

طبقه‌بندی کاربری اراضی تالاب انزلی با استفاده از تلفیق تصاویر راداری سنتینل ۱ و آلوس پالسار ۲

سارا عطارچی^{۱*}، مهسا قیساری^۲، سعید حمزه^۲، سید کاظم علوی پناه^۴

۱. استادیار، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۲. کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۳. دانشیار، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۴. استاد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۱۱/۱۲؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

چکیده

تالاب انزلی در ایران به عنوان یکی از تالاب‌های ارزشمند ثبت شده در کنوانسیون رامسر در معرض تهدید عوامل محیطی و انسانی است. در دو دهه اخیر در بین انواع تصاویر ماهواره‌ای، تصاویر سنجنده‌های راداری، نقش مهمی در پایش تالاب‌ها داشته‌اند، زیرا این سنجنده‌ها در تمام شرایط آب‌وهوایی فعالیت می‌کنند و به زبری و رطوبت سطح حساس هستند. با این حال، مشکلاتی نظیر تشابه ضرایب بازپخش بین کلاس‌های مختلف و پردازش‌های نسبتاً دشوار در مقایسه با سنجنده‌های نوری کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. در مطالعه پیش رو قابلیت تصاویر راداری در طبقه‌بندی تالاب انزلی و سه کاربری اصلی اطراف تالاب (زمین‌های کشاورزی، نیزار و مناطق ساخته شده) ارزیابی شد. به این منظور، دو تصویر راداری آلوس پالسار ۲ و سنتینل ۱ در سال ۲۰۱۸ انتخاب شد. پارامترهای بافت از هر دو تصویر استخراج شد. باندهای دو تصویر رادار و لایه‌های بافت استخراج شده به روش تلفیق در سطح ویژگی ادغام شده و سپس، با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی طبقه‌بندی شدند. صحت کلی روش تلفیق در سطح ویژگی معادل با ۷۵ درصد و ضریب کاپا برابر با ۶۲ درصد است. نتایج ارزیابی مربوط به صحت تولیدکننده و کاربر به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۸۳ درصد است. صحت زیاد نتایج به دست آمده نشان‌دهنده قابلیت مناسب تصاویر رادار در طبقه‌بندی و تشخیص بدنه آبی تالاب است، در صورتی که در تفکیک اراضی کشاورزی، نیزار و مناطق ساخته شده خطای بیشتری مشاهده شده است. همچنین، روش تلفیق در سطح ویژگی، شیوه مؤثری برای استفاده هم‌زمان از ویژگی‌های متمایز تصاویر مختلف در طبقه‌بندی کاربری اراضی تالابی است.

کلیدواژه‌گان: تالاب انزلی، تصاویر رادار، تلفیق در سطح ویژگی، سنجش از دور، طبقه‌بندی.

مقدمه

تالاب‌ها از جمله ارزشمندترین اکوسیستم‌های روی زمین محسوب می‌شوند که به سبب فواید کم‌نظیری مانند جلوگیری از سیلاب و تأمین زیستگاه بسیاری از گیاهان و جانوران، باید مورد توجه ویژه اقدامات مدیریتی قرار بگیرند [۱]. تالاب انزلی به عنوان یکی از تالاب‌های مهم بین‌المللی در سال ۱۳۵۴ در فهرست تالاب‌های بین‌المللی کنوانسیون رامسر به ثبت رسید. از جمله اهداف اصلی کنوانسیون رامسر، حفاظت و استفاده پایدار از تالاب‌ها از طریق اقدامات ملی و بین‌المللی برای دستیابی به توسعه پایدار تالاب است [۲]. این تالاب در چند سال اخیر با مشکلات زیست‌محیطی و انسانی فراوانی همراه شده است. تغییر کاربری زمین‌ها با ورود به حریم تالاب، ورود رسوبات کشاورزی از رودخانه‌های منتهی به تالاب، پساب‌های صنعتی و آلودگی‌های شهری بحران‌های اصلی تالاب انزلی به شمار می‌آیند [۳-۵]. متأسفانه به رغم اهمیت فراوان تالاب‌ها تا قرن بیستم میلادی، نصف تالاب‌ها از بین رفته‌اند [۶] و این یک هشدار بزرگ برای قرن حاضر است تا برای حفظ تالاب‌ها و جلوگیری از نابودی آن‌ها اقدام شود. بنابراین، بهبود مدیریت، نظارت مستمر و دقیق تالاب‌ها برای برنامه‌ریزی‌های آتی، امری ضروری است.

یکی از ابزارهای علمی کمک‌کننده به حفظ اکوسیستم تالاب‌ها و اخذ تصمیم‌های مدیریتی نوین برای پایش وضعیت تالاب‌ها و کاربری اطراف آن‌ها، علم سنجش از دور است. امروزه، تصاویر ماهواره‌ای مهم‌ترین منبع اخذ اطلاعات مکانی هستند که می‌توان از آن‌ها در تهیه، تولید و به‌روزرسانی داده‌ها و اطلاعات مختلف محیطی استفاده کرد. سنجنده‌های اخذ تصاویر ماهواره‌ای از منظر طول موجی که در آن فعالیت می‌کنند، متفاوت‌اند. سنجنده‌های نوری^۱ و راداری^۲ دو نوع از اصلی‌ترین انواع سنجنده‌ها هستند که هر یک در محدوده معینی از طیف الکترومغناطیس فعالیت می‌کنند و بسته به نوع کاربرد، مزایا و معایب خاص خود را دارند. بزرگ‌ترین ضعف سنجنده‌های نوری، وجود ابر و مه در تصاویر است [۷] این مسئله به‌خصوص در مناطق ساحلی و نیمه‌گرمسیری که میزان پوشش ابر وسیع و تعداد روزهای بارانی فراوان دارد، باعث محدودیت در استفاده از آن‌ها می‌شود [۳]. رادار دریچه^۳ مصنوعی^۴ نوعی از سیستم‌های سنجش از دور فعال^۴ راداری

است. تصاویر SAR به رغم پیچیدگی‌های تفسیر و پردازش به علت مستقل بودن از شرایط آب‌وهوایی و نور خورشید، در دهه اخیر به طور گسترده‌ای در حال استفاده هستند. طول موج‌های راداری به باندهای طیفی مختلفی تقسیم می‌شوند که از پرکاربردترین باندها می‌توان به باند C در محدوده ۳/۸ تا ۷/۵ و باند L در محدوده ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر اشاره کرد [۸].

سنجنده‌های استفاده‌شده در این تحقیق ترکیب^۵ تصاویر سنجنده سنتینل^۶ فعال در باند C و آلوس پالسالر^۷ در محدوده باند L هستند. دسترسی آسان و رایگان بودن و توان تفکیک مکانی و زمانی نسبتاً مناسب تصاویر این سنجنده‌ها از جمله عوامل اصلی در بررسی کاربرد این تصاویر در مطالعات تالاب است [۹]. با وجود مزایای یادشده در استفاده از سنجنده سنتینل^۶ تجزیه و تحلیل‌های کمی صورت گرفته در این زمینه در مطالعات مربوط به تالاب اندک است [۱۰]. از طرف دیگر، باند L قابلیت نفوذ در تاج پوشش گیاهی مترکم را دارد و به دلیل تمایز مشخصی که بین مناطق گیاهی و غیرگیاهی ایجاد می‌کند، برای استفاده در مطالعات مربوط به تهیه نقشه تالاب‌ها و پوشش زمین بسیار مفید است [۱۱] و [۱۲]. شایان یادآوری است که باند L به طور خاص در تحقیقات مربوط به تالاب‌های ساحلی (تعیین مرز و وسعت تالاب) قابلیت ویژه خود را اثبات کرده است [۱۳-۱۵].

ترکیب سنجنده‌های طی موج‌های متفاوت باعث می‌شود به صورت هم‌زمان از مزایای مربوط به هر طول موج برای نتیجه‌گیری بهتر بهره برد. تکنیک تلفیق^۸ تصاویر در سنجش از دور به معنای ترکیب دو یا چند تصویر مختلف برای ایجاد یک تصویر جدید با استفاده از یک الگوریتم خاص است [۱۶] و استفاده از این تکنیک غالباً باعث افزایش صحت می‌شود [۱۷]. در تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه تالاب و کاربری‌های آن، بیشتر از ترکیب سنجنده‌های رادار و نوری استفاده شده است. به نظر می‌رسد این ترکیب رایج‌ترین ترکیب سنجش از دوری برای تهیه نقشه تالاب‌ها و پایش آن‌ها باشد [۱۸-۲۰]. مطالعات محدودی به ترکیب سنجنده‌های راداری دارای باندهای متفاوت با هم و یا با داده‌های دیگر وجود دارد. در ادامه، به چند نمونه از مقالات در موضوع ترکیب سنجنده‌ها با محوریت تالاب پرداخته می‌شود.

5. Combination
6. Sentinel
7. ALOS PALSAR
8. Fusion

1. Optic
2. Radar (Radio Detecting And Ranging)
3. Synthetic Aperture Radar (SAR)
4. Active

صحت کلی طبقه‌بندی را در نتایج به دست آوردند. همچنین، داده DEM کارکرد زیادی در افزایش صحت طبقه‌بندی داشته است [۲۵].

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، ترکیب تصاویر اپتیک با تصاویر رادار بخش عمده مطالعات صورت‌گرفته در موضوعات مرتبط با تالاب را تشکیل می‌دهد. در این مطالعه برای نخستین‌بار از ترکیب دو سنجنده راداری سنتینل ۱ و آوس پالسا ۲ به روش تلفیق در سطح ویژگی^۸ برای بررسی طبقه‌بندی تالاب انزلی و کاربری‌های اطراف استفاده شده است. با توجه به مطالعات پیشین یادشده، هر دو سنجنده قادر به تشخیص محیط‌های تالابی هستند. همچنین در این تحقیق، از ویژگی بافت استفاده شده است. به علت تأثیر اسپکل^۹، ویژگی بافت یکی از ویژگی‌های مهم استفاده‌شده در طبقه‌بندی محسوب می‌شوند [۲۶]. با توجه به پوشش ابری مداوم منطقه و دسترسی کم به تصاویر نوری مناسب بدون پوشش ابر، روش‌های مبتنی بر تصاویر نوری و یا تلفیق تصاویر نوری با تصاویر راداری، با محدودیت زیادی روبه‌رو است. هدف اصلی این تحقیق، استفاده از دو سنجنده راداری، ارزیابی میزان کارایی و عملکرد ترکیب دو سنجنده به طور مستقل و بدون استفاده از تصاویر نوری است.

مواد و روش

معرفی منطقه مطالعه‌شده

تالاب انزلی یکی از ۲۴ تالاب بین‌المللی ایران است که در قسمت جنوب غربی سواحل دریای خزر در استان گیلان، در عرض جغرافیایی ۲۸ تا ۳۷ شمالی و طول جغرافیایی ۲۵ تا ۴۹ شرقی واقع شده است. این تالاب در حوضه آبریز تالش قرار گرفته و از سمت شمال، به شهرستان انزلی؛ از جنوب، به شهرستان صومعه‌سرا؛ از شرق، به شهرستان رشت و از غرب، به کپورچال و آبکنار انزلی محدود است. تالاب انزلی جزء تالاب‌های طبیعی و آب شیرین کشور بوده و سازمان بین‌المللی حیات پرندگان این تالاب را به عنوان یکی از زیستگاه‌های مهم برای پرندگان تشخیص داده است [۲۳]. تالاب دارای ۱۱ رود اصلی و ۳۰ رود فرعی است که پس از آبیاری مزارع و شالیزارها به همراه جریان‌های سطحی حوضه آبریز تالاب به آن وارد می‌شوند. بخش شرقی تالاب از کم‌عمق‌ترین بخش‌های تالاب و پوشیده از گیاهان آبی‌بن در آب است و آلوده‌ترین بخش آن

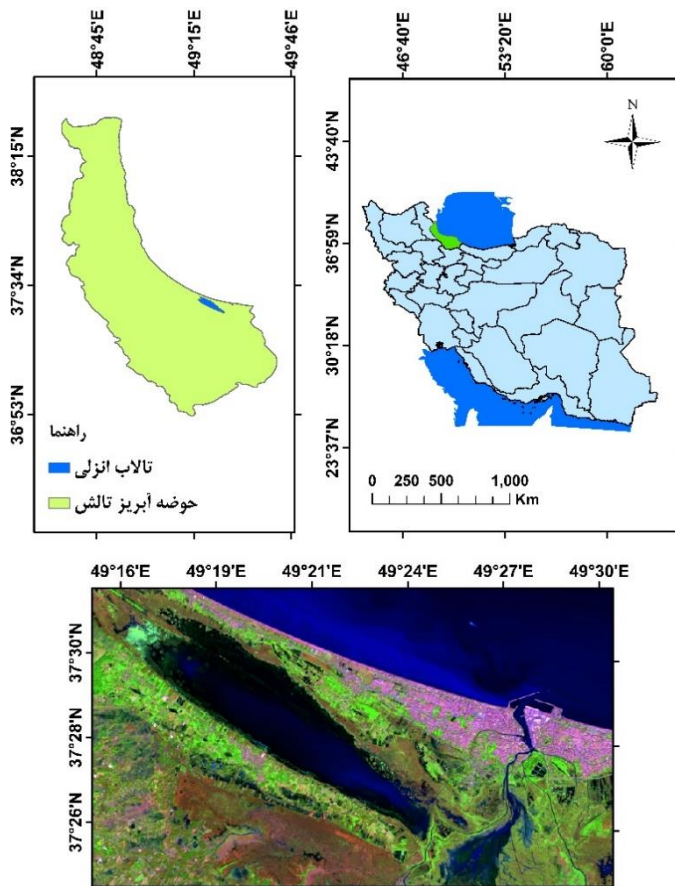
لاروک و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به تهیه نقشه تالاب در یکی از شهرهای جنوبی کانادا پرداختند. آن‌ها از ترکیب تصاویر لندست ۸، آوس پالسا ۱، سنتینل ۱ و داده‌های لیدار برای طبقه‌بندی قسمت‌های مختلف تالاب استفاده کردند. روش طبقه‌بندی استفاده‌شده در این مطالعه، جنگل تصادفی و صحت کلی طبقه‌بندی ۹۷/۶۷ درصد گزارش شده است. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق یادشده بیانگر قابلیت و کارآمدی ترکیب سنجنده‌های به‌کاررفته در طبقه‌بندی تالاب در منطقه جنگلی است [۲۱]. کاپلان و آدوان (۲۰۱۸) تصاویر سنتینل ۱ و ۲ را به منظور تهیه نقشه تالاب در ترکیه تلفیق کردند. شاخص‌های گیاهی^۱ به‌دست آمده از باندهای سنتینل ۲ به همراه باندهای تکی تصاویر هر دو سنجنده وارد فرایند تلفیق شده و در نهایت، با سه روش طبقه‌بندی به بررسی و مقایسه بین آن‌ها پرداخته‌اند. تحلیل‌های آماری این مطالعه نشان‌دهنده صحت زیاد تلفیق تصاویر با استفاده از طبقه‌بندی شیء‌گرا^۲ است [۲۲]. الوانس و همکاران (۲۰۱۰) از ترکیب تصاویر آوس ۱ و رادارست ۲ برای تهیه نقشه زمانی- مکانی از الگوی سیلاب در مجموعه یک تالاب بزرگ در برزیل استفاده کرده‌اند. روش پیشنهادی آن‌ها در مطالعه یادشده طبقه‌بندی شیء‌گرا است. از یافته‌های آن‌ها می‌توان به مفید بودن تلفیق تصاویر چندزمانه^۳ دو سنجنده SAR در تهیه نقشه کاربری اراضی محیط تالابی اشاره کرد [۲۳]. بنکس و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای از تصاویر سنجنده رادارست (باند C) با مدهای مختلف به‌تنهایی و در ادامه مطالعه در تلفیق با DEM^۴ و DSM^۵ برای طبقه‌بندی نواحی تالابی و غیر تالابی استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد با تلفیق DEM و DSM با تصاویر، صحت طبقه‌بندی به روش جنگل تصادفی افزایش می‌یابد [۲۴]. جانکیا و همکاران (۲۰۱۸) چند ترکیب متفاوت از تصاویر پولاریمتریک رادارست ۲، کوپیک برد^۶ و داده‌های لیدار را با روش طبقه‌بندی جنگل تصادفی برای تهیه نقشه تالاب به کار بردند. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که ترکیب تصاویر شدت HH, HV, VH, VV^۷ سنجنده رادارست، متغیرهای پولاریمتری و داده‌های لیدار بهترین

1. Vegetation Index
2. Object based
3. Multi temporal
4. Digital Elevation Model
5. Digital Surface Model
6. Quick Bird
7. Intensity

8. Feature Level
9. Speckle

وابسته به نوسان‌های آب دریای خزر است [۲۷ و ۲۸]. موقعیت جغرافیایی مناطق مطالعه‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

به شمار می‌آید. بخش مرکزی دارای پهنه آبی قابل توجه است و قسمت غربی آن عمیق‌ترین بخش تالاب است که عمق آب



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده در ایران، حوضه آبریز تالش و برشی از منطقه در تصویر رنگی کاذب (۲-۵-۷) از تصویر لندست OLI سال ۲۰۱۸

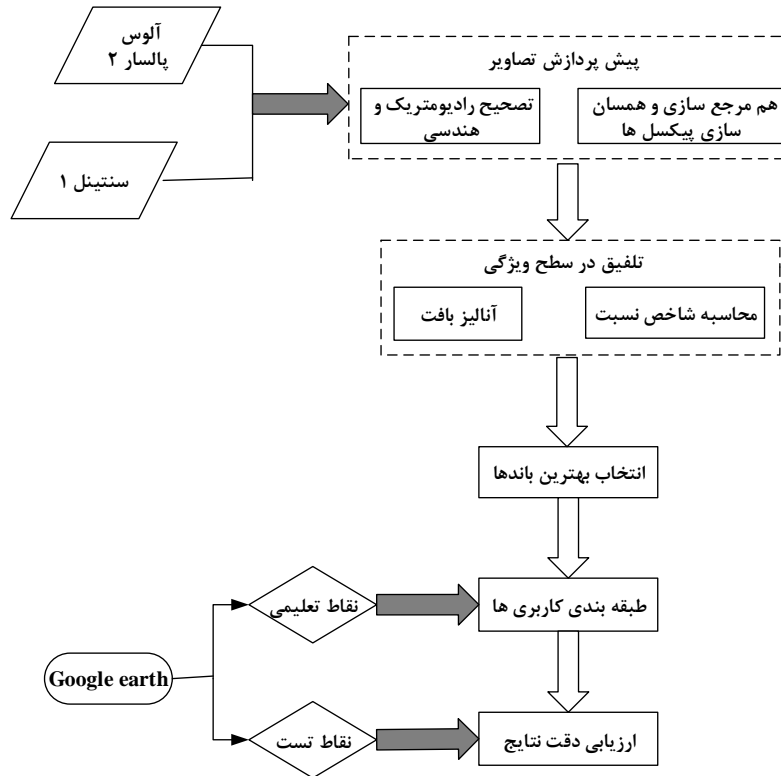
داده‌های استفاده‌شده

در مطالعه حاضر از تصاویر دو سنجنده SAR برای ارزیابی ترکیب باندی متفاوت در شناسایی و طبقه‌بندی بخش‌های مختلف تالاب انزلی و کاربری‌های اطراف تالاب استفاده شده است. سنجنده آلوس ۲ به دنبال سری اول این ماهواره و برای پیگیری مأموریت‌های آلوس ۱ اما به شکلی پیشرفته‌تر در تاریخ ۲۴ می ۲۰۱۴ در باند L در مدار قرار گرفت. تصویر آلوس ۲ استفاده‌شده از سری تصاویر موزاییک با قدرت تفکیک مکانی ۲۳/۵ متر با دو قطب^۲ HH و HV از سایت JAXA^۳ تهیه شد.

سنجنده سنتینل ۱ ماهواره‌ای خورشید آهنگ است که در تاریخ ۳ آوریل ۲۰۱۴ فعال در باند C طیف الکترومغناطیس به فضا پرتاب شد. تصویر سنتینل ۱ استفاده‌شده در این مطالعه حاوی اطلاعات شدت و با قدرت تفکیک ۱۰ متر است که تا حدودی اثر اسپیکل در آن کاهش یافته است. تاریخ دریافت تصویر استفاده‌شده در این مطالعه، ۶ آوریل ۲۰۱۸ و از نوع تصویر سطح یک GRD^۴ در مد^۵ IW و با دو قطب^۶ VH و VV است که از سایت COAH^۶ دانلود شده است. شکل ۲ نمودار گردش کار در این مطالعه را نشان می‌دهد. در ادامه هر مرحله از نمودار توضیح داده شده است.

4. Ground Range Detected
5. Interferometric Wide Swath
6. Copernicus Open Access Hub

1. ALOS 2
2. Dual polarization
3. Japan Aerospace Exploration Agency



شکل ۲. روش انجام کار برای طبقه‌بندی و تلفیق

رقومی به سیگما ناف σ_0 تبدیل شده و به واحد دسی‌بل [dB] بیان می‌شود (رابطه ۱):

$$\sigma_0 = 10 * \log_{10} [DN^2] + CF \text{ [dB]} \quad (1)$$

CF: ضریب واسنجی که برای سنجنده آلوس پالسار ۲ برابر است با ۸۳-

DN: اعداد رقومی تصویر

برای تصاویر VV و VH از سنجنده سنتینل نیز به همین ترتیب مقادیر رقومی تصاویر دریافتی به سیگما ناف در واحد دسی‌بل تبدیل شدند (رابطه ۲):

$$\sigma_0 = 10 * \log_{10} [DN] \quad (2)$$

سپس، به منظور از بین بردن اعوجاج‌های هندسی موجود و حذف خطای ناشی از توپوگرافی در تصویر، تصحیح رادیومتریک-توپوگرافی^۵ با استفاده از مدل رقومی ارتفاع انجام شد [۳۳].

آماده‌سازی لایه‌های ورودی

لازمه تلفیق تصاویر از سنجنده‌های مختلف، هم‌مرجع‌سازی^۶ و همسان‌سازی پیکسل‌های تصاویر است. هم‌مرجع‌سازی

پیش‌پردازش تصاویر

تصحیح رادیومتریک

مهم‌ترین عامل کاهش‌دهنده کیفیت رادیومتریک تصاویر SAR که تأثیر منفی بر کیفیت و نتایج طبقه‌بندی این تصاویر دارد، اسپکل است [۲۹]. در بیشتر موارد از اسپکل با نام نویز یاد می‌شود، در صورتی که اسپکل جزئی از ماهیت تصاویر راداری است [۳۰] در هر صورت، اسپکل‌ها در تصاویر SAR باعث محدودیت‌هایی هستند که باید قبل از هر تجزیه و تحلیل کمی کاهش یابند [۳۱]. در این بخش برای کاهش اثر اسپکل برای هر دو سنجنده از فیلتر Refined Lee استفاده شده است [۳۲].

استخراج ضریب بازپخش^۱

بازپخش^۲ داده‌های SAR دارای دامنه رادیومتریک وسیع با مقادیر اعداد رقومی^۳ تا چند هزار است. تصحیح رادیومتریک، از اولین گام‌های مهم در پردازش تصاویر SAR است که مقادیر هر پیکسل را به ضریب بازپخش تبدیل می‌کند؛ بنابراین، مقادیر بازپخش در تصاویر HH و HV آلوس از اعداد

4. Sigma-nought
5. Radiometric-Terrain Correction
6. Co-registration

1. Backscatter Coefficient
2. Backscatter
3. Digital numbers

جدول ۱. هشت توصیف‌کننده بافت به بیان ریاضی [۳۶]

$\sum_i \sum_j [i - j]^2 P_{ij}$ = کنتراست	$\sum_i \sum_j P_{ij} \log P_{ij}$ = آنترپی
$\sum_i \sum_j \frac{P_{ij}}{1 + [i - j]^2}$ = همگنی	$\sum_i \sum_j (P_{ij})^2$ = گشتاور مرتبه دوم
$\sum_i \sum_j P_{i,j} i - j $ = عدم شباهت	$\frac{\{\sum_i \sum_j (i,j) P_{i,j} - \mu_i \mu_j\}}{\sigma_i \sigma_j}$ = همبستگی
$\frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}^2}{N^2}$ = میانگین	$\sum_i \sum_j (i - \mu) P_{i,j}$ = واریانس

در روابط یادشده، P_{ij} عناصر ماتریس هم‌رخداد و i و j سطر و ستون و P_i و P_j احتمال حاشیه‌ای ماتریس هم‌رخداد در جهت i و j است. همچنین، μ_i ، μ_j ، σ_i و σ_j میانگین و انحراف معیار مقادیر P_i و P_j هستند. این ویژگی‌ها در اندازه ۵*۵ استخراج شدند.

بعد از استخراج ویژگی‌های هر دو تصویر، در مجموع یک لایه متشکل از ۳۸ زیرلایه از دو تصویر با اندازه پیکسلی یکسان با سناریوی تعریف‌شده، تلفیق و سپس، وارد فرایند انتخاب لایه‌های مؤثر بر طبقه‌بندی شدند:

$$\sigma^0_{HH}, \sigma^0_{HV}, \sigma^0_{HH/HV}, \text{Texture}_{HH1-8}, \text{Texture}_{HV1-8}$$

سنیتیل ۱:

$$\sigma^0_{VV}, \sigma^0_{VH}, \sigma^0_{VV/VH}, \text{Texture}_{VV1-8}, \text{Texture}_{VH1-8}$$

طبقه‌بندی به روش جنگل تصادفی^{۱۳}

روش طبقه‌بندی جنگل تصادفی یکی از روش‌های غیر پارامتریک است که طی سال‌های اخیر به دلیل اطمینان زیاد در مدیریت داده‌های پیچیده و دقت قابل رقابت با روش‌هایی دیگر، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [۳۷]. این روش یکی از روش‌های درختی است که برای افزایش دقت، چندین درخت تصمیم آموزش داده می‌شود و نتیجه به دست آمده در واقع پیش‌بینی گروهی از درختان تصمیم‌گیری است [۳۸]. در این مطالعه برشی از محدوده که شامل تالاب انزلی و مقداری از کاربری‌های اطراف تالاب است، انتخاب شد. در مجموع، چهار کلاس کاربری که در جدول ۲ به معرفی آن‌ها پرداخته شده است، طبقه‌بندی شدند.

تصاویر اشاره به آن دارد که پیکسل‌های متناظر در دو تصویر با مختصات معین یک عارضه را نشان دهد [۳۴]. همسان سازی پیکسل‌ها نیز اشاره به اندازه یکسان پیکسل‌های تصاویر برای تلفیق و طبقه‌بندی دارد که برای این کار تصویر آلوس ۲ مرجع تغییر ابعاد پیکسل^۱ قرار گرفت و پیکسل‌های تصویر سنجنده سنتینل به اندازه پیکسل‌های تصویر آلوس ۲ با استفاده از تکنیک نزدیک‌ترین همسایه^۲ تغییر داده شدند. در روش تلفیق در سطح ویژگی، ویژگی‌های متفاوت مانند لبه‌ها و پارامترهای بافت از تصاویر استخراج می‌شود و با یکدیگر ترکیب شده و به عنوان منبع داده‌ای جدید وارد پردازش یا طبقه‌بندی می‌شود. از این‌رو، در این مرحله تصاویر آلوس ۲ با دو قطب HH و HV و سنیتیل ۱ با دو قطب VV و VH برای محاسبه شاخص نسبت^۳ و آنالیز بافت آماده‌سازی شدند. شاخص نسبت همان نسبت طیفی بین دو قطب یک تصویر راداری است و به صورت روابط ۳ و ۴ بیان می‌شود:

آلوس پالسا ر ۲:

$$\text{Ratio} = \frac{\sigma^0_{HH}}{\sigma^0_{HV}} \quad (۳)$$

سنیتیل ۱:

$$\text{Ratio} = \frac{\beta^0_{VV}}{\beta^0_{VH}} \quad (۴)$$

در ادامه و در راستای آماده‌سازی مجموعه لایه‌های ورودی به طبقه‌بندی و افزایش صحت طبقه‌بندی، آنالیز بافت تصاویر انجام شد. ماتریس هم‌رخداد سطح خاکستری^۴ یکی از روش‌های قدرتمند پایش طبقه‌بندی کاربری‌های مختلف زمین است [۳۵] که در این مطالعه از آن استفاده شده است. توصیف‌کننده‌های بافت استفاده‌شده در این پژوهش شامل کنتراست^۵، همگنی^۶، عدم شباهت^۷، آنترپی^۸، گشتاور مرتبه دوم^۹، میانگین^{۱۰}، واریانس^{۱۱} و همبستگی^{۱۲} هستند. در جدول ۱ شیوه محاسبه این ویژگی‌ها آورده شده است.

1. Resampling
2. Nearest Neighbor
3. Ratio Index
4. Gray Level Co-Occurrence Matrix (GLCM)
5. Contrast
6. Homogeneity
7. Dissimilarity
8. Entropy
9. Second Moment
10. Mean
11. Variance
12. Correlation

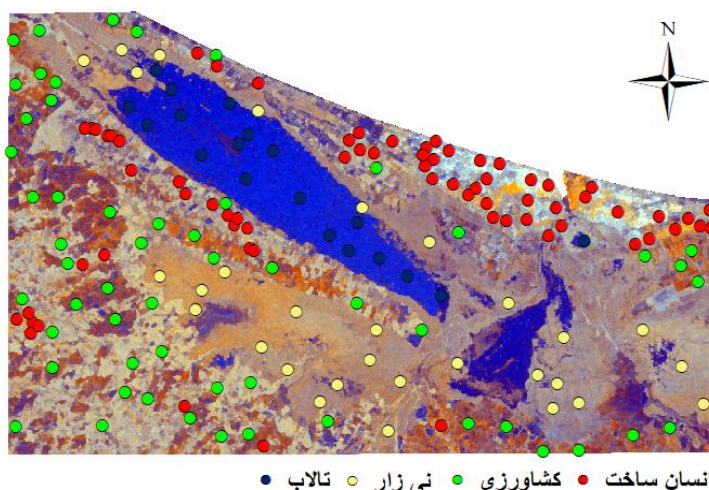
می‌شود [۴۰]. بنابراین باید لایه‌های مؤثر و بهینه را شناسایی کرد تا بتوان صحت نقشه‌های خروجی را افزایش داد. نقاط تعلیمی استفاده‌شده برای طبقه‌بندی و همچنین، نقاط تست برای ارزیابی صحت طبقه‌بندی به طور مستقل از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی زیاد گوگل ارث، استخراج شدند. نقاط به گونه‌ای انتخاب شدند که دارای پراکنش یکنواخت در سراسر منطقه مطالعه‌شده باشند (شکل ۳). از مجموع نقاط انتخابی، ۷۰ درصد نقاط به عنوان نقاط تعلیمی طبقه‌بندی و ۳۰ درصد به عنوان نقاط تست در ارزیابی صحت به کار برده شدند.

جدول ۲. مشخصات کلاس‌های طبقه‌بندی منطقه مطالعه‌شده

توضیح	کلاس کاربری
قسمت اصلی تالاب و بخش کوچک‌تر تالاب در قسمت شرق تالاب اصلی	تالاب
مناطق کشاورزی و باغ‌ها	کشاورزی
ساختمان‌ها، جاده‌ها و کارخانه‌ها	مناطق ساخته‌شده
نیزارهای اطراف تالاب و مناطق حفاظت‌شده	نیزار

انتخاب بهترین باندها

طبقه‌بندی کاربری زمین با تعداد زیاد متغیرهای ورودی معمولاً زمان‌بر و ناکارآمد است [۳۹] و به سبب افزایش حجم داده‌ها، سرعت پردازش کم و در مواقعی باعث کاهش صحت طبقه‌بندی

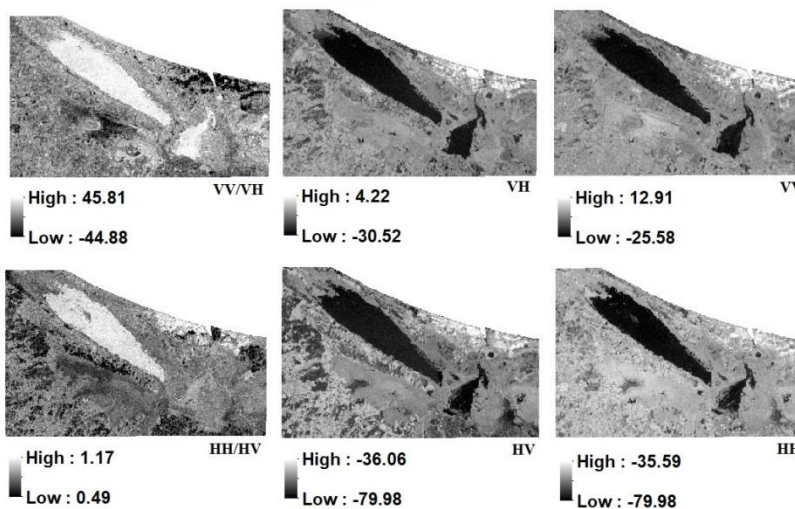


شکل ۳. پراکنش نقاط تعلیمی برای طبقه‌بندی روی برش تصویر آلوس ۲ از منطقه مطالعه‌شده (HH_HV_HH/HV)

سنتینل ۱ به همراه تصاویر شاخص نسبت آن‌ها، نشان داده شده است.

بحث و نتایج

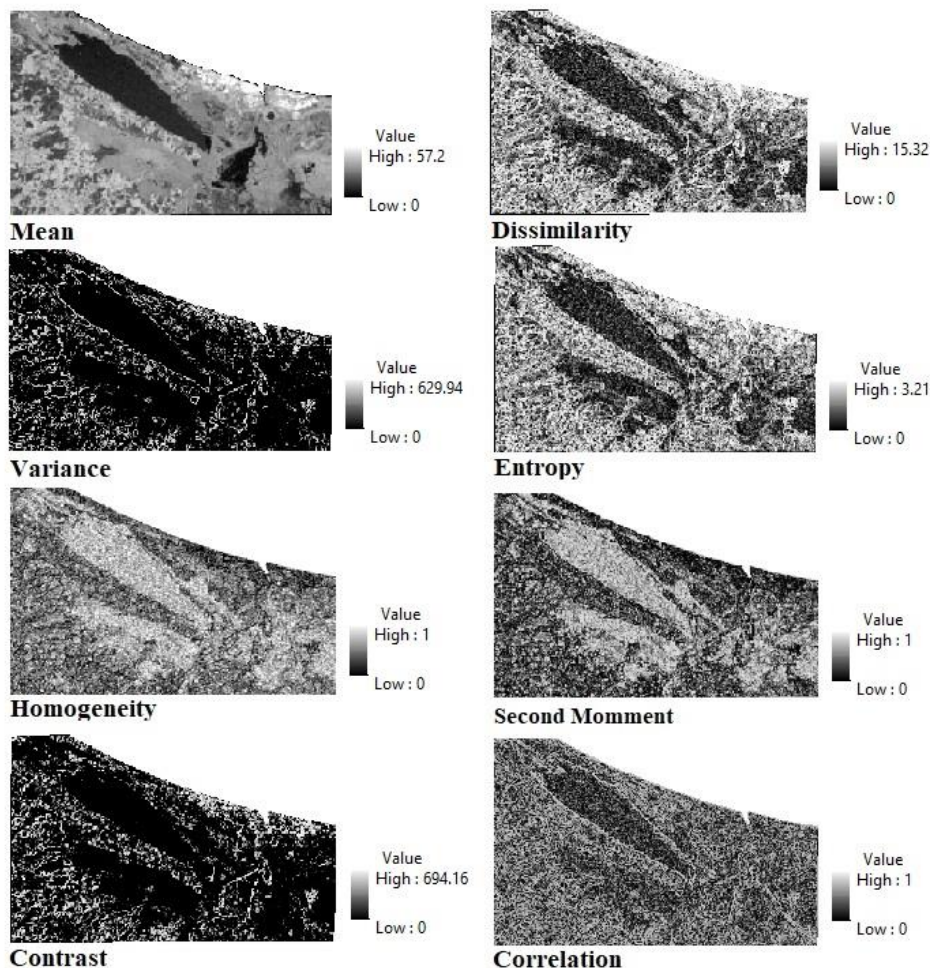
در شکل ۴ تصاویر استفاده‌شده از سنجنده‌های آلوس ۲ و



شکل ۴. تصاویر باندهای قطبی دو سنجنده سنتینل ۱ (VV و VH) آلوس ۲ (HV و HH) به همراه تصاویر شاخص نسبت آن‌ها

زیادی دارد. اعداد بالاتر به رنگ روشن در طبقات انسان‌ساخت (سطوح نفوذناپذیر) و کشاورزی و باغ‌ها دیده می‌شوند. در شش ویژگی از هشت ویژگی بافت، مناطق مرطوب مانند نواحی تالابی و نیزارها (سطوح نفوذپذیر) درجه‌های خاکستری تیره دارند [۴۱].

در شکل ۵ هشت ویژگی بافت یادشده برای قطب HV از سنجنده آلوس ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، هشت ویژگی بافت محاسبه‌شده از تصویر با قطب HV، مقادیر درجه‌های خاکستری یکسانی ندارند. مقادیر کنتراست و واریانس منطقه مطالعه‌شده، تنوع



شکل ۵. نمونه‌ای از هشت ویژگی بافت برای قطب HV از تصویر آلوس ۲

عنوان لایه‌های پراهمیت و دارای بیشترین اطلاعات مفید برای طبقه‌بندی انتخاب شدند. در این میان، چهار لایه اول مربوط به تصویر آلوس ۲ و چهار لایه دوم متعلق به تصاویر سنجنده سنتینل هستند. در واقع، هرچقدر میزان انحراف معیار لایه‌های بیشتر باشد، اهمیت آن لایه در طبقه‌بندی بیشتر است.

طبقه‌بندی تالاب‌ها به دلیل وجود پیکسل‌های مختلط فراوان، فرایندی دشوار است. در واقع، تشابه بازپخش^۲ و یا بازتاب به دلیل تشابه کلاس‌های مختلف در یک مجموعه

در نهایت، از طریق الگوریتم جنگل تصادفی هشت لایه پراهمیت^۱ به عنوان مهم‌ترین متغیرهای ورودی در طبقه‌بندی انتخاب و وارد فرایند طبقه‌بندی شدند:

$$\sigma^0_{HH}, \sigma^0_{HV}, \sigma^0_{HH_{Mean}}, \sigma^0_{HV_{Mean}}, \sigma^0_{VV}, \sigma^0_{VH}, \sigma^0_{VV_{Mean}}, \sigma^0_{VH_{Mean}}$$

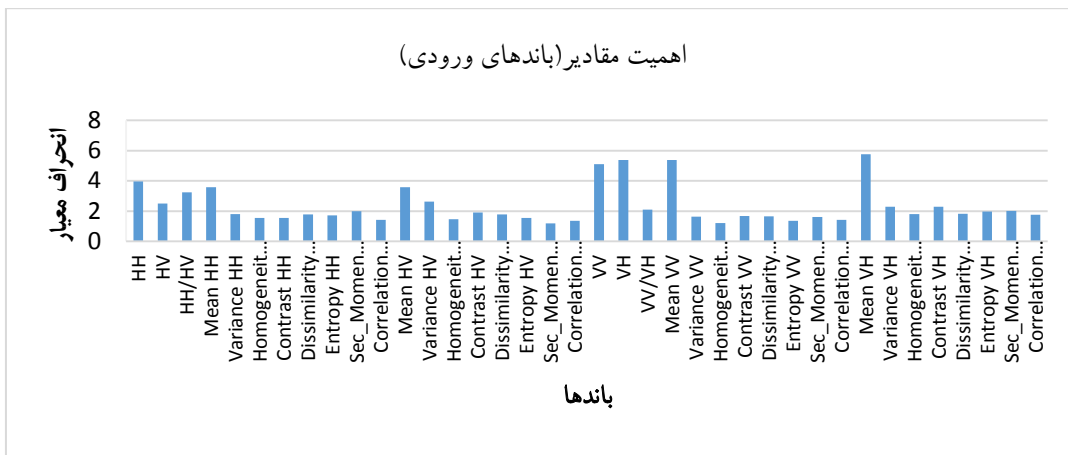
با توجه به نمودار ۱ مجموع ۳۸ لایه ورودی به فرایند انتخاب بهترین باندها، بر اساس انحراف معیار طبقه‌بندی شده‌اند و هریک مقدار انحراف معیار متفاوتی دارند. در این بین، هشت لایه‌ای که بیشترین انحراف معیار را دارند، به

2. Backscatter

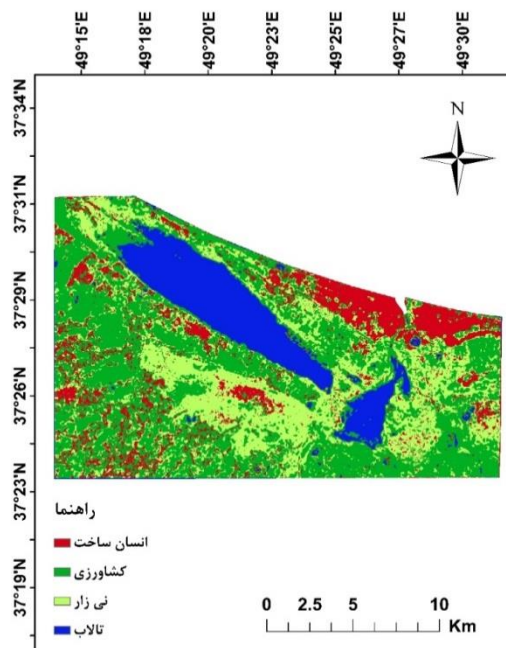
1. RFC Variable Importance

دیگری که اهمیت زیادی دارد، لایه حاصل از نسبت بین دو قطب تصویر آلوس یعنی HH/HV است. می‌توان گفت که قطب HH بیشترین کنتراست را بین تالاب و مناطق بلند اطراف آن فراهم می‌کند. از طرف دیگر، قطب غیر هم‌قطب^۱ (HV) می‌تواند تضاد خوبی بین تالاب و کاربری‌های اطراف به وجود بیاورد [۴۵]. بنابراین، نسبت بین دو تصویر با قطب دو گانه HH/HV یکی از بهترین راه‌های تشخیص تالاب است [۴۴]. شکل ۶ نقشه طبقه‌بندی شده نهایی را بر اساس لایه‌های انتخابی نشان می‌دهد.

تالابی باعث مشکل شدن فرایند طبقه‌بندی می‌شود [۴۲] و این نکته در مورد هر دو بخش اصلی طیف الکترومغناطیس یعنی نوری و مایکروویو صدق می‌کند [۴۴]. طبقه‌بندی تالاب انزلی و کاربری‌های اصلی اطراف آن با در نظر گرفتن اهمیت لایه‌های ورودی بر اساس انحراف معیار صورت پذیرفت. همان‌گونه که در نمودار ۱ نشان داده شد، ویژگی میانگین بافت برای هر دو قطب آن دو تصویر دارای انحراف معیار زیادی است و این نتیجه نشان‌دهنده اهمیت زیاد این ویژگی از بافت در طبقه‌بندی این منطقه است. لایه



نمودار ۱. میزان اهمیت باندهای ورودی به الگوریتم جنگل تصادفی بر اساس مقدار انحراف معیار



شکل ۶. نقشه طبقه‌بندی تالاب انزلی در سال ۲۰۱۸

نتیجه‌گیری

از بین رفتن سرمایه‌های طبیعی و سودمندی همچون محیط تالاب‌ها صدمات جبران‌ناپذیر زیست‌محیطی و اقتصادی در پی خواهد داشت. بنابراین، پایش کاربری‌های اراضی یکی از ابزارهای لازم برای مدیریت در هر سطح و مقیاسی است. نتایج نشان‌دهنده آن است که تالاب انزلی با کمترین درصد خطا توسط تصاویر سار شناسایی و استخراج شد. در این مطالعه، برای نخستین‌بار ارزیابی روش تلفیق در سطح ویژگی با استفاده از تصاویر سار و مستقل از تصاویر نوری برای مجموعه تالاب انزلی انجام گرفت. با توجه به ویژگی‌های اقلیمی و محیطی مناطق شمالی ایران و از طرف دیگر، رایگان و در دسترس بودن تصاویر استفاده‌شده در این مطالعه، به کارگیری بیشتر تصاویر سار برای بررسی روش‌های مختلف طبقه‌بندی و سطوح متفاوت تلفیق توصیه می‌شود. چرا که به‌رغم برداشت‌های متوالی سنجنده‌های نوری در این مناطق، درصد زیاد پوشش ابر باعث شده تا این تصاویر در بسیاری از موارد غیر قابل استفاده باشند. به طور کلی، در بحث مربوط به طبقه‌بندی کاربری یک محیط تالابی، هر دو سری منبع اصلی داده‌ها یعنی مایکروویو و نوری مزیت‌ها و معایبی دارند و به نظر می‌رسد با روش‌های مختلف تلفیق می‌توان بر معایب هر یک تا حد زیادی غلبه کرد. بهره بردن از توانمندی داده‌ها و تصاویر مختلف برای رسیدن به نتایج با حداکثر اطمینان و صحت از اهداف اصلی روش‌های مختلف تلفیق است. در بحث مربوط به کاربرد مورد نظر در این مطالعه، بهره بردن از ویژگی مهم مستقل بودن از شرایط آب‌وهوایی تصاویر راداری در کنار طول موج کوتاه‌تر تصاویر نوری که منجر به تنوع در اطلاعات بازتابی و تشخیص کلاس‌های بیشتر می‌شود، از جمله مزایایی هستند که تلفیق این دو نوع داده فراهم می‌کند. از سوی دیگر، در نظر گرفتن ویژگی‌های محیطی و اقلیمی منطقه مطالعه‌شده هنگام انتخاب تصاویر برای طبقه‌بندی، نقش مهمی در بالا بردن سطح کیفیت و صحت طبقه‌بندی خواهد داشت.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (گرن‌ت شماره ۹۵۸۴۹۰۴۷) به انجام رسیده است.

پس از طبقه‌بندی تصاویر، باید صحت نتایج را بررسی کرد [۴۶]. به این منظور، در جدول ۳ پارامترهای مربوط به ارزیابی خطا شامل خطای تولیدکننده، خطای کاربر، صحت کلی و شاخص کاپای استخراج شده است.

جدول ۳. نتایج ارزیابی صحت نقشه طبقه‌بندی شده

شاخص ارزیابی صحت	کلاس‌های کاربری			
	تالاب	نیزار	کشاورزی	انسان‌ساخت
خطای تولیدکننده	۱۰۰/۰۰	۳۳/۳۳	۶۰/۰۰	۹۴/۴۴
خطای کاربر	۸۳/۳۳	۵۰/۰۰	۸۱/۸۲	۷۳/۹۱
صحت کلی شاخص کاپا	۷۵/۰۰ درصد ۰/۶۳			

با توجه به نقشه خروجی از طبقه‌بندی جنگل تصادفی و نتایج ارزیابی صحت می‌توان گفت که بهترین صحت طبقه‌بندی در بخش تالاب انزلی و ضعیف‌ترین نتیجه مربوط به کلاس نیزار است. همان‌طور که در نقشه واضح است، طبقه کاربری نیزار و مناطق حفاظت‌شده اطراف تالاب (از جمله منطقه بزرگ حفاظت‌شده سیاه کشیم) الگویی کاملاً نویزی دارند. در واقع، طبقه‌بندی جنگل تصادفی حاصل از تلفیق تصاویر آلو ۲ و سنتینل ۱ نتوانسته است کلاس نیزار را به خصوص از کلاس کشاورزی تفکیک کند. بیشترین میزان پیکسل‌های مختلط بین کلاس نیزار و کشاورزی است که دلیل آن شباهت مقادیر بازپخش این دو کلاس به یکدیگر است. نکته دیگر مربوط به کلاس مناطق انسان‌ساخت است. با در نظر گرفتن برش انتخابی محدوده مطالعه‌شده، شهر بندر انزلی در قسمت شمال و در امتداد ساحل دریای خزر واقع شده است. به جز شهر بندر انزلی، چند شهر و روستای کوچک دیگر نیز در محدوده وجود دارد، ولی با توجه به شکل ۶ تنها قسمت متراکم شهری (هسته اصلی شهر) بندرانزلی به خوبی تشخیص داده شده و باقی شهرها و روستاهای کوچک و پراکنده از کاربری‌های دیگر تفکیک نشده است.

از دلایل اصلی این نتایج، ساختار محیطی و اقلیمی منطقه مطالعه‌شده است. میزان زیاد بارش و رطوبت نسبی، وجود خاک مرطوب در بیشتر ماه‌های سال، شرایط ساختاری و ناهمگن بودن منطقه بندر انزلی در کنار حساسیت سنجنده‌های سار به رطوبت زمین، همگنی یا پیچیدگی سطح و زبری آن در نتایج ارزیابی سهم هستند.

- 2015;23(1):61–77.
- [15]. Xie C, Shao Y, Xu J, Wan Z, Fang L. Analysis of ALOS PALSAR InSAR data for mapping water level changes in Yellow River Delta wetlands. *Int J Remote Sens.* 2013;34(6):2047–56.
- [16]. van Genderen JL, Pohl C. Geometric aspects of remote sensing data fusion. In *ACRS 1993: Proceedings of the 14th Asian conference on remote sensing (ACRS): October 12-17 1993, Teheran, Iran, pp. I-3-1-I-3-5 1993 (pp. I-3).*
- [17]. Castanedo F. A review of data fusion techniques. *Sci world J.* 2013;2013.
- [18]. Wang J, Shang J, Brisco B, Brown RJ. Comparison of multirate RADAR and multispectral optical satellite data for wetland detection in the Great Lakes region. *Proc Geomatics era RADARSAT.* 1997.
- [19]. Lin Y, Yue C. China's new national rules on wetland protection. Available SSRN 2517481. 2014.
- [20]. Amani M, Mobasheri MR. A parametric method for estimation of leaf area index using landsat ETM+ data. *GIScience Remote Sens.* 2015;52(4):478–97. [Persian]
- [21]. LaRocque A, Phiri C, Leblon B, Pirotti F, Connor K, Hanson A. Wetland mapping with Landsat 8 OLI, Sentinel-1, ALOS-1 PALSAR, and LiDAR Data in southern New Brunswick, Canada. *Remote Sens.* 2020;12(13):2095.
- [22]. Kaplan G, Avdan U. Sentinel-1 AND Sentinel-2 Data Fusion For Wetlands Mapping: BALIKDAMI, TURKEY. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci.* 2018;42(3).
- [23]. Evans TL, Costa M, Telmer K, Silva TSF. Using ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 to map land cover and seasonal inundation in the Brazilian Pantanal. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens.* 2010;3(4):560–75.
- [24]. Banks S, White L, Behnamian A, Chen Z, Montpetit B, Brisco B, et al. Wetland classification with multi-angle/temporal SAR using random forests. *Remote Sens.* 2019;11(6):670.
- [25]. Jahncke R, Leblon B, Bush P, LaRocque A. Mapping wetlands in Nova Scotia with multi-beam RADARSAT-2 Polarimetric SAR, optical satellite imagery, and Lidar data. *Int J Appl earth Obs Geoinf.* 2018;68:139–56.
- [26]. Clausi DA, Yue B. Comparing cooccurrence probabilities and Markov random fields for texture analysis of SAR sea ice imagery. *IEEE Trans Geosci Remote Sens.* 2004;42(1):215–28.
- [27]. Javedan Kherad A, EsmailiSari A, Bahramifar N. Investigation of persistent organic pollutants residue in sediments of international Anzali wetland, Iran. *J Environ Stud.* 2011;37(57):35–44. [Persian]
- [28]. Modaberi H, Shokoohi, A R. Using eco-hydrologic methods in determining Anzali
- منابع
- [1]. Fickas KC, Cohen WB, Yang Z. Landsat-based monitoring of annual wetland change in the Willamette Valley of Oregon, USA from 1972 to 2012. *Wetl Ecol Manag.* 2016;24(1):73–92.
- [2]. Jones K, Lanthier Y, van der Voet P, van Valkengoed E, Taylor D, Fernández-Prieto D. Monitoring and assessment of wetlands using Earth Observation: The GlobWetland project. *J Environ Manage.* 2009;90(7):2154–69.
- [3]. Ottinger M, Clauss K, Kuenzer C. Large-scale assessment of coastal aquaculture ponds with sentinel-1 time series data. *Remote Sens.* 2017;9(5):440.
- [4]. Ghahraman A, Atar F. Anzali wetland in danger of death (an ecologic-floristic research). *J Environ Stud.* 2003;28:1–38. [Persian]
- [5]. Tavakoli B, Sabetraftar K. Determination of relationships between pollution indices with socioeconomic and ecological factors in watershed area of Anzali wetland. *J Environ Stud.* 2003;28:51_57.
- [6]. Nicholls RJ. Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: changes under the SRES climate and socio-economic scenarios. *Glob Environ Chang.* 2004;14(1):69–86.
- [7]. Guo M, Li J, Sheng C, Xu J, Wu L. A review of wetland remote sensing. *Sensors.* 2017;17(4):777.
- [8]. Mahdavi S, Maghsoodi Y. Fundamentals of radar remote sensing. K.N.Toosi University of Technology; 2016. 290 p. [Persian]
- [9]. Mohammadimanesh F, Salehi B, Mahdianpari M, Brisco B, Motagh M. Wetland water level monitoring using interferometric synthetic aperture radar (InSAR): A review. *Can J Remote Sens.* 2018;44(4):247–62.
- [10]. Chen Y, Qiao S, Zhang G, Xu YJ, Chen L, Wu L. Investigating the potential use of Sentinel-1 data for monitoring wetland water level changes in China's Momoge National Nature Reserve. *PeerJ.* 2020;8:e8616.
- [11]. Ottinger M, Kuenzer C. Spaceborne L-Band Synthetic Aperture Radar Data for Geoscientific Analyses in Coastal Land Applications: A Review. *Remote Sens.* 2020;12(14):2228.
- [12]. Jensen K, McDonald K, Podest E, Rodriguez-Alvarez N, Horna V, Steiner N. Assessing L-band GNSS-reflectometry and imaging radar for detecting sub-canopy inundation dynamics in a tropical wetlands complex. *Remote Sens.* 2018;10(9):1431.
- [13]. Davidson NC, Fluet-Chouinard E, Finlayson CM. Global extent and distribution of wetlands: trends and issues. *Mar Freshw Res.* 2018;69(4):620–7.
- [14]. Mitchell AL, Milne AK, Tapley I. Towards an operational SAR monitoring system for monitoring environmental flows in the Macquarie Marshes. *Wetl Ecol Manag.*

- [38]. Breiman L. Random forests Mach learn. 2001; 45: 5–32.
- [39]. Zakeri H, Yamazaki F, Liu W. Texture analysis and land cover classification of Tehran using polarimetric synthetic aperture radar imagery. Appl Sci. 2017;7(5):452.
- [40]. Fallah A, Kalbi S, Shataee S, Karami O. Determinate ASTER satellite data capability and classification and regression tree and random forest algorithm for forest type mapping. For Wood Prod. 2015;67(4):573–84.
- [41]. Sohrabi Mofrad M, Bakhtyari Kia M. Detecting impervious urban surfaces using the textural properties of Radar imagery. Spat Plan. 2020;10(1):85–104. [Persian]
- [42]. Adeli S, Salehi B, Mahdianpari M, Quackenbush LJ, Brisco B, Tamiminia H, et al. Wetland monitoring using SAR data: A meta-analysis and comprehensive review. Remote Sens. 2020;12(14):2190.
- [43]. Boon PI, Schofield NJ, Brock MA, Bunn SE. National wetlands R&D program: Scoping review. 1997;
- [44]. Brisco B. Mapping and monitoring surface water and wetlands with synthetic aperture radar. Remote Sens Wetl Appl Adv. 2015;119–36.
- [45]. White L, Brisco B, Pregitzer M, Tedford B, Boychuk L. RADARSAT-2 beam mode selection for surface water and flooded vegetation mapping. Can J Remote Sens. 2014;40(2):135–51.
- [46]. Lillesand T, Kiefer RW, Chipman J. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons; 2015.
- wetland environmental water requirement. IRAN-WATER Resour Res. 2019;15:91_104. [Persian]
- [29]. Quegan S, Yu JJ. Filtering of multichannel SAR images. IEEE Trans Geosci Remote Sens. 2001;39(11):2373–9.
- [30]. Richards JA. Remote sensing with imaging radar. Vol. 1. Springer; 2009.
- [31]. Sim CK, Abdullah K, MatJafri MZ, Lim HS. Land cover classification using ALOS imagery for Penang, Malaysia. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing; 2014. p. 12025.
- [32]. Lee J-S, Wen J-H, Ainsworth TL, Chen K-S, Chen AJ. Improved sigma filter for speckle filtering of SAR imagery. IEEE Trans Geosci Remote Sens. 2008;47(1):202–13.
- [33]. Attarchi S. Efficiency evaluation of SAR-derived indices in urban impervious surfaces extraction using full polarimetric image. Geogr Urban Plan Res. 2019;7(4):837–54. [Persian]
- [34]. Shokri M, Sahebi MR. Fusion of synthetic aperture radar data and optic images based on curvelet transform. J Geomatics Sci Technol. 2017;7(2):127–38. [Persian]
- [35]. Kandaswamy U, Adjeroh DA, Lee M-C. Efficient texture analysis of SAR imagery. IEEE Trans Geosci Remote Sens. 2005;43(9):2075–83.
- [36]. Haralick RM, Shanmugam K, Dinstein IH. Textural features for image classification. IEEE Trans Syst Man Cybern. 1973;(6):610–21.
- [37]. Pal M. Random forest classifier for remote sensing classification. Int J Remote Sens. 2005;26(1):217–22.