

طبقه‌بندی و شناسایی تغییرات اراضی ساخته‌شده با استفاده از تصاویر سنجنش از دور

کیوان عزی‌مند- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشگاه تهران
عطاءالله عبداللهی کاکروودی* - استادیار گروه سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران
مجید کیاورز مقدم- استادیار گروه سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۱ تأیید مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۲

چکیده

در پی شهرنشینی بی‌سابقه در دهه‌های گذشته و افزایش جمعیت شهرها، چشم‌اندازهای طبیعی در حال تبدیل شدن به چشم‌اندازهای انسانی است و فضاهای باز شهری به اراضی ساخته‌شده مبدل شده است. در این بین، تغییرات کاربری اراضی مدیران شهری را مجاب می‌کند که همواره اطلاعات به‌روزی از این تغییرات داشته باشند تا بتوانند درباره مدیریت شهری سریع‌تر تصمیم‌گیری کنند. هدف از انجام این مطالعه طبقه‌بندی اراضی ساخته‌شده و شناسایی میزان تغییرات این اراضی در شهر تهران است. همچنین این مطالعه به بررسی و عملکرد هفت شاخص طیفی به‌منظور طبقه‌بندی و تشخیص تغییر اراضی ساخته‌شده با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ سنجنده + ETM و تصاویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI / TIRS می‌پردازد. محدوده مورد مطالعه در این تحقیق شهر تهران با وسعت ۶۸۹۹۵ هکتار است. روش انجام این تحقیق نیز بدین گونه است که ابتدا برای جداسازی سطوح دارای آب از سطوح بدون آب بر روی تصاویر، از شاخص MNDWI و روش آستانه‌گذاری اتسو استفاده شده است. پس از آن به‌منظور توجه مطلق بر مناطق بدون آب، یک ماسک آب تولید، و برای پوشاندن آب در تمام تصاویر به کار رفته است. در نهایت با استفاده از روش اتسو برای تمامی شاخص‌ها اراضی ساخته‌شده و ساخته‌نشده از یکدیگر جدا و طبقه‌بندی شده‌اند. دقت طبقه‌بندی نیز با استفاده از ۳۵۰۰ نقطه مرجع برای هر تصویر بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد شاخص VbSWIR1-BI با دقت کلی ۹۲/۸۸ درصد (لندست ۷) و ۹۲/۶۸ درصد (لندست ۸)، دقت کلی بیشتری دارد. همچنین نتایج تغییرات اراضی ساخته‌شده شهر تهران براساس شاخص VbSWIR1-BI در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ به میزان ۶/۳۸ درصد بوده است. گفتنی است بیشترین تغییرات مکانی اراضی ساخته‌شده در بخش‌های غربی و جنوب غربی شهر تهران دیده می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تصاویر لندست ۷ و لندست ۸، شاخص‌های طیفی، شناسایی تغییرات، طبقه‌بندی، گسترش شهری.

مقدمه

توسعه فناوری و رشد سریع شهرنشینی در قرن حاضر سبب به وجود آمدن بسیاری از مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی در کشورهای در حال توسعه شده است. (Longley, 2002: 235) آمارها نشان می‌دهد شهرنشینی نگرانی اصلی بسیاری از مناطق جهان است؛ به طوری که بیش از نصف جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند (United Nations Population Fund, 2007: 1). همچنین پیش‌بینی شده است که جمعیت شهری جهان در سال ۲۰۵۰ حدود دو برابر خواهد شد و از ۳/۳ میلیارد در سال ۲۰۰۷ به ۴/۶ میلیارد در سال ۲۰۵۰ خواهد رسید (United Nations, 2007: 38)؛ در حالی که بسیاری از این ساکنان جدید در شهرهایی از کشورهای در حال توسعه تمرکز خواهند یافت (Ginkel, 2010: 60).

در حال حاضر ۴۰۰ هزار کیلومتر مربع از نواحی سطح زمین تحت پوشش اراضی ساخته شده^۱ قرار دارد (Jaeger and Schwick, 2014: 294). این مقدار به سرعت در حال افزایش است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ بین ۷۰۰ هزار (Angel et al., 2005: 5) تا ۱ میلیون و ۲۰۰ هزار کیلومتر مربع (Seto et al., 2012: 16083) افزایش یابد. ممکن است در شهرهای کشورهای در حال توسعه اراضی ساخته شده سه برابر یا بیشتر باشد؛ به طوری که این مقدار از ۲۰۰ هزار کیلومتر مربع به ۶۰۰ هزار کیلومتر مربع برسد؛ در حالی که در شهرهای کشورهای توسعه یافته این مقدار از ۲۰۰ هزار کیلومتر مربع به ۵۰۰ هزار کیلومتر مربع می‌رسد (Population Fund, 2007: 47 United Nations).

گفتنی 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 (Coisson et al., 2014: 38). پراکندگی شهری ویژگی مهم شهرنشینی است که بازتاب تعامل بین شهرها و تکامل سیستم‌های شهری است (Jiang et al., 2016: 1). تعامل بین توسعه اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیست شهری، اراضی ساخته شده شهری را گسترش داده (Angel & Blei, 2016: 4) و امروزه تغییرات بدون برنامه کاربری اراضی به مشکلی عمده تبدیل شده است. بیشتر تغییرات کاربری اراضی، بدون برنامه‌ریزی روشن و منطقی با توجه اندک به آثار زیست‌محیطی آنها صورت می‌گیرد. همچنین مشکلاتی از نظر اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی نظیر اتلاف انرژی، تخریب منابع زیست‌محیطی، جزیره حرارتی، تناوبی از ویژگی‌های هیدرولوژی، افزایش هزینه‌های شهرداری و غیره را به همراه دارد (Han et al., 2009: 133). تحلیل گسترش شهری در گذشته این امکان را برای تصمیم‌گیران و تصمیم‌سازان سیاست‌های شهری فراهم می‌کرد که بتوانند ضمن ارزیابی سیاست‌های فعلی، توسعه آینده شهر و تغییرات کاربری اراضی را به سمت توسعه‌ای پایدار هدایت کنند. در این بین، مدل‌های رشد شهری به کاربر اجازه می‌دهد بینش بهتری در زمینه تصمیم‌گیری واقعی به دست آورد و در نتیجه حالت‌های سنجیدنی و جایگزین را برای آینده پیش‌بینی کند (Ganeshkumar, 2014: 22).

شایان ذکر است که به تازگی و به صورت بی‌سابقه‌ای، به مطالعات شهری با استفاده از داده‌های سنجش از دور توجه شده است؛ زیرا این دانش در مورد میزان و الگوی اراضی ساخته شده، چشم‌انداز و برنامه‌ریزی توسعه شهری، ارزیابی

ریسک و مدیریت بحران و مدیریت منابع محیط بحث می‌کند. ماهواره‌های سنجش‌ازدور داده‌های زمانی و مکانی را با هزینه کم فراهم می‌کنند تا بتوانند در تصمیم‌گیری از آن‌ها استفاده کنند (Xu, 2008: 4269).

طبقه‌بندی اراضی ساخته‌شده در شهر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بسیار مهم است و تنها به تجزیه‌وتحلیل پراکنندگی شهری محدود نمی‌شود (Zeng et al., 2015: 10); Estoque & Murayama, 2013: 60); مدل‌سازی رشد شهری و تأثیرات زیست‌محیطی (Thapa & Murayama, 2011: 25; Estoque et al., 2012: 47) و تجزیه‌وتحلیل پدیده جزیره گرمایی (Weng et al., 2012: 82; Estoque & Murayama 2014:239; Kong et al., 2012: 82) نیز کاربردهای زیادی دارد.

همانند مطالعاتی که در گذشته انجام شده، این مطالعه نیز سطوح نفوذناپذیری را به‌عنوان اراضی ساخته‌شده مدنظر قرار می‌دهد که شامل ساختمان‌ها، جاده‌ها، پیاده‌رو، پارکینگ و غیره است (Thanapura et al., 2007: 57; Matthias and Martin, 2003: 2; Weng, 2012: 478). این سطوح به‌طور کلی به دو دسته طبیعی یا انسان‌ساخت تقسیم می‌شوند و از نفوذ آب‌های سطحی به خاک جلوگیری می‌کنند (Matthias & Martin, 2003: 2; Weng, 2012: 475).

به‌منظور تشخیص سریع و طبقه‌بندی دقیق اراضی ساخته‌شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، شاخص‌های طیفی مختلف ارائه شده که عبارت‌اند از: شاخص شهری^۱، شاخص تفاوت نرمال شده اراضی ساخته‌شده^۲، شاخص مبتنی بر سایر شاخص‌های اراضی ساخته‌شده^۳، شاخص تفاوت نرمال سطح نفوذناپذیر^۴ و دو شاخص مبتنی بر باندهای مرئی سبز و قرمز برای اراضی ساخته‌شده^۵ است. درنهایت شاخص معرفی‌شده، بر باند مرئی آبی و باند اول مادون قرمز موج کوتاه برای اراضی ساخته‌شده^۶ مبتنی است.

گفتنی است شاخص‌های UI و NDBI از طیف الکترومغناطیس مادون قرمز میانی^۷ و باند مادون قرمز نزدیک^۸ استفاده می‌کنند. شاخص IBI نیز از ترکیب طیف‌های الکترومغناطیس مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز میانی و مرئی^۹ استفاده می‌کند. از ترکیب طیف‌های الکترومغناطیس مادون قرمز حرارتی^{۱۰}، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز میانی و باندهای مرئی، شاخص NDISI به دست می‌آید. دو شاخص VrNIR-BI و VgNIR-BI بر طیف مرئی (باندهای قرمز و سبز) و مادون قرمز نزدیک، و درنهایت شاخص VbSWIR1-BI بر باند مرئی آبی و باند اول مادون قرمز موج کوتاه مبتنی

1. Urban Index (UI)
2. Normalized Difference Built-up Index (NDBI)
3. Index-based Built-up Index (IBI)
4. Normalized Difference Impervious Surface Index (NDISI)
5. Visible Red/Green-based Built-up Indices (VrNIR-BI and VgNIR-BI)
6. Visible Blue based Built-up Index (VbSWIR1-BI)
7. Near-Infrared Channel
8. Mid-Infrared Channels
9. Visible Channels
10. Thermal infrared

است. همانند شاخص پوشش گیاهی^۱ (Rouse et al., 1973) و دمای سطح زمین^۲ (Weng et al., 2004)، شاخص‌های طیفی اراضی ساخته شده به عنوان شاخص و پارامتری در تحقیقات زیست‌محیطی در شهر استفاده می‌شوند (Polydoros & Cartalis, 2015).

بسیاری از محققان به منظور استخراج اراضی ساخته شده تنها از ترکیب باندهای مرئی با باندهای مادون قرمز نزدیک استفاده کرده‌اند که از نمونه‌های آن می‌توان به ماسک^۳ و همکاران (۲۰۰۰) و ماتیس و مارتین^۴ (۲۰۰۳) اشاره کرد. ژانگ و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از تصاویر سنجش از دور و شاخص‌های NDVI و NDBI، اراضی ساخته شده و پوشش گیاهی را استخراج و نهایتاً رابطه آن‌ها را با درصد سطوح نفوذناپذیر و دمای سطح زمین نشان دادند. نتایج نیز بیانگر همبستگی مثبت و قوی بین NDBI، درصد سطوح نفوذناپذیر و دمای سطح زمین است. خو (۲۰۱۰) برای استخراج سطوح نفوذناپذیر در شهر فوجو چین و تأثیرات آن بر روی جزایر حرارتی از شاخص NDISI استفاده کرده است. در این پژوهش طبقه‌بندی اراضی ساخته شده با شاخص NDISI با روش‌های Spectral Mixture Analysis (SMA) و Carlson مقایسه شده و نتایج بیانگر دقت کلی بالاتر شاخص NDISI بوده است. خو و همکاران^۵ (۲۰۱۳) مقایسه جامعی بین شاخص IBI و روش طبقه‌بندی SVM برای استخراج اراضی ساخته شده از تصاویر لندست و استر انجام داده‌اند که نتایج آن حاکی از دقت بالاتر شاخص IBI برای هر دو تصویر در مقایسه با روش طبقه‌بندی SVM بوده است. پلیدروس و کارتالیس (۲۰۱۵) با استفاده از شاخص‌های NDVI، NDBI و IBI، اراضی ساخته شده در سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۰ را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که این شاخص‌ها پتانسیل زیادی در شناسایی تغییرات داشته‌اند.

با این حال هنوز به اهمیت باند آبی در طبقه‌بندی اراضی ساخته شده توجه نشده است؛ از این‌رو، هدف این مطالعه بررسی و مقایسه عملکرد شاخص‌ها و معرفی شاخص جدید برای طبقه‌بندی اراضی ساخته شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شناسایی تغییرات کاربری اراضی در محدوده شهر تهران است. از سوی دیگر چنین مطالعه‌ای برای کلان‌شهر تهران که در منطقه‌ای نیمه‌خشک قرار گرفته، همچنین اراضی بایر و با پوشش گیاهی خشک که سبب خطا در طبقه‌بندی اراضی ساخته شده می‌شوند، انجام نشده است.

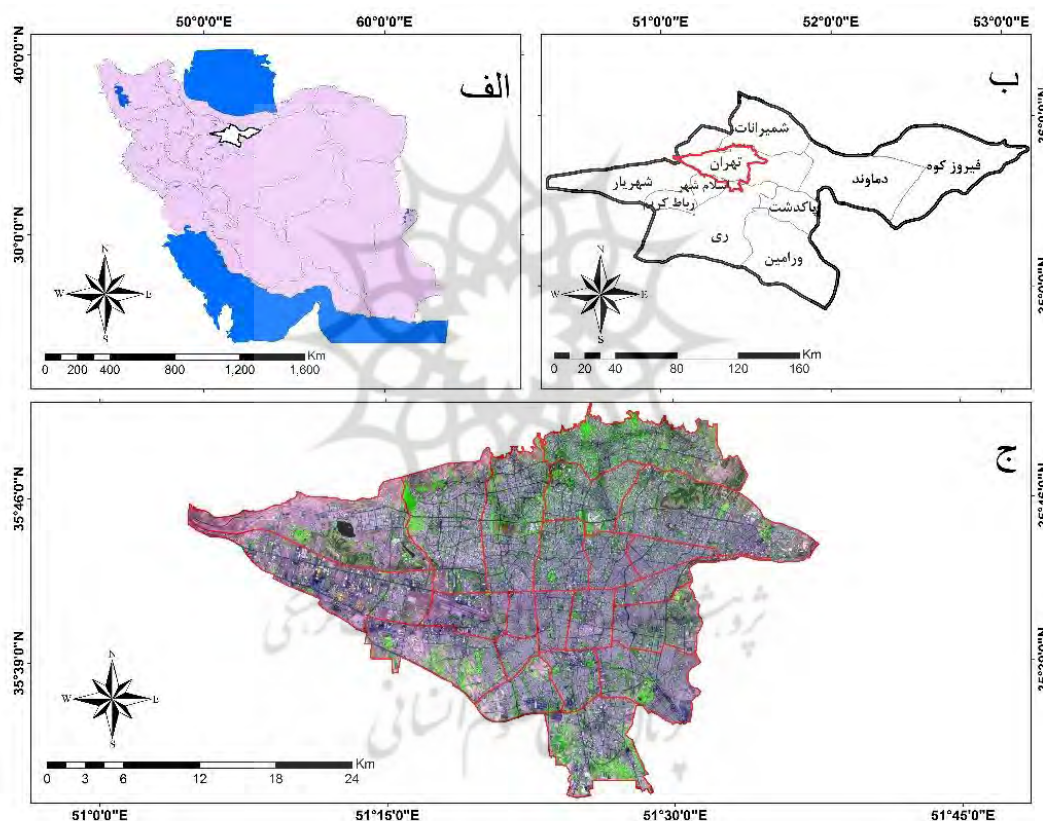
در این مطالعه از شاخص‌های IBI، NDSI، NDBI، UI، VrNIR-BI و VgNIR-BI در طبقه‌بندی اراضی ساخته شده بر روی تصاویر ماهواره لندست ۷ سنجنده + ETM در سال ۲۰۰۱ و تصاویر ماهواره لندست ۸ سنجنده / OLI در سال ۲۰۱۵ استفاده شده است. علاوه بر شش شاخص فوق، شاخص جدید VbSWIR1-BI که بر مبنای باند آبی و باند اول مادون قرمز موج کوتاه است نیز به منظور جداسازی اراضی ساخته شده و ساخته نشده ارائه شده است. همچنین تغییرات زمانی و مکانی شهر تهران از سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۱۵ در این تحقیق تشخیص داده و بررسی شده است.

1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
2. Land Surface Temperature (LST)
3. Masek
4. Matthias and Martin
5. Xu

مواد و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شهر تهران است (شکل ۱) که از نظر جغرافیایی در ۵۱ درجه ۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. این منطقه در فلات مرکزی، در دامنه جنوبی کوه های البرز و جهت شیب کلی از شمال به جنوب و در دشتی نسبتاً هموار با مساحت ۶۸۹۹۵ هکتار و جمعیتی معادل ۸۲۴۴۵۳۵ نفر (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰) واقع شده و آب‌وهوای آن جزء ناحیه اقلیمی نیمه‌خشک و بیشتر از ارتفاعات البرز مرکزی متأثر است. متوسط بارندگی این منطقه نیز ۳۳۳ میلی‌متر در سال است (حجازی‌زاده و پروین، ۱۳۸۸: ۴۵).



شکل ۱. معرفی محدوده مورد مطالعه

(الف) موقعیت استان تهران در مقایسه با ایران؛

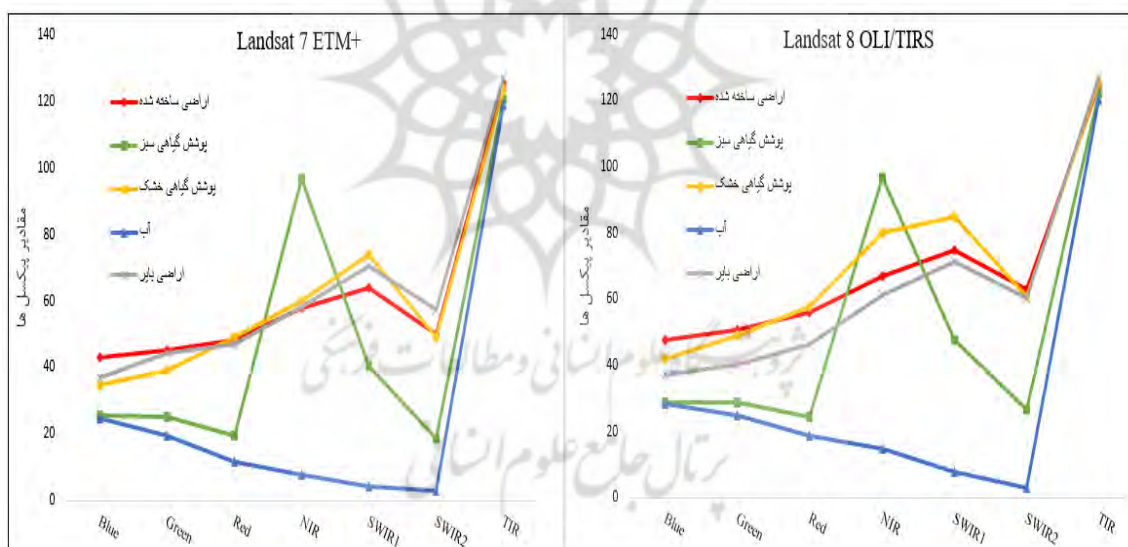
(ب) موقعیت شهر تهران در مقایسه با استان تهران؛

(ج) تصویر لندست ۸ سنجنده OLI/TIRS از شهر تهران با ترکیب رنگی (RGB=645) در تاریخ ۲ ژوئن ۲۰۱۵؛ در این تصویر اراضی ساخته‌شده به رنگ بنفش متمایل به خاکستری تیره، پوشش گیاهی به رنگ سبز و پهنه‌های آبی به رنگ آبی تیره به‌نظر می‌رسد. خط قرمز نیز محدوده شهر تهران و مناطق ۲۲ گانه آن را نشان می‌دهد.

داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه، از تصاویر مربوط به ماهواره لندست ۷ سنجنده ETM+ و ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI/TIRS استفاده شده است. تصاویر در مسیر ۱۶۴ و در ردیف ۳۵ از سیستم مرجع جهانی (WRS) قرار دارد. تصویر لندست ۷ سنجنده ETM+ در ۳ ژوئن ۲۰۰۱ به دست آمده و شامل هشت باند است، در حالی که تصویر لندست ۸ سنجنده OLI/TIRS در ۲ ژوئن ۲۰۱۵ به دست آمده و شامل یازده باند است (<http://landsat.usgs.gov>). محصولات لندست ۷ با اعداد دیجیتال ۸ بیتی، و تصاویر لندست ۸ با اعداد دیجیتال ۱۶ بیتی ذخیره شده است (Landsat 7 Science Data Users Hand book). همچنین در این تحقیق تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا که در Google Earth موجود است کاربرد دارد.

شکل ۲ پروفیل طیفی از انواع پوشش‌های سطحی را در منطقه مورد مطالعه در هفت باند نشان داده می‌شود. باند مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) شامل باند ۱ و ۲ است. چنین به نظر می‌رسد که با داشتن تفاوت در طول موج باندهای دو سنسور می‌توان انواع پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه را با استفاده از الگوی بازتاب در یک سطح مشابه در دو تصویر نشان داد (شکل ۲).



شکل ۲. پروفیل طیفی از انواع پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه

تصویر فوق مقدار بازتاب از سطح^۱ برای هریک از پوشش‌ها را در باندهای چندطیفی و دمای روشنایی در باندهای حرارتی نشان می‌دهد. برای ترسیم این پروفیل طیفی از هزار پیکسل نمونه به کار رفته که برای هر کلاس تعداد ۲۰۰ پیکسل انتخاب شده است.

روش‌شناسی تحقیق

پیش‌پردازش تصاویر لندست ۷ و ۸

پیش از استخراج شاخص‌های طیفی مختلف اراضی ساخته‌شده، برخی پیش‌پردازش‌های داده از جمله محاسبه شاخص آب (MNDWI)، تصحیحات هندسی، تصحیحات رادیومتریک و تصحیحات اتمسفری بر روی تصاویر لندست ۷ سنجنده + ETM و تصاویر لندست ۸ سنجنده OLI / TIRS صورت گرفته است.

مقادیر خام پیکسل‌ها که به‌عنوان شماره دیجیتال^۱ شناخته می‌شود، در باندهای چندطیفی^۲ و باندهای حرارتی^۳ به رادیانس طیفی بالای اتمسفر^۴ و برای باندهای حرارتی به دمای روشنایی^۵ تبدیل شده است. گفتنی است رادیانس طیفی بالای اتمسفر از باندهای چندطیفی و حرارتی تصاویر لندست ۷ سنجنده + ETM و لندست ۸ سنجنده OLI / TIRS را می‌توان با استفاده از معادلات ۱ و ۲ محاسبه کرد.

در این مطالعه، با استفاده از Radiometric Calibration موجود در نرم‌افزار ENVI، رادیانس طیفی بالای اتمسفر را محاسبه کردیم سپس آن را به‌عنوان ورودی مدل FLAASH قرار دادیم و تصحیح اتمسفری را اعمال کردیم، پس از این با روش FLAASH نتایج به بازه ۰-۱ برده (Envi,2009: 37) و در عدد ۴۰۰ برای تولید تصاویر ۸ بیتی (۰-۲۵۵) ضرب شد (Xu,2010: 559).

$$L_{\lambda}(\text{Landsat}-7) = \text{Grescale} * Q_{\text{cal}} + \text{Brescale} \quad (1)$$

L_{λ} تابش طیفی دریافت‌شده از سوی سنجنده برحسب ($w/m^2 * sr * \mu m$)، Grescale و Brescale به ترتیب Gain و Offset سنجنده برحسب ($w/m^2 * sr * \mu m$)، Q_{cal} ارزش پیکسل واسنجی‌شده کوانتیزه شده^۶ است. مقادیر فوق را می‌توان از متادیتای تصاویر به‌دست آورد (Landsat 7 Science Data Users Handbook).

$$L_{\lambda}(\text{Landsat}-7) = M_L * Q_{\text{cal}} + A_L \quad (2)$$

M_L و A_L به ترتیب رادیانس MULT و رادیانس ADD که از متادیتای تصاویر به دست می‌آید و Q_{cal} ارزش پیکسل واسنجی‌شده کوانتیزه شده است (USGS, 2013a).

برای محاسبه دمای روشنایی از باند حرارتی ماهواره لندست ۷ سنجنده + ETM (باند ۶) و باند حرارتی ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI/TIR (باند ۱۰) استفاده کرده ایم. پس از محاسبه رادیانس طیفی باندهای حرارتی، با استفاده از Thermal Atmospheric Correction تصحیح اتمسفری را برای باندهای حرارتی انجام دادیم و دمای روشنایی را برای لندست ۷ و لندست ۸ با معادله ۳ محاسبه کردیم، اما پیش از این کار از محاسبه دمای روشنایی برای لندست ۷ مقدار ۰/۰۳۶ از رادیانس طیفی کم شد (برای جزئیات بیشتر مراجعه شود به USGS, 2013b). درنهایت مقادیر دمای روشنایی بین صفر تا ۲۵۵ تبدیل و به‌صورت ۸ بیتی ذخیره شد.

1. Digital Number
2. Multispectral Bands
3. Thermal Bands
4. Top Of Atmosphere
5. Brightness Temperature
6. Quantized Calibrated Pixel Value

$$TB = \frac{K_2}{Ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (3)$$

TB دمای روشنایی سنجنده^۱ برحسب کلوین و K_1 و K_2 ضرایب ثابت کالیبراسیون دمای روشنایی سنجنده هستند که به ترتیب برحسب کلوین و $(w/m^2 * sr * \mu m)$ و در متادیتای تصاویر موجود است (USGS, 2006; Chander et al., 2009: 901) در جدول ۱ ضرایب ثابت کالیبراسیون دمای روشنایی برای ماهواره لندست ۷ باند ۶ و ماهواره لندست ۸ باند ۱۰ نشان داده شده است (Chander et al., 2009: 901).

جدول ۱. ضرایب ثابت کالیبراسیون دمای روشنایی

ضریب	K_1	K_2
واحد	$(w/m^2 * sr * \mu m)$	Kelvin
لندست ۷ باند ۶	۶۶۶/۰۹	۱۲۸۲/۷۱
لندست ۸ باند ۱۰	۷۷۴/۸۸۵۳	۱۳۲۱/۰۷۸۹

شاخص‌های طیفی برای طبقه‌بندی اراضی ساخته شده

در اواسط دهه ۱۹۹۰ کاواموآ برای تولید اطلاعات به روز در مورد شرایط مناطق شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای شاخص UI (معادله ۴) را معرفی کرد (Kawamura et al., 1996: 321). شاخص UI از باند مادون قرمز نزدیک و باند دوم مادون قرمز موج کوتاه (SWIR2) استفاده می‌کند. باید توجه داشت که این شاخص برای بهره‌برداری رابطه معکوس بین روشنایی مناطق شهری در باندهای مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه طراحی شده است. (Kawamura et al., 1996: 322) در اوایل سال ۲۰۰۰ ژا شاخص NDBI (معادله ۵) را ارائه کرد (Zha et al, 2003)، این شاخص واکنش طیفی منحصربه‌فرد از اراضی ساخته شده و انواع کاربری‌ها را به کار گرفت. همانند UI شاخص NDBI برای بهره‌برداری از تفاوت واکنش‌های طیفی اراضی ساخته شده با سایر کاربری‌ها در بخش‌های مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه توسعه داده شد با این تفاوت که شاخص NDBI از باند اول مادون قرمز موج کوتاه (SWIR1) استفاده می‌کند.

در اواخر دهه ۲۰۰۰ خو شاخص IBI (معادله ۶) را با هدف ارائه روش ساده اما مؤثر برای طبقه‌بندی اراضی ساخته شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای معرفی کرد (Xu, 2008). استدلال این شاخص بر این مبنا استوار است که در شاخص NDBI غالباً پیکسل‌های مخلوط گیاه به دلیل کاهش مقدار آب در برگ‌ها بازتاب زیادی دارند (Xu, 2008: 4270)، در نتیجه پوشش گیاهی خشک ممکن است بازتاب بسیار بالاتر در طول موج مادون قرمز موج کوتاه و در طول

1. at-sensor Brightness Temperature

2. Kawamura

موج مادون قرمز نزدیک داشته باشد (Cibula et al., 1992: 1873; Gao, 1996: 257). براساس همین، شاخص IBI با ترکیب باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه این محدودیت را از بین می‌برد (Xu, 2008: 4272).

در سال ۲۰۱۰ شاخص NDISI (معادله ۷) به عنوان فنی برای استخراج سطوح نفوذناپذیر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پیشنهاد شد (Xu, 2010) که در آن علاوه بر استفاده از باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه، باند حرارتی نیز کاربرد داشت. در اوایل دهه ۲۰۱۰ دو شاخص VrNIR-BI (معادله ۸) و VgNIR-BI (معادله ۹) بر مبنای طیف مرئی معرفی شدند (Estoque and Murayama, 2013) که از باندهای قرمز و سبز در ترکیب با باند مادون قرمز نزدیک بهره می‌بردند. همچنین در این تحقیق شاخص جدیدی بر مبنای باند مرئی آبی و باند اول مادون قرمز موج کوتاه (VbSWIR1-BI) برای طبقه‌بندی اراضی ساخته‌شده و ساخته‌نشده ارائه شد (معادله ۱۰).

$$UI = \frac{\rho SWIR_2 - \rho NIR}{\rho SWIR_2 + \rho NIR} \quad (4)$$

$$NDBI = \frac{\rho SWIR_1 - \rho NIR}{\rho SWIR_1 + \rho NIR} \quad (5)$$

$$IBI = \frac{2\rho SWIR_1 / (\rho SWIR_1 + \rho NIR) - [\rho NIR / (\rho NIR + \rho Red) + \rho Green / (\rho Green + \rho SWIR_1)]}{2\rho SWIR_1 / (\rho SWIR_1 + \rho NIR) + [\rho NIR / (\rho NIR + \rho Red) + \rho Green / (\rho Green + \rho SWIR_1)]} \quad (6)$$

$$NDISI = \frac{\rho TIR_1 - ((\rho Green + \rho NIR + \rho SWIR_1) / 3)}{\rho TIR_1 + ((\rho Green + \rho NIR + \rho SWIR_1) / 3)} \quad (7)$$

$$VrNIR - BI = \frac{\rho Red - \rho NIR}{\rho Red + \rho NIR} \quad (8)$$

$$VgNIR - BI = \frac{\rho Green - \rho NIR}{\rho Green + \rho NIR} \quad (9)$$

$$VbSWIR1 - BI = \frac{\rho SWIR_1 - \rho Blue}{\rho SWIR_1 + \rho Blue} \quad (10)$$

$$MNDVI = \frac{\rho Green - \rho SWIR_1}{\rho Green + \rho SWIR_1} \quad (11)$$

در معادلات فوق $\rho SWIR_2$ ، $\rho SWIR_1$ ، ρNIR ، ρRed ، $\rho Green$ ، $\rho Blue$ مقدار بازتاب تصحیح‌شده اتمسفری از سطح برای باندهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ ماهواره لندست ۷ سنجنده ETM+ و باندهای ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI/TIR₁ مقدار دمای روشنایی تصحیح‌شده اتمسفری برای باند حرارتی ۶ ماهواره لندست ۷ سنجنده ETM+ و باند حرارتی ۱۰ ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI/TIR است.

تعیین حد آستانه مطلوب

حد آستانه نقش مهمی در شاخص‌های طیفی ایفا می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهد روش اتسو برای حد آستانه‌های باینری (Otsu, 1979: 62) به منظور استخراج ویژگی‌های آب از تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود (Du et al., 2014: 676).

(Li et al., 2013: 5537). در این گونه مطالعات، محققان دریافته‌اند که یافتن حد آستانه مطلوب امری چالش‌برانگیز است و شاید حتی یک حد آستانه دلخواه نیز مقیاس مطلوب را ارائه نکند؛ بنابراین در این مطالعه ما از روش اتسو برای جداسازی مکان‌های دارای آب از مکان‌های بدون آب و اراضی ساخته‌شده از اراضی ساخته‌نشده استفاده کرده‌ایم. روش اتسو برای تشخیص پیش‌زمینه^۱ و پس‌زمینه^۲ در یک تصویر، با به‌روزآوری دو سطح با حداقل واریانس طراحی شده است (Otsu, 1979: 63). هدف این الگوریتم یافتن نقطه‌ای است که کمترین ادغام بین دو کلاس را داشته باشد. اگر فرض کنیم دامنه پیکسل شاخص از $[a, b]$ که $a < b - 1$ باشد، ممکن است در دو کلاس c_1 با دامنه $[t, a]$ و c_2 با دامنه $[b, t]$ تقسیم شود که مقدار t حد آستانه است. پارامترهای تعیین حد آستانه مطلوب t در معادله ۱۲ نشان داده شده است. حد آستانه مطلوب t در واریانس بین کلاس c_1 (برای مثال بدون آب و ساخته‌نشده) و c_2 (برای مثال دارای آب و ساخته‌شده) با استفاده از معادله ۱۳ مشخص می‌شود.

$$\begin{cases} \sigma^2 = P_{c_1} \times (M_{c_1} - M)^2 + P_{c_2} \times (M_{c_2} - M)^2 \\ M = P_{c_1} \times M_{c_1} + P_{c_2} \times M_{c_2} \\ P_{c_1} + P_{c_2} = 1 \end{cases} \quad (12)$$

σ^2 واریانس بین دو کلاس c_1 (برای مثال بدون آب و ساخته‌نشده) و c_2 (برای مثال دارای آب و ساخته‌شده)، M مقدار میانگین تصویر شاخص است؛ P_{c_1} و P_{c_2} احتمال قرارگیری یک پیکسل در کلاس c_1 و c_2 و M_{c_1} و M_{c_2} مقدار میانگین پیکسل کلاس‌های c_1 و c_2 است.

$$t = \text{ArgMax}_{a \leq t \leq b} \{ P_{c_1} \times (M_{c_1} - M)^2 + P_{c_2} \times (M_{c_2} - M)^2 \} \quad (13)$$

اطلاعات بیشتر درباره استفاده از این روش را می‌توان در برنامه‌های کاربردی سنجش از راه دور و ارزیابی شاخص‌های طیفی در مطالعات دیگر یافت (برای مثال Li et al., 2013; Du et al., 2014). در این مطالعه، روش اتسو با استفاده از حد آستانه باینری در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 اجرا شده است.

طبقه‌بندی پوشش زمین

در این مطالعه سه نقشه پوشش و کاربری زمین (LULC) را با عنوان اراضی ساخته‌شده، اراضی ساخته‌نشده و دارای آب طبقه‌بندی کرده‌ایم. سطوح دارای آب و بدون آن ابتدا با استفاده از دو تصویر طبقه‌بندی شد. برای استخراج آب از طریق تصاویر ماهواره‌ای، شاخص تفاضل نرمال‌شده آب^۳ (McFeeters, 1996) و نسخه گسترش‌یافته آن یعنی شاخص

1. Background
2. Foreground
3. Normalized Difference Water Index (NDWI)

اصلاح‌شدهٔ تفاضل نرمال‌شدهٔ آب^۱ (Xu, 2006) استفاده شد (معادلهٔ ۱۱). در مطالعات قبلی دریافتیم MNDWI شاخصی برتر بین این دو است (Xu, 2006: 3025)؛ بنابراین در این مطالعه از MNDWI (معادلهٔ ۱۱) استفاده شده است. روش اتسو برای تولید نقشه باینری مناطق دارای آب و بدون آب، برای تصویر لندست ۷ سنجنده ETM+ و تصویر لندست ۸ سنجنده OLI/TIRS استفاده شده است. سطوح آب شامل قسمت‌های دارای آب از قبیل دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، حوضچه‌ها و... است که پس از استخراج آن‌ها از تصاویر، برای تولید ماسک آب استفاده شدند و در مرحلهٔ بعد برای طبقه‌بندی اراضی ساخته‌شده با شاخص‌های طیفی فقط سطوح غیر آب در نظر گرفته شد.

پس از تولید ماسک آب، با استفاده از شاخص‌های طیفی اراضی ساخته‌شده و روش اتسو، چهارده نقشهٔ باینری (۷ نقشه برای تصویر لندست ۷ و ۷ نقشه برای تصویر لندست ۸) تولید شد. این نقشه‌ها به دو کلاس اراضی ساخته‌شده و اراضی ساخته‌نشده طبقه‌بندی شد. اراضی ساخته‌نشده شامل مناطق گیاهی (به‌عنوان مثال پارک‌ها، زمین‌های کشاورزی) و اراضی بایر و به عبارت دیگر مناطق نفوذناپذیر است. اراضی ساخته‌شده شامل ساختمان‌ها، خانه‌ها و تمام سطوح نفوذناپذیر دیگر مانند جاده‌ها، پارکینگ‌ها و... است. در آخر سطوح آب استخراج‌شده با اراضی ساخته‌شده و اراضی ساخته‌نشده ادغام شده و در نتیجه چهارده نقشهٔ سه سطحی پوشش زمین با استفاده از هفت شاخص طیفی برای هر دو تصویر ماهواره‌ای به تولید رسیده است.

ارزیابی نتایج طبقه‌بندی

به‌منظور ارزیابی دقت و نتایج طبقه‌بندی هفت شاخص طیفی اراضی ساخته‌شده، خطاهای مربوط به طبقه‌بندی اشتباه پیکسل‌های مربوط به هر کلاس شامل خطای مولد (تولیدکننده)،^۲ خطای کاربر،^۳ دقت کلی^۴ و شاخص کاپا^۵ استخراج شده است. برای جزئیات بیشتر دربارهٔ این پارامترها به Foody, 2002 و Congalton, 1991 مراجعه شود.

در مطالعات پیشین می‌بینیم که تعداد نقاط یا پیکسل‌های نمونه مرجع از چندین صد (Estoque and Murayama, 2013: 62 تا چندین هزار (Du et al., 2014, 676) متفاوت است. همچنین پیشنهاد شده است که حداقل ۵۰-۱۰۰ نمونه در هر کلاس استفاده شود (Congalton, 1991: 44). از تصاویر با رزولوشن مکانی بالا که در Google Earth در دسترس است، می‌توان به‌منظور ارزیابی دقت استفاده کرد (Du et al., 2014: 675). با این حال هنگام استفاده از Google Earth نه‌تنها چالشی از ناسازگاری زمانی بین تصاویر کاربردی در طبقه‌بندی و تصاویر Google Earth وجود دارد، بلکه با تناقض مکانی در برخی از تصاویر در آن نیز مواجه هستیم. در باندهای پانکروماتیک از سنجنده‌های ماهواره‌ای مختلف به‌عنوان مثال لندست ۷ سنجندهٔ ETM+ و لندست ۸ سنجندهٔ OLI/TIR که در

1. Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)
2. Omission Error (OE)
3. Commission Error (CE)
4. Overall Accuracy
5. Kappa Index

مقایسه با باندهای چند طیفی مربوط، رزولوشن مکانی بالاتری دارند و معمولاً در طبقه بندی پوشش زمین استفاده می‌شوند، در نتیجه باندهای پانکروماتیک مرجعی برای ارزیابی دقت هستند (Du et al., 2014: 675).

باید توجه داشت که در فرایند ارزیابی دقت از ۳۵۰۰ نقطه، و برای چک کردن نقشه پوشش و کاربری زمین از روش ادغام تصاویر با استفاده از تصاویر پانکروماتیک با قدرت تفکیک مکانی پانزده متر استفاده شده است. در این مطالعه الگوریتم ادغام تصاویر Gram-Schmidt نیز به کار رفته است (Laben & Brower, 2000: 7).

گفتنی است پس از تأیید تمام نقاط مرجع، دو تصویر حقیقی زمین لندست ۷ سنجنده ETM+ و لندست ۸ سنجنده OLI/TIR تولید شد. در نهایت، چهارده نقشه پوشش زمین تولید شده با شاخص‌ها با تصویر حقیقی زمین به منظور تعیین خطای تولیدکننده، خطای کاربر، دقت کلی و شاخص کاپا با هم مقایسه شدند.

بحث و تجزیه و تحلیل

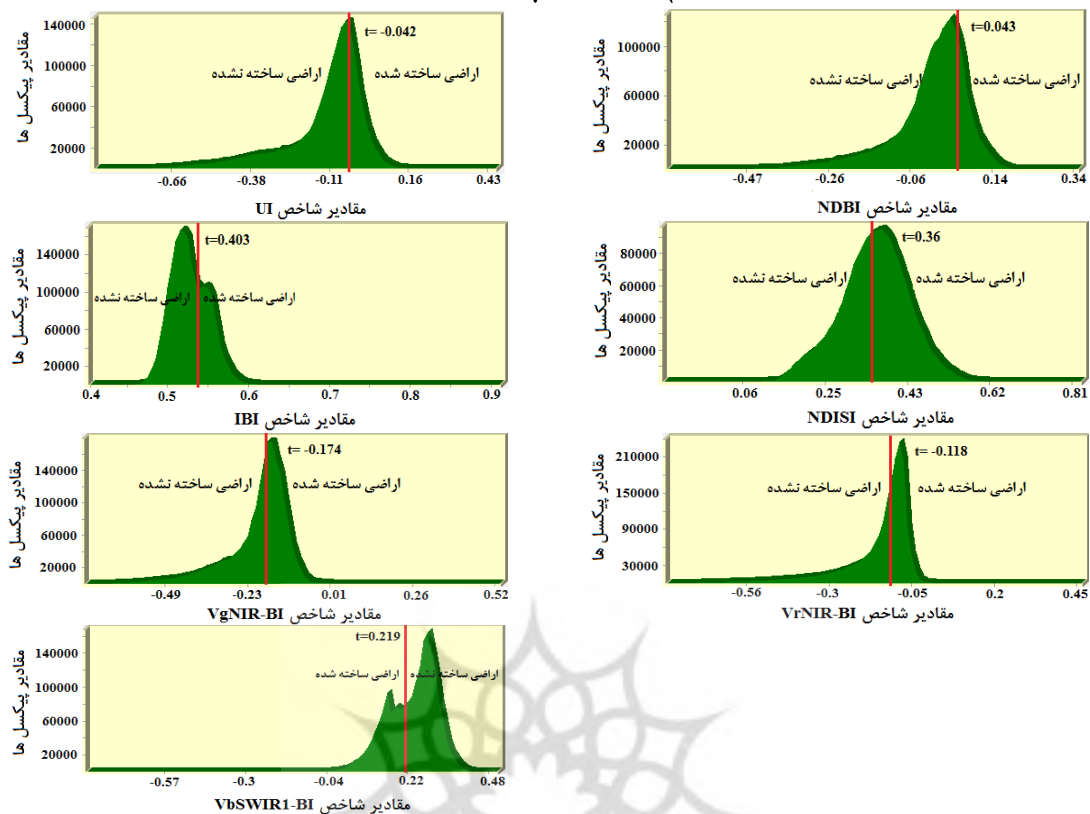
حد آستانه بهینه

هیستوگرام شاخص‌های طیفی اراضی ساخته شده با استفاده از تصاویر دو ماهواره در شکل ۳ ارائه شده است. برای سنجنده ETM+، تمام شاخص‌ها به جز NDBI و VrNIR-BI (تقریباً کم) یک توزیع دوگانه را نشان می‌دهند. برای سنجنده OLI/TIRS، تنها شاخص‌های IBI، VgNIR-BI و VbSWIR1-BI نشان‌دهنده علائمی از یک توزیع دوگانه هستند.

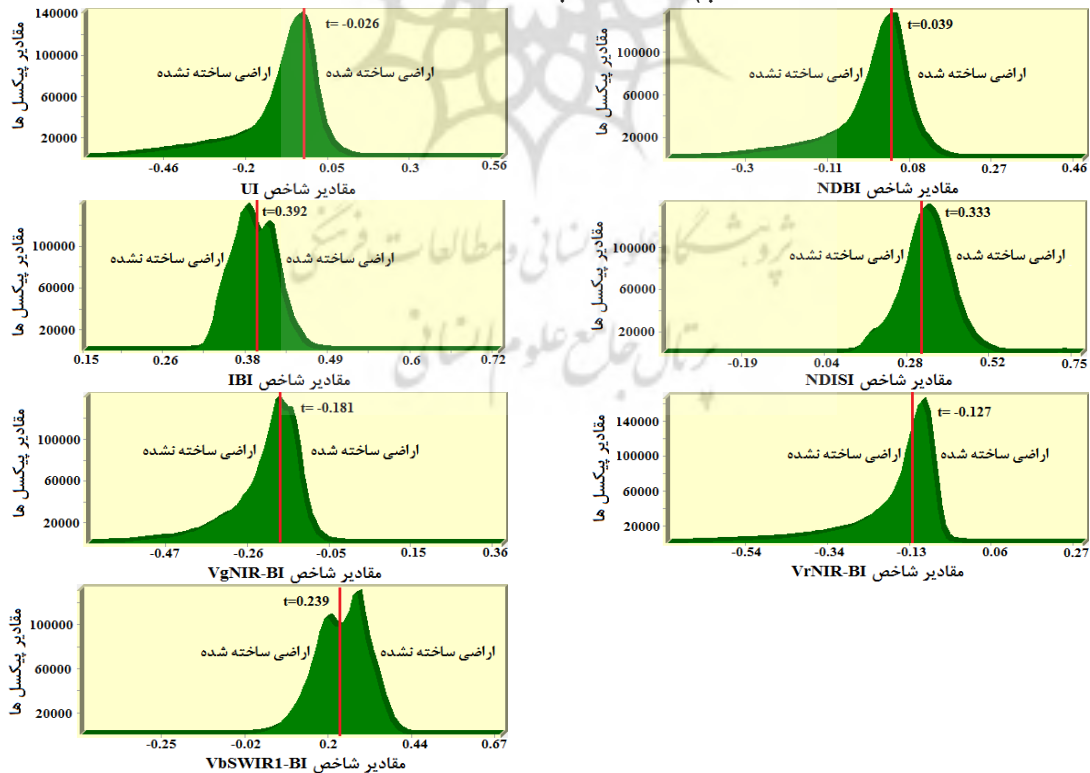
از آنجا که هفت شاخص طیفی اراضی ساخته شده از نظر ساختار متفاوتند، به عنوان مثال باندهای ورودی (معادلات ۴ الی ۱۰) لزوماً یک آستانه واحد قابل اجرا برای تمام آن‌ها نیستند. می‌توان گفت شاخص‌های مبتنی بر باندهای مرئی و مادون قرمز موج کوتاه IBI و VbSWIR1_BI و سه شاخص مبتنی بر این باندها مثل NDISI، NDBI و UI بالاترین حد آستانه را دارند. براساس همین، دو شاخص مبتنی بر باندهای مرئی، یعنی VrNIR-BI و VgNIR-BI کمترین حد آستانه را دارند که این نتیجه به دست آمده از هر دو تصویر ماهواره‌ای است.

می‌توان با استفاده از روش آستانه بهینه اتسو به اتوماتیک کردن فرایند تعیین حد آستانه کمک کرد. در واقع، حد آستانه نقشی مهم در استفاده از شاخص‌های مختلف طیفی ایفا می‌کند. در این مطالعه، دقت به دست آمده از نقشه‌های پوشش زمین نه تنها به حد آستانه، بلکه به ساختار منحصربه‌فرد هفت شاخص طیفی اراضی ساخته شده مربوط است. روش حد آستانه بهینه اتسو بخش‌های یک تصویر را براساس خواص آن تعیین می‌کند. در این مطالعه شاخص‌های VbSWIR1-BI و IBI همواره علائمی از توزیع دوگانه را نشان می‌دهند، همچنین در طبقه‌بندی بهترین دقت کلی را نیز داشته‌اند (بخش ارزیابی دقت طبقه‌بندی را ببینید).

الف) لندست ۷ سنجنده ETM+



ب) لندست ۸ سنجنده OLI/TIRS



شکل ۳. هیستوگرام مربوط به شاخص‌های طیفی. خط قرمز به روش حد آستانه اتسو اشاره دارد.

جدول ۲. نتایج ارزیابی دقت طبقه‌بندی

الف) لندست ۷ سنجنده ETM+

VbSWIR1-BI	VrNIR-BI	VgNIR-BI	NDISI	IBI	NDBI	UI	
							خطای تولیدکننده (%)
۴/۱۶	۱۳/۶۵	۵/۹۷	۶/۷۷	۱/۶۱	۳/۴۶	۱۵/۹۱	اراضی ساخته‌شده
۱۲/۰۸	۱۸/۶۷	۲۶/۸۶	۶۱/۱۵	۱۹/۰۹	۲۵/۹۳	۱۷/۶۵	اراضی ساخته‌نشده
							خطای کاربر (%)
۶/۹۷	۱۱/۳۸	۱۴/۵۱	۲۸/۰۴	۱۰/۳۳	۱۳/۷۶	۱۱/۰۹	اراضی ساخته‌شده
۷/۳۸	۲۲/۰۲	۱۲/۰۸	۲۲/۶۹	۳/۲۳	۷/۲۹	۲۴/۵۴	اراضی ساخته‌نشده
۹۲/۸۸	۸۴/۴۸	۸۶/۲۴	۷۳/۹۶	۹۱/۸۷	۸۸/۱۶	۸۳/۴۴	دقت کلی (%)
۸۴/۶۳	۶۷/۱	۶۹/۵۴	۳۶/۶۸	۸۲/۰۳	۷۳/۶۱	۶۵/۲۳	شاخص کاپا (%)

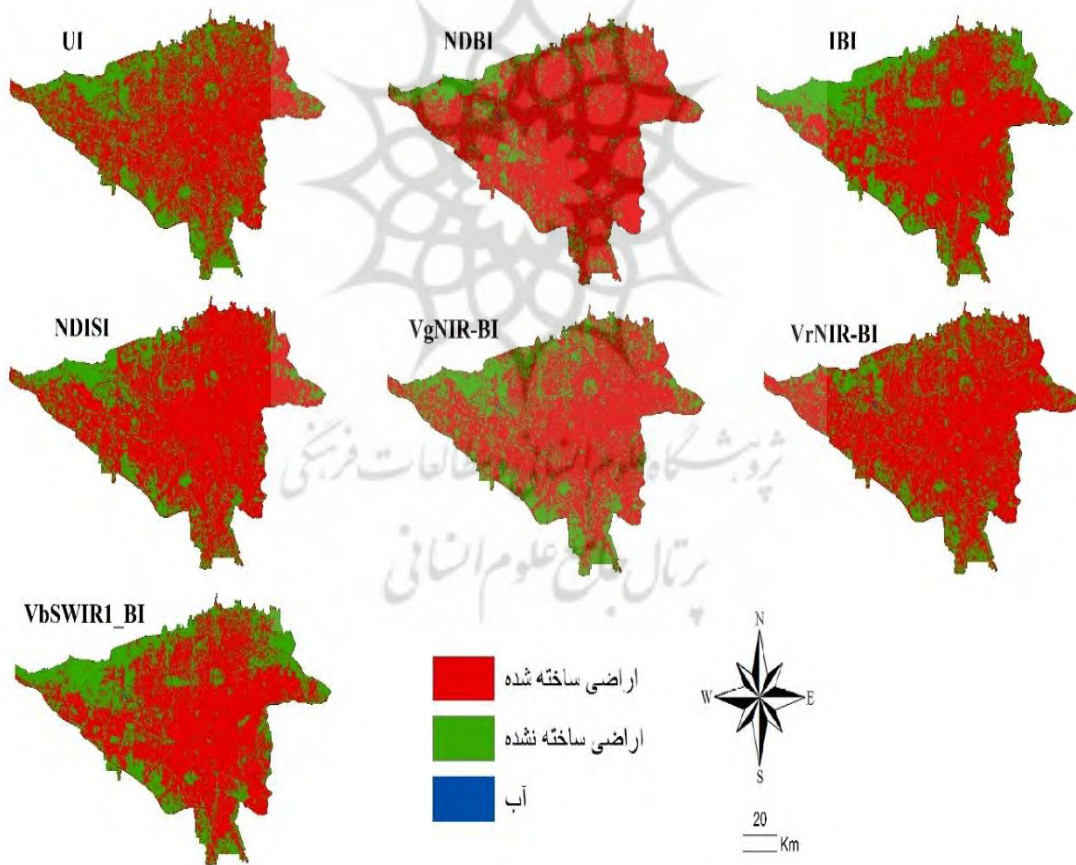
ب) لندست ۸ سنجنده OLI/TIR

VbSWIR1-BI	VrNIR-BI	VgNIR-BI	NDISI	IBI	NDBI	UI	
							خطای تولیدکننده (%)
۴/۹۸	۲/۳۲	۲/۷۷	۳۸/۸۹	۵/۷	۳	۳/۴۲	اراضی ساخته‌شده
۱۲/۷۳	۴۷/۸۵	۳۸/۱	۳۲/۸۴	۱۷/۱۲	۳۳/۲۷	۴۲/۵۸	اراضی ساخته‌نشده
							خطای کاربر (%)
۵/۴۸	۱۷/۴۸	۱۴/۵	۱۸/۸۶	۷/۲۸	۱۲/۹۲	۱۶/۰۲	اراضی ساخته‌شده
۱۱/۶۴	۹/۳۱	۹/۳۸	۵۷/۲۴	۱۳/۷۱	۹/۴۲	۱۲/۱	اراضی ساخته‌نشده
۹۲/۶۸	۸۳/۹۳	۸۶/۵۵	۶۲/۹۳	۹۰/۸۵	۸۷/۸۵	۸۴/۷۵	دقت کلی (%)
۸۲/۵۸	۵۶/۶۷	۶۴/۹۷	۲۴/۳۳	۷۸/۰۶	۶۸/۸۷	۵۹/۸۹	شاخص کاپا (%)

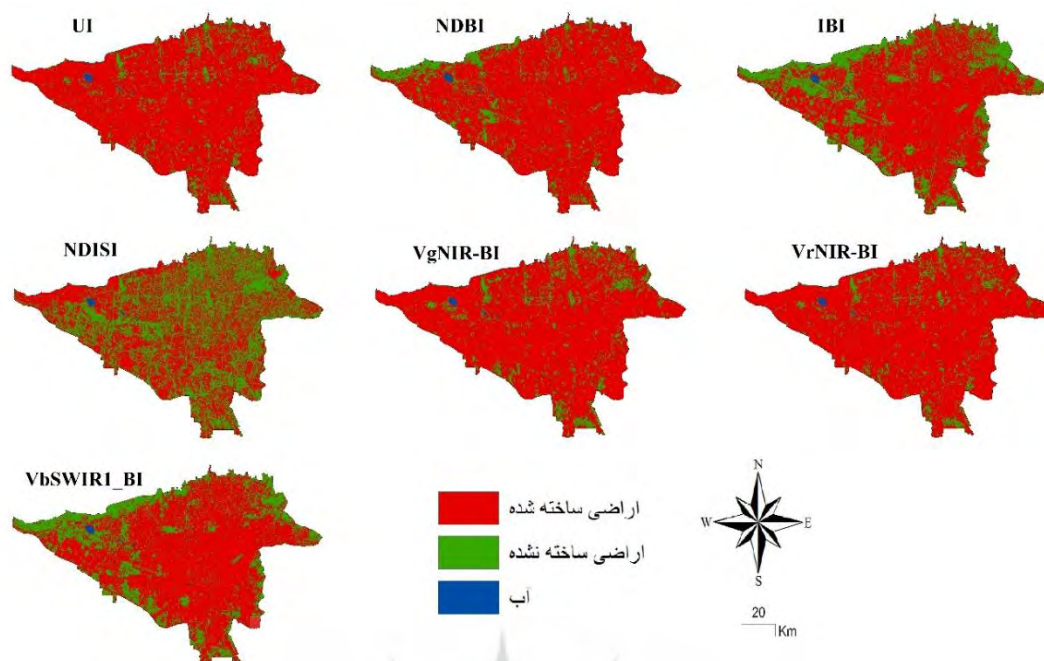
ارزیابی دقت طبقه‌بندی

نتایج حاصل از ارزیابی دقت (جدول ۲) پایه‌ای برای انتخاب شاخص مناسب‌تر است؛ با این حال، باید در نظر داشت که در طول فرایند ارزیابی دقت، اغلب امکان مقایسه تمام پیکسل‌ها در نقشه LULC طبقه‌بندی شده با اطلاعات مرجع با توجه به برخی محدودیت‌ها وجود ندارد؛ به همین دلیل در بیشتر موارد ارزیابی دقت تنها در نقاط نمونه مرجع معتبر است. در مقایسه بین نقشه پوشش زمین طبقه‌بندی شده و نقشه مرجع یا حقیقی زمین، خطای تولیدکننده به درصد پیکسل‌هایی مربوط است که در واقعیت با کلاس ارتباط دارد، اما جزو کلاس‌های دیگر طبقه‌بندی شده است. از سوی دیگر، خطای کاربر خطایی است که براساس دقت کاربر محاسبه می‌شود و معادل آن درصدی از پیکسل‌هایی است که در واقعیت به کلاس مورد نظر متعلق نیستند ولی در طبقه‌بندی جزو آن کلاس در نظر گرفته شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهد برای کلاس اراضی ساخته‌شده، با استفاده از شاخص مبتنی بر باند مادون قرمز موج کوتاه، یعنی UI، دارای بالاترین خطای تولیدکننده برای اراضی ساخته‌شده برای تصویر لندست ۷ (۱۵/۹۱ درصد) و برای تصویر لندست ۸ شاخص مبتنی بر باند حرارتی یعنی NDISI دارای بالاترین خطا (۳۸/۸۹ درصد) است (جدول ۲). همچنین شاخص NDISI بالاترین خطای کاربر را برای کلاس اراضی ساخته‌شده در تصاویر لندست ۷ (۲۸/۰۴ درصد) و تصویر لندست ۸ (۱۸/۸۶ درصد) دارد (جدول ۲). مقدار خطای کاربر برای اراضی ساخته‌شده در تصویر لندست ۷ در تمامی شاخص‌ها به جز دو شاخص UI و VbSWIR1-BI و در تصویر لندست ۸ به جز دو شاخص IBI و VbSWIR1-BI در مقایسه با اراضی ساخته‌نشده بیشتر است. در مقابل، همین شاخص‌ها برای اراضی ساخته‌شده در هر دو تصویر خطای تولیدکننده پایین‌تری برای کلاس اراضی ساخته‌شده در مقایسه با اراضی ساخته‌نشده دارند. این نشان می‌دهد که مقدار اراضی ساخته‌شده در منطقه مورد مطالعه در هر دو مرحله (۲۰۰۱: لندست ۷، ۲۰۱۵: لندست ۸) بیش‌ازحد با این شاخص‌ها برآورد شده است که می‌توانید در شکل ۴ و ۵ و جدول ۳ مشاهده کنید.



شکل ۴. نقشه طبقه‌بندی انواع پوشش زمین شهر تهران با استفاده از تصاویر لندست ۷ سنجنده ETM+ در سال ۲۰۰۱. تصاویر فوق نتایج استفاده از شاخص‌های مختلف اراضی ساخته‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نقشه طبقه‌بندی کاربری و پوشش زمین شهر تهران با استفاده از تصاویر لندست ۸ سنجنده OLI/TIRS در سال ۲۰۱۵. تصاویر فوق نتایج استفاده از شاخص‌های مختلف اراضی ساخته‌شده را نشان می‌دهند.

شاخص مبتنی بر باند مرئی و باند مادون قرمز موج کوتاه؛ یعنی VbSWIR1-BI کمترین خطای کاربر را برای کلاس اراضی ساخته‌شده دارد که نشان‌دهنده دقت بالای این شاخص در طبقه‌بندی اراضی ساخته‌شده است (جدول ۲). برای کلاس اراضی ساخته‌نشده نیز شاخص مبتنی بر باند مرئی و مادون قرمز موج کوتاه یعنی VbSWIR1-BI کمترین خطای تولیدکننده را دارد (جدول ۲). در واقع، نتایج نشان می‌دهد شاخص VbSWIR1-BI بالاترین دقت کلی را در تصاویر هر دو سنجنده لندست ۷ (۹۲/۸۸ درصد) و لندست ۸ (۹۲/۶۸ درصد) دارد. در هر دو تصویر لندست ۷ و ۸ شاخص IBI (۹۱/۸۷ درصد برای لندست ۷ و ۹۰/۸۵ درصد برای لندست ۸) از نظر دقت کلی در مرحله دوم قرار دارد. در نهایت برای دو تصویر لندست ۷ و لندست ۸ شاخص NDISI کمترین دقت کلی را دارد (جدول ۲). گفتنی است کلاس آب تنها با استفاده از فنی واحد برای همه شاخص‌ها استخراج می‌شود؛ از این رو در تغییرات دقت کلی در نقشه‌های متفاوت پوشش زمین تأثیری ندارد.

تجزیه و تحلیل و مقایسه شاخص‌های طیفی

نتایج نشان می‌دهد برخی از اراضی ساخته‌نشده به عنوان اراضی ساخته‌شده و بالعکس به صورت اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند. این طبقه‌بندی‌های اشتباه با خطاهای کاربر و تولیدکننده برای تصاویر هر دو لندست ۷ و لندست ۸ نشان داده شده است (جدول ۲). احتمالاً به دلیل تداخل طیفی برخی از شاخص‌ها، اراضی ساخته‌شده از دیگر زمین‌ها به‌ویژه زمین‌های بایر و پوشش گیاهی خشک درست طبقه‌بندی نشده‌اند (جدول ۳). مهم‌ترین تشابه طیفی میان شاخص‌ها که در همه آن‌ها استفاده می‌شود کانالی از محدوده مادون قرمز نزدیک است. در این باند، پوشش گیاهی سبز در تن روشن به نظر می‌رسد،

درحالی‌که زمین ساخته‌شده و به‌ویژه پیکره‌آبی با تن تیره دیده می‌شود (شکل ۲). چهار شاخص UI، NDBI، IBI و NDSI، از ترکیب باند مادون قرمز موج کوتاه با باند مادون قرمز نزدیک استفاده کرده است. دلیل اصلی استفاده از باند طیفی مادون قرمز موج کوتاه برای اراضی ساخته‌شده، بازتاب بالاتر در این باند در مقایسه با باند مادون قرمز نزدیک است. در مورد اولین باند از محدوده مادون قرمز موج کوتاه یعنی SWIR1، شواهد بیشتری بر این استدلال می‌افزاید (شکل ۲). با این حال، داده‌ها نیز نشان می‌دهد که زمین‌های بایر و پوشش گیاهی خشک نیز در کانال SWIR1 در مقایسه با کانال NIR بازتاب بیشتری دارد (شکل ۲) این نیز با سایر مشاهدات قبلی یعنی برخی از انواع پوشش گیاهی از جمله پوشش گیاهی خشک سازگار است که می‌تواند بازتاب بیشتری در باند مادون قرمز موج کوتاه در مقایسه با باند مادون قرمز نزدیک داشته باشد. این پدیده موجب اشتباه طیفی بین اراضی ساخته‌شده و پوشش گیاهی خشک شده است.

گفتنی است شاخص‌های مبتنی بر محدوده مادون قرمز موج کوتاه و محدوده حرارتی، موجب ایجاد خطاهای کاربر بسیار بالاتری برای کلاس اراضی ساخته‌شده خواهند شد (جدول ۲). استفاده از باند اول محدوده مادون قرمز موج کوتاه یعنی SWIR1، به انجام طبقه‌بندی بهتر شاخص VbSWIR1-BI و IBI نسبت به شاخص UI که از باند دوم مادون قرمز موج کوتاه استفاده می‌کند بیشتر کمک کرده است، با توجه به اینکه اختلاف دو شاخص NDBI و شاخص UI تنها در باند اول و دوم مادون قرمز موج کوتاه است شاخصی که از باند اول مادون قرمز موج کوتاه استفاده (NDBI) کرده در مقایسه با شاخصی که از باند دوم مادون قرمز موج کوتاه استفاده می‌کند دقت بالاتری داشته است (جدول ۲). زمین‌های بایر و پوشش گیاهی خشک بازتاب کمتری در باند دوم مادون قرمز موج کوتاه یعنی SWIR2 دارد، این ویژگی موجب می‌شود برخی از انواع پوشش گیاهی، از اراضی ساخته‌شده به درستی جدا نشود که در نتیجه سبب دقت کمتر در طبقه‌بندی می‌شوند (جدول ۲). از نمونه آن می‌توان به شاخص UI اشاره کرد. در شاخص VrNIR-BI و VgNIR-BI که به ترتیب از باند مرئی قرمز و سبز در ترکیب باند مادون قرمز نزدیک استفاده می‌شود همان‌طور که در نتایج می‌بینیم، ترکیب باند سبز و مادون قرمز نزدیک عملکرد بهتری در مقایسه با ترکیب باند قرمز و مادون قرمز نزدیک دارند (جدول ۲). در باندهای مرئی سبز، اراضی ساخته‌شده در تن روشن، درحالی‌که پوشش گیاهی و پیکره‌آب‌ها در تن تیره ظاهر شده است (شکل ۲). با این حال، اراضی ساخته‌شده در باندهای سبز و قرمز در مقایسه با باند NIR انعکاس کمتری دارند؛ به همین دلیل حد آستانه بهینه اتسو برای این شاخص‌ها بسیار پایین‌تر از حد آستانه دیگر شاخص‌ها بوده است (شکل ۳). شاخص NDISI که بر باند حرارتی مبتنی است کمترین دقت طبقه‌بندی را دارد (جدول ۲). به‌طورکلی نتایج نشان می‌دهد در میان هفت شاخص طیفی اراضی ساخته‌شده که بررسی شده است. شاخص VbSWIR-BI و پس از آن شاخص IBI دقت طبقه‌بندی بالاتری دارند (جدول ۲). این دو شاخص برای طبقه‌بندی دقیق‌تر اراضی ساخته‌شده از تصاویر سنجنده‌های لندست ۷ سنجنده ETM+ و لندست ۸ سنجنده OLI/TIRS استفاده می‌شود.

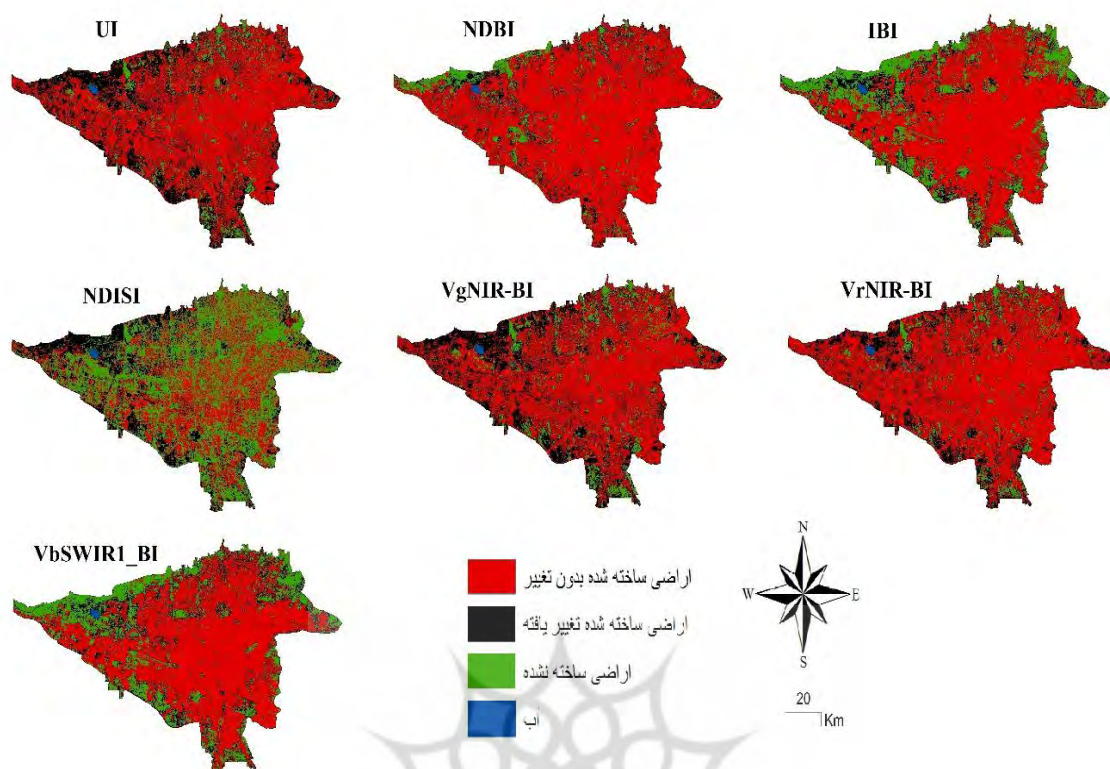
تغییرات مکانی-زمانی پوشش زمین

نتایج به‌دست‌آمده علائمی از افزایش الگوی توسعه شهری را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که با افزایش اراضی ساخته‌شده در مرکز شهر و بخش‌های غربی نمایش داده شده است. (شکل ۶). با این حال، بیشترین افزایش اراضی ساخته‌شده از نظر

جغرافیایی را می‌توان در قسمت غربی و جنوب غربی یافت (شکل ۶). این پراکندگی شهری و تغییرات در چشم‌انداز شهر تهران، حاصل شهرنشینی مداوم در منطقه پایتخت کشور طی ۱۴ سال گذشته (۲۰۰۱-۲۰۱۵) است. در جدول ۳ وسعت و تغییرات شناسایی شده اراضی ساخته شده در منطقه مورد نظر به طور خلاصه بیان می‌شود، درحالی که شکل ۶ توزیع فضایی تغییرات شناسایی شده برای هفت شاخص طیفی اراضی ساخته شده را ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد میزان اراضی ساخته شده در منطقه مورد نظر در سال ۲۰۰۱ از ۶۲/۱۲ درصد تا ۷۸/۰۸ درصد و در سال ۲۰۱۵ از ۵۱/۵۷ درصد تا ۸۹/۳۷ درصد متفاوت بوده است، در نتیجه شناسایی اراضی ساخته شده بین سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۵ نیز متفاوت است (۲۲/۱۴ درصد تا ۲۵/۷۶ درصد). این نتایج نشان می‌دهد وسعت و افزایش اراضی ساخته شده در منطقه مورد مطالعه در طول دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ با توجه انتخاب شاخص متفاوت بوده است. براساس نتایج (جدول ۲) و شکل‌های ۴ و ۵، طبقه بندی شاخص‌های VbSWIR1-BI و IBI دقیق‌ترین بوده است. براساس نتایج حاصل از این شاخص، اراضی ساخته شده در منطقه مورد نظر در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ نسبت به کل چشم‌انداز ۶/۳۸ درصد تا ۷/۳ درصد افزایش یافته است.

جدول ۳. شناسایی میزان تغییرات اراضی ساخته شده با استفاده از شاخص‌های طیفی

۲۰۱۵-۲۰۰۱		۲۰۱۵		۲۰۰۱		
درصد	مساحت به	درصد نسبت به	مساحت به	درصد نسبت به	مساحت به	
رشد	هکتار	منطقه	هکتار	منطقه	هکتار	
۲۵/۷۶	۱۷۷۷۶	۸۷/۸۹	۶۰۶۰۲	۶۲/۱۲	۴۲۸۳۶	UI
۷/۷۳	۵۳۲۷	۸۵/۷۹	۵۹۱۵۷	۷۸/۰۸	۵۳۸۳۰	NDBI
۷/۳	۵۰۳۵	۷۰/۶۸	۴۸۷۳۹	۶۳/۳۸	۴۳۷۰۴	IBI
-۲۲/۱۴	-۱۵۲۶۷	۵۱/۵۷	۳۵۵۶۳	۷۳/۷۱	۵۰۸۳۰	NDISI
۲۳/۴۶	۱۷۱۸۰	۸۶/۴۶	۵۹۶۱۶	۶۲/۹۹	۴۳۴۳۶	VgNIR-BI
۱۷/۲۴	۱۱۸۸۷	۸۹/۳۷	۶۱۶۲۵	۷۲/۱۳	۴۹۷۳۸	VrNIR-BI
۶/۳۸	۴۳۹۶	۸۱/۵۴	۴۴۹۳۱	۶۵/۱۵	۴۴۹۳۱	VbSWIR1-BI



شکل ۶. توزیع فضایی تغییرات پوشش زمین شهری ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ با استفاده از شاخص‌های طیفی

نتیجه‌گیری

افزایش جمعیت شهری و در پی آن رشد بی‌رویه شهری لزوم توجه به مسائل شهری را برای برنامه‌ریزان ضروری کرده است. از مسائل مهم امروزه که در مناطق شهری رخ می‌دهد، بحث گسترش شهری و تغییرات کاربری اراضی، همچنین تبدیل اراضی ساخته‌نشده به اراضی ساخته‌شده است. پیشرفت پی‌درپی جغرافیا و فناوری سنجش‌ازدور، شاخص‌های مختلف طیفی را برای طبقه‌بندی به‌وجود آورده است. در این مطالعه، اجرای هفت شاخص طیفی در طبقه‌بندی و تغییر اراضی ساخته‌شده با تصاویر لندست ۷ سنجنده ETM+ و تصاویر لندست ۸ سنجنده OLI/TIRS بررسی شده است. در بخش سنجش‌ازدور شهری، مطالعات زیادی برای فواید محدوده مادون قرمز موج کوتاه از طیف الکترومغناطیسی صورت گرفته است؛ زیرا در این کانال، اراضی ساخته‌شده بازتاب بالایی دارند و می‌توانند از ویژگی‌های دیگر جدا شوند.

مرور مطالعات انجام شده درباره شاخص‌های طیفی نشان می‌دهد که از باند طیفی آبی در تلفیق با باند مادون قرمز نزدیک برای طبقه‌بندی اراضی ساخته‌شده و اراضی ساخته‌نشده استفاده نشده و نتایج این مطالعه نشان داده است که این شاخص به خوبی توانسته طبقه‌بندی اراضی ساخته‌شده را انجام دهد و دقت طبقه‌بندی را در مقایسه با مطالعات گذشته بیشتر کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که شاخص VbSWIR-BI در مقایسه با سایر شاخص‌ها دقت بیشتری داشته است (جدول ۳). این شاخص می‌تواند نسبت به شاخص‌های دیگر بالاتر از ۱۸/۹۲ درصد برای تصاویر لندست ۷ سنجنده ETM+ و ۲۹/۷۵ درصد برای لندست ۸ سنجنده OLI/TIR دقیق‌تر باشد (جدول ۳). در نتیجه شاخص VbSWIR-BI

در مقایسه با شاخص‌های دیگر پتانسیل بیشتری برای طبقه‌بندی اراضی ساخته‌شده دارد. براساس نتایج، شاخص مبتنی بر باند آبی و باند اول مادون قرمز موج کوتاه یعنی شاخص VbSWIR-BI برای تغییرات زمانی و مکانی در چشم‌انداز شهری نیز استفاده می‌شود. براساس دقیق‌ترین طبقه‌بندی، یعنی با شاخص VbSWIR-BI میزان اراضی ساخته‌شده منطقه مورد نظر (شهر تهران) از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵، ۶/۳۸ درصد افزایش یافته است. براساس شاخص‌های طیفی اراضی ساخته‌شده بیشترین میزان این اراضی در بخش‌های غربی و جنوب غربی شهر تهران بوده است و در نتیجه بسیاری از باغ‌ها و اراضی کشاورزی به اراضی ساخته‌شده تبدیل شده است. از جمله آثار گسترش شهری شهر تهران و تبدیل اراضی ساخته‌نشده به اراضی ساخته‌شده، همچنین افزایش سطوح نفوذناپذیر شهری پدیده سیلاب‌های شهری است که در نتیجه کاهش سطوح نفوذپذیر شهری رخ داده است.



منابع

- حجازی‌زاده، زهرا و نادر پروین (۱۳۸۸) «بررسی تغییرات دما و بارش تهران طی نیم قرن اخیر»، فصلنامه جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، پیش‌شماره، شماره صفر، صص ۴۳-۵۶.
- مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰، نتایج تفصیلی سرشماری عمومی و نفوس و مسکن.
- Angel, S. and Blei, 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*, No. 51: 21° 35. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2015.11.031>
- Angel, S. and Sheppard, S. (2005), The dynamics of global urban expansion. *Transport and Urban*, 1 ° 207. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
- Chander, G. Markham, B. L. and Helder, D. L. (2009), Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, NO. 5: 893° 903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chen, X. L. Zhao, H. M. Li, P. X. and Yin, Z. Y. (2006), *Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes*, *Remote Sensing of Environment*, Vol.104, No.2:133° 146. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016>
- Cibula, W. G. Zetka, E. F. and Rickman, D. L. (1992), *Response of thematic mapper bands to plant water stress*, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 13, No. 10: 1869° 1880. <https://doi.org/10.1080/01431169208904236>
- Coisson, T. Oueslati, W. and Salanié, J. (2014), *Urban sprawl occurrence under spatially varying agricultural amenities*, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 44, No. 1: 38° 49. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2013.11.001>
- Congalton, R. G. (1991), A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 37, No. 1: 35° 46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- 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*, Vol.5, No. 7: 672° 681. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.960606>
- ENVI, 2009. Atmospheric correction module: QUAC and FLAASH User s Guide, Available online: [_www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash Module.pdf](http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash%20Module.pdf) (accessed 19 December 2014).
- Estoque, R. C. Estoque, R. S, and Murayama, Y. (2012), Prioritizing Areas for Rehabilitation by Monitoring Change in Barangay-Based Vegetation Cover. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 1, No.1: 46° 68. <https://doi.org/10.3390/ijgi1010046>
- Estoque, R. C, and Murayama, Y. (2013), Landscape pattern and ecosystem service value changes: Implications for environmental sustainability planning for the rapidly urbanizing summer capital of the Philippines. *Landscape and Urban Planning*, No. 116: 60° 72. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.04.008>

- Estoque, R, and Murayama, Y. (2014), A geospatial approach for detecting and characterizing non-stationarity of land- change patterns and its potential effect on modeling accuracy. *GIScience & Remote Sensing*, No. 51(June 2014): 239° 252. <https://doi.org/10.1080/15481603.2014.908582>
- Foody, G. M. (2002), *Status of land cover classification accuracy assessment*, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 80, No.1:185° 201. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)
- Ganeshkumar.B, and Mohan.M, (2014),Urban Sprawl Spatial Modeling using SLEUTH Model, *International Journal of Geospatial Engineering and Technology* Vol.1, No.1:22 ° 28.
- Gao, B. C. (1996), *NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space*, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 58, No. 3: 257° 266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Ginkel, V.H. 2010, *Sustainable Urban Futures: Challenges And Opportunities*. Paper Presented at School of Humanities, Universiti Sains Malaysia, Penang. May 17, 2010.
- Han, J. Hayashi, Y. Cao, X. and Imura, H. (2009), *Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China*, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 91, No. 3: 133° 141. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.12.002>
- Jaeger, J. A. G. and Schwick, C. (2014), Improving the measurement of urban sprawl: Weighted Urban Proliferation (WUP) and its application to Switzerland. *Ecological Indicators*, No. 38: 294° 308. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.11.022>
- Jiang, G. Ma, W. Qu, Y. Zhang, R. and Zhou, D. (2016), How does sprawl differ across urban built-up land types in China? A spatial-temporal analysis of the Beijing metropolitan area using granted land parcel data. *Cities*, No. 58: 1° 9. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.04.012>
- Kawamura, M. Jayamanna, S. and 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*.
- Kong, F. Yin, H. Nakagoshi, N. and James, P. (2012), Simulating urban growth processes incorporating a potential model with spatial metrics. *Ecological Indicators*, No. 20: 82° 91. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.02.003>
- Laben, C.A. and Brower, B.V. (2000), Process for enhancing the spatial resolution of multi-spectral imagery using pan-sharpening. US Patent 6011875, Eastman Kodak Company, Rochester, N.Y.
- Li, W. Bai, Y. Chen, Q. He, K. Ji, X. and Han, C. (2014), Discrepant impacts of land use and land cover on urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, No. 47: 171° 178. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.015>
- 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*, Vol. 5, No.11, 5530° 5549. <https://doi.org/10.3390/rs5115530>
- Longley, P. (2002), *Geographical Information Systems: will developments in urban remote*

- sensing and GIS lead to better urban geography? *Progress in Human Geography*, Vol. 26, No. 2: 231° 239. <https://doi.org/10.1191/0309132502ph366pr>
- Matthias, B. Martin, H. (2003), Mapping imperviousness using NDVI and linearspectral unmixing of ASTER data in the Cologne-Bonn region (Germany). In: *Proceedings of the SPIE 10th International Symposium on Remote Sensing*, 8° 12September, Vol. 5239: 274° 284.
- Masek, J. G. Lindsay, F. E. and Goward, S. N. (2000), *Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973-1996, from Landsat observations*, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 18: 3473° 3486. <https://doi.org/10.1080/014311600750037507>
- McFeeters, S. K. (1996), *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, No. 7: 1425° 1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Otsu, N. (1979), A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, No.1: 62° 66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Polydoros, A. and 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*, No. 98: 92° 99. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.060>
- Rouse, J.W. Haas, R.H. Schell, J.A. Deering, D.W. (1973), Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, pp. 309° 317.
- Seto, K. C. Güneralp, B. and Hutyra, L. R. (2012), Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 109, No. 40: 16083° 16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- Thanapura, P. Helder, D. L. Burckhard, S. Warmath, E. O Neill, M. and Galster, D. (2006), Mapping urban land cover using QuickBird NDVI image and GIS spatial modeling for runoff coefficient determination. *Annual Conference of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing 2006: Prospecting for Geospatial Information Integration*, ASPRS 2006, Vol. 3, No. 1: 1421° 1432. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84869030547&partnerID=40&md5=91481ffad2567b99cef1320833023f2c6>
- Thapa, R. B. & Murayama, Y. (2011), Urban growth modeling of Kathmandu metropolitan region, Nepal. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 35, No. 1: 25° 34. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.07.005>
- USGS, (2006), Multi-resolution Land Characteristics 2001 (MRLC2001) ImageProcessing Procedure, Available online: [_http://landcover.usgs.gov/pdf/image_preprocessing.pdf_](http://landcover.usgs.gov/pdf/image_preprocessing.pdf) (accessed: 19 December 2014).
- USGS, (2013a), Using the USGS Landsat 8 Product, Available online: [_http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php_](http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php) (accessed: 19 December 2014).
- USGS, (2013b), September 27, 2013~ Landsat 7 Thermal Band Calibration Update, Available

- online: [_http://landsat.usgs.gov/science L7 Cal Notices.php_](http://landsat.usgs.gov/science_L7_Cal_Notices.php)(accessed: 19 December 2014).
- United Nations. (2007), World Urbanization Prospects The 2007 Revision Highlights. Desa, ESA/P/WP/2(4), 883. <https://doi.org/10.2307/2808041>
- Weng, Q. (2012), Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, No. 117: 34° 49. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030>
- Weng, Q. Lu, D. and Schubring, J. (2004), Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 89, No. 4: 467° 483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Xu, H. (2006), Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 14: 3025° 3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Xu, H. (2008), A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 14: 4269° 4276. <https://doi.org/10.1080/01431160802039957>
- 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*, Vol. 76, No. 5: 557° 565. <https://doi.org/10.14358/PERS.76.5.557>
- Xu, H. Huang, S. and Zhang, T. (2013), Built-up land mapping capabilities of the ASTER and Landsat ETM+ sensors in coastal areas of southeastern China. *Advances in Space Research*, Vol. 52, No.8: 1437° 1449. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.07.026>
- Zeng, C. Liu, Y. Stein, A. and Jiao, L. (2015), International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Characterization and Spatial Modeling of Urban Sprawl in the Wuhan Metropolitan Area, China. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, No.34: 10° 24. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.06.012>
- Zha, Y. Gao, J. and Ni, S. (2003), Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, NO. 3: 583° 594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.03.001>