

شناسایی اراضی شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ و ۲ بر پایه سامانه گوگل ارث انجین (GEE)

وحید محمدنژاد آروق* - استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۳۰ تأیید مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۱۷

چکیده

استفاده از روش‌های مناسب و تصاویر ماهواره‌ای به‌روز در مطالعات مختلف، به‌ویژه مطالعات شهری می‌تواند در تولید نقشه‌های شهری تأثیر بسیاری داشته باشد. یکی از این داده‌های مهم، نقشه‌ی مربوط به حدود اراضی شهری است که با استفاده از روش‌های مختلف قابل استخراج است. هدف پژوهش حاضر استخراج اراضی شهری تعدادی از شهرهای ایران به کمک تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ (SAR) و سنتینل ۲ بر پایه سامانه گوگل ارث انجین (GEE) است؛ بدین منظور تصاویر راداری سنتینل ۱ و اپتیکی سنتینل ۲ به صورت سری زمانی از اول ژانویه ۲۰۱۷ تا اول ژانویه ۲۰۲۰ برای ۲۰ شهر ایران انتخاب و وارد محیط گوگل ارث انجین شدند. سپس در محیط این سامانه، ابتدا میانگین و انحراف از معیار تصاویر سری زمانی راداری تهیه و با اعمال آستانه، اراضی بالقوه شهری استخراج شد. پوشش گیاهی حداکثر، پهنه‌های آبی و مناطق پرشیب و کوهستانی نیز به کمک تصاویر سنتینل ۲ و مدل‌های رقومی ارتفاعی استخراج شدند. با اعمال آستانه نیز تصاویر ماسک ایجاد شدند. در نهایت با اعمال این تصاویر روی نقشه اراضی بالقوه شهری، نقشه اراضی هدف ایجاد و با اعمال فیلتر ۳×۳ برای حذف پیکسل‌های منفرد و اشتباه، نقشه نهایی اراضی شهری استخراج شد. به منظور بررسی صحت نقشه‌ها از ضریب کاپا، صحت کلی، صحت کاربر و صحت تولیدکننده استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد، میانگین ضریب کاپا برای ۲۰ شهر، ۸۶/۱۶ درصد است که بیشترین آن به شهر رشت و کمترین آن به کرمان مربوط است. همچنین شهرهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک، صحت کمتری دارند. همچنین مشخص شد سامانه GEE قادر است حجم زیادی از داده‌ها را در زمان بسیار اندک با دقت بالا پردازش کند.

واژه‌های کلیدی: ایران، تصاویر راداری (SAR)، سامانه گوگل ارث انجین، سنتینل ۲، نقشه اراضی شهری.

مقدمه

در مطالعات مربوط به شهرها، اطلاع از نحوه توزیع و پراکندگی اراضی شهری و همچنین کاربری‌های مختلف آن می‌تواند مهم باشد؛ زیرا اراضی واقع در محدوده یک شهر تأثیر بسزایی در میکرواقلیم منطقه، میزان انرژی مصرفی و خدمات‌رسانی در شهر توسط بخش‌های خدماتی دارد (Seto et al., 2011: 8). آرنولد و گیبون (۱۹۹۶)، اراضی شهری را مترادف با اراضی نفوذناپذیر می‌دانند؛ یعنی مناطقی از شهر مانند جاده‌ها، مناطق مسکونی، بخش‌های صنعتی و سایر مناطقی که از مواد غیر قابل نفوذ در برابر آب مانند آسفالت، بتن و سنگ تشکیل شده‌اند و اندازه‌های متفاوتی دارند؛ برای مثال این سطوح می‌تواند یک خانه شخصی کوچک تا بزرگ‌ترین مراکز تجاری یا تفریحی را شامل شود. این پهنه‌های نفوذناپذیر هنگام بارندگی، حجم فراوانی از آب را در سطح خود جاری می‌کنند و هیچ‌گونه نفوذ آب در آن‌ها صورت نمی‌گیرد؛ در نتیجه سبب افزایش جریان‌های سیلابی می‌شوند. حتی اراضی ساخته‌شده شهری در جذب انرژی خورشید و تشکیل جزایر حرارتی شهری نقش بسزایی دارند؛ بنابراین می‌توان با بررسی و مقایسه این اراضی (سطوح نفوذناپذیر) در سال‌های مختلف، جهت و نحوه گسترش فیزیکی شهرها را مطالعه کرد. پژوهشگران قادرند اراضی شهری (طبیعی و انسان‌ساخت) را با روش‌ها و ابزارهای مختلفی مطالعه و نقشه آن‌ها را تهیه کنند؛ مانند استفاده از عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌برداری توسط پهپاد و نقشه‌برداری زمینی. در سال‌های اخیر به دلیل در دسترس قرار گرفتن تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مناسب، کمک فراوانی به تهیه انواع نقشه‌های شهری شده است. وجود این داده‌ها به همراه توسعه روش‌های مختلف استخراج و طبقه‌بندی اراضی شهری مانند یادگیری ماشین (Weng & Hu, 2008; Sun et al., 2011; Zhang et al., 2014; Zhang et al., 2018; Wu et al., 2019; Sun et al., 2019; Xu, 2010; Liu et al., 2013; Wang et al., 2018) شیء‌گرا (Wu & Murray, 2003; Li et al., 2013; Civaco et al., 2015; Deng and Wu, 2012) ترکیب‌های باندی (Shao et al., 2015; Yang et al., 2002; Lu & Weng, 2004; Yang et al., 2003) تحلیل‌های رگرسیونی (2003)، جنگل تصادفی و یادگیری عمیق، سبب شده است پژوهشگران مختلف بتوانند به مطالعات شهری بپردازند. روش‌های مطرح‌شده نیازمند سیستم‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری قدرتمندی است که تحلیل‌های پیچیده‌ای را شامل می‌شوند (Deng & Wu, 2012: 253)؛ بنابراین باید به منظور رفع این مشکلات، از داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای برخط و روش‌ها و نرم‌افزارهای ساده‌تری استفاده کرد؛ به طوری که بتوان مطالعات را با سرعت و دقت بالا بدون نیاز به سیستم کامپیوتری قدرتمند و برای منطقه‌ای وسیع انجام داد (Hansen & Loveland, 2015: 70).

تصاویر ماهواره‌ای مختلفی وجود دارد که می‌توان از آن‌ها در مطالعات مختلف استفاده کرد؛ برای مثال سری ماهواره‌های لندست (با قدرت تفکیک ۳۰ متر) و مودیس (با قدرت تفکیک تا هزار متر)، که داده‌های متنوعی را در اختیار کاربران قرار می‌دهند (Schneider et al., 2010; Chen et al., 2015; Zhang and Seto, 2011; Xian and Homer., 2010; Pesaresi et al., 2013)، اما قدرت تفکیک مکانی آن‌ها متوسط تا کم است. همچنین اگر منطقه پوشیده از ابر باشد، نمی‌توان از این تصاویر برای مطالعات سطح زمین و مطالعات شهری استفاده کرد (Hagolle et al., 2010). از سوی دیگر به دلیل ایتیکی بودن این ماهواره‌ها و تصاویر حاصل از آن‌ها، امکان تداخل طیفی در شناسایی پدیده‌ها بیشتر است (Ban et al., 2015). با وجود روش‌های متعدد نقشه‌برداری شهری، بسیاری از آن‌ها به طور خاص برای تصاویر

اپتیکی طراحی شده‌اند. به دلیل وجود پوشش‌های مختلف در محدوده شهری با بازتاب‌های طیفی مشابه، تصاویر اپتیکی به‌تنهایی قادر به برآورد دقیق این سطوح نیستند؛ برای مثال در بسیاری موارد پوشش آب و سایه با سطوح تیره نفوذناپذیر یکسان در نظر گرفته می‌شوند (Weng et al., 2009; Hodgson et al., 2003). در نتیجه برای حل این مشکل، استفاده هم‌زمان از تصاویر مختلف سنجش از دور به منظور بهره‌گیری از قوت‌های تصاویر مجزا برای بهبود دقت نقشه‌ها معرفی شد (Weng, 2012).

از داده‌هایی که می‌توان در کنار تصاویر اپتیکی از آن‌ها استفاده کرد، تصاویر SAR^۱ هستند که در هر شرایط آب و هوایی و هر لحظه از شبانه‌روز اطلاعات دقیقی از شرایط سطح زمین در اختیار ما قرار می‌دهند (Matgen et al., 2007; Kussul et al., 2017). همچنین قدرت تفکیک مکانی مناسبی دارند (Shen et al., 2019; Ban et al., 2015). با افزایش دسترسی به داده‌های SAR و توسعه تکنیک‌های استخراج داده‌ها از آن بهتر است در آینده از این داده‌ها در سطح گسترده‌تری استفاده شود (Shen et al., 2019). مطالعات نشان می‌دهد، ادغام داده‌های رادار (SAR) با داده‌های نوری می‌تواند به‌طور قابل توجهی دقت طبقه‌بندی تصویر را بهبود دهد و سطوح نفوذناپذیر شهری و انواع پوشش زمین را از هم تفکیک کند (IM et al., 2012; Zhang et al., 2012). داده‌های SAR که به ویژگی‌های هندسی سطوح اراضی شهری حساس هستند، قادرند اطلاعات مربوط به بافت سطح را فراهم کنند و در ترکیب با تصاویر اپتیکی سطوح غیرقابل شناسایی را نشان دهند. هدف مقاله حاضر استخراج اراضی شهری از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ (راداری) و سنتینل ۲ (اپتیکی)، با استفاده از سامانه گوگل‌ارت انجین است؛ در نتیجه این ابزارها و روش معرفی و از آن‌ها استفاده شد. همچنین دقت آن‌ها ارزیابی شد. می‌توان از نتایج این روش در مطالعات آتی درباره توسعه فیزیکی شهر و تغییرات آن استفاده کرد. در واقع در پژوهش حاضر با ترکیب تصاویر راداری و اپتیکی و همچنین با صحت بیشتر و صرف زمان کم، اراضی ساخته‌شده شهری ۲۰ شهر مختلف ایران استخراج و ارزیابی شد؛ بدین‌منظور تصاویر ماهواره‌ای سری زمانی (سنتینل ۱ و سنتینل ۲) مربوط به این شهرها به محیط سامانه GEE^۲ وارد شدند. ضرایب بازپخش تصاویر راداری و میانگین و انحراف از معیار این تصاویر محاسبه و به کمک آستانه‌گذاری، اراضی بالقوه شهری استخراج شد. هم‌زمان تصاویر سری زمانی سنتینل ۲، شاخص‌های تراکم پوشش گیاهی و پهنه‌های آبی محاسبه و به ترتیب حداکثر و میانگین این شاخص‌ها تهیه شد. در نتیجه به کمک آستانه‌گذاری و به‌عنوان لایه ماسک روی اراضی بالقوه شهر اعمال شدند. در نهایت لایه اراضی شهر هدف تهیه و با حذف و اصلاح پیکسل‌های منفرد، اراضی نهایی شهری استخراج شد.

مبانی نظری

اراضی ساخته‌شده شهری مترادف با سطوح نفوذناپذیر شهری است. این بخش‌ها برای مدیران و برنامه‌ریزان شهری اهمیت بسیاری دارد؛ زیرا مطالعه موقعیت و پراکندگی مناطق ساخته‌شده، تراکم این مناطق و روند تغییرات آن در طول زمان دارای اهمیت بوده است و مدیران شهری برای مدیریت بهتر، باید از این تغییرات آگاهی کافی و به‌روز داشته باشند؛ از این‌رو می‌توانند روند توسعه فعلی شهر و تغییرات آینده آن را بر پایه توسعه پایدار برنامه‌ریزی کنند (عطارچی، ۱۳۹۸). با

1. Synthetic aperture radar

2. Google earth engine

توجه به اینکه توسعه فیزیکی شهر فرایندی پویا و مداوم است که طی آن محدوده‌های فیزیکی شهر در جهات عمودی و افقی، از نظر کیفی و کمی افزایش می‌یابند، دسترسی به اطلاعات و داده‌های این تغییرات معمولاً با استفاده از نقشه‌برداری زمینی، کاری پرهزینه و زمان‌بر است و تکرار آن برای سال‌های متوالی امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین می‌توان با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور و پردازش تصاویر مختلف ماهواره‌ای، با سرعت بالا و به‌صورت سری زمانی، تغییرات فیزیکی شهرها را مطالعه و بررسی کرد. معمولاً این تصاویر منبع مهمی برای مطالعه پوشش زمین و تغییرات آن‌ها در شهرها به‌شمار می‌روند. از سوی دیگر، این تصاویر می‌توانند داده‌هایی را درباره جزایر حرارتی شهری، محیط‌زیست شهری و تغییرات آن و در نهایت مدل‌سازی توسعه شهر ارائه دهند.

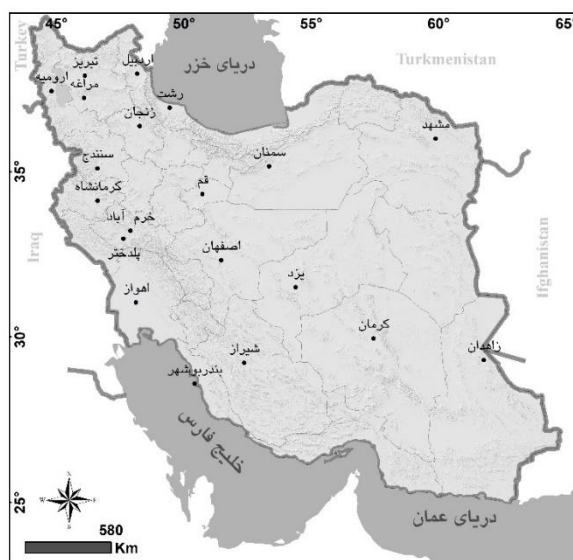
سنجده‌های موجود در بخش‌های متفاوت طیف الکترومغناطیس فعالیت دارند که عمدتاً شامل بخش نوری، حرارتی و راداری می‌شوند. اولین سنجده‌ها در بخش نوری و حرارتی فعال بودند؛ بنابراین داده‌های تاریخی مناسبی دارند. همچنین دسترسی و تجزیه و تحلیل آن‌ها نسبتاً ساده است، اما در عین حال معایبی نیز دارند؛ برای مثال می‌توان به احتمال تشابه پاسخ طیفی عوارض مختلف در این تصاویر اشاره کرد. همچنین اگر منطقه‌ای پوشیده از ابر باشد، تصاویر نوری امکان ثبت تصویر سطح زمین را نخواهند داشت. از سوی دیگر، داده‌های حرارتی نیز معمولاً قدرت تفکیک مکانی کمی دارند و در مطالعات مربوط به شهرها با محدودیت زیادی همراه هستند. در این میان، سنجده‌های راداری در محدوده میکروویو طیف الکترومغناطیس عمل می‌کنند، اما در مقایسه با تصاویر نوری پیچیدگی بیشتری دارند و تحلیل آن‌ها سخت است. اطلاعات به‌دست‌آمده از SAR و سنسورهای نوری تا حد زیادی با یکدیگر تفاوت دارند. SAR اطلاعاتی را ارائه می‌دهد که ممکن است از حسگرهای نوری حاصل نشود؛ برای مثال امواج رادار با توجه به فرکانس و قطبش می‌تواند در خاک و نواحی سایه نفوذ کند و همین عامل سبب می‌شود ناهمگونی مکانی و طیفی محیط‌های شهری به حداقل برسد (Corbane et al., 2008). با توجه به اینکه تصاویر راداری سازوکارهای بازپخش مختلفی دارند (برای مثال پشت‌بام ساختمان‌ها دارای بازپخش منفرد و دیوار ساختمان‌ها دارای بازپخش دوگانه هستند)، این امر سبب شناسایی بهتر پدیده‌های شهری می‌شود. از سوی دیگر، داده‌های راداری مشکلاتی از قبیل وجود نویز در تصاویر دارند؛ بنابراین اگر بتوان تصاویر مختلف از منابع متفاوت را با یکدیگر ادغام و در مطالعات شهری از آن‌ها استفاده کرد، نتایج دقیق‌تری به‌دست خواهد آمد (Gomez et al., 2006). در نهایت، ترکیب تصاویر راداری و اپتیکی روش مناسبی برای مطالعات شهری است (Hass and Ban, 2017; Pavanelli et al., 2018) به‌ویژه این روش در مناطق استوایی که مدت زیادی از سال پوشیده از ابر است و همچنین مناطقی که اغلب اوقات با توفان‌های ریزگردی مواجه است، مهم‌تر می‌شود.

سامانه گوگل‌ارث انجین (GEE)، سیستمی مبتنی بر وب و محاسبات ابری است که از سوی شرکت گوگل و به‌منظور ذخیره‌سازی و تحلیل حجم عظیمی از داده‌ها در مقیاس پتابایت (از جمله تصاویر مختلف ماهواره‌ای، مدل‌های رقمی ارتفاعی، داده‌های اقلیمی، داده‌های وکتوری) راه‌اندازی شده است (Seto et al., 2011). ویژگی بسیار خوب این سامانه، رایگان بودن آن، نیازنداشتن به سخت‌افزار پیشرفته و گران‌قیمت و دسترسی آزاد و آنلاین به پایگاه داده‌های سازمان فضایی اروپا و آمریکا و بسیاری از پایگاه‌های اطلاعاتی دیگر است (Shelestov et al., 2017; Goldblatt, 2016; Patel, 2015). این امر سبب می‌شود تا بدون صرف هزینه و با صرف زمان اندک بتوان به تصاویر مختلف ماهواره‌ای، از

جمله تصاویر راداری دسترسی داشت؛ برای مثال در زمینه مطالعات پوشش گیاهی می‌توان به کمک این سیستم شاخص تراکم پوشش گیاهی، تاج پوشش گیاهی، میزان فتوسنتز گیاهی و میزان رطوبت موجود در گیاهان را پایش کرد (Sun et al., 2011; Weng and Hu, 2008; Schneider et al., 2010). تهیه نقشه‌های مربوط به پوشش زمین (Wu et al., 2019) و بررسی ویژگی‌های آن‌ها مانند محاسبه دمای سطح زمین (Sun et al., 2018) و پایش مناطق حفاظت‌شده (Xu, 2010)، پایش منابع آب و مناطق مرطوب (Liu et al., 2013) نیز در این سیستم انجام‌شدنی هستند. همچنین در زمینه کشاورزی و پایش محصولات کشاورزی (Wang et al., 2015)، تهیه نقشه فرسایش خاک (Deng et al., 2012) و مطالعات مربوط به مخاطرات محیطی، مطالعات فراوانی با استفاده از سامانه گوگل‌ارث انجام شده است (Wu and Murray, 2003; Civaco et al., 2002; Li et al., 2003; Lu and Weng, 2004).

منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر ۲۰ شهر از استان‌های مختلف ایران با شرایط جغرافیایی متفاوت، به‌منظور استخراج اراضی شهری آن‌ها انتخاب شدند؛ یعنی به تنوع پوشش زمین توجه خاصی شد تا بتوان تأثیرات این روش را در مناطق دارای پوشش‌های متفاوت زمین (مانند وجود پوشش آب، گیاه و زمین‌های برهنه) مقایسه و بررسی کرد؛ بنابراین نوع انتخاب شهرها، هدفمند است؛ یعنی براساس شناختی که از بازپراکنش راداری در مناطق مختلف وجود دارد، شهرهایی از همه گستره ایران انتخاب شدند تا بتوان تأثیر متغیرهایی از قبیل وسعت شهر، واقع‌شدن در مناطق مرطوب و خشک، تراکم ساختمان‌ها و غیره در روش به‌کاررفته در مقاله حاضر را بررسی کرد. با توجه به مطالب مذکور، شهرهای تبریز، ارومیه، اردبیل، زنجان، خرم‌آباد، پلدختر، مراغه، اهواز، رشت، مشهد، کرمان، بوشهر، کرمانشاه، قم، اصفهان، شیراز، سنج، یزد، سمنان و زاهدان برای مطالعه انتخاب شدند (شکل ۱).



شکل ۱. شهرهای منتخب در پژوهش

روش پژوهش

این مقاله با هدف استخراج سریع اراضی شهری با استفاده از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ (SAR) و ۲، در محیط سامانه گوگل ارث انجین تنظیم شد. داده‌های اصلی در این پژوهش، شامل تصاویر ماهواره سنتینل ۱ و ۲ از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۰ و مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر است (جدول ۱).

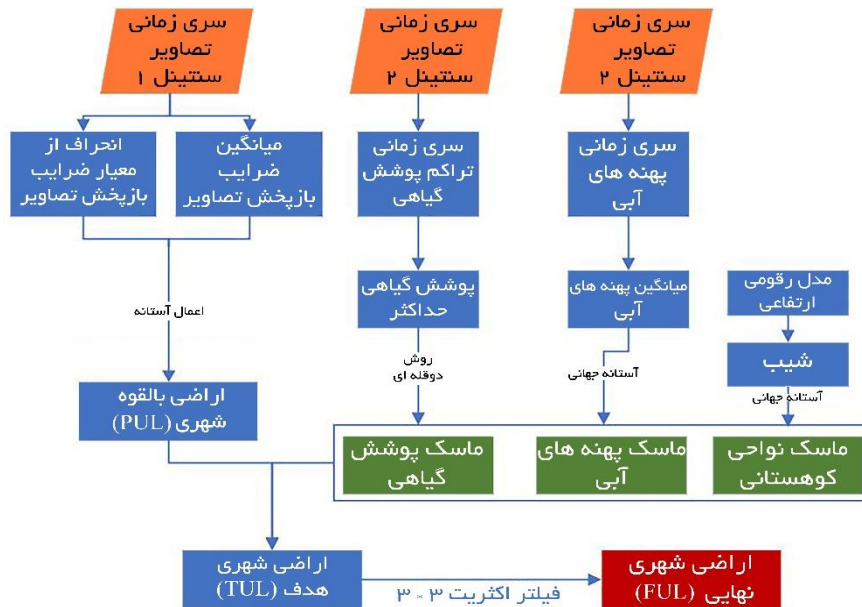
جدول ۱. داده‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر

ردیف	نوع داده	تاریخ	تعداد (متوسط برای هر شهر)	مجموع
۱	Sentinel 1 (SAR)	۲۰۱۷/۰۱/۰۱ - ۲۰۲۰/۰۱/۰۱	۳۴۸	۶۷۹۲
۲	Sentinel 2	۲۰۱۷/۰۱/۰۱ - ۲۰۲۰/۰۱/۰۱	۲۸۰	۵۱۰۳
۳	SRTM (DEM) 30m	۲۰۰۰	۱	۲۰

از داده‌های راداری سنتینل ۱ به منظور استخراج اولیه اراضی شهری و از داده‌های سنتینل ۲ برای استخراج پوشش گیاهی و آبی در محدوده شهرها استفاده شد؛ بدین منظور سری زمانی تصاویر سنتینل ۱ با جهت مدارهای نزولی و صعودی وارد محیط گوگل ارث انجین شد و σ^0 (سیگما نات) آن‌ها محاسبه شد. در مرحله بعد، با توجه به وجود حجم زیادی از تصاویر (متوسط ۲۸۰ تصویر برای هر شهر) و به منظور تجمیع سری‌های زمانی، انحراف از معیار و میانگین آن‌ها محاسبه و در نتیجه دو تصویر سیگمای میانگین و سیگمای انحراف از معیار به دست آمد. این تصاویر در استخراج اولیه اراضی شهری استفاده شدند. در نتیجه با پردازش شدت (به کمک اعمال آستانه بر هیستوگرام)، سیگمای میانگین و انحراف از معیار تصاویر SAR، اراضی بالقوه شهری (PUL^1) استخراج شد. پس از این مرحله، به منظور استخراج تراکم پوشش گیاهی و پوشش آب، سری زمانی تصاویر سنتینل ۲ (متوسط ۳۴۸ تصویر برای هر شهر) وارد گوگل ارث انجین شد و در نهایت تصویر پوشش گیاهی حداکثر ($NDVI^2 \max$) و تصویر میانگین پوشش آب ($MNDWI^3 \text{ mean}$) تهیه شد. منظور از پوشش گیاهی حداکثر، مقادیر حداکثر شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی برای تصاویر سری زمانی سنتینل ۲ است. برای محاسبه آن، ابتدا شاخص NDVI کل تصاویر استخراج و سپس مقادیر حداکثر آن محاسبه شد؛ یعنی آنجا که پوشش گیاهی وجود دارد، قطعاً جزء اراضی شهری نیست. برای به دست آوردن شاخص آبی نیز ابتدا این شاخص برای کل تصاویر تهیه و در نهایت میانگین آن به کمک اعمال تابع کاهنده (Reducer) در محیط GEE به دست آمد. در این مورد نیز می‌توان گفت جایی که پهنه‌های آبی وجود دارند، اراضی شهری نیستند. همچنین از مدل‌های رقومی ارتفاعی به منظور تهیه نقشه شیب و مناطق کوهستانی استفاده شد. در نهایت این سه تصویر (حداکثر پوشش گیاهی، پوشش آب و شیب)، با یکدیگر ترکیب و به عنوان ماسک روی تصاویر SAR اعمال شدند تا در مکان‌هایی که این سه پوشش قرار دارند، به عنوان اراضی شهری طبقه‌بندی نشوند. در کنار این فرایند با استفاده از روش قطعه‌بندی براساس آستانه نقشه اراضی شهری هدف (TUL^4) استخراج شد. در نهایت با اعمال یک فیلتر از نوع مربع با ابعاد پنجره

1. Potential urban land
2. Normalized differential vegetation index
3. Modified normalized differential water index
4. Target urban land

۳ × ۳ تصاویر نهایی یعنی اراضی شهری (FUL) به دست آمد. این فیلتر به منظور حذف پیکسل‌های منفردی که به اشتباه جزء اراضی شهری در نظر گرفته می‌شوند، کاربرد دارد. مراحل بالا در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. مراحل استخراج اراضی شهری

محاسبه تراکم پوشش گیاهی، آب، PUL و شیب

در این پژوهش، از ۲۸۰ تصویر مربوط به ماهواره سنتینل ۱ و ۳۴۸ تصویر مربوط به ماهواره سنتینل ۲ استفاده شد. این تصاویر از اول ژانویه ۲۰۱۷ تا اول ژانویه ۲۰۲۰ را شامل می‌شوند. با توجه به اینکه قطبش تصاویر SAR، به صورت VV و HH است، قطبش‌های VV با مد IW و مدارهای صعودی و نزولی برای این مقاله انتخاب شدند. تصاویری که سامانه گوگل ارث انجین از آن‌ها استفاده می‌کند، تصحیحات هندسی دارند. زمانی که تصاویر در سامانه گوگل ارث به تصاویر σ^0 تبدیل می‌شوند، در واقع تصحیحات مربوط به کالیبراسیون رادیومتریک، تصحیحات توپوگرافیکی و حذف نویزهای حرارتی روی آن‌ها اعمال می‌شود. به منظور استخراج تراکم پوشش گیاهی و پوشش آب از باندهای قرمز، سبز و مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی تصاویر سنتینل ۲ استفاده شد. این باندها دارای تفکیک مکانی ۱۰ و ۲۰ متری هستند.

در بخش‌هایی از شهرها که تراکم کم ساختمانی و پوشش گیاهی دارند (Chen et al., 2015; Xian & Homer, 2001)، از شاخص تراکم پوشش گیاهی برای استخراج این نواحی استفاده شد. در مقاله حاضر، بیشترین میزان تراکم پوشش گیاهی در طول دوره مطالعاتی استخراج و با عنوان NDVI max در نظر گرفته شد. از این شاخص، به منظور افزایش صحت استخراج اراضی کم تراکم شهری استفاده شد (Huang et al., 2017). این شاخص با روابط زیر محاسبه شده است.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

در این فرمول، NIR^۱، باند مادون قرمز نزدیک و RED باند قرمز تصاویر سنتینل ۲ است. با استخراج این شاخص با استفاده از رابطه ۱، محاسبه حداکثر این شاخص در محیط گوگل ارث انجین با استفاده از رابطه ۲ انجام شد.

$$\text{NDVImax} = \max(\text{NDVI}) \quad (2)$$

پس از محاسبه شاخص NDVI، محاسبه و استخراج حداکثر تراکم پوشش گیاهی برای تصاویر سنتینل ۲ (۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹) صورت گرفت. تصویر NDVI max به‌عنوان ماسک برای استخراج اراضی شهری استفاده شد. در مناطقی که پهنه‌های آبی دارند، مانند شهرهای ساحلی، شهرهایی که از وسط آن‌ها رودخانه عبور می‌کند و شهرهایی که دارای پارک‌های آبی و دریاچه‌های مصنوعی هستند، ممکن است عوارض سطح این پهنه‌ها مانند پل‌ها، کشتی‌ها و ابزارهای سرگرمی داخل دریاچه‌ها بازتابی مانند بازتاب زمین‌های شهری داشته باشد؛ در واقع ما در این مقاله با محاسبه شاخص آب (MNDWI) و استفاده از آن به‌عنوان ماسک در نقشه نهایی، این پدیده‌ها را حذف کردیم. شاخص مذکور از نسبت نرمال شده باند سبز و باند مادون قرمز میانی ایجاد و از این شاخص، طیفی برای استخراج پهنه‌ای آبی استفاده می‌شود؛ در نتیجه پدیده‌های غیرآبی با استفاده از این شاخص حذف می‌شوند و تنها تأکید بر پهنه‌های آبی خواهد بود؛ بنابراین برای مطالعه تالاب‌ها، دریاچه‌ها، آب‌های آزاد و رودخانه‌ها از این شاخص استفاده شده است که در رابطه ۳ قابل مشاهده است:

$$\text{MNDWI} = (G - \text{MIR}) / (G + \text{MIR}) \quad (3)$$

در رابطه ۳، G، باند محدوده سبز و MIR^۲ مادون قرمز میانی در تصاویر سنتینل ۲ است. پس از استخراج این شاخص، میانگین آن (MNDWI mean) برای کل تصاویر دوره زمانی محاسبه شد. از سوی دیگر و به‌منظور تهیه داده‌های مربوط به PUL از σ^0 تصاویر SAR استفاده شد. بدین منظور پس از محاسبه σ^0 تصاویر، میانگین کل تصاویر استخراج شد و با تعریف یک آستانه از هیستوگرام با استفاده از رابطه ۴، تصاویر PUL به‌دست آمد. σ^0 یا ضریب بازپراکنش که با واحد دسیبل (db) بیان می‌شود، رایج‌ترین معیاری است که در مطالعه سطح با تصاویر راداری از آن استفاده می‌شود. این معیار بیانگر میزان بازگشت امواج به آنتن رادار از واحد سطح است که مقادیر آن براساس زاویه برخورد، طول موج، نوع قطبیدگی و ویژگی‌های بازتابندگی خود شیء (سطح) تغییر می‌کند.

$$\text{PUL} = \sigma^0 \text{ mean} > T \quad (4)$$

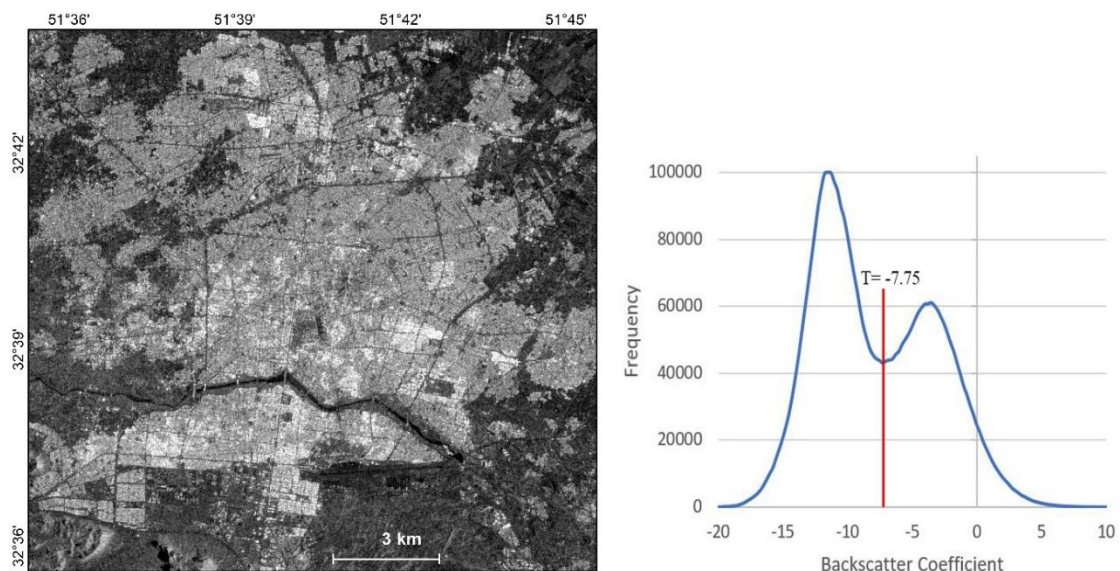
در اینجا مهم‌ترین مسئله، تعریف مقدار آستانه (T) است. با ترسیم هیستوگرام تصاویر میانگین σ^0 ، برآورد دقیق عدد آستانه مشخص شد. این مقدار برای شهرهای مورد مطالعه متفاوت و بین ۶/۵- تا ۸/۲۵- تعیین شد. امواج برگشتی به رادار در نتیجه برخورد با اراضی شهری و مناطق کوهستانی پرشیب شباهت فراوانی با یکدیگر دارند؛ بنابراین ممکن است در استخراج اراضی شهری با استفاده از SAR، مناطق پرشیب کوهستانی نیز به‌عنوان شهر تفکیک شوند. برای جلوگیری از این اختلال، از داده‌های مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر مناطق مورد مطالعه استفاده شد تا علاوه بر استخراج مناطق کوهستانی، شیب مناطق نیز تعیین و به‌عنوان ماسک در ارزیابی نهایی استفاده شود. در این مقاله مانند بیشتر مقالات (Ban et al., 2015) آستانه شیب ۱۵ درجه انتخاب شد.

1. Near InfraRed band

2. Mid-InfraRed band

یافته‌های پژوهش

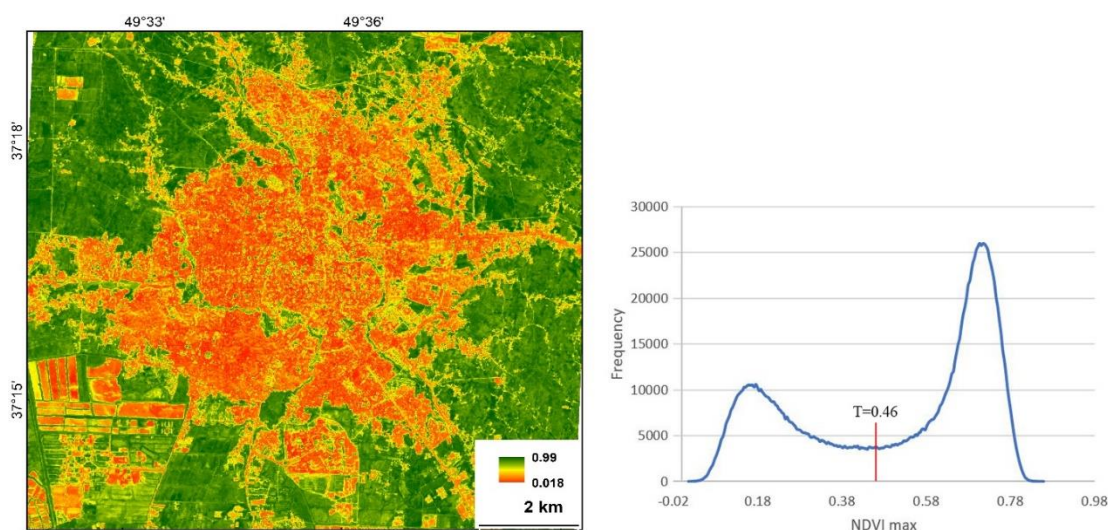
براساس روش پژوهش (شکل ۲)، به منظور قطعه‌بندی تصاویر σ^0 میانگین SAR به اراضی شهری و غیرشهری از یک آستانه محلی استفاده شد. منظور از این نوع آستانه تفاوت در مقادیر آن از یک منطقه به منطقه دیگر است که با توزیع هیستوگرام تصاویر محاسبه و اعمال شد. در کنار این روش، شاخص حداکثر تراکم پوشش گیاهی به‌عنوان ماسک پوشش گیاهی، شاخص MNDVI میانگین به‌عنوان ماسک مناطق با پوشش آب و داده‌های شیب منطقه به‌عنوان ماسک مناطق کوهستانی نیز به تصویر SAR مورد نظر، برای ۲۰ شهر انتخابی اعمال شد؛ یعنی با استفاده از کدنویسی در محیط گوگل ارث انجین و فراخوانی تصاویر ماهواره‌ای مختلف، این فرایندها برای همه شهرها صورت گرفت تا نقشه‌های مربوط به اراضی شهری استخراج شوند. مشکلی که در تعیین آستانه‌های تصاویر σ^0 SAR وجود داشت، این بود که هیستوگرام همه شهرها از نوع دوقله‌ای نبودند. در هیستوگرام‌های دوقله‌ای تعیین عدد آستانه راحت است، اما در هیستوگرام‌های تک‌قله‌ای این کار کمی پیچیده است. برای رفع این مشکل از روش روسین (۲۰۰۱) استفاده شد. در شکل ۳ میانگین تصاویر SAR شهر اصفهان و هیستوگرام مربوط به آن آمده است. با توجه به تصویر SAR اصفهان، مشخص است به لحاظ بازتاب پدیده‌های موجود در آن، اراضی شهری از تن رنگی روشن‌تری برخوردار هستند. سایر اراضی مانند زمین‌های بایر، پوشش گیاهی و پهنه‌های آبی (مسیر زاینده‌رود) تیره‌تر هستند. همچنین مشخص است هیستوگرام این تصویر از نوع دوقله‌ای است؛ در نتیجه تعیین عدد آستانه برای به‌دست‌آوردن تصویر PUL در آن راحت است. میزان آستانه برای شهر اصفهان، $-7/75$ محاسبه شد. این فرایند برای شهرهای دیگر نیز با آستانه‌های متفاوت اعمال و داده‌های PUL آن‌ها استخراج شد.



شکل ۳. تصویر SAR شهر اصفهان و هیستوگرام دوقله‌ای آن برای محاسبه میزان آستانه

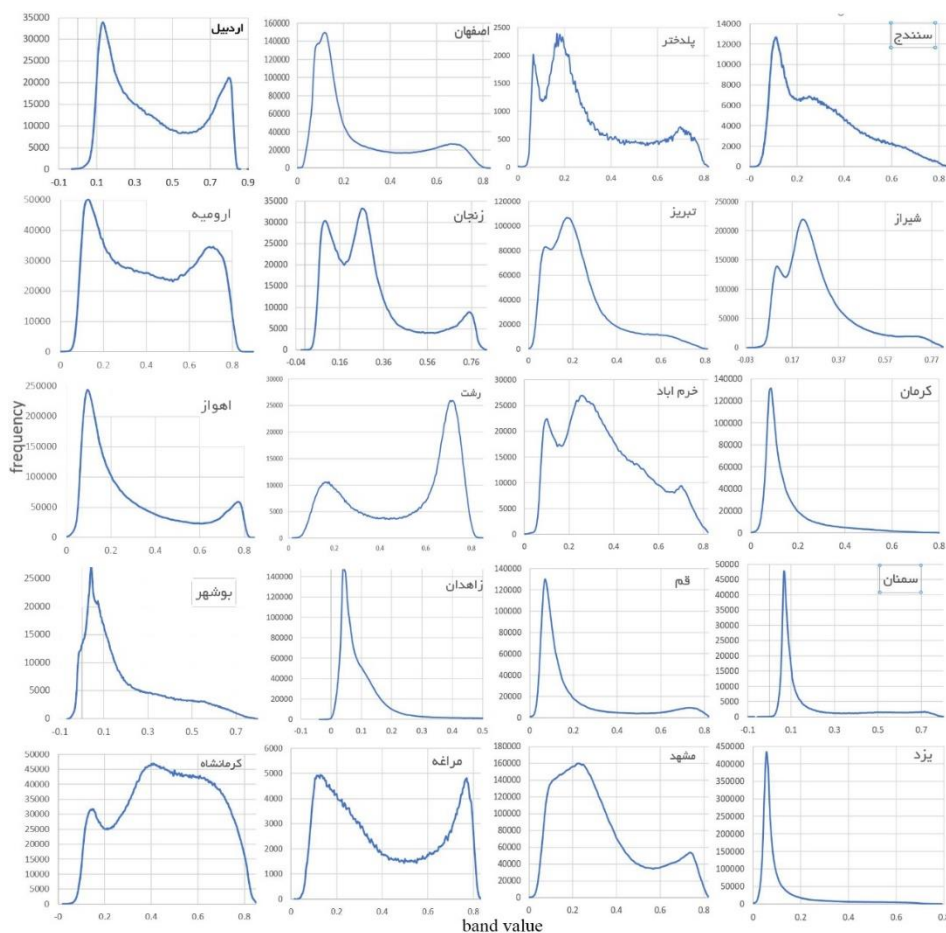
با توجه به لزوم تهیه نقشه‌های پوشش گیاهی حداکثر و اعمال آستانه بر آن‌ها، برای استخراج تصاویر ماسک پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ استفاده شد. روش کار و نحوه تعیین آستانه مانند تعیین آستانه و طبقه‌بندی تصاویر

SAR به اراضی شهری و غیرشهری است؛ یعنی در اینجا نیز با استفاده از هیستوگرام تصاویر، آستانه مشخص شد و تصاویر به مناطقی با پوشش گیاهی و بدون پوشش طبقه‌بندی شدند (شکل ۴). بر نوع طبقه‌بندی هم نظارت نشده است. این آستانه برای هریک از شهرها متفاوت محاسبه شد؛ چراکه برخی شهرهای انتخابی دارای پوشش گیاهی متراکم و برخی دارای پوشش‌های بسیار پراکنده و حتی بدون پوشش قابل توجه بودند. مقادیر آستانه پوشش گیاهی برای کل شهرها ۰/۲ تا ۵/۷ است. برای به‌دست‌آوردن آستانه پوشش آبی نیز از یک مقدار جهانی استفاده شد. این میزان آستانه براساس مطالعه مقالات مختلف و پژوهش‌های پیشین انتخاب شد. مقدار آن برای کل شهرها بیشتر از ۰/۰۵ انتخاب شد؛ یعنی در تصاویر MNDWI پیکسل‌هایی که ارزش آن‌ها بیشتر از ۰/۰۵ بودند، به‌عنوان ماسک آب در نظر گرفته شدند و نقشه آن‌ها استخراج شد.



شکل ۴. شاخص پوشش گیاهی حداکثر و هیستوگرام آن

در شکل ۴، تصویر NDVI max شهر رشت نشان داده شده است. این تصویر از مجموعه تصاویر سنتینل ۲ بین سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ استخراج شده است. در واقع در محیط سامانه گوگل ارث انجین ابتدا تصاویر سنتینل دو منطقه فراخوانی شد و با استفاده از رابطه ۱ تراکم پوشش گیاهی محاسبه و در مرحله بعد با استفاده از رابطه ۲ حداکثر پوشش گیاهی از آن استخراج شد. مقادیر NDVI بین ۱ و ۱- است. در شکل فوق، حداکثر تراکم ۰/۹۹ و حداقل آن ۰/۰۱۸ برآورد شده است که به ترتیب با رنگ‌های سبز و قرمز مشخص شده است. همچنین با استفاده از هیستوگرام همین تصویر، مقدار آستانه برای تولید تصاویر ماسک پوشش گیاهی، ۰/۴۶ محاسبه شده است. این شاخص برای همه ۲۰ شهر انتخابی تهیه و هیستوگرام آن‌ها ترسیم شد تا براساس آن بتوان آستانه‌های پوشش گیاهی همه شهرها را محاسبه و اعمال کرد (شکل ۵). بررسی هیستوگرام‌های NDVI max نشان می‌دهد نمودار شهرهایی که پوشش گیاهی متراکمی دارند، از نوع دوقله‌ای هستند. در این نمودارها، مشخص کردن مقادیر آستانه ساده‌تر از سایر هیستوگرام‌هاست؛ برای مثال مراغه به‌عنوان یک باغ شهر و پوشش گیاهی متراکم که اغلب از نوع باغ‌ها هستند، هیستوگرام دوقله‌ای کاملاً مشخصی دارد؛ درحالی‌که شهرهایی مانند یزد، بوشهر، زاهدان و سمنان که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارند و به لحاظ پوشش گیاهی فقیر هستند، هیستوگرام‌های تک‌قله‌ای دارند.

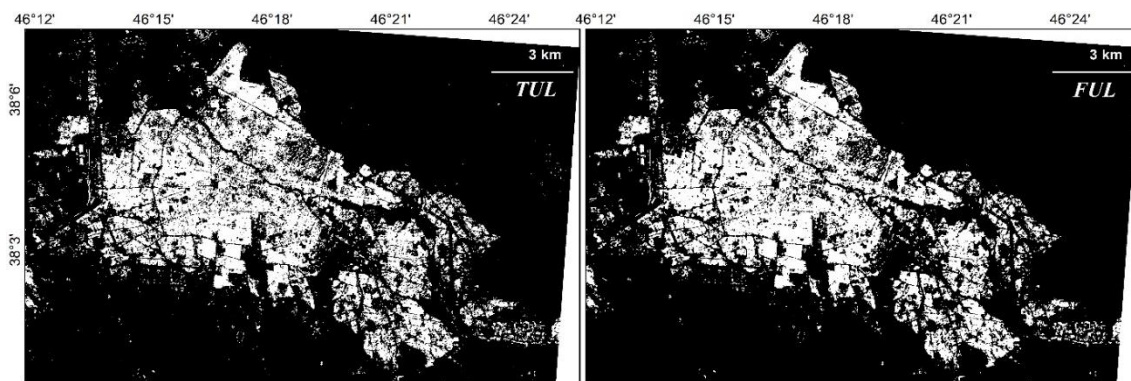


شکل ۵. نمودار هیستوگرام NDVI max برای ۲۰ شهر مورد مطالعه

محاسبه و استخراج TUL و FUL

آخرین مرحله برای استخراج اراضی شهری، اعمال داده‌های پوشش گیاهی حداکثر، پوشش آب و نواحی کوهستانی به‌عنوان ماسک روی تصاویر PUL است. پیش از این اشاره شد که داده‌های PUL با استفاده از روابط مطرح‌شده در روش پژوهش از تصاویر SAR ماهواره سنتینل ۱ استخراج شدند. تصاویر حاصل، نشان‌دهنده مناطق بالقوه اراضی شهری (PUL) هستند. پس از اعمال آستانه روی NDVI max، MNDWI mean و شیب، این داده‌ها به تصاویر ماسک تبدیل شدند. این فرایندها در محیط GEE انجام شد. پس از این مرحله همه تصاویر ماسک با استفاده از تابع OR با یکدیگر ترکیب شدند تا یک نقشه واحد متشکل از سه لایه مذکور تهیه شود. در نهایت این تصویر واحد به‌عنوان ماسک روی داده‌های PUL اعمال شد. نتیجه این الگوریتم استخراج اراضی شهری هدف (TUL) است که نشان‌دهنده عوارض شهری مانند انواع سازه‌های ساختمانی، خیابان‌های عریض، کارخانه‌ها و سایر پدیده‌های انسان‌ساخت شهری است. با وجود این داده‌ها، این نقشه‌ها، نقشه‌های نهایی شهری نیستند؛ زیرا برخی پیکسل‌های ریز و منفردی وجود دارد که به‌اشتباه جزء اراضی شهری طبقه‌بندی شده است؛ بنابراین باید از یک فیلتر برای حذف این پیکسل‌ها استفاده کرد. در محیط سامانه GEE، الگوریتم Focal Mode به‌منظور حذف این پیکسل‌ها به‌کار گرفته شد. در این الگوریتم باید شکل و شعاع پنجره فیلتر مشخص شود. در این پژوهش شکل پنجره، مربع و قطر آن ۱/۵ انتخاب شد. با اعمال این فیلتر

تصاویر نهایی مربوط به اراضی شهری (FUL) استخراج شدند (شکل ۶). این تصاویر از نوع باینری و متشکل از اراضی شهری و غیرشهری هستند که به ترتیب با اعداد ۱ و صفر نشان داده شده‌اند.



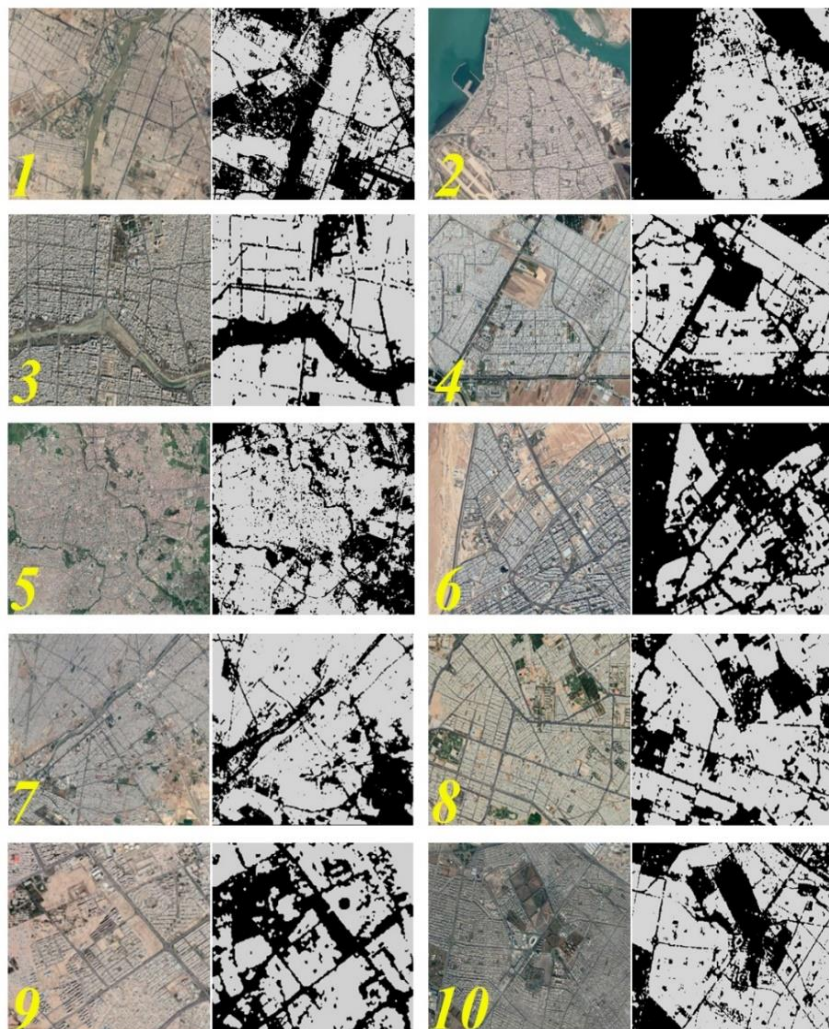
شکل ۶. تصویر TUL و اعمال فیلتر 3×3 روی آن و حذف پیکسل‌های منفرد و اشتباه (تصویر FUL) برای شهر تبریز

اعتبارسنجی و صحت روش

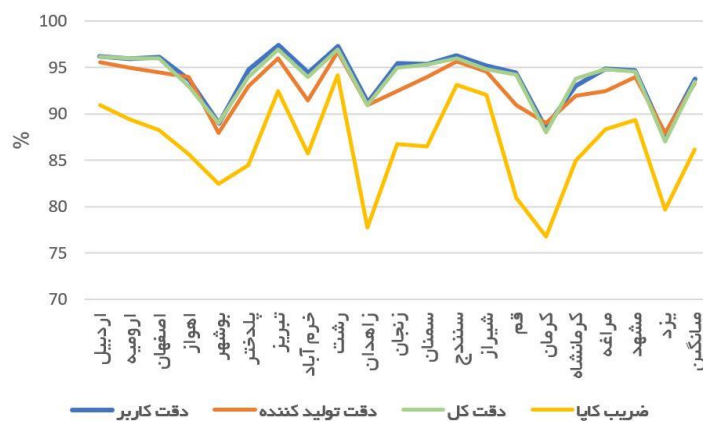
پس از تهیه و استخراج اراضی ۲۰ شهر مورد مطالعه در پژوهش حاضر، صحت و دقت روش بررسی شد؛ بدین‌منظور از دو روش تحلیل نرم‌افزاری و بصری کمک گرفته شد. در بررسی بصری، تصویر استخراج‌شده با این روش و سامانه GEE با تصاویر حاصل از گوگل‌ارت مقایسه شد؛ یعنی در این بخش اراضی شهری استخراج‌شده، وارد نرم‌افزار گوگل‌ارت شدند و موقعیت ساختمان‌ها و دیگری سازه‌های انسانی با تصاویر گوگل‌ارت مقایسه شد. در شکل ۷، اراضی استخراج‌شده ۱۰ شهر از ۲۰ شهر مورد مطالعه در کنار تصاویر گوگل‌ارت همان شهرها نشان داده شده است که با مقایسه آن‌ها می‌توان تا حدودی به کارایی این روش در استخراج اراضی شهری پی برد.

همان‌طور که اشاره شد، روش مقایسه بصری روشی نسبی است که نمی‌تواند به طور دقیق، صحت نتایج را بررسی کند. به همین دلیل برای برآورد صحت و دقت تصاویر تولیدشده، ضرایب کاپا، صحت تولیدکننده، صحت کاربر و صحت کلی تصاویر محاسبه و مقایسه شد؛ بدین‌منظور در نرم‌افزار ArcGIS و براساس محدوده اراضی شهری، به‌صورت تصادفی و به طور متوسط ۱۵۰ نقطه نمونه ایجاد شد. بدین‌صورت که تصاویر مستخرج از سامانه GEE، یک به یک وارد محیط نرم‌افزار GIS شدند. این تصاویر دارای دو ارزش صفر و هستند. ارزش ۱ نشان‌دهنده اراضی شهری (مانند ساختمان‌ها، سازه‌های انسانی، پارکینگ‌ها و بازارها) و ارزش صفر بیانگر اراضی غیرشهری هستند. نقاط ایجادشده به روش تصادفی، ارزش‌های صفر و ۱ را به خود گرفته‌اند. با مقایسه این ارزش‌ها با تصاویر گوگل‌مپ، صحت‌داشتن یا نداشتن نقاط ارزیابی شد. با بررسی‌های صورت‌گرفته مشخص شد تصاویر گوگل‌مپ همه شهرهای مورد مطالعه، به سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ مربوط هستند که این امر بیانگر به‌روزر بودن تصاویر مرجع انتخابی برای صحت‌سنجی نتایج است. درنهایت با تشکیل ماتریس نقاط نمونه‌برداری‌شده مقادیر صحت نقشه‌ها به‌دست آمد. صحت کاربر، صحت تولیدکننده، صحت کل و ضریب کاپا برای همه ۲۰ شهر محاسبه (شکل ۸) و میانگین کل شهرها نیز برآورد شد. ضریب کاپای میانگین برابر با $167/86$ درصد است. میانگین صحت کل $51/93$ درصد، صحت تولیدکننده $94/92$ درصد و

صحت کاربر برابر با ۹۳/۷۶ درصد است. حداکثر ضریب کاپا برای شهر رشت به مقدار ۹۴/۱۶ درصد و حداقل آن برای شهر کرمان ۷۶/۸۱ درصد محاسبه شده است. از نظر صحت کل، رشت با ۹۷ درصد و یزد با ۸۷ درصد مقادیر حداکثر و حداقل را دارند. همچنین این دو شهر به ترتیب (۹۶/۷ و ۸۸ درصد) کمترین و بیشترین مقادیر صحت تولیدکننده را دارند. در نهایت تبریز با ۹۷/۴ درصد و یزد با ۸۷/۶۸ درصد بیشترین و کمترین مقادیر صحت کاربر را نشان می‌دهند. با توجه به این ضرایب، به نظر می‌رسد شهرهایی که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارند؛ مانند زاهدان، یزد، کرمان و بوشهر صحت کمتری دارند. این نتایج با نتایج مطالعات پیشین در سطح جهان (Potin et al., 2016; Sun et al., 2019) هماهنگ و همسویی دارد. شاید یکی از دلایل صحت کم طبقه‌بندی در این شهرها، به پراکنده‌بودن ساختمان‌ها و نوع مصالح به‌کاررفته در آن‌ها مربوط باشد؛ البته باید این امر در پژوهشی جداگانه بررسی شود تا صحت‌داشتن یا نداشتن این گفته مشخص شود.



شکل ۷. مقایسه اراضی استخراج‌شده تعدادی از شهرهای مورد مطالعه از تصاویر سنتینل ۱ و ۲ با تصاویر گوگل ارث شهرهای اهواز، بوشهر، اصفهان، کرمانشاه، رشت، سمنان، قم، شیراز، کرمان و مشهد



شکل ۸. مقادیر ضریب کاپا، صحت کل، صحت تولیدکننده و صحت کاربر برای ۲۰ شهر مورد مطالعه در پژوهش

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد ترکیب تصاویر سری زمانی SAR سنتینل ۱ و سنتینل ۲ و استفاده از آن‌ها در استخراج نیمه‌اتوماتیک اراضی شهری می‌تواند بسیاری از محدودیت‌های روش‌های طبقه‌بندی تصاویر در مقیاس ناحیه‌ای از قبیل تجزیه و تحلیل تک به تک تصاویر مناطق مختلف، محدودیت زمانی در برداشت تعداد وسیعی از نقاط کنترل زمینی، نیاز به الگوریتم‌های پیچیده و بارگیری حجم زیادی از داده‌ها را از بین ببرد. در این میان، استفاده از روش آستانه‌گذاری براساس نمودار هیستوگرام در مقایسه با سایر روش‌ها برای طبقه‌بندی، بسیار ساده و در زمان کمتری قابل استفاده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد، استفاده از داده‌های راداری به دلیل اینکه در هر شرایط آب و هوایی و در هر ساعت از شبانه‌روز قابلیت ثبت تصاویر را دارند، می‌توانند به‌ویژه در مطالعه و استخراج اراضی ساخته‌شده شهری (اراضی غیرقابل نفوذ) کاربرد وسیعی داشته باشند؛ زیرا بازتاب امواج راداری در مناطق شهری بسیار قوی است. از سوی دیگر در چنین مطالعاتی باید از تصاویر سری زمانی داده‌های راداری استفاده شود؛ زیرا تصاویر تکی هم اطلاعات کمتری از منطقه ارائه می‌دهند و هم خطاهایی مانند خطای سایه در مناطق کوهستانی و ساختمان‌های متراکم و مرتفع دارند. در این پژوهش، به‌منظور رفع این خطاها از تصاویر سری زمانی با مدارهای نزولی و صعودی استفاده شد. از دیگر نتایج مهم این مقاله، مشخص شدن کارایی بسیار بالای سامانه GEE در پردازش حجم عظیمی از تصاویر ماهواره‌ای است. استفاده از این سامانه به هیچ نرم‌افزار تخصصی سنجش از دور نیاز ندارد و کاربر به راحتی می‌تواند با استفاده از مرورگر کامپیوتر و حتی گوشی خود داده‌های مختلف را پردازش کند. نکته مهم دیگر این است که در این سامانه به دانلود تصاویر مختلف نیاز نیست، بلکه کاربر می‌تواند تنها نتیجه پردازش را دانلود کند. این امر به لحاظ زمان و سرعت در پردازش بسیار سودمند است؛ بنابراین نتیجه کلی این است که سامانه GEE می‌تواند حجم زیادی از داده‌های سری زمانی (در اینجا تصاویر ماهواره‌ای) مناطق مختلف جهان را با سرعت بسیار بالا و زمان بسیار اندک پردازش کند و نتایج را به صورت نقشه‌ها و نمودارهای مختلف ارائه دهد.

استفاده از این داده‌ها و روش‌ها برای استخراج تعدادی از اراضی شهرهای ایران نشان می‌دهد که می‌توان با سرعت و صحت مناسبی اراضی شهری را استخراج کرد، اما در مناطق مختلف صحت و کارایی این تصاویر متفاوت است؛ به نحوی

که بررسی ضرایب کاپا و دیگر مؤلفه‌های تعیین صحت طبقه‌بندی نشان می‌دهد در مناطق خشک و نیمه‌خشک صحت این روش از سایر مناطق اندک است؛ به طوری که شهرهایی مانند زاهدان، یزد و بوشهر، کمترین ضرایب مربوط به برآورد صحت تصاویر را دارند. این امر می‌تواند ناشی از نبود پوشش گیاهی مناسب، نوع مصالح به کاررفته در ساختمان‌ها، ارتفاع ساختمان‌ها و شکل هندسی آن‌ها باشد. براین اساس می‌توان شهرهای مختلف را گروه‌بندی کرد، اما با توجه به هدف این مقاله که معرفی و بررسی صحت روش در استخراج اراضی ساخته‌شده (نفوذناپذیر) شهری بود، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از این روش برای بررسی و گروه‌بندی شهرها و همچنین بررسی میزان توسعه فیزیکی آن‌ها استفاده شود. نتیجه کلی اینکه با توجه به ضرایب موجود و مقایسه بصری تصاویر استخراج‌شده با تصاویر گوگل ارث می‌توان از این روش برای استخراج سری زمانی اراضی ساخته‌شده شهری و بررسی تغییرات آن در گذر زمان در سایر نقاط کشور استفاده کرد.

منابع

- عطارچی، سارا (۱۳۹۸). «کارایی شاخص‌های راداری در استخراج سطوح نفوذناپذیر شهری با استفاده از تصویر رادار تمام پلاریمتریک»، پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری، شماره ۴، صص ۸۳۷-۸۵۴.
- Arnold Jr, C. L., & Gibbons, C. J. (1996). Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator. *Journal of the American Planning Association*, 62(2), 243-258.
- Attarchi, S. (2019). Efficiency Evaluation of SAR-Derived Indices in Urban Impervious Surfaces Extraction Using Full Polarimetric Image. *Geographical Urban Planning Research*, 7(4), 837-854. (In Persian)
- Ban, Y., Jacob, A., & Gamba, P. (2015). Spaceborne SAR Data for Global Urban Mapping at 30 M Resolution Using a Robust Urban Extractor. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 28-37.
- Chen, J., Chen, J., Liao, A., Cao, X., Chen, L., Chen, X., & Zhang, W. (2015). Global Land Cover Mapping at 30 M Resolution: A POK-Based Operational Approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 7-27.
- Civco, D. L., Hurd, J. D., Wilson, E. H., Arnold, C. L., & Prisloe Jr, M. P. (2002). Quantifying and Describing Urbanizing Landscapes in the Northeast United States. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(10), 1083-1090.
- Corbane, C., Faure, J. F., Baghdadi, N., Villeneuve, N., & Petit, M. (2008). Rapid Urban Mapping Using SAR/Optical Imagery Synergy. *Sensors*, 8(11), 7125-7143.
- Deng, C., & Wu, C. (2012). BCI: A Biophysical Composition Index for Remote Sensing of Urban Environments. *Remote Sensing Of Environment*, 127, 247-259.
- Goldblatt, R., You, W., Hanson, G., & Khandelwal, A. K. (2016). Detecting the Boundaries of Urban Areas in India: A Dataset for Pixel-Based Image Classification in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 8(8), 634.
- Gomez-Chova, L., Fernández-Prieto, D., Calpe, J., Soria, E., Vila, J., & Camps-Valls, G. (2006). Urban Monitoring Using Multi-Temporal SAR and Multi-Spectral Data. *Pattern Recognition Letters*, 27(4), 234-243.
- Haas, J., & Ban, Y. (2017). Sentinel-1A SAR and Sentinel-2A MSI Data Fusion for Urban Ecosystem Service Mapping. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 8, 41-53.
- Hagolle, O., Huc, M., Pascual, D. V., & Dedieu, G. (2010). A Multi-Temporal Method for Cloud Detection, Applied To FORMOSAT-2, Venüs, LANDSAT and SENTINEL-2 Images. *Remote Sensing Of Environment*, 114(8), 1747-1755.
- Hansen, M. C., & Loveland, T. R. (2012). A Review of Large Area Monitoring of Land Cover Change Using Landsat Data. *Remote Sensing of Environment*, 122, 66-74.
- Hodgson, M. E., Jensen, J. R., Tullis, J. A., Riordan, K. D., & Archer, C. M. (2003). Synergistic Use of Lidar And Color Aerial Photography for Mapping Urban Parcel Imperviousness. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(9), 973-980.
- Huang, H., Chen, Y., Clinton, N., Wang, J., Wang, X., Liu, C., & Zhu, Z. (2017). Mapping Major Land Cover Dynamics in Beijing Using All Landsat Images in Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 202, 166-176.
- Im, J., Lu, Z., Rhee, J., & Quackenbush, L. J. (2012). Impervious Surface Quantification Using a Synthesis of Artificial Immune Networks and Decision/Regression Trees from Multi-Sensor Data. *Remote Sensing of Environment*, 117, 102-113.

- Kussul, N., Lavreniuk, M., Skakun, S., & Shelestov, A. (2017). Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(5), 778–782.
- Li, G., Lu, D., Moran, E., & Hetrick, S. (2013). Mapping Impervious Surface Area in the Brazilian Amazon Using Landsat Imagery. *Geoscience & Remote Sensing*, 50(2), 172–183.
- Liu, C., Shao, Z., Chen, M., & Luo, H. (2013). MNDISI: A Multi-Source Composition Index for Impervious Surface Area Estimation at the Individual City Scale. *Remote Sensing Letters*, 4(8), 803–812.
- Lu, D., & Weng, Q. (2004). Spectral Mixture Analysis of the Urban Landscape in Indianapolis with Landsat ETM+ Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(9), 1053–1062.
- Matgen, P., Schumann, G., Henry, J. B., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2007). Integration of SAR-Derived River Inundation Areas, High-Precision Topographic Data and a River Flow Model toward Near Real-Time Flood Management. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(3), 247–263.
- Patel, N. N., Angiuli, E., Gamba, P., Gaughan, A., Lisini, G., Stevens, F. R., & Trianni, G. (2015). Multitemporal Settlement and Population Mapping from Landsat Using Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 199–208.
- Pavanelli, J. A. P., Santos, J. R. D., Galvão, L. S., Xaud, M., & Xaud, H. A. M. (2018). PALSAR-2/ALOS-2 and OLI/LANDSAT-8 Data Integration for Land Use and Land Cover Mapping in Northern Brazilian Amazon. *Boletim De Ciências Geodésicas*, 24(2), 250–269.
- Pesaresi, M., Huadong, G., Blaes, X., Ehrlich, D., Ferri, S., Gueguen, L., & Marin-Herrera, M. A. (2013). A Global Human Settlement Layer from Optical HR/VHR RS Data: Concept and First Results. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(5), 2102–2131.
- Potin, P., Rosich, B., Grimont, P., Miranda, N., Shurmer, I., O'Connell, A., & Krassenburg, M. (2016). Sentinel-1 Mission Status. In (Eds.), *Sentinel-1 Mission Status. Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar* (pp. 1–6). Hamburg, Germany: VDE VERLAG GMBH.
- Rosin, P. L. (2001). Unimodal Thresholding. *Pattern Recognition*, 34(11), 2083–2096.
- Schneider, A., Friedl, M. A., & Potere, D. (2010). Mapping Global Urban Areas Using MODIS 500-M Data: New Methods and Datasets Based on 'Urban Ecoregions'. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1733–1746.
- Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion. *Plos One*, 6(8), E23777.
- Shao, Y., Li, G. L., Guenther, E., & Campbell, J. B. (2015). Evaluation of Topographic Correction on Subpixel Impervious Cover Mapping with CBERS-2B Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(8), 1675–1679.
- Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A., & Skakun, S. (2017). Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science*, 5, 17.
- Shen, X., Wang, D., Mao, K., Anagnostou, E., & Hong, Y. (2019). Inundation Extent Mapping by Synthetic Aperture Radar: A Review. *Remote Sensing*, 11(7), 879.

- Sun, Z., Guo, H., Li, X., Lu, L., & Du, X. (2011). Estimating Urban Impervious Surfaces from Landsat-5 TM Imagery Using Multilayer Perceptron Neural Network and Support Vector Machine. *Journal of Applied Remote Sensing*, 5(1), 053501.
- Sun, Z., Xu, R., Du, W., Wang, L., & Lu, D. (2019). High-Resolution Urban Land Mapping in China From Sentinel 1A/2 Imagery Based on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11(7), 752.
- Sun, Z., Zhao, X., Wu, M., & Wang, C. (2019). Extracting Urban Impervious Surface From Worldview-2 and Airborne Lidar Data Using 3D Convolutional Neural Networks. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(3), 401–412.
- Wang, Z., Gang, C., Li, X., Chen, Y., & Li, J. (2015). Application of a Normalized Difference Impervious Index (NDII) to Extract Urban Impervious Surface Features Based on Landsat TM Images. *International Journal of Remote Sensing*, 36(4), 1055–1069.
- Weng, Q. (2012). Remote Sensing of Impervious Surfaces in the Urban Areas: Requirements, Methods, and Trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34–49.
- Weng, Q., & Hu, X. (2008). Medium Spatial Resolution Satellite Imagery for Estimating and Mapping Urban Impervious Surfaces Using LSMA and ANN. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(8), 2397–2406.
- Weng, Q., Hu, X., & Liu, H. (2009). Estimating Impervious Surfaces Using Linear Spectral Mixture Analysis with Multitemporal ASTER Images. *International Journal of Remote Sensing*, 30(18), 4807–4830.
- Wu, C., & Murray, A. T. (2003). Estimating Impervious Surface Distribution by Spectral Mixture Analysis. *Remote Sensing of Environment*, 84(4), 493–505.
- Wu, M., Zhao, X., Sun, Z., & Guo, H. (2019). A Hierarchical Multiscale Super-Pixel-Based Classification Method for Extracting Urban Impervious Surface Using Deep Residual Network from Worldview-2 and Lidar Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(1), 210–222.
- Xian, G., & Homer, C. (2010). Updating the 2001 National Land Cover Database Impervious Surface Products to 2006 Using Landsat Imagery Change Detection Methods. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1676–1686.
- 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.
- Yang, L., Huang, C., Homer, C. G., Wylie, B. K., & Coan, M. J. (2003). An Approach for Mapping Large-Area Impervious Surfaces: Synergistic Use of Landsat-7 ETM+ and High Spatial Resolution Imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(2), 230–240.
- Zhang, C., Sargent, I., Pan, X., Li, H., Gardiner, A., Hare, J., & Atkinson, P. M. (2018). An Object-Based Convolutional Neural Network (OCNN) for Urban Land Use Classification. *Remote Sensing of Environment*, 216, 57–70.
- Zhang, H., Zhang, Y., & Lin, H. (2012). A Comparison Study of Impervious Surfaces Estimation Using Optical and SAR Remote Sensing Images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 148–156.
- Zhang, Q., & Seto, K. C. (2011). Mapping Urbanization Dynamics at Regional and Global Scales Using Multi-Temporal DMSP/OLS Nighttime Light Data. *Remote Sensing of Environment*, 115(9), 2320–2329.
- Zhang, Y., Zhang, H., & Lin, H. (2014). Improving the Impervious Surface Estimation with Combined Use of Optical and SAR Remote Sensing Images. *Remote Sensing Of Environment*, 141, 155–167.