (In Persian)
- Rezvani, A. A. (1995). *Mutual Relations between City and Village with Emphasis on Iran*. Tehran: Payame Noor University Press. (In Persian)
- Salmon, B. P., Kleyhans, W., Van Den Bergh, F., Olivier, J. C., Grobler, T. L., & Wessels, K. J. (2013). Land Cover Change Detection Using the Internal Covariance Matrix of the Extended Kalman Filter Over Multiple Spectral Bands IEEE. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6, 1079–1085.
- Saraee, M. H., & Jamshidi, Z. (2018). Investigating the Physical Growth Patterns of Urmia City and Presenting an Optimal Pattern in Order to Increase Compression. *Geographical Research of Urban Planning*, 5(2), 265–287. (In Persian)
- Sezgin, M., and B. Sankur. (2004). “Survey over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation.” *Journal of Electronic Imaging* 13 (1): 146–165
- Shia, E. (2001). *An Introduction to the Basics of Urban Planning*. Tehran: Iran University of Science and Technology Publications. (In Persian)
- Singh, A. (1989). Review Article Digital Change Detection Techniques Using Remotely – Sensed Data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 989–1003.
- Statistical Center of Iran (2011). Detailed Results of the General Census and Population and Housing. (In Persian)
- Tehran Proceedings (1991). Iran Urban Planning and Architecture Studies and Research Center. (In Persian)
- Volpi, M., Petropoulos, G. P., & Kanevski, M. (2013). Flooding Extent Cartography with Landsat TM Imagery and Regularized Kernel Fisher’s Discriminant Analysis. *Computer & Geoscience*, 57, 24–31.
- Waqar, M. M., Mirza, J. F., Mumtaz, R., & Hussain, E. (2012). Development of New Indices for Extraction of Built-Up Area & Bare Soil from Landsat Data. *Open Access Scientific Reports*, 1(1), 1-4.

- Weng, Q. (2012). Remote Sensing of Impervious Surfaces in the Urban Areas: Requirements Methods and Trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34–49.
- Xu, H. (2008). A New Index for Delineating Built-Up Land Features in Satellite Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4269–4276.
- Xu, H. (2007). Extraction of Urban Built-Up Land Feature from Landsat Imagery Using a Thematic-Oriented Index Combination Technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(12), 1381–1391.
- Xu, H. (2010). Analysis of Impervious Surface and its Impact on Urban Heat Environment using the Normalized Difference Impervious Surface Index (NDISI). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(5), 557–565
- Zarin, J., & Alavipanah, S. K. (2016). *Investigating Changes in Thermal Pattern Over a Period of 30 Years Using Thermal Bands Landsat Satellite Images (Case Study: Southern Lands of Abadan Island)*, *The First International Conference on Natural Disasters and Environmental Crisis in Iran, Strategies and Challenges*. Ardabil: Mohaghegh Ardabili University. (In Persian)
- Zayyari, K. A. (2003). Socio-Cultural Developments Resulting from the Industrial Revolution in the Spatial Development of Tehran. *Journal of Geography and Development*, 1(1), 151-164. (In Persian)
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of Normalized Difference Built-Up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594.
- Zhang, Y. Odeh, I. O. A. and Han, C. (2009). Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub-pixel image analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 11, No. 4: 256–264.
- Zhao, M. S., Rossiter, D. G., Li, D. C., Zhao, Y. G., & Liu, F. (2014). Mapping Soil Organic Matter in Low-Relief Areas Based on Land Surface Diurnal Temperature Difference and a Vegetation Index. *Ecological Indicators*, 39, 120–133.