

کارایی شاخص‌های راداری در استخراج سطوح نفوذناپذیر شهری با استفاده از تصویر رادار تمام پلاریمتریک

سارا عطارچی* - استادیار گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۱۷ تأیید مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۶

چکیده

تفکیک سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری و بررسی روند تغییرات آن، اهمیت بسیاری دارد؛ زیرا امروزه این مقوله شاخصی از گسترش شهر به‌شمار می‌آید. سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری، شامل مناطق مسکونی، مناطق تجاری و صنعتی، پارکینگ‌ها و سطح معابر و شبکه خیابان‌هاست. انواع سطوح نفوذناپذیر و تنوع بسیار آن‌ها از نظر شکل، اندازه و مواد تشکیل‌دهنده سبب پیچیدگی تفکیک این سطوح در مناطق شهری می‌شود. در این پژوهش از تصویر سار تمام پلاریمتریک سنجنده آلوِس / پالِسار برای تشخیص سطوح نفوذناپذیر در سطح شهر تهران استفاده شده است. کارایی شاخص‌های راداری مختلف و ترکیب دوگانه باندهای پلاریمتریک در تفکیک سطوح نفوذناپذیر از سایر کلاس‌های متفاوت پوشش زمین، ارزیابی شده است. برای شناسایی کلاس‌های پوشش زمین از الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. براساس نتایج پژوهش، استفاده از شاخص‌های راداری همراه با تمام باندهای پلاریمتریک، سبب استخراج انواع سطوح نفوذناپذیر با صحت ۹۵ درصد می‌شود. همچنین در صورت استفاده از دو باند پلاریمتریک با قطب عمودی‌اش به همراه شاخص‌های راداری، صحت طبقه‌بندی ۹۰ درصد است. براساس یافته‌های این پژوهش، تصاویر سار جایگزین مناسبی برای تصاویر نوری در تفکیک سطوح نفوذناپذیر شهری هستند. همچنین در صورت دسترسی نداشتن به تصاویر تمام پلاریمتریک، استفاده از دو باند پلاریمتریک به همراه شاخص‌های راداری، برای استخراج سطوح نفوذناپذیر در مناطق پیچیده شهری مناسب است.

واژه‌های کلیدی: آلوِس / پالِسار، سار تمام پلاریمتریک، سطوح نفوذناپذیر شهری، شاخص‌های راداری، طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان.

مقدمه

سطوح نفوذناپذیر، شامل مناطق انسان‌ساخت می‌شوند که آب قابلیت نفوذ در آن‌ها را ندارد (Jiang et al., 2009). بر اساس تعریف، این سطوح در مقابل سطوح طبیعی قرار می‌گیرند که آب در آن‌ها جذب می‌شود. سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری شامل ساختمان‌ها، خیابان‌ها و پارکینگ‌هاست. این سطوح از نظر شکل، اندازه و مواد تشکیل‌دهنده بسیار متفاوت هستند. سطوح نفوذناپذیر شامل سطوح پوشیده‌شده با بتن، انواع آسفالت، آجر یا انواع متفاوت پوشش‌های سقف ساختمان‌ها می‌شود. اندازه این سطوح نیز بسیار متفاوت است؛ برای مثال این سطوح می‌تواند در ابعاد یک خانه کوچک شخصی تا ساختمان‌های متراکم تجاری باشد. کوچه‌های باریک محلی تا شبکه‌های پیچیده بزرگراهی همه جزء سطوح نفوذناپذیر هستند. افزایش سطوح نفوذناپذیر بر محیط‌زیست شهری اثرگذار است. سطوح نفوذناپذیر با افزایش رواناب شهری سبب کاهش کیفیت آب و تغییر در چرخه هیدرولوژیک می‌شود. سطوح نفوذناپذیر با کاهش جذب آب، سبب افزایش جریان‌های سیلابی و در نتیجه افزایش فرسایش در نقاط کم ارتفاع می‌شود (زائری امیرانی و سفیانیان، ۱۳۹۱). همچنین استفاده از بتن و آسفالت در ساختار سطوح نفوذناپذیر سبب افزایش جذب نور خورشید می‌شود. این امر سبب افزایش دما در مناطق دست‌ساز بشر در مقایسه با محیط اطرافش می‌شود و پدیده جزیره حرارتی در شهرها را به وجود می‌آورد. در بسیاری از مطالعات، گسترش سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری، نشانه‌ای از گسترش مناطق ساخت انسان، افزایش جمعیت و افزایش شهرنشینی در نظر گرفته می‌شود (Brabec et al., 2002)؛ به همین دلیل شناسایی سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری و بررسی روند تغییرات آن به عنوان شاخصی از گسترش شهر، امری ضروری به‌شمار می‌آید. ماهیت تصاویر سنجش‌ازدور مانند دوره‌ای بودن برداشت و امکان اخذ تصویر در گستره‌های متفاوت سبب استفاده روزافزون از این تصاویر در مطالعات جغرافیایی شده است. تاکنون پژوهش‌های بسیاری، کارایی تصاویر نوری را در استخراج سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری بررسی کرده‌اند (Deng and Wu, 2013, Weng, 2012, Hu and Weng, 2009, Hu and Weng, 2011, Yang et al., 2003).

در برخی مطالعات نیز از سایر داده‌ها مانند سری داده‌های زمانی یا داده‌های روشنایی در شب استفاده شده است (Wu and Thompson, 2013, Ma et al., 2014). تصاویر سنجنده‌های نوری مانند لندست، قابلیت فراوانی برای شناسایی سطوح نفوذناپذیر دارد. با این حال، تفکیک سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری با تصاویر نوری، فرایندی ساده به‌شمار نمی‌آید. دلیل اصلی این پیچیدگی، انواع سطوح نفوذناپذیر و تنوع زیاد آن‌ها از نظر شکل، اندازه و مواد تشکیل‌دهنده است (Zhang et al., 2014b, Deng and Wu, 2013). علاوه‌براین، پیکسل‌های مخلوط و بازتاب طیفی مشابه سطوح نفوذناپذیر و سایر کاربری‌های زمین، تفکیک آن‌ها را با پیچیدگی همراه می‌کند. با در نظر گرفتن محدودیت‌های تصاویر نوری و ویژگی‌های تصاویر سار (رادار با دریچه مصنوعی)، کاربرد این تصاویر در تهیه نقشه مناطق شهری در سال‌های اخیر توسعه یافته است (Jiang et al., 2009, Leinenkugel et al., 2011). در این زمینه، بیشتر مطالعات درباره تلفیق تصاویر سار و نوری یا تصاویر تک‌قطبی سار تمرکز یافته‌اند (Zhang et al., 2014b, Leinenkugel et al., 2011, Guo et al., 2014, Gamba and Houshmand, 2001).

سنجندۀ سار در محدوده طول موج‌های ماکروویو طیف الکترومغناطیس فعالیت می‌کند و خاصیت قطبش دارد. این سنجنده امکان فعالیت در حالت تک‌قطبی، دوقطبی یا قطبش کامل را داراست. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شود، تصاویر سار چندقطبی، توانایی بیشتری برای جداسازی طبقات پوشش زمین دارند؛ زیرا در حالت قطبش کامل، تمام ویژگی‌های بازپخش پدیده‌ها دریافت می‌شود (Guo et al., 2014). در نتیجه براساس ویژگی‌های پولاریمتریک و مکانیسم‌های بازپخش، امکان تفکیک پدیده‌ها بیشتر می‌شود. در محیط‌های شهری پیچیده با انواع پوشش زمین، مکانیسم‌های بازپخش متفاوتی وجود دارد. در حالت قطبش کامل در مقایسه با حالت تک‌قطبی و دوقطبی، امکان بیشتری برای شناسایی پدیده‌ها به کمک مکانیسم بازپخش وجود دارد. با این حال، ضروری است بدانیم بیشتر سنجنده‌های سار، در حالت تک‌قطبی یا دوقطبی فعالیت می‌کنند؛ زیرا در حالت قطبش کامل عرض برداشت پایین‌تر است و حجم داده و هزینه‌ها افزایش می‌یابد؛ بنابراین ضروری است تا مشخص شود، در صورت عدم دسترسی به تصاویر قطبش کامل، کدام ترکیب دو باند پولاریمتریک می‌تواند کاربرد داشته باشد. شاخص‌های راداری که از ترکیب دو یا چند باند پولاریمتریک به دست می‌آیند، یکی دیگر از مؤلفه‌های مستخرج از تصاویر راداری هستند. با این حال، کاربرد شاخص‌های راداری در طبقه‌بندی مناطق شهری به شکلی جامع بررسی نشده است. شاخص‌ها عموماً از اطلاعات موجود در بیش از یک باند استفاده می‌کنند و به تفکیک و طبقه‌بندی بهتر پدیده‌ها منجر می‌شوند (Longépé et al., 2011, Walker et al., 2010). همچنین محاسبه شاخص‌ها پیچیده نیست و به دلیل داشتن محدوده مشخصی از مقادیر، تفسیر آن ساده است. همچنین استفاده از اطلاعات دو باند در شاخص‌های راداری سبب حذف برخی خطاها در تصویر می‌شود. روش‌های طبقه‌بندی متفاوتی مانند حداکثر احتمال^۱، ماشین بردار پشتیبان^۲ (Zhang et al., 2012) و روش شبکه عصبی^۳ (Weng and Hu, 2008) به منظور تهیه نقشه کاربری/پوشش زمین در مناطق شهری وجود دارد. در مطالعات بسیاری، کارایی روش‌های متفاوت طبقه‌بندی در استخراج سطوح نفوذناپذیر مطالعه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، اگرچه روش‌های طبقه‌بندی پرکاربردی مانند حداکثر احتمال، صحت پذیرفته‌ای دارد، روش‌های غیرپارامتریک^۴ از قبیل ماشین بردار پشتیبان و طبقه‌بندی فازی در طبقه‌بندی تصاویر سار، صحت بالاتری داشتند (Weng, 2012, Zhang et al., 2012).

از آنجا که کارایی تصاویر سار تمام پولاریمتریک در استخراج سطوح نفوذناپذیر بررسی نشده است، در مطالعه حاضر تمرکز اصلی بر استخراج انواع سطوح نفوذناپذیر در محیط شهری پیچیده با استفاده از تصاویر سار تمام پولاریمتریک در محدوده L ماکروویو تمرکز یافته است. همان‌طور که گفته شد، بیشتر مطالعات پیشین بر تصاویر نوری یا تلفیق تصاویر نوری و سار متمرکز شده‌اند. به همین دلیل، در این مقاله تنها از تصاویر سار تمام قطبی و شاخص‌های راداری برای تشخیص سطوح نفوذناپذیر شهری استفاده شده است. برای نیل به این هدف، در این پژوهش، علاوه بر طبقه‌بندی باندهای پولاریمتریک، از شاخص‌های راداری استفاده شده است. نوآوری این پژوهش، بررسی کارایی شاخص‌های راداری در طبقه‌بندی سطوح نفوذناپذیر در منطقه پیچیده شهری است که تاکنون در ایران صورت نگرفته است.

1. Maximum Likelihood
2. Support Vector Machine
3. Neural Network
4. Non-Parametric

مبانی نظری

شناسایی سطوح نفوذناپذیر شهری شاخصی مهم از مناطق ساخته شده برای مدیران و برنامه‌ریزان شهری است. برای متولیان شهر ضروری است از سه جنبه موقعیت و پراکندگی مناطق ساخته شده، تراکم این مناطق و روند تغییرات آن‌ها در طی زمان سطوح نفوذناپذیر را بررسی کنند. تحلیل تغییرات سطوح نفوذناپذیر به مدیران اجازه می‌دهد تا روند کنونی توسعه شهر را ارزیابی و تغییرات آینده شهر را منطبق بر توسعه پایدار برنامه‌ریزی کنند. بدیهی است دسترسی به این اطلاعات به کمک پیمایش زمینی یا نقشه‌برداری زمینی بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. با در نظر گرفتن پویایی ساختار شهری، برای پایش تغییرات گستره شهر امکان تکرار برداشت‌های زمینی با توجه به هزینه و زمان اجرای چنین برداشت‌هایی، ناممکن است. ویژگی‌های خاص سنجش‌ازدور مانند تکرارپذیری و امکان اخذ داده در مقیاس‌های محلی تا جهانی سبب شده است تا تصاویر سنجش‌ازدور به عنوان مهم‌ترین منبع تأمین داده برای مطالعه پوشش زمین و تغییرات آن در شهرها شناخته شوند. همچنین، تصاویر سنجش‌ازدور در کاربردهایی مانند جزیره حرارتی شهری، بررسی تأثیرات زیست‌محیطی گسترش شهر و مدل‌سازی توسعه شهر کاربرد دارد. سنجنده‌های موجود در بخش‌های متفاوت طیف الکترومغناطیس شامل بخش نوری^۱، حرارتی و رادار فعالیت می‌کنند. هر کدام از این تصاویر، برتری‌ها و محدودیت‌هایی دارند. تصاویر نوری پرکاربردترین تصاویر سنجش‌ازدور به‌شمار می‌آیند؛ زیرا دسترسی به این داده‌ها آسان است و پردازش این تصاویر پیچیده نیست. اگرچه تصاویر نوری، آرشیو طولانی‌تر، دسترسی راحت‌تر و پردازش آسان‌تر دارند استفاده از این تصاویر با محدودیت‌هایی نیز همراه است: نخست اینکه امکان مشابهت پاسخ طیفی بین کلاس‌های مختلف پوشش اراضی زیاد است؛ در نتیجه تفکیک آن‌ها بر پایه باندهای طیفی، با دشواری‌هایی روبه‌روست. دومین عامل محدودکننده در استفاده از تصاویر نوری، چه به صورت مستقل و چه به صورت تلفیق با سایر تصاویر، نبود تصاویر مناسب در مناطق پوشیده از ابر است. پوشش ابر در برخی مناطق سبب می‌شود تا در ماه‌های متوالی هیچ تصویر نوری از یک منطقه خاص موجود نباشد. تصاویر حرارتی در مطالعه درجه حرارت سطح زمین و بررسی جزایر حرارتی شهری کاربرد دارد. مهم‌ترین محدودیت، تصاویر حرارتی قدرت تفکیک مکانی پایین این تصاویر است که استفاده از آن‌ها را در محیط‌های شهری با محدودیت مواجه کرده است. سنجنده‌های راداری در محدوده ماکروویو طیف الکترومغناطیس فعالیت می‌کنند. تصاویر این سنجنده‌ها به دلیل پیچیده بودن فرایند پردازش و دسترسی کمتر به تصاویر نوری، تاکنون به طور گسترده در مناطق شهری استفاده نشده‌اند. تصاویر راداری در مقایسه با تصاویر نوری، چند مزیت عمده دارند:

۱. به دلیل فعال بودن سنجنده، امکان تصویربرداری در شب را دارند و در هر شرایط آب‌وهوایی نیز می‌توانند تصویر تهیه کنند.

۲. امکان شناخت پدیده‌ها بر مبنای ضریب بازپخش و مکانیسم پخش وجود دارد.

۳. سطح اشباع بالاتری از سنجنده‌های نوری دارند و در نتیجه به تغییرات بازپخش پدیده‌ها، حساسیت بیشتری دارند.

۴. سنجنده‌های رادار قادرند امواج الکترومغناطیس را با قطبش عمودی و افقی ارسال و دریافت کنند. این سنجنده‌ها از

این دیدگاه به سه دسته تک‌قطبی^۱، دوقطبی^۲ و تمام‌قطبی^۳ تقسیم می‌شوند. از آنجا که پدیده‌ها نسبت به قطبش‌های متفاوت، واکنش متفاوت دارند، استفاده از قطبش‌های مختلف سبب می‌شود تا ویژگی‌های متفاوتی از پدیده‌ها آشکار شود و در نتیجه تشخیص بهتر پدیده‌ها صورت بگیرد. سنجنده‌های رادار با دریچه مصنوعی (سار)^۴، نوع خاصی از سنجنده‌های راداری هستند که با فناوری خاص می‌توانند شبیه‌سازی آنتن‌های بلند را انجام دهند و در نتیجه امکان اخذ تصاویر تا قدرت تفکیک حدود ده متر را برای سنجنده‌های فضا برد فراهم کنند. پدیده‌های مختلف در برابر پرتوهای راداری، مکانیسم پخش متفاوتی دارند. مکانیسم پخش شامل پخش منفرد، دوگانه و سه‌گانه^۵ است. مکانیسم بازپخش غالب در سطوح نفوذناپذیر برحسب نوع آن متفاوت است؛ برای مثال مکانیسم پخش غالب از سطح بام‌ها، مکانیسم پخش منفرد است، یا در جایی که یک ساختار عمودی مانند دیوار روی زمین (ترکیب زمین- دیوار عمودی) قرار دارد، مکانیسم غالب، بازپخش دوگانه خواهد بود و در مناطق بسیار پرتراکم شهری که تراکم ساختمان‌ها بسیار زیاد است، مکانیسم پخش سه‌گانه نیز دیده می‌شود. در بعضی مطالعات، از انواع روش‌های تجزیه پلاریمتریک^۶ برای تعیین مکانیسم پخش غالب به منظور تهیه نقشه کاربری/ پوشش زمین استفاده شده است (Deng and Wu, 2013). تصاویر سار قطبی امکان درک انواع مکانیسم پخش را دارند و در نتیجه به تفکیک بهتر پدیده‌ها کمک می‌کنند. قابلیت تصاویر سار و نوری به‌طور مستقل یا در تلفیق با یکدیگر برای شناسایی سطوح نفوذناپذیر شهری، در چندین پژوهش بررسی شده است. ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از تصاویر دوقطبی تراسار و آلوس/ پالسا به همراه تصاویر نوری اسپات نشان دادند که استفاده از داده‌های دوقطبی دقت بالاتری به تصاویر تک‌قطبی دارد. استفاده هم‌زمان تصاویر سار به همراه تصاویر نوری در طبقه‌بندی مناطق شهری نیز در چندین مطالعه بررسی شده است (Gamba and Houshmand, 2001, Zhang et al., 2014).

براساس نتایج همه این پژوهش‌ها ترکیب تصاویر سار و نوری سبب افزایش تفکیک‌پذیری پدیده‌های شهری می‌شود. تیسون و همکاران (۲۰۰۴) کاربرد تصاویر رادار با قدرت تفکیک مکانی بالا را برای طبقه‌بندی مناطق شهری بررسی کردند. آن‌ها از روش طبقه‌بندی مارکوف برای این کاربرد خاص با دقت پذیرفته استفاده کردند. ژانگ و همکاران کاربرد تصاویر تمام قطبی رادار ست-۲ را در سه شهر متفاوت شنزن، هنگ‌کنگ و ماکائو بررسی کردند. به همین منظور روش جدیدی را بر مبنای مدل مشهور پوشش گیاهی- سطوح نفوذناپذیر- خاک^۸ توسعه دادند و بر مبنای آن به استخراج سطوح نفوذناپذیر شهری پرداختند. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش قبلی نشان‌دهنده افزایش صحت کلی طبقه‌بندی تا ۴/۶ درصد و ضریب کاپا به میزان ۰/۱۸ دارد. تغییرات سالیانه مناطق ساخته‌شده در محیط پیچیده شهری- روستایی در چین با استفاده از تصاویر پالسا و لندست را گین و همکاران، به‌طور کمی بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از فرایند طبقه‌بندی درخت تصمیم‌گیری و طبقه‌بندی پیکسل پایه، به استخراج مناطق ساخته‌شده با قدرت تفکیک ۳۰

1. Single Polarized Image
2. Dual Polarized Image
3. Full Polarized Image
4. Synthetic Aperture Radar (SAR)
5. Single, Double And Triple Bounce Scattering Mechanism
6. Ground-Wall Structure
7. Polarimetric Decomposition
8. Vegetation-Impervious Surface-Soil (VIS)

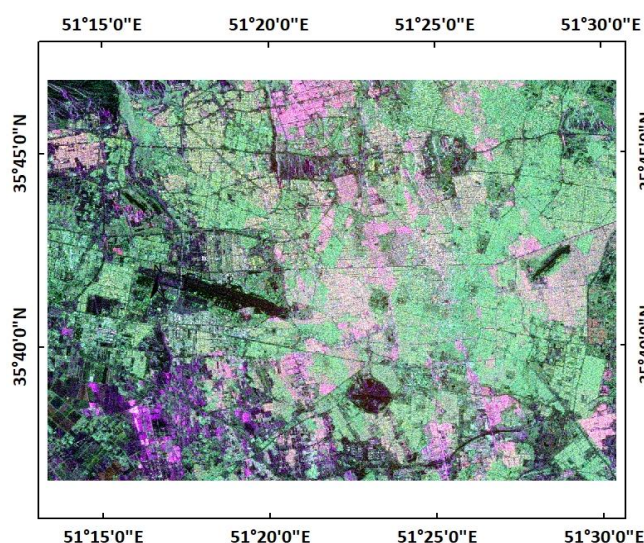
متری در سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ پرداختند. برای این کار، از ضریب بازپخش باند HH و مقدار حداکثر شاخص نرمال‌شده تفاضل پوشش گیاهی لندست استفاده کردند (Qin et al., 2017). ژانگ و همکاران کارایی تصاویر لندست و تصاویر ENVISAT ASAR را در استخراج سطوح نفوذناپذیر بررسی کردند. آن‌ها همچنین دو روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان^۱ و شبکه عصبی مصنوعی^۲ را با یکدیگر مقایسه کردند. براساس نتایج آن‌ها، تصاویر لندست صحت طبقه‌بندی بالاتری از تصاویر ENVISAT ASAR داشتند. همچنین طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان در تصاویر لندست، نتایج بهتری داشت؛ در صورتی که درباره تصاویر ENVISAT ASAR، طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی صحت بالاتری داشت (Zhang H., 2012). در مطالعه دیگری، از تصاویر لندست و تصاویر ماهواره ERS در حالت تداخل‌سنجی، درصد سطوح نفوذناپذیر شهری به دست آمده است. تصاویر سار تداخل‌سنجی به‌ویژه سبب افزایش دقت تفکیک سطوح نفوذناپذیر از اراضی بایر شد. بر مبنای نتایج نویسندگان پیشنهاد دادند از تصاویر سار تداخل‌سنجی برای استخراج سطوح نفوذناپذیر برای مناطقی که پوشش ابر دارند، استفاده شود (Yang et al., 2009). با این حال تصاویر با قطبش کامل کمتر در پژوهش‌ها استفاده شده‌اند؛ زیرا بیشتر سنجنده‌ها در حالت تک‌قطبی و دوقطبی فعالیت می‌کنند؛ به این دلیل که در حالت تک‌قطبی و دوقطبی، امکان تولید تصاویر با عرض برداشت بزرگ‌تر، حجم داده کمتر و انتقال داده راحت‌تر وجود دارد. با در نظر گرفتن این مطلب و محدودیت‌های تصاویر نوری، در پژوهش پیش‌رو، از تصاویر سار و شاخص‌های مستخرج از آن به صورت مستقل و بدون کمک از تصاویر نوری استفاده شده است. برای بررسی کارایی تصاویر سار و شاخص‌های راداری در شناسایی سطوح نفوذناپذیر شهری، شهر تهران گزینه مناسبی برای این پژوهش به شمار می‌آید. تهران، به عنوان پایتخت ایران، مرکز اقتصادی و سیاسی کشور و بزرگ‌ترین کلان‌شهر کشور است؛ بنابراین شناسایی این سطوح در تهران، به عنوان نمادی از گسترش شهر بسیار اهمیت دارد. همچنین تهران، ساختاری ناهمگن دارد و انواع متفاوت سطوح نفوذناپذیر در آن مشاهده می‌شود. تشخیص سطوح نفوذناپذیر شهری در این محیط پیچیده شهری، حائز اهمیت است.

منطقه مورد مطالعه

به منظور بررسی کارایی تصاویر سار تمام پولاتریمتریک در استخراج سطوح نفوذناپذیر شهری، شهر تهران به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. دلیل انتخاب این شهر، اهمیت آن و وجود انواع کاربری اراضی و تنوع آن‌هاست. شهر تهران، پایتخت ایران و مهم‌ترین مرکز جمعیتی و اقتصادی ایران است. این شهر با جمعیتی بالغ بر ۸ میلیون نفر (Statistical Center of Iran, 2016) یکی از کلان‌شهرهای جهان است که در چند دهه اخیر و با گسترش شهرنشینی در ایران، توسعه بسیاری یافته است. در این کلان‌شهر، انواع کاربری/پوشش زمین با توزیع غیریکنواخت وجود دارد که همین امر، طبقه‌بندی کاربری زمین را با دشواری همراه می‌کند. در این شهر انواع سطوح نفوذناپذیر مناطق مسکونی، خیابان‌ها، شبکه بزرگراهی و پارکینگ‌ها وجود دارد که هر یک از آن‌ها، به اشکال و اندازه‌های متفاوت در تهران دیده می‌شود؛ برای نمونه، مناطق مسکونی در این شهر از انواع خانه‌های تک‌خانوار یک طبقه، برج‌های بلند مسکونی و مناطق بسیار متراکم

1. Support Vector Machine (SVM)
2. Artificial Neural Network (ANN)

شهری تشکیل شده است. شبکه معابر این شهر شامل کوچه‌های بسیار باریک محلی تا بزرگراه‌های عریض است. سطوح نفوذناپذیر به دو صورت نفوذناپذیر روشن و نفوذناپذیر تیره در تصاویر سار دیده می‌شوند. سطوح نفوذناپذیر روشن که مقادیر بالایی از بازپخش را دارند، شامل مناطق مسکونی پرتراکم، مناطق تجاری و ساختمان‌هایی است که در نمای آن‌ها از فلز استفاده شده است. سطوح نفوذناپذیر تیره که مکانیسم پخش غالب آن پخش سطحی است، عمدتاً شامل شبکه معابر و سطح پارکینگ‌هاست. به جز این سطوح در این شهر و اطراف آن، پوشش گیاهی، استخرهای آب و دریاچه مصنوعی و زمین‌های بدون پوشش نیز دیده می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. تصویر تمام پلاریمتریک شهر تهران با ترکیب رنگی کاذب (باند قرمز: HH، باند سبز: HV، باند آبی: VV) سنجنده آلوس / پالسار در تاریخ ۲۳ آوریل ۲۰۰۹

روش پژوهش

داده‌های مورد استفاده

تصویر تمام پلاریمتریک سنجنده آلوس / پالسار^۱ در محدوده باند L که محدوده مورد مطالعه را دربرمی‌گیرد، گرفته شده است. تاریخ دریافت تصویر ۲۳ آوریل ۲۰۰۹ و در حالت SLC^۲ با زاویه فرود متوسط ۲۳/۹۳ درجه است. در این تصویر، هر چهار باند پلاریمتریک شامل HH، HV، VH و VV وجود دارند. در قدم اول، این تصاویر چنددیده^۳ شدند. پس از این پردازش، ابعاد پیکسل برابر با ۱۲/۵ × ۱۲/۵ متر شد. برای حذف خطای ناشی از توپوگرافی در تصویر، تصحیح رادیومتر-توپوگرافی^۴ با استفاده از مدل رقومی ارتفاع انجام شد. در مرحله بعد، با استفاده از فرمول زیر و ضریب واسنجی، اعداد رقومی به ضریب بازپخش (برحسب دسی‌بل) تبدیل شدند (Shimada et al., 2007).

$$\sigma^{\circ}(\text{dB}) = 10 \log(DN^2) + CF \quad (1)$$

1. Advanced Land Observing Satellite/ Phased Array Type L-Band Synthetic Aperture Radar (ALOS/PALSAR)
2. Single Look Complex
3. Multi-Looking
4. Radiometric-Terrain Correction

σ° : ضریب بازپخش

DN: عدد رقومی تصویر در باندهای پولاریمتریک

CF= -83 (ضریب واسنجی)

پیکسل‌های سیاه و سفید منفرد در تصاویر راداری که به آن لکه‌های راداری^۱ نیز می‌گویند، جزء جدایی‌ناپذیر این تصاویر هستند. وجود این لکه‌ها، یکی از محدودیت‌های استفاده از تصاویر راداری است؛ زیرا تفسیر و طبقه‌بندی تصاویر راداری را با مشکل مواجه می‌کند ضمن اینکه به تصاویر راداری، ظاهری نامأنوس و متفاوت از تصاویر نوری می‌دهد. از آنجا که این لکه‌ها، بخشی از ماهیت این تصاویر هستند و ماهیت تصادفی ندارند، جزء نویزها قرار نمی‌گیرند. با این حال برای انجام‌دادن سایر پردازش‌ها، باید تأثیرات لکه‌ها کاهش یابد. برای کاهش این اثرات، فیلترهای متفاوتی توسعه یافته‌اند. در این پژوهش از فیلتر لی بهبودیافته^۲ (Lee et al., 1994) با هدف تمایز بین کلاس‌های متفاوت پوشش زمین، استفاده شده است.

محاسبه شاخص‌های راداری

شاخص‌های راداری متفاوتی از باندهای قطبی، محاسبه می‌شوند که مهم‌ترین آن‌ها شامل شاخص نسبت^۳، شاخص میانگین^۴، شاخص تفاضل^۵، شاخص تفاضل نرمال‌شده^۶ و شاخص NLI (جدول ۱) است. با وجود سادگی محاسبه، این شاخص‌ها زیاد استفاده نشده‌اند. در پژوهش‌هایی که از شاخص‌های راداری استفاده شده است، کارایی این شاخص‌ها در تفکیک طبقات مختلف زمین اثبات شده است؛ برای نمونه نشان داده شده است که شاخص تفاضل و شاخص تفاوت نرمال‌شده، قادر به تفکیک بهتر پوشش گیاهی از سایر کاربری‌ها هستند (Dong et al., 2012, Dong et al., 2014, Qin et al., 2015). همچنین شاخص NLI توانسته است صحت کلی طبقه‌بندی کاربری زمین را در تصاویر باند L افزایش دهد (Li et al., 2012) (جدول ۱).

جدول ۱. نحوه محاسبه شاخص‌های راداری

$$Ratio (RAT) = \frac{\sigma_{HH}^\circ}{\sigma_{HV}^\circ}$$

$$Average (AVE) = \frac{\sigma_{HH}^\circ + \sigma_{HV}^\circ}{2}$$

$$Difference (DIF) = \sigma_{HH}^\circ - \sigma_{HV}^\circ$$

$$Normalized\ Difference\ Index (NDI) = \frac{\sigma_{HH}^\circ - \sigma_{HV}^\circ}{\sigma_{HH}^\circ + \sigma_{HV}^\circ}$$

$$NLI = \frac{\sigma_{HH}^\circ \times \sigma_{HV}^\circ}{\sigma_{HH}^\circ + \sigma_{HV}^\circ}$$

1. Speckle
2. Enhanced Lee
3. Ratio Index
4. Average Index
5. Difference Index
6. Normalized Difference Index

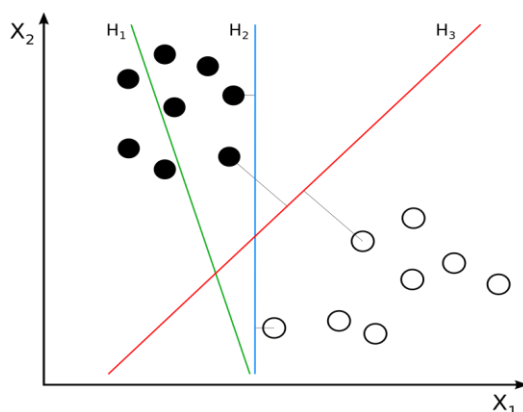
σ° ضریب بازپخش برحسب دسی‌بل و σ°_{HH} ، ضریب بازپخش در باناست باشد. σ°_{HV} ضریب بازپخش در باند HV است. در این فرمول‌ها، به‌جای دو باند HH, HV می‌توان سایر ترکیب دو باندی یعنی (HV, VV) و (HH, VV) را در نظر گرفت.

طبقه‌بندی و صحت‌سنجی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد در محدوده شهر تهران علاوه بر سطوح نفوذناپذیر، پوشش گیاهی، سطوح آبی و زمین‌های بایر نیز وجود دارد. به همین دلیل در طبقه‌بندی، پنج کلاس پوشش زمین شامل سطوح نفوذناپذیر روشن، سطوح نفوذناپذیر تیره، سطوح آبی، پوشش گیاهی و زمین‌های بایر در نظر گرفته شد. سطوح نفوذناپذیر روشن شامل ساختمان‌های مسکونی و تجاری است. سطوح نفوذناپذیر تیره دربرگیرنده کوچه‌ها، خیابان‌ها، بزرگراه‌ها، پارکینگ‌های عمومی و باندهای فرودگاه است. کلاس پوشش گیاهی، پارک‌های جنگلی شمال تهران، پارک‌های تفریح پراکنده شده در سطح شهر و فضای سبز اطراف بزرگراه‌ها را شامل می‌شود. سطوح آبی نیز به استخرها و دریاچه‌های مصنوعی محدود است. کلاس زمین‌های بایر، دربرگیرنده زمین‌های بدون پوشش گیاهی یا پوشش انسان‌ساز مانند زمین‌های پوشیده از خاک یا پوشیده از سنگ است. بعد از تعریف کلاس‌های پوشش زمین، نمونه‌های آموزشی به‌منظور انجام طبقه‌بندی انتخاب شدند. نمونه‌های آموزشی هر کلاس به‌کمک تصاویر با قدرت تفکیک بالا گوگل ارث انتخاب شدند. حدود ۵۰۰ پیکسل از هر کلاس پوشش زمین به‌عنوان نمونه آموزشی انتخاب شدند. برای اعتبارسنجی نتایج نیز حدود ۳۰۰ پیکسل از هر کلاس به‌عنوان نمونه‌های اعتبارسنجی به‌طور مستقل از نمونه‌های آموزشی انتخاب شد.

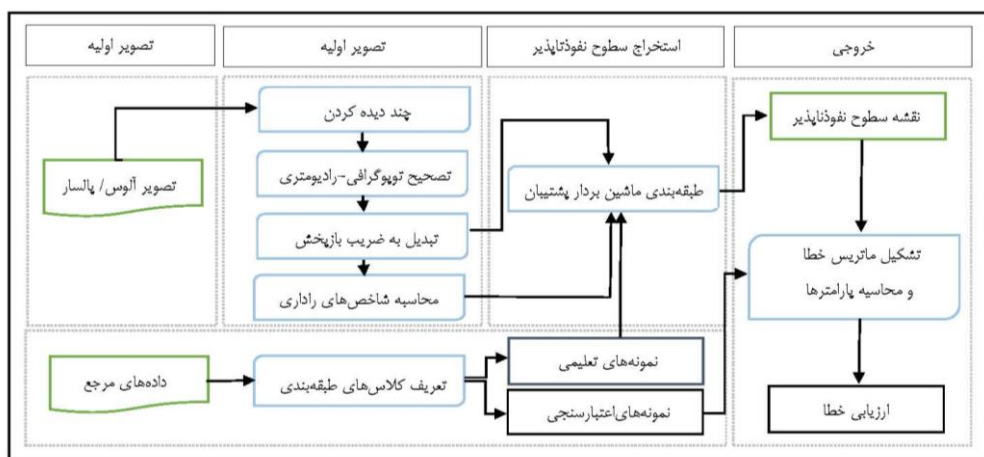
به‌منظور استخراج سطوح نفوذناپذیر شهری، در این پژوهش از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. اولین بار این الگوریتم را وپنیک^۱ ارائه شده است و در دهه اخیر کاربرد چشمگیری در طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای داشته است. این الگوریتم، طبقه‌بندی نظارت‌شده و غیرپارامتریک است. در این روش، فرض نرمال بودن توزیع داده‌های ورودی وجود ندارد و بدون هیچ پیش‌فرضی از چگونگی توزیع داده‌ها، آن‌ها را طبقه‌بندی می‌کند (Mountrakis et al., 2011). در این روش، یک صفحه فرضی با نام ابرصفحه^۲ ایجاد می‌شود که در فضایی چندبعدی، کلاس‌های مختلف را به‌گونه‌ای از هم جدا می‌کند تا خوشه‌هایی که کمترین تفاوت را با هم دارند، کلاس واحدی را تشکیل بدهند. در عین حال حداکثر حاشیه بین کلاس‌های مختلف وجود داشته باشد (شکل ۲). ویژگی دیگر این الگوریتم، دستیابی به صحت پذیرفته نسبت به سایر روش‌های طبقه‌بندی در صورت وجود تعداد کم نمونه‌های تعلیمی است (Zhang et al., 2014a). به‌دلیل برتری این الگوریتم از روش‌های پارامتریک طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای مانند حداقل فاصله تا میانگین و حداکثر احتمال، در این پژوهش از روش ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است.

1. Vapnik
2. Hyper Plane



شکل ۲. نحوه عملکرد ابرصفحه در الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، صفحه H_1 قادر به جداسازی دو کلاس نیست. صفحه H_2 دو کلاس را از هم جدا می‌کند، اما مقدار حاشیه بین صفحه و کلاس‌ها اندک است. صفحه H_3 دو کلاس را با حداکثر حاشیه جدا می‌کند.

پس از اجرای طبقه‌بندی، ضروری است نتایج براساس مجموع داده مستقل، صحت‌سنجی شود. برای محاسبه صحت، از ماتریس خطا^۱ استفاده شده است. ماتریس خطا از مقایسه خروجی طبقه‌بندی با نمونه‌های اعتبارسنجی به دست می‌آید. براساس انطباق کلاس انتسابی هر پیکسل در نمونه‌های اعتبارسنجی با کلاس واقعی آن، ماتریس خطا تشکیل می‌شود. براساس ماتریس خطا، صحت کلی^۲، خطای حذف^۳ و خطای اضافه^۴ محاسبه می‌شود. صحت کلی، بر اساس تعداد پیکسل‌هایی که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند به دست می‌آید. براساس خطای حذف و خطای اضافه، میزان صحت طبقه‌بندی برای هر کلاس خاص، به طور جداگانه محاسبه می‌شود. خطای حذف، براساس پیکسل‌هایی از نمونه اعتبارسنجی محاسبه می‌شود که در کلاس مورد نظر قرار نگرفته‌اند. خطای اضافه، براساس تعداد پیکسل‌هایی است که از کلاس‌های دیگر در این کلاس قرار گرفته‌اند (Jensen and Lulla, 1987) (شکل ۳).



شکل ۳. فلوچارت کلی پژوهش

1. Confusion Matrix
2. Overall Accuracy
3. Omission Error
4. Commission Error

جدول ۲. سناریوهای متفاوت برای طبقه‌بندی

سناریو	ترکیب باندها
۱	چهار باند پولاریمتریک
۲	ترکیب باندی HH، HV و شاخص‌های راداری استخراج‌شده از آن
۳	ترکیب باندی HV، VV و شاخص‌های راداری استخراج‌شده از آن
۴	ترکیب باندی HH، VV و شاخص‌های راداری استخراج‌شده از آن
۵	ترکیب چهار باند پولاریمتریک و شاخص‌های راداری استخراج‌شده از آن

بحث و یافته‌ها

برای تعیین نقش باندهای پولاریمتریک و شاخص‌های راداری استخراج‌شده از آن‌ها در تفکیک سطوح نفوذناپذیر، طبقه‌بندی در پنج سناریوی مختلف انجام شد (جدول ۲). در سناریوی اول، تنها چهار باند پولاریمتریک طبقه‌بندی شدند. در سناریوی دوم، ترکیب باندی HH، HV و شاخص‌های راداری استخراج‌شده از این دو باند، استفاده شد. سناریوی بعدی، استفاده از دو باند HV و VV و شاخص‌های این دو باند است. در سناریوی چهارم، تنها از باندهای هم‌قطب^۱ و شاخص‌های راداری مستخرج از آن و در آخرین سناریو، از ترکیب باندهای پولاریمتریک و تمام شاخص‌های راداری استفاده شده است.

صحت تولیدکننده، صحت کاربر، شاخص کاپا و صحت کلی هر سناریو در جدول ۳ آمده است. صحت کلی سناریوی اول، ۹۲ درصد و ضریب کاپا برابر ۰/۹ است. صحت کاربر و صحت تولیدکننده در سطوح نفوذناپذیر تیره و روشن بالاتر از ۹۰ درصد است. سطوح نفوذناپذیر روشن، با دقت بالاتری از سطوح نفوذناپذیر تیره از سایر کلاس‌های پوشش زمین تفکیک شده‌اند. سطوح نفوذناپذیر روشن، بیشتر شامل مناطق متراکم مسکونی و تجاری است که به دلیل وجود ساختمان‌ها، مکانیسم پخش غالب، مکانیسم پخش گوشه‌ای، دو گانه و سه گانه است. در نتیجه تفاوت مکانیسم پخش و مقادیر بالای ضریب بازپخش، این سطوح کاملاً متمایز از سایر کلاس‌های پوشش زمین هستند و در تصاویر سار، با دقت بالایی تشخیص داده می‌شوند. نتایج طبقه‌بندی باندهای پولاریمتریک نشان می‌دهد با استفاده از تصاویر سار تمام پولاریمتریک می‌توان با صحت بالایی سطوح نفوذناپذیر را از سایر طبقات پوشش زمین تفکیک کرد. در تصاویر سار تمام قطبی، امکان دریافت بیشتر ویژگی‌های پخش وجود دارد؛ در نتیجه این تصاویر نسبت به تصاویر تک‌قطبی یا دوقطبی، قابلیت بیشتری برای تفکیک سطوح نفوذناپذیر دارند. پایین‌ترین دقت، به اراضی بدون پوشش سطحی مربوط است.

در سناریوی دوم از دو باند پولاریمتریک HH و HV و شاخص‌های راداری مستخرج از این دو باند استفاده شد. صحت کلی در این سناریو ۸۴/۲۳ درصد و ضریب کاپا ۰/۷۸ است. مقایسه خروجی این سناریو با خروجی طبقه‌بندی تصاویر تمام پولاریمتریک در سناریوی اول، نشان‌دهنده کاهش حدود ۱۰ درصدی صحت کلی و ضریب کاپاست. همچنین صحت تولیدکننده و صحت کاربر همه کلاس‌های پوشش زمین در مقایسه با طبقه‌بندی باندهای قطبش کامل کاهش یافته است. سطوح نفوذناپذیر روشن با صحت تولیدکننده و صحت کاربر حدود ۹۹ درصد بهتر از سایر کلاس‌های پوشش زمین در شهر تهران، قابل جداسازی هستند، اما سطوح نفوذناپذیر تیره، با صحت پایین‌تری از حالت تمام قطبی

تفکیک شده‌اند. بیشترین تداخل سطوح نفوذناپذیر تیره با کلاس آب صورت می‌گیرد. کلاس پوشش گیاهی نیز با صحت تولیدکننده و صحت کاربر حدود ۹۰ درصد به‌خوبی قابل‌تفکیک است. کمترین صحت تولیدکننده و درواقع بالاترین خطای حذف‌شدگی به کلاس زمین‌های بایر مربوط است.

در سناریوی سوم، از ترکیب دو باند پولاریمتریک که پولاریزه عمودی دارند، یعنی باند HV و VV و شاخص‌های راداری محاسبه‌شده از این دو باند استفاده شده است. صحت کلی در این سناریو ۹۰ درصد و ضریب کاپا ۰/۸۶ است. مقایسه نتایج این سناریو با دو سناریوی قبلی، نشان می‌دهد صحت کلی طبقه‌بندی نسبت به زمان استفاده از تصویر تمام قطبی کاهش یافته است، اما نسبت به زمان استفاده از ترکیب دو باند HH، HV و شاخص‌های راداری بیشتر شده است. با توجه به بافت شهر تهران که ساختمان‌های بلند دارد، وجود باند هم قطب عمودی (VV) سبب درک بهتر ساختار عمودی ساختمان‌ها شده است و صحت طبقه‌بندی را در مقایسه با باند هم قطب افقی (HH) افزایش داده است. مقادیر بالای صحت کاربر و تولیدکننده در کلاس سطوح نفوذناپذیر روشن که دربرگیرنده ساختمان‌های اداری و مسکونی است، تأییدکننده این مطلب است. مقادیر صحت تولیدکننده و کاربر سطوح نفوذناپذیر روشن، تقریباً معادل سناریوی اول است و حذف باند HH، تأثیری بر صحت تشخیص این سطوح ندارد. این روند در تشخیص سطوح نفوذناپذیر تیره که شامل سطح معابر، خیابان‌ها و پارکینگ‌هاست، صدق نمی‌کند. صحت استخراج سطوح نفوذناپذیر تیره در زمان استفاده از دو باند HV, VV و شاخص‌های راداری این دو باند، در مقایسه با باندهای تمام پولاریمتریک، پایین‌تر است. کلاس پوشش گیاهی نیز با صحت کاربر و تولیدکننده، تقریباً نزدیک به حالت تمام قطبی استخراج شده است. صحت تولیدکننده و کاربر کلاس آب و زمین‌های بایر نیز در مجموع در مقایسه با حالت قطبش کامل، کاهش و نسبت به سناریوی دوم نسبتاً افزایش داشته است.

در سناریوی چهارم، از دو باند هم قطب سار پولاریمتریک (HH, VV) و شاخص‌های راداری مستخرج از آن استفاده شد. صحت کلی حدود ۸۰ درصد و ضریب کاپا ۰/۷ است. صحت کلی و کاپا در این حالت از سناریوهای قبلی پایین‌تر است. علت این امر، نبود باندهای پولاریمتریک غیرهم‌قطب در این سناریوست؛ زیرا در شهر، به‌دلیل وجود ساختمان‌ها و گیاهان، پدیده تغییر قطبش^۱ اتفاق می‌افتد و باندهای هم‌قطب قادر به دریافت قطب‌های مخالف ناشی از پدیده هم‌قطبی نیستند. در نتیجه نبود باندهای غیرهم‌قطب^۲ سبب کاهش صحت استخراج عوارض می‌شود. در این سناریو، صحت تولیدکننده و صحت کاربر کلاس سطوح نفوذناپذیر روشن به ترتیب ۹۰ و ۸۲ درصد است که از همه حالت‌های قبل کمتر است. در این سناریو، بالاترین صحت تولیدکننده، به کلاس زمین‌های بایر برابر ۹۴ درصد و صحت کاربر برابر ۸۸ درصد متعلق است. سطوح نفوذناپذیر تیره با صحت پایین‌تری از سطوح نفوذناپذیر روشن تفکیک شدند (صحت تولیدکننده ۷۴ درصد و صحت کاربر ۷۰ درصد).

در سناریوی نهایی، از همه باندهای پولاریمتریک و شاخص‌های راداری استفاده شد. بهترین نتایج در این سناریو به‌دست آمده است. صحت کلی این سناریو ۹۵/۵۹ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۶ است. مقایسه نتایج سناریوی نهایی با اولین

1. Depolarization
2. Cross-Polarized

سناریو، اهمیت شاخص‌های راداری را در افزایش تفکیک‌پذیری پدیده‌های مختلف در محیط‌های پیچیده شهری آشکار می‌کند. صحت کاربر و صحت تولیدکننده کلاس سطوح نفوذناپذیر روشن ۱۰۰ درصد است. سطوح نفوذناپذیر تیره با صحت تولیدکننده ۹۲/۱۹ و صحت کاربر ۹۳/۸۸ از سایر کلاس‌ها تفکیک شدند. بعد از کلاس سطوح نفوذناپذیر روشن، زمین‌های بایر با صحت بالا (صحت تولیدکننده ۹۹/۰۱ و صحت کاربر ۱۰۰) تفکیک شدند. پوشش گیاهی و آب در رده‌های بعدی صحت طبقه‌بندی قرار دارند (شکل ۴). شاخص‌های راداری همچنین سبب افزایش صحت طبقه‌بندی دو کلاس آب و زمین‌های بایر شده‌اند که پیکسل‌های هیچ کلاس دیگری به اشتباه در این دو کلاس وارد نشده است.

جدول ۳. جدول ماتریس خطا و ارزیابی صحت استخراج سطوح نفوذناپذیر شهری (اعداد صحت تولیدکننده، صحت کاربر و صحت کلی به درصد است، برای توضیح سناریوها به جدول ۲ مراجعه شود.)

سناریوی ۲			سناریوی ۱			
ضریب کاپا	صحت کاربر	صحت تولیدکننده	ضریب کاپا	صحت کاربر	صحت تولیدکننده	
.۷۸	۹۸/۶۹	۹۸/۳۷	.۹۰	۹۹/۸۴	۹۹/۳۵	سطوح روشن
	۶۹/۷۶	۷۳/۵۰		۹۳/۶۲	۹۷/۱۶	سطوح تیره
	۹۱/۴۴	۸۹/۸۲		۹۸/۲۵	۹۹/۱۲	پوشش گیاهی
	۷۷/۵۹	۹۵/۲۶		۸۷/۶۴	۹۷/۰۲	آب
	۹۵/۰۰	۱۷/۳۵		۷۸/۲۹	۴۶/۱۲	زمین‌های بایر
		۸۴/۲۳			۹۲/۶۷	صحت کلی

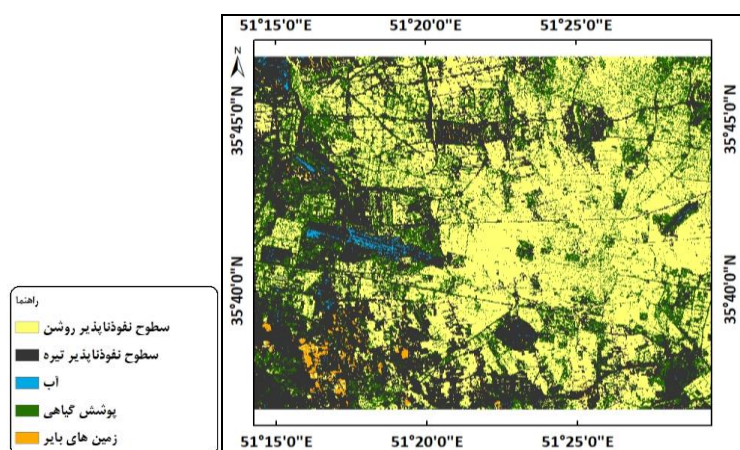
سناریوی ۴			سناریوی ۳			
ضریب کاپا	صحت کاربر	صحت تولیدکننده	ضریب کاپا	صحت کاربر	صحت تولیدکننده	
.۷۰	۸۲/۸۷	۹۰/۵۸	.۸۶	۹۹/۱۳	۹۹/۲۵	سطوح روشن
	۷۰/۸۳	۷۴/۳۱		۷۸/۷۱	۶۲/۱۶	سطوح تیره
	۷۵/۰۰	۶۴/۰۲		۹۴/۶۳	۹۳/۳۸	پوشش گیاهی
	۷۰/۸۳	۵۸/۵۶		۹۲/۵۹	۸۹/۱۰	آب
	۸۸/۰۲	۹۴/۳۷		۸۰/۵۹	۹۳/۰۲	زمین‌های بایر
		۷۹/۱۶			۹۰/۳۰	صحت کلی

سناریوی ۵			
ضریب کاپا	صحت کاربر	صحت تولیدکننده	
.۹۶	۱۰۰	۱۰۰	سطوح روشن
	۹۳/۸۸	۹۲/۱۹	سطوح تیره
	۹۷/۰۲	۹۹/۰۱	پوشش گیاهی
	۱۰۰	۸۹/۸۷	آب
	۱۰۰	۹۹/۰۱	زمین‌های بایر
		۹۵/۵۹	صحت کلی

نتیجه‌گیری

نتایج استخراج سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری نشان می‌دهد بالاترین صحت زمانی به دست می‌آید که از تمام باندهای سار پولاریمتریک و شاخص‌های مستخرج از آن استفاده شده است. استفاده از تمام باندهای پولاریمتریک به تشخیص سطوح نفوذناپذیر شهری با صحت بالایی منجر می‌شود؛ زیرا در این حالت تمام ویژگی‌های پخش پدیده دریافت می‌شود. شاخص‌های راداری به‌طور خاص، سبب افزایش صحت طبقه‌بندی در حالت قطبش کامل شده‌اند. شاخص‌های استخراج‌شده از تصاویر نوری مانند شاخص نرمال‌شده تفاضل گیاهی^۱، شاخص نرمال‌شده تفاضل آب^۲ یا شاخص نرمال‌شده تفاضل مناطق ساخته‌شده^۳ به‌طور گسترده استفاده می‌شوند؛ به‌طوری‌که بعضی از این شاخص‌ها از قبیل شاخص نرمال‌شده تفاضل پوشش گیاهی، به‌عنوان محصول^۴ بعضی از سنجنده‌ها به‌طور مستمر تولید می‌شود و در اختیار کاربران قرار می‌گیرد. درحالی‌که شاخص‌های راداری با وجود سادگی محاسبه تاکنون کمتر بررسی شده‌اند.

در زمان استفاده از سایر ترکیبات دو باند پولاریمتریک، بالاترین صحت زمانی به دست می‌آید که هر دو باند مؤلفه‌ای عمودی داشته باشند (HV، VV). استفاده از شاخص‌های راداری در کنار باندهای دارای پولاریزه عمودی، صحتی نزدیک به حالت تمام‌قطبی دارد. در این حالت، سطوح نفوذناپذیر به‌ویژه سطوح نفوذناپذیر روشن با صحت بسیار بالا از سایر کلاس‌های پوشش زمین تفکیک می‌شوند. با در نظر گرفتن این نکته که در بافت‌های شهری، به‌ویژه در شهری مانند تهران، پدیده‌ها ساختارهای متفاوت عمودی دارند، وجود پولاریزه عمودی به تفکیک بهتر کمک می‌کند. پایین‌ترین صحت مربوط به زمانی است که از دو باند هم‌قطب (VV، HH) استفاده شده است. با توجه به اینکه در محیط‌های شهری تغییر قطبش^۵ پدیده‌ای غالب است، نبود باندهای غیرهم‌قطب^۶ سبب کاهش صحت استخراج عوارض می‌شود. در زمان استفاده از باندهای HH و HV صحت طبقه‌بندی در حد پذیرفته قرار داد.



شکل ۴. خروجی تصویر طبقه‌بندی شده مربوط به سناریوی پنجم (برای توضیحات به جدول ۲ مراجعه شود)

1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
2. Normalized Difference Water Index (NDWI)
3. Normalize Difference Built-Up Index (NDBI)
4. Product
5. Depolarization
6. Cross-Polarized

براساس یافته‌های این پژوهش، می‌توان سه نتیجه‌گیری کلی داشت: نتایج نشان می‌دهد تصاویر سار تمام پلاریمتریک به‌طور مستقل قادرند سطوح نفوذناپذیر با صحت بالایی، حتی در محیط‌های شهری پیچیده استخراج کنند. در صورت نبود تصاویر نوری با کیفیت، به دلیل شرایط آب و هوایی، تصاویر سار تمام پلاریمتریک جایگزین مناسبی برای تصاویر نوری هستند. با در نظر گرفتن دسترسی روزافزون به تصاویر سار، اهمیت این مسئله آشکارتر می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده از شاخص‌های راداری، تصاویر دو پلاریمتریک نیز قادر به تفکیک سطوح نفوذناپذیر شهری هستند. از آنجا که بیشتر سنجنده‌های سار در حالت دو پلاریمتریک فعالیت می‌کنند (مانند ماهواره سنتینل-۲ که از زمان آغاز فعالیت، داده‌های آن به‌طور رایگان در اختیار کاربران در سطح دنیا قرار گرفته است) بیشتر تصاویر راداری موجود، دوقطبی هستند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد استفاده از شاخص‌های راداری، کارایی تصاویر دوپلاریمتریک را افزایش می‌دهد؛ به طوری که ترکیب دوقطبی مناسب به‌همراه شاخص‌های راداری، دقتی نزدیک به تصاویر تمام‌قطبی دارد. در پایان می‌توان گفت باندهای سار پلاریمتریک که پولا ریزه عمودی دارند، در استخراج سطوح نفوذناپذیر شهری کارا تر هستند.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد توسعه فناوری سنجش‌ازدور، تولید تصاویر ماهواره‌ای با ویژگی‌های متفاوت و افزایش دسترس‌پذیری به این داده‌ها، امکان بررسی روند توسعه شهر را در محیط‌های پیچیده‌تر، با دقت بالاتر فراهم می‌کند. بررسی روند توسعه شهر، اطلاعات ارزشمندی در اختیار برنامه‌ریزان و مدیران شهری قرار می‌دهد. نتایج چنین مطالعاتی می‌تواند چگونگی گسترش شهر را پایش و ارزیابی کند تا مشخص شود تغییرات شهر تا چه حد بر توسعه پایدار منطبق بوده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد، آیا محدودیت‌ها و الزامات موجود مانند ممنوعیت ساخت‌وساز در ارتفاعات، حفظ حریم رودخانه و غسل و ساخت‌وساز در اراضی کشاورزی در گسترش شهر در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه تاکنون بیشتر کاربرد سنجش‌ازدور در مطالعات شهری به عکس‌هوایی یا استفاده از سنجنده‌های نوری مانند لندست محدود بوده است، صحت بالای به‌دست آمده از تصاویر سار قطبی نشان می‌دهد این تصاویر قابلیت استفاده در کاربردهای شهری را دارند. بر این مبنای ضروری است در پژوهش‌های آتی، سایر کاربردهای تصاویر سار قطبی در محیط‌های پویای شهری بررسی شود تا برتری‌ها و محدودیت‌های آن در برنامه‌ریزی شهری ایران مشخص شود.

منابع

- زائری امیرانی، آزاده و علیرضا سفیانیان، ۱۳۹۱، تهیه نقشه سطوح نفوذناپذیر به عنوان یک شاخص زیست محیطی، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر، دوره ۲۱، شماره ۸۳، صص ۶۵-۵۹.
- Arnold JR, C. L. and Gibbons, C. J., 1996, *Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator*, Journal of The American Planning Association, No. 62, PP. 243-258.
- Brabec, E., Schulte, S., and Richards, P. L. 2002. *Impervious Surfaces and Water Quality: A Review of Current Literature and Its Implications for Watershed Planning*, Journal of Planning Literature, No. 16, PP. 499-514.
- Deng, C. and Wu, C., 2013, *Examining the Impacts of Urban Biophysical Compositions on Surface Urban Heat Island: A Spectral Unmixing and Thermal Mixing Approach*, Remote Sensing of Environment, No. 131, PP. 262-274.
- Dong, J., Xiao, X., Sheldon, S., Biradar, C., Duong, N. D. And Hazarika, M. 2012, *A Comparison of Forest Cover Maps in Mainland Southeast Asia From Multiple Sources: PALSAR, MERIS, MODIS and FRA*, Remote Sensing of Environment, No. 127, PP. 60-73.
- Dong, J., Xiao, X., Sheldon, S., Biradar, C., Zhang, G., Duong, N. D., Hazarika, M., Wikantika, K., Takeuhci, W., and Moore Iii, B., 2014. *A 50-M Forest Cover Map in Southeast Asia From Alos/Palsar And Its Application on Forest Fragmentation Assessment*, Plos One, 9, E85801.
- Gamba, P., and Houshmand, B., 2001, *An Efficient Neural Classification Chain of Sar and Optical Urban Images*, International Journal of Remote Sensing, No. 22, PP. 1535-1553.
- Guo, H., Yang, H., Sun, Z., Li, X. and Wang, C., 2014, *Synergistic Use of Optical and Polsar Imagery for Urban Impervious Surface Estimation*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, No. 80, PP. 91-102.
- Hu, X., and Weng, Q., 2009, *Estimating Impervious Surfaces From Medium Spatial Resolution Imagery Using the Self-Organizing Map and Multi-Layer Perceptron Neural Networks*, Remote Sensing of Environment, No. 113, PP. 2089-2102.
- Hu, X., and Weng, Q., 2011, *Estimating Impervious Surfaces From Medium Spatial Resolution Imagery: A Comparison Between Fuzzy Classification And LSMA*, International Journal of Remote Sensing, No. 32, PP. 5645-5663.
- Jensen, J. R., and Lulla, K., 1987, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*.
- Jiang, L., Liao, M., Lin, H., and Yang, L., 2009, *Synergistic Use of Optical and Insar Data for Urban Impervious Surface Mapping: A Case Study In Hong Kong*, International Journal of Remote Sensing, No. 30, PP. 2781-2796.
- Lee, J. S., Jurkevich, L., Dewaele, P., Wambacq, P., and Oosterlinck, A., 1994, *Speckle Filtering of Synthetic Aperture Radar Images: A Review*, Remote Sensing Reviews, No. 8, PP. 313-340.
- Leinenkugel, P., Esch, T., and Kuenzer, C., 2011, *Settlement Detection and Impervious Surface Estimation in the Mekong Delta Using Optical and SAR Remote Sensing Data*, Remote Sensing of Environment, No. 115, PP. 3007-3019.
- Li, G., Lu, D., Moran, E., Dutra, L., and Batistella, M., 2012, *A Comparative Analysis of ALOS PALSAR L-Band and Radarsat-2 C-Band Data for Land-Cover Classification in a Tropical Moist Region*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, No. 70, PP. 26-38.
- Longepe, N., Rakwatin, P., Isoguchi, O., Shimada, M., Uryu, Y., and Yulianto, K., 2011, *Assessment of Alos Palsar 50 M Orthorectified Fbd Data for Regional Land Cover Classification By Support Vector Machines*, Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, No. 49, PP. 2135-2150.

- Ma, Q., He, C., Wu, J., Liu, Z., Zhang, Q., and Sun, Z., 2014, *Quantifying Spatiotemporal Patterns of Urban Impervious Surfaces in China: An Improved Assessment Using Nighttime Light Data*, *Landscape and Urban Planning*, No. 130, PP. 36-49.
- Mountrakis, G., Im, J., and Ogole, C., 2011, *Support Vector Machines in Remote Sensing: A Review*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, No. 66, PP. 247-259.
- Qin, Y., Xiao, X., Dong, J., Chen, B., Liu, F., Zhang, G., Zhang, Y., Wang, J., and Wu, X., 2017, *Quantifying Annual Changes in Built-Up Area in Complex Urban-Rural Landscapes From Analyses of PALSAR and Landsat Images*, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, No. 124, PP. 89-105.
- Qin, Y., Xiao, X., Dong, J., Zhang, G., Shimada, M., Liu, J., Li, C., Kou, W., and Moore Iii, B. 2015, *Forest Cover Maps of China In 2010 From Multiple Approaches and Data Sources: PALSAR, Landsat, MODIS, FRA, and NFI*, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, No. 109, PP. 1-16.
- Shimada, M., Isoguchi, O., Tadono, T., Higuchi, R., and Isono, K., *Palsar Calval Summary and Update 2007*, 2007 Ieee International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. Ieee, PP. 3593-3596.
- Statistical Center of Iran, I, 2016, *Population and Housing Censuses [Online]*. Available: <https://www.amar.org.ir/english/population-and-housing-censuses> [accessed 2019.07.01].
- Walker, W. S., Stickler, C. M., Kellndorfer, J. M., Kirsch, K. M., and Nepstad, D. C., 2010, *Large-Area Classification and Mapping of Forest and Land Cover in the Brazilian Amazon: A Comparative Analysis of Alos/Palsar and Landsat Data Sources*, *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, No. 3, PP. 594-604.
- Weng, Q., 2012, *Remote Sensing of Impervious Surfaces in the Urban Areas: Requirements, Methods, and Trends*, *Remote Sensing of Environment*, No. 117, PP. 34-49.
- Weng, Q., and 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*, No. 46, PP. 2397-2406.
- WU, J., and Thompson, J., 2013, *Quantifying Impervious Surface Changes Using Time Series Planimetric Data From 1940 to 2011 in Four Central Iowa Cities, USA*, *Landscape and Urban Planning*, No. 120, PP. 34-47.
- Yang, L., Huang, C., Homer, C. G., Wylie, B. K., and 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*, No. 29, PP. 230-240.
- Yang, L., Jiang, L., Lin, H., and Liao, M., 2009, *Quantifying Sub-Pixel Urban Impervious Surface Through Fusion of Optical and Insar Imagery*, *Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 2, PP.161-171.
- Zaeri Amirani, A., Sofyanian, A., 2012, *Preparation of Infiltration Levels Mapping As An Environmental Indicator*, *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (Sepehr)*, Vol. 21, No. 83, PP. 65-69.
- Zhang, H., Lin, H., and Wang, Y., 2018, *A New Scheme for Urban Impervious Surface Classification From SAR Images*, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, No. 139, PP. 103-118.
- Zhang, H., Zhang, Y., and 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*, No. 18, PP. 148-156.

- Zhang, J., Pu, R., Yuan, L., Wang, J., Huang, W., and Yang, G., 2014a, *Monitoring Powdery Mildew of Winter Wheat by Using Moderate Resolution Multi-Temporal Satellite Imagery*, Plos One, 9, E93107.
- Zhang, Y., Zhang, H., and Lin, H., 2014b, *Improving the Impervious Surface Estimation with Combined Use of Optical and SAR Remote Sensing Images*, Remote Sensing of Environment, No. 141, PP. 155-167.