

مدلسازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری/پوشش اراضی با تحلیل مکانی-زمانی تصاویر سنجش‌ازدور اپتیک و رادار

صبا فرشیدی^۱، فرشید فرنود احمدی^۲، وحید صادقی^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور - گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تبریز
saba.farshidi@yahoo.com

^۲ دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تبریز
farnood@tabrizu.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تبریز
v.sadeghi@tabrizu.ac.ir

(تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۴۰۱، تاریخ تصویب تیر ۱۴۰۱)

چکیده

پوشش‌های سطح زمین در طول گذر زمان همواره دستخوش تغییرات بوده است و چه بسا این تغییرات در آینده نیز رخ خواهند داد. با شناسایی نوع تغییرات و مهم‌تر از همه مدل تغییرات پوشش زمین، نه تنها اطلاعات صحیح و بهنگام از سطح زمین در دسترس خواهد بود، بلکه حتی این امکان نیز فراهم می‌شود تا تغییرات آتی پوشش زمین با در نظر گرفتن قواعد جغرافیایی و الگوهای رفتار پدیده‌ها پیش‌بینی گردد. سنسورهای ماهواره‌ای از جمله ابزارهای مهم و ارزشمند سنجش‌ازدور است که تصاویر با رزولوشن‌های مختلف و داده‌های منظم و گسترده از سطح زمین را ارائه می‌نمایند. از طرفی تلفیق این تصاویر، به ویژه تصاویر راداری و نوری با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد هر یک از آن‌ها، در پیشرفت روش‌های شناسایی و مدلسازی تغییرات نقش مهمی داشته‌است. در تحقیق حاضر، با بکارگیری تصاویر سری زمانی، الگوی رفتار مکانی و زمانی تغییرات پوششی در بازه‌ی زمانی معلوم، ملحوظ شده و بدین طریق تغییرات سطح زمین مدلسازی می‌گردد. سپس تغییرات پوششی زمین برای زمان آتی با بکارگیری مدل مکانی-زمانی ارائه شده، پیش‌بینی می‌شود. تصاویر راداری و نوری با یک رویکرد ابتکاری که مبتنی بر ترکیبی از تلفیق در سطوح ویژگی و تصمیم‌گیری است، با یکدیگر تلفیق می‌شوند. در روش پیشنهادی، تلفیق بر اساس تعریف یک نگاشت خطی بین ویژگی‌های مستخرج از تصاویر راداری و نوری متناظر، در یک سری است. در مقایسه با نتایج طبقه‌بندی الگوریتم RF، نتایج حاصل از پیش‌بینی تغییرات پوشش زمین در این تحقیق، که شامل پوشش آب، پوشش گیاهی، اراضی بایر و شوره‌زار است، به ترتیب بیانگر صحت ۸۲/۵، ۹۴، ۸۶/۸ و ۹۴/۷ درصدی است.

واژگان کلیدی: شناسایی و پیش‌بینی تغییرات، تصاویر سری زمانی، مدلسازی مکانی-زمانی، تلفیق تصاویر اپتیک و رادار

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

فعالیت‌های بشر و تغییر سبک زندگی آن در دهه‌های اخیر، یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در ایجاد تغییرات در سطح زمین و پوشش‌های آن بوده‌است. بیشتر این فعالیت‌ها در راستای افزایش تقاضا برای مواد غذایی، بر خورداری از منابع معدنی موجود در زمین، رفاه و تنوع زیستی بشر بوده است. البته در این میان برخی از تغییرات نیز ناشی از حوادث و بلایای طبیعی بوده و نمی‌توان از آن‌ها چشم‌پوشی نمود [۱]. به طور کلی تغییرات رخ داده در اکوسیستم زمین را به سه دسته‌ی کلی می‌توان تقسیم کرد: (۱) تغییرات فصلی ناشی از فرآیند چرخه فنولوژیکی، (۲) تغییرات تدریجی ناشی از تغییرات اقلیمی و تغییرات مدیریتی و کاربری پوشش زمین و (۳) تغییرات ناگهانی ناشی از بلایای طبیعی همچون سیل و زلزله و طوفان [۲]. داده‌های مکانی و داده‌های توصیفی منسوب به این نوع داده‌ها که در یک مقطع زمانی مشخص جمع‌آوری و مستند می‌شوند، تا زمانی ارزشمند خواهند بود که تغییرات رخ داده در آن‌ها به اندازه‌ای نباشد که موقعیت مکانی یا توصیفی را به طور کامل تغییر دهند. با این وجود اگر نحوه‌ی تغییرات صورت گرفته بر روی اطلاعات مکانی و توصیفی از قبل شناسایی شوند، یا به عبارتی بتوان زمان و نوع تغییرات را پیش‌بینی نمود، امکان برنامه‌ریزی جهت مدیریت بسیاری از امور مربوط به محیط پیرامون همچون؛ مدیریت و برنامه‌ریزی شهری، مدیریت بحران و مدیریت منابع طبیعی و کشاورزی و صنایع غذایی تسریع و تسهیل خواهد شد.

با این حال همواره در مورد مدل‌سازی و شناسایی نوع تغییرات پوششی و کاربری زمین، چالش‌های قابل توجهی وجود داشته‌است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به در دسترس نبودن داده‌های دقیق، گسترده و منظم از سطح زمین و پیچیدگی‌های شناسایی انواع تغییرات و زمان‌بر و پرهزینه بودن روش‌های قدیمی اشاره کرد. خوشبختانه در سال‌های اخیر توسعه سیستم‌های سنجش از دوری در زمینه ارائه تصاویر منظم، با رزولوشن مناسب در باندهای طیفی مختلف، سبب شده‌است تا این سیستم‌ها به ابزاری مناسب و کارآمد جهت پایش تغییرات سطح زمین تبدیل شوند. تحقیقات نشان می‌دهد استخراج اطلاعات پوششی زمین، تحولات زمانی و فنولوژیکی و تغییرات مکانی با

استفاده از تصاویر سری زمانی ماهواره‌ای (SITS)^۱ بهبود یافته است [۳]. تصاویر سری زمانی ماهواره‌ای به مجموعه‌ای از داده‌های تصویری اشاره دارد که توسط یک حسگر ماهواره‌ای برای منطقه جغرافیایی یکسان، در طول زمان منظم به دست می‌آید [۴]. از آنجایی که اندازه‌گیری‌های پیوسته توسط SITS امکان تشخیص تغییر در وضعیت و موقعیت اشیاء جغرافیایی را ممکن می‌سازد، به طور گسترده در نظارت و تجزیه و تحلیل تغییرات کاربری/پوششی زمین، جزایر حرارتی شهری و چرخه کربن اکوسیستم استفاده می‌شود [۳] و [۵]. اگرچه ارزش مجموعه داده‌های بلندمدت^۲ سنجش از دوری برای تشخیص تغییرات کاملاً ثابت شده‌است [۶]؛ ولی روش‌های تشخیص تغییرات مبتنی بر سری زمانی به علت دو چالش بزرگ بسیار محدود هستند؛ اولاً روش‌ها باید امکان تشخیص تغییرات رخ داده در مجموعه داده‌های بلندمدت را که شامل ترکیبی از انواع تغییرات فصلی، تدریجی و ناگهانی هستند، ضمن توجه به نویز ناشی از باقی‌مانده‌های خطاهای هندسی، پراکندگی‌های جوی و اثرات ابری فراهم کنند که این فرآیند شناسایی تغییرات از داده‌های سنجش از دور ساده نیست [۷]. دوماً تکنیک‌های تشخیص تغییرات باید مستقل از حدآستانه‌های خاص یا خط سیر تغییرات باشند. زیرا روش‌های تشخیص تغییرات که نیازمند حدآستانه هستند، اغلب به دلیل ویژگی‌های مختلف طیفی و فنولوژیکی انواع پوشش زمین در طول سری زمانی، نتایج گمراه‌کننده‌ای را ارائه می‌کنند. همچنین تعیین حدآستانه‌ی مناسب برای تشخیص تغییرات در مناطق بزرگ با پوشش‌های مختلف تلاش و دقت قابل توجهی را به دنبال خواهد داشت [۲] و [۸].

علاوه بر این‌ها، اشیاء جغرافیایی (زمینی) دارای سه ویژگی ذاتی در SITS هستند که شامل؛ ناهمگونی مکانی-زمانی^۳، همبستگی مکانی-زمانی^۴ و مقیاس مکانی-زمانی^۵ است که سبب چالش‌هایی در زمینه تجزیه و تحلیل و کاربرد SITS می‌شوند [۹] و [۱۰]. چنین ناهمگونی‌هایی تفاوت در ویژگی‌های مکانی-زمانی برای کلاسی یکسان از اشیاء جغرافیایی را افزایش می‌دهد. توجه به این سه ویژگی ذاتی

^۱ Satellite Image Time series^۲ Long term^۳ Spatiotemporal heterogeneity^۴ Spatiotemporal correlation^۵ Spatiotemporal scale

برای پوشش جغرافیایی، در بهبود دقت تجزیه و تحلیل SITS بسیار مهم هستند [۳]. لحاظ نمودن این ویژگی‌های ذاتی عوارض در فرآیند شناسایی و مدلسازی انواع تغییرات (تدریجی، فصلی و ناگهانی) پوشش‌های زمینی در SITS بسیار موثر خواهد بود.

در مطالعات قبلی، یک رویکرد تشخیص تغییر عمومی برای سری‌های زمانی با شناسایی و مشخص کردن شکست‌های مولفه‌های فصلی و روند موجود در سری زمانی BFAST^۱ پیشنهاد شده است [۲]. این رویکرد با تجزیه سری‌های زمانی به اجزاهای: مولفه روند، مولفه فصلی و باقیمانده به طور مکرر زمان و تعداد تغییرات را تخمین می‌زند و تغییرات را با بزرگی و جهت آن مشخص می‌کند. مشابه با تحقیق قبلی، یک روش تشخیص تغییرات فضایی-زمانی-طیفی برای تشخیص نقاط شکست در داده‌های سری زمانی پیشنهاد شده و در بعد زمانی، سری زمانی به اجزای الگوهای فصلی و روند خطی و نویز تجزیه شده است [۱۱]. در تحقیقی دیگر تغییر ساختاری در مولفه روند و فصلی یک سری زمانی با توجه به همبستگی پیکسل‌های همسایگی و با رویکرد تعمیم‌یافته BFAST شناسایی می‌شود [۱۲]. در این نسخه توسعه یافته BFAST، ابتدا یک مدل روند-فصلی بجای تجزیه سری زمانی به اجزای روند و فصلی اعمال می‌شود. سپس این مدل با اتورگرسیو زمانی و اتورگرسیو مکانی تلفیق می‌شود.

به دلیل اهمیت موضوع شناسایی تغییرات در بسیاری از کاربردهای مرتبط با اطلاعات مکانی، روش‌های متعددی برای تشخیص و شناسایی تغییرات با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه و چندسنسوری فعال و غیرفعال ارائه شده است که به تبع این موضوع، سنجنده‌های متنوعی توسط سازمان‌های دولتی و خصوصی طراحی و بکار گرفته شده است [۱۳]. تصاویر ماهواره‌ای نوری نقش اصلی و پایه‌ای را در امور مربوط به شناسایی تغییرات ایفا می‌کنند و می‌توانند اطلاعات مفیدی در زمینه ماهیت تغییرات پوشش‌های زمینی فراهم نمایند. لیکن این نوع از تصاویر در رابطه با شناسایی تغییرات هندسی و تغییرات فیزیکی بسیار ضعیف عمل کرده و حتی قابلیت تفکیک میان عوارضی که شباهت زیاد از نظر طیفی داشته ولی از نظر الگویی متفاوت هستند را ندارند. در مقابل

تصاویر ماهواره‌ای راداری در رابطه با الگوی هندسی و فیزیکی عوارض و حتی برخی از ویژگی‌های مربوط به جنس عوارض بسیار حساس عمل کرده و در کنار تصاویر نوری می‌توانند در بهبود فرآیند شناسایی تغییرات موثر باشند.

انواع بسیاری از رویکردهای تلفیقی در سنجش از دور با اهدافی متفاوت توسعه یافته است. از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد؛ تلفیق تصاویر چندطیفی و پانکروماتیک که به نام Pan sharpening Fusion معروف است [۱۴]. تلفیق تصاویر فراطیفی و چندطیفی با نام تلفیق فضایی-زمانی [۱۵]، تلفیق تصاویر رادار با دیافراگم مصنوعی (SAR) و تصاویر نوری [۱۶] و تلفیق تصاویر چندفرکانسه یا چندقطبی و یا چندرزولوشنی با هم [۱۷] و [۱۸]. هر کدام از این رویکردهای تلفیقی با توجه به شرایط مسئله می‌توانند مفید واقع شوند. تلفیق تصاویر نوری و SAR از رایج‌ترین انواع تلفیق تصاویر است که در سه سطح کلی، شامل: تلفیق در سطح پیکسل، تلفیق در سطح ویژگی و تلفیق در سطح تصمیم‌گیری می‌باشد [۱۹].

جوشی و همکاران [۲۰]، کاربردهای تلفیق تصاویر سنجش از دوری چندزمانه را در زمینه‌ی نقشه‌برداری و نظارت بر کاربری اراضی بررسی نموده‌اند. در این پژوهش حدود ۱۲ تحقیق در زمینه تلفیق تصاویر مورد نقد و ارزیابی قرار گرفته و به دو دسته‌ی کلی، تلفیق تصاویر قبل از کلاس‌بندی و بعد از کلاس‌بندی تقسیم شده است. در تحقیقی دیگر که توسط واسکی و بندیکتسون [۲۱] انجام شده است، تصاویر راداری و نوری با یک رویکرد ابتکاری مبتنی بر الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در سطح تصمیم‌گیری با یکدیگر تلفیق شده‌اند. ریچی و همکاران [۲۲]، تصاویر راداری و نوری را در سطح تصمیم‌گیری تلفیق نموده و جهت نظارت و شناسایی تغییرات پوشش جنگلی در کاربرد جنگل‌زدایی مورد استفاده قرار داده‌اند. در برخی از کاربردها، استفاده‌ی تنها از یک سطح تلفیق برای رسیدن به نتایج، مطلوب نبوده و لذا ترکیب همزمان دو یا چند سطح مختلف از تلفیق ضروری به نظر می‌رسد. به عنوان نمونه می‌توان به تحقیق انجام گرفته توسط لانگ بوتام و همکاران [۲۳] اشاره نمود که به منظور دستیابی به نتیجه‌ی بهتر از سه سطح ترکیبی، تلفیق در سطح پیکسل، تلفیق در سطح ویژگی و تلفیق در سطح تصمیم‌گیری برای

^۲ Synthetic aperture radar

^۱ Breaks For Additive Seasonal and Trend

تلفیق تصاویر اپتیک و راداری استفاده نموده‌اند [۱۳]. در تحقیقی دیگر، بررسی تغییرات آب‌وهوایی و تغییرات ناگهانی مانند آتش‌سوزی، که از جمله پدیده‌ها و مکانیسم‌های مرتبط با خشکسالی است، برای مطالعه‌ی انواع خشکسالی‌های منطقه‌ای و جهانی، با ترکیب تصاویر سنجش از دوری چندزمانه چندسنسوری انجام گرفته است [۲۴]. از دیگر مطالعات مربوط به استفاده از داده‌های چندزمانه چندسنسوری می‌توان به شناسایی تغییرات کاربری زمین و تخمین جمعیت مناطق مسکونی در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ میلادی اشاره کرد که در آن از آنالیز شی‌منا و تفسیر بصری تصاویر ماهواره‌ای و تصاویر هواپیمای بدون سرنشین استفاده شده است [۲۵].

اغلب تحقیقات انجام‌شده در زمینه شناسایی و مدل‌سازی تغییرات، مربوط به استفاده از الگوریتم‌های نظارت‌شده و یا نظارت‌نشده بوده و معمولاً با تعداد تصاویر پایین و با هدف تشخیص و طبقه‌بندی تغییرات انجام گرفته‌اند. در واقع بدون توجه به روابط همسایگی مکانی و زمانی بین پیکسل‌های تشکیل‌دهنده‌ی پوشش زمین، تغییرات رخ داده را با تصاویر چندزمانه طبقه‌بندی کرده‌اند. لازم به ذکر است که مطالعاتی هر چند اندک در زمینه بررسی روابط همسایگی مکانی و زمانی تغییرات پوششی زمین نیز انجام شده‌است که رفتار تغییرات در گذر زمان را رصد کرده و موقعیت پیکسل تغییر یافته را برآورد می‌نمایند. اما در این مطالعات اقدامی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات در زمان آینده صورت نگرفته‌است.

در این تحقیق جهت مدل‌سازی تغییرات پوشش زمین با در نظر گرفتن روابط همسایگی مکانی و زمانی موجود در پوشش‌ها، که معمولاً ناشی از خصوصیات طبیعی عوارض و نوع سیستم اخذ تصویر ماهواره‌ای از این عوارض است، یک مدل رگرسیونی مکانی-زمانی طراحی شده است. مدل‌سازی تغییرات بر مبنای مولفه‌ی فصلی و روند و باقی‌مانده‌ی سری زمانی بوده و تمامی تغییرات تدریجی و فصلی و ناگهانی طبق این تابع رگرسیونی تعریف‌شده مدل می‌شود. با توجه به مزایای تلفیق تصاویر راداری و نوری در سنجش از دور، استفاده از تصاویر تلفیقی در سری‌های زمانی نیز به جهت نظارت بر پویایی تغییرات پوششی زمین در بازه‌ی زمانی منظم می‌تواند نتایج مناسبی را ارائه کنند. در نتیجه برای ورودی مدل مکانی-زمانی ارائه‌شده، در راستای استفاده‌ی همزمان از مزایا و ویژگی‌های تصاویر غیرفعال نوری و فعال

راداری، سری زمانی ۱۲ ماهه حاصل از تلفیق تصاویر نوری و راداری استفاده شده است. تلفیق این داده‌ها در سطح ویژگی و سطح تصمیم‌گیری جهت تفکیک پوشش‌های زمینی (آب، پوشش گیاهی، اراضی بایر و شوره‌زار) انجام شده‌است. بعد از تفکیک پوشش‌های زمینی و تولید سری زمانی ۱۲ ماهه، تصاویر پوششی تلفیقی برای انجام فرآیند مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات پوششی زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نوآوری‌های تحقیق حاضر شامل سه مورد؛ (۱) نحوه تلفیق و بکارگیری داده‌های چندسنسوری، (۲) نحوه مدل‌سازی تغییرات و (۳) امکان پیش‌بینی تغییرات آتی، است. در تحقیق حاضر یک رویکرد ابتکاری برای تلفیق تصاویر نوری و راداری پیشنهاد شده‌است که از مزایای هر دو نوع داده نامبرده برای استخراج اطلاعات کاربری/پوشش اراضی استفاده می‌کند. مدل‌سازی تغییرات نیز بر مبنای مولفه فصلی و روند و باقی‌مانده سری زمانی بوده و تمامی تغییرات تدریجی و فصلی و ناگهانی طبق تابع رگرسیونی پیشنهادی، مدل می‌شود. همچنین در فرایند مدل‌سازی از تاثیر روابط همسایگی پیکسل‌ها در شناسایی و تفکیک تغییرات واقعی پوشش‌ها از تغییرات نویزی و تصادفی در طول سری زمانی استفاده شده‌است. لازم به ذکر است، روش پیشنهادی محدود به مدل‌سازی تغییرات پوشش/کاربری نبوده، بلکه با بکارگیری مدل طراحی‌شده و تحلیل داده‌های سری زمانی، تغییرات آتی کاربری/پوشش اراضی را نیز پیش‌بینی می‌نماید.

۲- مواد و روش تحقیق

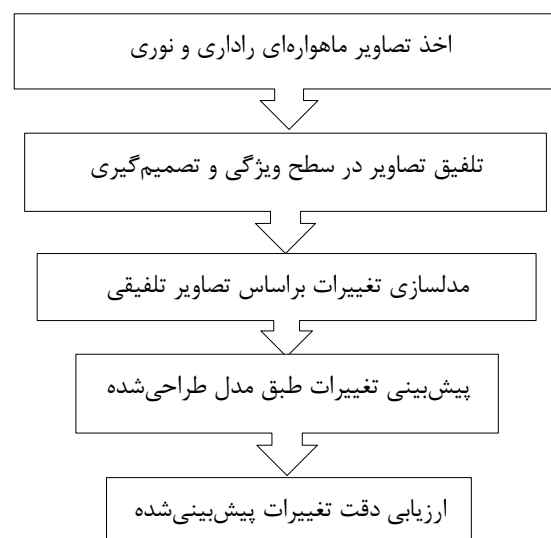
در تحقیق پیشرو سعی بر آن شده‌است تا با ارائه یک مدل مکانی-زمانی، تغییرات رخ داده در پوشش‌های زمین در گذر زمان توسط تصاویر سری زمانی شناسایی و مدل‌سازی شوند. شناسایی و تشخیص تغییرات رخ داده از یک سو و مدل‌سازی مکانی-زمانی این تغییرات بر اساس رفتار پدیده‌ها از سوی دیگر، امری مهم بوده و منجر به دسترسی به داده‌های بهنگام می‌شود. لیکن بایستی به این نکته توجه کرد که شناسایی تغییرات و به ویژه ارائه یک مدل مکانی-زمانی برای این تغییرات مسئله‌ای بسیار پیچیده بوده و نیازمند لحاظ نمودن قواعد مربوطه و رفتار پدیده‌ها است، تا بتواند انواع تغییرات رخ داده در سطح زمین را پوشش دهد.

روش مدلسازی مکانی-زمانی تغییرات پوشش زمین ارائه می‌شود که مبتنی بر بکارگیری روابط منطقی بین پیکسل‌های مجاور در گذر زمان است. به طور کلی می‌توان وابستگی‌های ساختاری یک منطقه را از مشاهده‌ی این همبستگی‌ها و روابط مکانی و زمانی بین داده‌ها استنتاج کرد و در صورتی که این همبستگی‌ها از الگوی خاصی پیروی نمایند، می‌توان از این الگوها در مدلسازی رفتار عوارض استفاده کرد. در نتیجه، نظارت و تجزیه و تحلیل این همبستگی‌های مکانی، می‌تواند در ایجاد مدلی دقیق برای شناسایی تغییرات پوششی موثر واقع شود.

مدل‌های مبتنی بر رگرسیون از جمله رویکردهایی است که در کنار استفاده از تصاویر سری زمانی ماهواره‌ای و تعریف مولفه‌های آن، می‌توانند در مدلسازی انواع تغییرات پوشش‌های زمین با توجه به همبستگی‌های زمانی و مکانی مناسب باشند. در صورت مدل‌شدن تغییرات فصلی و تغییرات تکراری منظم در بازه‌ی زمانی مورد نظر توسط مولفه فصلی و روند سری زمانی، آنچه که به عنوان باقی‌مانده سری زمانی مطرح می‌شود ناشی از مقادیر مدل‌نشده توسط مولفه‌های فصلی و روند است که به عنوان تغییرات در سری زمانی تعریف می‌شود. از آنجایی که تغییرات نویزی و تصادفی و فاقد ارزش نظارتی و همچنین خطاهای سیستماتیک خود مدل نیز در کنار تغییرات واقعی رخ داده در پوشش زمین، جزئی از این مولفه‌ی باقی‌مانده سری زمانی است، تفکیک تغییرات واقعی رخ داده از سایر تغییرات، امری مهم در زمینه مدلسازی تغییرات می‌باشد.

در تحقیق حاضر، با بکارگیری یک مدل رگرسیونی از نوع اتورگرسیو مکانی SAR^۱ [۲۷]، [۲۸]، سعی بر آن شده است تا رفتار پیکسل‌هایی را که کاندیدای قوی برای تغییر واقعی پوشش زمین هستند مدلسازی کرد. شناسایی این تغییرات با تعریف رابطه‌ی مکانی در یک پنجره‌ی همسایگی روی مولفه‌ی باقی‌مانده‌ی تصاویر سری زمانی صورت گرفته‌است. طبق این مدل رگرسیونی همچنین می‌توان علاوه بر همبستگی مکانی هر پیکسل، همبستگی‌های مکانی-زمانی و یا همبستگی زمانی را برای هر پیکسل و همسایه‌های آن تعریف نمود. در این تحقیق، از همبستگی مکانی پیکسل‌های همسایه در مولفه‌ی باقی‌مانده سری زمانی استفاده شده است.

تمرکز اصلی تحقیق حاضر، شناخت و پیش‌بینی رفتار تغییرات پوشش زمین در گذر زمان با توجه به همبستگی مکانی تغییرات با پیکسل‌های همسایه در چارچوب یک مدل مکانی-زمانی است. در این راستا از تلفیق تصاویر راداری و نوری جهت استفاده‌ی همزمان از قابلیت‌های این تصاویر به منظور تفکیک انواع پوشش‌های زمین و شناسایی تغییرات آن‌ها استفاده شده است که روند کلی روش پیشنهادی در شکل ۱ قابل مشاهده است. در ادامه جزئیات روش پیشنهادی در بخش‌های ۱-۲ و ۲-۲ ارائه می‌گردد.



شکل ۱- فرایند کلی روش پیشنهادی

۱-۲- روش پیشنهادی مدلسازی مکانی-زمانی

تشخیص و آشکارسازی تغییرات در طول زمان، اولین گام صحیح و ضروری جهت شناسایی عامل تغییر و درک مکانیسم تغییرات است [۲۶]. اگر تغییرات رخ داده در پوشش زمین در طول زمان، واقعی بوده و مربوط به تغییرات فصلی و فنولوژیکی و یا تغییرات با دوره‌های منظم تکرارشونده نباشند، حتما در همسایگی‌های پیکسل تغییر کرده نیز این تغییرات تأثیرگذار خواهند بود. از طرفی زمانی که یک سنجنده‌ی ماهواره‌ای از سطح زمین تصویری را اخذ می‌کند، معمولاً با توجه به ابعاد زمینی پیکسل سنجنده، پوشش‌های زمینی در بیش از یک پیکسل ثبت خواهند شد. در نتیجه وقوع تغییرات در پیکسل‌های همسایگی عارضه، امری منطقی است. مطالعات قبلی در مورد تغییرات در طول سری زمانی، عمدتاً بدون توجه به این همبستگی‌ها، بر طبقه‌بندی پوشش زمین و تشخیص تغییرات متمرکز بوده‌اند. یافتن این همبستگی‌ها در تحقیق حاضر مورد توجه قرار گرفته و یک

^۱ Spatial Auto Regressive

$$X = (1, t, \sin(2\pi t/f), \cos(2\pi t/f), \dots, \cos(2\pi kt/f))$$

$$\beta = (\alpha_1, \alpha_2, \lambda_1 \cos(\delta_1), \lambda_1 \sin(\delta_1), \dots, \lambda_k \sin(\delta_k))$$

طبق این مدل رگرسیون مکانی-زمانی تعریف‌شده، مولفه‌ی همبستگی مکانی موجود بین باقی‌مانده‌های سری زمانی (μ) ، ابتدا به صورت بهینه با بیشترین احتمال (MLE)^۱ برآورد می‌شود. سپس سایر پارامترهای رگرسیون توسط روش حداقل مربعات تعمیم‌یافته (GLS)^۲ تخمین زده می‌شوند. در انتها براساس این مدل تعریف‌شده، الگوی تغییرات رخ داده در تصاویر سری زمانی در بازه زمانی مطالعاتی $t=1, \dots, 12$ شناسایی شده و بر طبق این الگو، تغییرات پوشش‌های زمین برای زمان آتی پیش‌بینی می‌شود.

انتظار می‌رود که بکارگیری پتانسیل داده‌های سنجنش از دور راداری و نوری در کنار هم، برای تفکیک و شناسایی تغییرات پوشش‌ها در طول زمان، سبب افزایش اعتمادپذیری و بهبود دقت در نتایج شناسایی و مدلسازی تغییرات شود. اگرچه برای استفاده از مدل مکانی-زمانی ارائه‌شده، برای داده‌های نوری یا راداری به تنهایی محدودیتی وجود ندارد. جزئیات روش پیشنهادی برای تلفیق داده‌ها در ادامه در بخش ۲-۲ تشریح می‌گردد.

۲-۲- روش تلفیق داده‌ها

روش‌های متنوعی برای تلفیق داده‌ها توسعه داده شده است. ولی در هر مسئله‌ی کاربردی، جهت انتخاب بهترین و موثرترین روش باید جنبه‌های مختلفی مورد توجه قرار گیرد. به عبارت دیگر قبل از انتخاب روش مناسب برای تلفیق داده‌ها، باید هدف از تلفیق مشخص شده و سپس داده‌های مناسب برای کاربرد مورد نظر انتخاب و متناسب با داده‌های منتخب، بهترین روش تلفیق تعیین شود [۱۳]. در این تحقیق، هدف اصلی از تلفیق داده‌ها، استفاده توأم از دو سنسور با قابلیت تصویربرداری راداری و سنسور با قابلیت تصویربرداری نوری است که می‌تواند تا حد قابل‌قبولی محدودیت‌های ممکن در هر یک از سنسورها را کاهش دهد. در بازه‌ی زمانی مطالعاتی، ابتدا ویژگی‌های تفکیک‌کننده‌ی نوری و راداری با توجه به خصوصیات منطقه، از

برای انجام مدلسازی و پیش‌بینی تغییرات از یک آرایه‌ی سه بعدی (X, Y, t) برای ورودی فرایند مدلسازی استفاده شده‌است که مولفه‌ی X و Y مربوط به ابعاد (طول و عرض) تصاویر سری زمانی و t بیانگر زمان اخذ تصاویر سری زمانی می‌باشد. در این تحقیق $t=12$ لحاظ شده است (دوره ماهانه در یک سال). مدل رگرسیونی SAR از روابط (۱) و (۲) تبعیت می‌کند [۲۷]:

$$Y = X\beta + u, u = \mu w u + \varepsilon \quad (1)$$

$$Y = X\beta + \mu w u + \varepsilon \quad (2)$$

که در این رابطه β بردار مجهولات یا پارامترهای رگرسیون و X ضرایب مجهولات مدل و u باقیمانده رگرسیون و μ ضریب همبستگی مکانی باقی‌مانده‌ها و ε نویز سفید و W ماتریس وزن می‌باشد که برای همسایگی‌های نزدیک برابر با مقدار یک است. با توجه به توابع مدل رگرسیون مکانی (رابطه ۲)، مولفه‌ی فصلی و مولفه‌ی روند موجود در تصاویر سری زمانی به ترتیب از روابط (۳) و (۴) برآورد می‌گردد:

$$S_t = \sum_{k=1}^K \lambda_{jk} \sin\left(\frac{2\pi kt}{f} + \delta_{jk}\right) \quad (3)$$

$$T_t = \alpha_1 + \alpha_2 t \quad (4)$$

با فرض تبعیت کردن مولفه‌ی روند از تابع خطی و همچنین تبعیت مولفه‌ی فصلی از توابع هارمونیک درجه سه $(k=3)$ [۲]، در رابطه (۳) پارامتر λ بیانگر دامنه‌ی تغییرات فصلی، $j = 1, \dots, P$ و پارامتر f فرکانس برداشت داده و پارامتر δ مربوط به فاز مولفه‌ی فصلی می‌باشد و در رابطه (۴) نیز، دو پارامتر α_1 و α_2 نشان‌دهنده‌ی عرض از مبدأ و شیب تابع مولفه‌ی روند در زمان معلوم می‌باشد. در حالت کلی با توجه به توابع مولفه‌های روند و فصلی، تعداد مجهولات برای هر پیکسل در طول بازه‌ی زمانی $t=12$ شامل $P=2k+2$ خواهد بود. با جایگزین کردن این مولفه‌ها در مدل رگرسیون مکانی (رابطه ۲)، بردار ضرایب مجهولات و بردار مجهولات این مدل، طبق روابط تعریف شده در بردارهای X و β برآورد می‌گردند [۲۹].

^۱ Maximum likelihood Estimation

^۲ Generalized least-squares

شده است. جدول (۲) نتایج آزمون (۰.۶ تا ۱ درصد همبستگی پیرسون) حاکی از مناسب بودن میزان همبستگی (رابطه قوی) بین ویژگی‌ها است.

جدول ۲- بررسی همبستگی ویژگی‌های تلفیقی با آزمون پیرسون

ویژگی رادار	ویژگی نوری	ضریب همبستگی (%)
NRPI	WRI	+۷۹/۹۳
VH (db)	NDVI	+۶۹/۹۹

بعد از استخراج ویژگی از منابع داده (راداری و نوری)، تلفیق داده‌ها در سه مرحله کلی اجرا شده است. اول با حد‌آستانه‌های تعریف شده بر روی ویژگی‌های تولید شده از تصاویر، پوشش زمینی مورد نظر جدا می‌شود. حد‌آستانه برای ویژگی‌های راداری و نوری به صورت جداگانه بر اساس الگوی رفتار آن‌ها در طول سری زمانی تعیین می‌شوند. به عنوان نمونه برای تفکیک پوشش آبی، حد‌آستانه برای ویژگی راداری ($NWPI > -0.4$) و برای ویژگی نوری ($WRI \geq 1$) تعیین شده است. در اینصورت پیکسل‌هایی که در این بازه قرار دارند به عنوان پوشش آبی لحاظ شده و مقدار ۱ به آن‌ها نسبت داده شده و برای مابقی پیکسل‌ها، مقدار صفر لحاظ می‌گردد.

در مرحله دوم، مقادیر ویژگی نوری در موقعیت پیکسل‌ها با مقدار ۱ (خروجی مرحله قبل) جایگزین شده است. به دلیل اینکه جداسازی باینری پوشش‌ها با رویکرد مدلسازی تغییرات در این تحقیق، که مدلسازی مکانی-زمانی تغییرات است، هم‌راستا نیست، داشتن اطلاعات پوششی و مقادیر پیکسلی مربوط به همسایگی مکانی پوشش مورد نظر لازم و ضروری است. لذا در مرحله سوم، علاوه بر پیکسل‌های پوشش زمین مورد نظر، برای تعیین مقادیر پیکسل‌های همسایه مکانی و همچنین استفاده از خصوصیات هر دو ویژگی راداری و نوری در پیکسل‌های همسایه، از مقادیر برازش‌شده حاصل از رگرسیون خطی بین دو ویژگی راداری و نوری استفاده شده است. این مقادیر در موقعیت پیکسل‌ها با مقادیر صفر (عدم حضور پوشش مد نظر) مرحله اول جایگزین می‌شود (شکل ۲).

بنابراین در پایان مرحله سوم، تصاویر پوششی/کاربری سری زمانی تلفیقی، برای هر یک از پوشش‌های مورد مطالعه ایجاد شده است. در این تحقیق چهار نوع سری زمانی پوششی (پوشش آبی، اراضی بایر، شوره‌زار و پوشش گیاهی) تولید شده است.

تصاویر راداری و نوری جداگانه استخراج می‌شوند. از تصاویر نوری ویژگی‌های $NDVI^1$ و WRI^2 و از تصاویر راداری ویژگی‌های $NRPI^3$ و بازپراکنش در باند پلاریمتری $VH(db)$ استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۱).

جدول ۱- ویژگی‌های استخراجی از داده‌های راداری و نوری

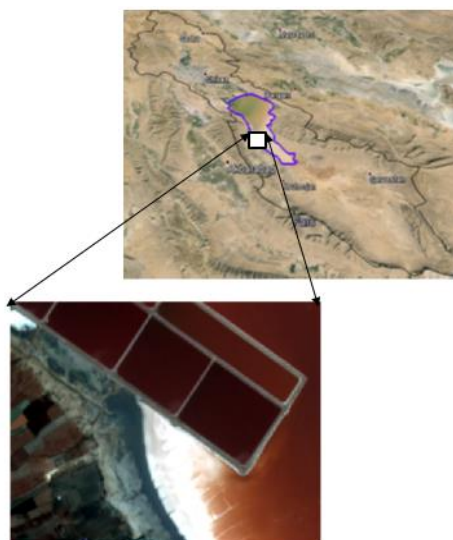
ویژگی	سنجنده	رابطه
WRI	Sentinel-2A	$\frac{Green + Red}{NIR + MIR}$
NDVI	Sentinel-2A	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
NRPI	Sentinel-1	$\frac{VH - VV}{VH + VV}$
VH (db)	Sentinel-1	$10 * \log_{10} VH $

با اینکه ویژگی WRI جهت شناسایی پهنه‌بندی آبی ارائه شده است و به طور ویژه در مواقعی که هدف جداسازی باینری پوشش آب از سایر پوشش‌های موجود باشد، از این ویژگی استفاده می‌شود، ولی در صورت تعیین حد‌آستانه‌ی مناسب، قابلیت تمایز پوشش‌های زمین بایر و تفکیک شوره‌زار از پوشش‌های آبی که بیشتر فصلی هستند را نیز دارد. ویژگی $NDVI$ از جمله ویژگی‌های نوری پرکاربرد در زمینه‌ی پوشش گیاهی و آنالیز سبزی‌نگی و میزان کلروفیل پوشش گیاهی است و در این تحقیق برای تشخیص پوشش گیاهی که اکثراً مربوط به زمین کشاورزی هستند استفاده شده است. از ویژگی راداری $NRPI$ نیز به دلیل حساسیت نسبت به پوشش خاکی یا اراضی بایر ناشی از حضور باند پلاریمتری (VV) و حساسیت نسبت به پوشش گیاهی و آبی ناشی از حضور باند پلاریمتری (VH) در داخل تابع، استفاده شده است. در انتخاب ویژگی‌ها علاوه بر قابلیت آن‌ها در تفکیک‌پذیری پوشش‌های منطقه، به میزان و جهت همبستگی بین ویژگی‌های راداری و نوری نیز توجه شده است تا با حضور همزمان برای شناسایی پوشش زمینی، سبب افزایش قابلیت هم‌دیگر باشند. همبستگی بین ویژگی‌ها با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون آزموده

^۱ Normalized Difference Vegetation Index

^۲ Water Ratio Index

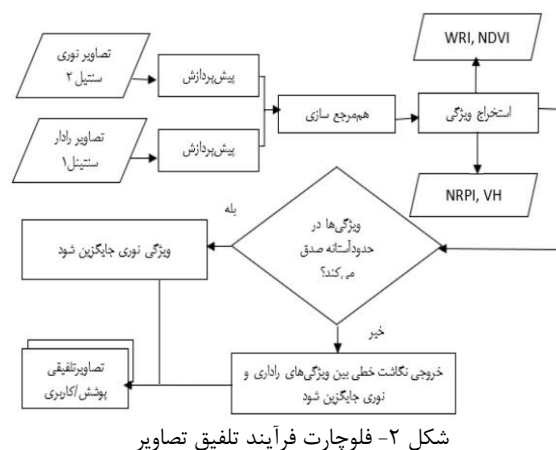
^۳ Normalized Radar Polarimetry Index



شکل ۳- تصویر ماهواره‌ای از تالاب مهارلو (منطقه مورد مطالعه)

۴-۲- داده‌ها و پیش‌پردازش

در این تحقیق از تصاویر راداری سنتینل در حالت $1W$ که کاربردی‌ترین حالت برای مطالعات سطوح زمین است، در فرمت $2GRD$ که حاوی مقادیر حقیقی برای هر پیکسل می‌باشد، استفاده شده‌است. این تصاویر شامل پلاریزاسیون (VV, VH) بوده و در بازه‌ی زمانی $(2020/05/30 - 2019/05/30)$ با دقت تفکیک مکانی ۱۰ متر اخذ شده‌اند. در بازه زمانی مشابه، تصاویر نوری سنتینل ۲ در سطح $2A$ که برای فعالیت‌های تحقیقاتی ایده‌آل‌ترین سطح پردازش است و امکان تجزیه و تحلیل را بدون اعمال اصلاحات اضافی جوی فراهم می‌کند، استفاده شده‌است (جدول ۳). پیش‌پردازش تمام داده‌های سنتینل شامل نمونه‌برداری مجدد باندها در دقت ۱۰ متر بود. از آنجایی که داده‌ها در سطح $2A$ بدون تاثیر اتمسفری ثبت شده است، نیاز به اعمال تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی نداشتند. پیش‌پردازش داده‌های راداری نیز شامل؛ حذف نویز حرارتی، اعمال اطلاعات مداری، کالیبراسیون مقادیر بازپراکنشی، حذف نویز اسپکل با فیلتر Lee و در نهایت تصحیح توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی SRTM در سیستم مختصات UTM می‌باشد. پس از انجام عملیات پیش‌پردازشی بر روی هر یک از داده‌ها، با لحاظ نزدیکترین بازه زمانی ممکن بین داده‌ها، تصاویر نسبت به یکدیگر هم‌مرجع شده و در یک مجموعه چندلایه قرار گرفته است.



شکل ۲- فلوچارت فرآیند تلفیق تصاویر

۳-۲- منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی در این تحقیق، تالاب مهارلو واقع در جنوب شرقی استان فارس در ایران می‌باشد. موقعیت جغرافیایی منطقه، در طول جغرافیایی $29^{\circ} 48' 22''$ شرقی و عرض جغرافیایی $29^{\circ} 27' 27''$ شمالی بوده و در اثر وقوع یک فرونشست ناودیدی به وجود آمده و مساحت آن ۶۰۰ کیلومتر مربع است. بیشترین طول این دریاچه ۲۸ کیلومتر و بیشترین عرض آن ۱۵ کیلومتر است و ژرفای آن در عمیق‌ترین بخش به ۳ متر می‌رسد (شکل ۳). وجود دو منبع نمکی در شرق این دریاچه باعث شوری آب شده‌است. طوری که این تالاب یکی از منابع مهم تامین نمک آبی در سطح کشور می‌باشد. این دریاچه در فصل‌های پرآب به رنگ آبی است. با افزایش دما و تبخیر که با پایین آمدن سطح آب دریاچه همراه است، شوری و غلظت نمک دریاچه نیز افزایش یافته و باعث رشد جلبک‌هایی به نام دونالینیا شده و موجب تغییر رنگ آب دریاچه به صورتی می‌شود. وسعت این تالاب در فصل‌های مختلف سال بنا به میزان بارش‌های جوی و سالانه و تبخیر سطحی زیاد، متفاوت می‌باشد. تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های اخیر منطقه، تغییرات قابل توجهی را در میزان وسعت آب تالاب و پوشش‌های حاشیه‌ی آن به همراه داشته‌است. این دریاچه در سال‌های اخیر دو دوره شاهد خشکی عمده بوده‌است. عمده پوشش‌های زمین در این منطقه علاوه بر پوشش آبی دریاچه، شامل پوشش گیاهی و شوره‌زار اطراف دریاچه و زمین بایر است.

^۱ Interferometric Wide swath

^۲ Ground Range Detected

جدول ۳- مشخصات داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

فرکانس اخذ تصاویر	رزولوشن مکانی	فرمت تصاویر	بازه زمانی تصاویر	نام سنجنده
۳۰ روزه	۱۰ متر	IW / GRD	۲۰۲۰/۰۵/۳۰ - ۲۰۱۹/۰۵/۳۰	Sentinel-1A
۳۰ روزه	(۶۰ و ۱۰) متر	MS / Level2A	۲۰۲۰/۰۵/۳۰ - ۲۰۱۹/۰۵/۳۰	Sentinel-2A/B

۳- ارزیابی نتایج مدلسازی و پیش‌بینی تغییرات پوشش زمین

با استفاده از تصاویر تلفیقی سری زمانی $t=1,2,...,12$ تغییرات منطقه با مدل مکانی-زمانی طراحی شده در این تحقیق، مدلسازی شد. بر اساس مدل مذکور، بدون استفاده از تصویر زمان $t=13$ کلاس‌های پوشش/کاربری اراضی برای زمان $t=13$ پیش‌بینی گردید.

برای ارزیابی صحت نتایج حاصل از مدلسازی و پیش‌بینی تغییرات، از خود تصویر اصلی زمان $t=13$ و الگوریتم نظارت‌شده‌ی جنگل تصادفی (RF) استفاده شد. الگوریتم RF یک الگوریتم مبتنی بر یادگیری ماشین می باشد که برخلاف طبقه‌بندی‌کننده‌های پارامتریک همچون حداکثر احتمال، به جای اینکه آموزش مدل با داده‌های آموزشی شروع شود، رابطه بین داده‌های آموزشی و مجموعه پاسخ به داده‌ها را می‌آموزد و طبق این آموزش طبقه‌بندی را انجام می‌دهد. با بکارگیری الگوریتم RF و داده‌های آموزشی بدست‌آمده از سطح تصویر به صورت تصادفی، تصویر زمان $t=13$ طبقه‌بندی شد. نتایج طبقه‌بندی مذکور و پوشش‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل پیشنهادی (مدل رگرسیونی مکانی-زمانی)، در شکل (۴) ارائه شده‌است.

چنانچه در شکل (۴) مشخص است، پوشش‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل رگرسیون پیشنهادی، تطابق بسیار بالایی با نتایج حاصل از طبقه‌بندی نظارت‌شده‌ی تصویر $t=13$ دارد. این تطابق بالا، بیانگر کارایی قابل توجه مدل پیشنهادی در پیش‌بینی پوشش‌های مختلف سطح زمین است. البته مقایسه بصری این نقشه‌ها برای ارزیابی روش پیشنهادی به تنهایی کافی نبوده و بهتر است از معیارهای کمی و قابل اندازه‌گیری استفاده شود. نتایج ارزیابی کمی روش پیشنهادی در جدول (۴) ارائه شده است.

ارزیابی‌های ارائه‌شده در جدول ۴، بر اساس ماتریس خطا است که منجر به معیارهای ارزیابی صحت، شامل صحت کلی (O.A)، صحت تولیدکننده (P.A) و صحت-کاربر (U.A) شده‌است. ارزیابی برای هر نوع پوشش زمینی

جداگانه و در دو کلاس وجود و عدم وجود یا به عبارتی پیش‌بینی و عدم پیش‌بینی پوشش مورد نظر در زمان آینده انجام گرفته‌است. در واقع تعداد پیکسل‌هایی که بدرستی برای پوشش مورد نظر در زمان بعدی پیش‌بینی شده‌است، در مقایسه با پوشش‌های واقعی زمان بعدی سنجیده می-شوند تا میزان کارایی الگوریتم مشخص شود.

صحت‌های کلی، ۹۴٪، ۸۲/۵٪، ۹۴/۷٪ و ۸۶/۸٪ به ترتیب برای کلاسهای پوشش گیاهی، آب، شوره‌زار و اراضی بایر، بیانگر قابلیت بالای مدل پیشنهادی در پیش‌بینی کاربری/پوشش‌های آبی سطح زمین در منطقه مورد مطالعه است. بغیر از کلاس شوره‌زار که صحت تولیدکننده و کاربر در آن مقدار پایینی است، در مابقی کلاسها، هر دو معیار صحت تولیدکننده و صحت کاربر، مقادیر بالایی است. البته برای کلاس بایر هر چند صحت تولیدکننده پایین است، ولی صحت کاربر مقدار بالایی است (۹۳/۴٪).

برای ارزیابی بهتر و دقیق‌تر روش پیشنهادی، پیش‌بینی حاصل از مدل رگرسیون مکانی-زمانی، نه با نتایج یک طبقه‌بندی بلکه با داده‌های واقعیت زمینی جمع‌آوری‌شده از سطح تصویر $t=13$ مقایسه شد. نتایج حاصل از این ارزیابی برای پیش‌بینی پهنه‌های آبی، پوشش گیاهی، زمین بایر و شوره‌زار، بیانگر میزان ۱۰۰ درصدی معیار صحت کاربر برای پیش‌بینی پوشش آبی و میزان ۹۸/۶ درصدی صحت کاربر در پیش‌بینی پوشش گیاهی و میزان ۱۰۰ درصدی صحت کاربر برای پیش‌بینی پوشش زمین بایر و در نهایت میزان ۶/۸ درصدی صحت کاربر برای پیش‌بینی پوشش شوره‌زار بود. به طور کلی، میانگین صحت کلی برای پیش‌بینی پوشش‌ها بر اساس هر دو منبع ارزیابی، برای پوشش‌های آبی، گیاهی، اراضی بایر و شوره‌زار به ترتیب برابر ۸۶٪، ۹۷٪، ۸۹٪ و ۹۵٪ حاصل شد.

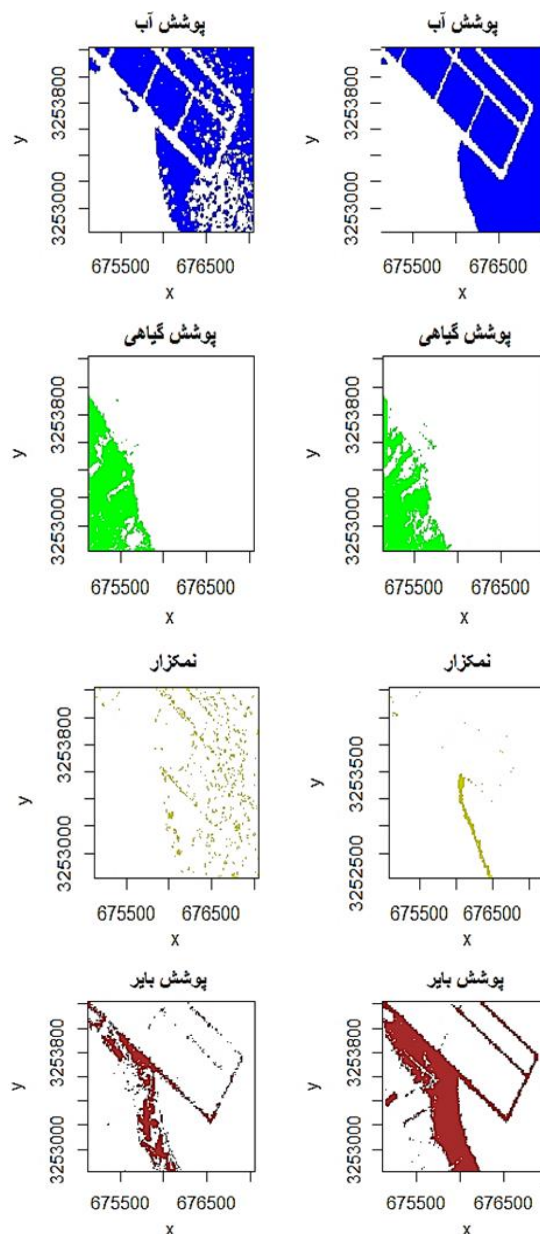
ب	غیر آب	آب	مجموع	U.A.
غیر آب	۱۱۸۲	۳۶۷۵	۱۴۸۵۷	۷۵/۳
آب	۱۰۲۷	۱۰۹۹۶	۱۲۰۲۳	۹۱/۵
مجموع	۱۲۲۰۹	۱۴۶۷۱	۲۶۸۸۰	-
P.A.	۹۱/۶	۷۵	-	O.A. = ٪۸۲/۵

ج	غیرشوره‌زار	شوره‌زار	مجموع	U.A.
غیرشوره‌زار	۲۵۴۳۷	۴۳۵	۲۵۸۷۲	۹۸/۳
شوره‌زار	۹۹۱	۱۷	۱۰۰۸	۱/۷
مجموع	۲۶۴۲۸	۴۵۲	۲۶۸۸۰	-
P.A.	۹۶/۳	۳/۸	-	O.A. = ٪۹۴/۷

د	غیر بایر	بایر	مجموع	U.A.
غیر بایر	۲۰۷۶۷	۳۳۶۵	۲۴۱۳۲	۸۶/۱
بایر	۱۸۱	۲۵۶۷	۲۷۴۸	۹۳/۴
مجموع	۲۰۹۴۸	۵۹۳۲	۲۶۸۸۰	-
P.A.	۹۹/۱	۴۳/۳	-	O.A. = ٪۸۶/۸

۴- بحث و نتایج

رگرسیون تصاویر یکی از رویکردهای متداولی است که در شناسایی تغییرات داده‌های بلندمدت سنجش از دوری به کار گرفته می‌شود. این رویکرد از لحاظ تئوری از مزایای ارزشمندی همچون کاهش اثرات زاویه‌ی تابش متفاوت و پراکندگی‌های اتمسفری و جوی برخوردار است. استفاده از این تکنیک برای شناسایی و مدل‌سازی تغییرات با توجه به تجزیه و تحلیل مولفه‌های سری زمانی داده‌های سنجش از دور، می‌تواند تا حد قابل‌قبولی چالش‌های موجود در مدل‌سازی انواع تغییرات (تدریجی، فصلی، ناگهانی) را تعدیل کند. در مدل‌های مبتنی بر رگرسیون، بررسی میزان همبستگی پارامترها نیز در طول سری زمانی ممکن است. از جمله در مدل اتورگرسیون مکانی، امکان تخمین و برآورد میزان همبستگی مکانی و زمانی مستقیم بین مشاهدات تصویر (پیکسل‌های تصویر) و یا همبستگی مکانی و زمانی بین پارامترهای وابسته و مستقل در طول سری زمانی ممکن است. این همبستگی‌ها می‌تواند با تعریف روابط همسایگی نزدیک بین داده‌ها براساس یک المان وزن بررسی شوند.



شکل ۴- مقایسه پوشش‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل رگرسیون مکانی-زمانی پیشنهادی (در سمت چپ)، با پوشش‌های حاصل از طبقه‌بندی نظارت‌شده توسط الگوریتم RF برای تصویر t=13 (در سمت راست)

جدول ۴- ارزیابی پیش‌بینی پوشش‌ها در مقایسه با طبقه‌بندی RF در جداول (الف، ب، ج، د). آخرین مولفه در هر جدول، صحت کلی است

الف	غیر گیاه	گیاه	مجموع	U.A.
غیر گیاه	۲۲۲۰۴	۴۷۳	۲۲۶۷۷	۹۷/۹
گیاه	۱۱۵۲	۳۰۵۱	۴۲۰۳	۷۲/۶
مجموع	۲۳۳۵۶	۳۵۲۴	۲۶۸۸۰	-
P.A.	۹۵/۱	۸۶/۶	-	O.A. = ٪۹۴

تغییرات تدریجی و فصلی و ناگهانی طبق این تابع رگرسیونی طراحی شده، یک پنجره همسایگی مکانی مکعبی ($3 \times 3 \times 12$) تعریف شد. کل تصویر با مکعب‌های آرایه‌ای (مکانی-زمانی) تعریف شده، جاروب شده است. در هر حرکت با برآورد پارامترهای رگرسیون از یک طرف و اعمال این برآوردها بر روی داده‌های معلوم از طرف دیگر، پوشش‌های زمین در زمان $t=13$ پیش‌بینی شد.

۵- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف توسعه‌ی روشی جهت مدلسازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری و پوشش اراضی سطح زمین انجام گرفته و در این راستا تصاویر سری زمانی نوری و راداری با یکدیگر تلفیق شده و در یک مدل رگرسیون مکانی-زمانی مورد تحلیل قرار گرفته است. از مهم‌ترین نتایج و دستاوردهای تحقیق حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- هر چند وقوع تغییرات ناگهانی در زمینه‌ی مدلسازی تغییرات در اکثر زمینه‌ها یک پیشامد مزاحم می‌باشد، براساس رویکرد ارائه شده در این تحقیق با رصد منطقه مورد نظر با تصاویر سری زمانی در فرکانس‌های مختلف (روزانه، ماهانه، سالانه) وابسته به تغییرات منطقه و با نظارت بر مقادیر مولفه‌ی باقی‌مانده سری زمانی، می‌توان این تغییرات را مدل کرده و بسته به هدف نهایی، بر روی مولفه‌های دیگر در مورد تغییرات تصمیم‌گیری نمود.
- مدل مکانی-زمانی بکار گرفته شده در این تحقیق دارای پارامترهای انعطاف‌پذیری است، یعنی هر کدام از پارامترها و مولفه‌ها در صورت نیاز قابل حذف و یا جایگزینی است. برای مثال در مدلسازی تصاویر سالانه مولفه‌های فصلی از مجهولات کنار گذاشته می‌شود، بدون اینکه ساختار کلی مدل تغییر کند.
- تلفیق داده‌ها با استفاده از ویژگی‌های راداری و نوری براساس رویکرد پیشنهادی، با توجه به متفاوت بودن نوع تاثیرپذیری هر کدام از این ویژگی‌ها در تعامل با انواع پوشش‌های زمینی، اعتمادپذیری در مورد تفکیک و شناسایی پوشش‌ها توسط حدآستانه‌های تعریف شده را افزایش می‌دهد.
- روش پیشنهادی تنها محدود به مدلسازی تغییرات پوشش‌های زمین نبوده، بلکه با بکارگیری مدل طراحی شده و تحلیل داده‌های سری زمانی، تغییرات آتی پوشش‌های سطح زمین نیز پیش‌بینی می‌شود. با وجود تغییرات اقلیمی و

در روش پیشنهادی، فرآیند تلفیق تصاویر برای هر یک از پوشش‌های زمینی، در سه مرحله‌ی کلی اجرا شده است. در فرآیند تلفیق، از حدآستانه‌هایی که بر مبنای رفتار ویژگی‌های مستخرج از تصاویر، در طول زمان است، استفاده شده است. حدودآستانه برای همه پوشش‌های زمینی مورد نظر، بصورت تجربی و با تجزیه و تحلیل رفتار ویژگی‌های راداری و نوری استخراج شده، در طول فصول (بارشی و خشک) تعیین شدند. سپس با توجه به مناسب بودن میزان همبستگی ویژگی‌های راداری و نوری مطابق با آزمون پیرسون، برای تفکیک پوشش‌های مورد نظر، باهم به کار گرفته شدند. از آنجایی که ویژگی‌های استخراجی از سنجنده نوری براساس رفتار طیفی عوارض در باندها و بدون توجه به جنس و ماهیت هندسی و فیزیکی تولید می‌شوند، در حالی که ویژگی‌های استخراجی از سنجنده راداری با توجه به رفتار عوارض در کانال‌های پلاریمتری و در نظر گرفتن رفتار هندسی و خاصیت دی‌الکتریکی و همچنین جنس عوارض تولید می‌شوند. در نتیجه حضور هر دو نوع ویژگی‌های راداری و نوری تصاویر ماهواره‌ای به صورت مکمل در کنار یکدیگر در شناسایی و تفکیک پوشش‌های زمین کارآمد بوده و سبب کاهش ابهام در جداسازی پوشش‌ها از یکدیگر می‌شود. به عنوان یک نمونه از مزایای این تلفیق، می‌توان به تفکیک پوشش آب سبز (آبی) که به علت رشد جلبک و خزه‌های آبی به رنگ سبز دیده می‌شود) از پوشش‌های گیاهی (زمین کشاورزی) در تحقیق حاضر اشاره کرد. به علت وجود شباهت طیفی بین این دو نوع پوشش، استفاده از ویژگی‌های باند نوری تصاویر ماهواره‌ای به تنهایی کارساز نبود. ولی با تلفیق ویژگی‌های راداری و نوری، به علت حساسیت به میزان رطوبت و نوع فیزیک عوارض در تصاویر راداری، این دو نوع پوشش با دقت قابل قبولی از همدیگر تفکیک شد.

در این تحقیق، با کمک سری زمانی تلفیقی در بازه زمانی ۱۲ ماهه، از یک رابطه‌ی اتورگرسیو مکانی مبتنی بر مولفه‌ی فصلی و مولفه‌ی روند سری زمانی بهره گرفته شد. با کمک توابع و روابط منطقی، تغییرات فنولوژیکی و زمانی در ضمن تعیین همبستگی مکانی تغییرات رخ داده در پوشش زمین، توسط مولفه‌ی باقی‌مانده مدلسازی شد. به این ترتیب هم مولفه‌های سری زمانی با این رویکرد مدل شده و در شناسایی تغییرات شرکت داده شد، و همچنین همبستگی بین باقی‌مانده‌های مدل که بیانگر تغییرات در سری زمانی است مدلسازی شد. در نهایت، با در نظر گرفتن تمامی

حتی گاهی تغییرات ناگهانی مانند خشکسالی‌های دوره‌ای در منطقه مورد مطالعه، رویکرد ارائه‌شده در این تحقیق همچنان در شناسایی تغییرات اکثر پوشش‌ها موفق عمل کرده است. برای تحقیقات آینده، می‌توان پیش‌بینی تغییرات برای یک دوره‌ی زمانی بلندمدت در آینده ($t=13, \dots, n$) با در نظر گرفتن روابط همبستگی مکانی-زمانی، به جای همبستگی مکانی در تعریف روابط همسایگی، اجرا کرد. همچنین با توجه به اینکه نتایج حاصل از حدآستانه‌گذاری

تجربی به مهارت کاربر وابسته است، می‌توان علاوه بر روش حدآستانه‌گذاری تجربی، از روش‌های خودکار متنوعی که در این زمینه ارائه شده‌است، در مرحله‌ی تلفیق داده‌ها استفاده نمود. در تلفیق داده‌های سنجنش از دوری راداری و نوری، به‌جای استفاده از تصاویر پلاریمتری راداری در باند C می‌توان از سایر تصاویر راداری با باندهای X و L نیز به جهت نفوذپذیری و دقت مکانی متفاوت آن‌ها استفاده کرد.

مراجع

- [1] D. Liu, M. Kelly, and P. Gong, "A spatial-temporal approach to monitoring forest disease spread using multi-temporal high spatial resolution imagery," *Remote Sens. Environ.*, vol. 101, no. 2, pp. 167–180, 2006, doi: 10.1016/j.rse.2005.12.012.
- [2] J. Verbesselt, R. Hyndman, G. Newnham, and D. Culvenor, "Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series," *Remote Sens. Environ.*, vol. 114, no. 1, pp. 106–115, 2010, doi: 10.1016/j.rse.2009.08.014.
- [3] W. Xi, S. Du, Y. C. Wang, and X. Zhang, "A spatiotemporal cube model for analyzing satellite image time series: Application to land-cover mapping and change detection," *Remote Sensing of Environment*, vol. 231, 2019, doi: 10.1016/j.rse.2019.111212.
- [4] T. Guyet and H. Nicolas, "Long term analysis of time series of satellite images," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 70, pp. 17–23, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.patrec.2015.11.005.
- [5] Z. Zhu et al., "Including land cover change in analysis of greenness trends using all available Landsat 5, 7, and 8 images: A case study from Guangzhou, China (2000–2014)," *Remote Sens. Environ.*, vol. 185, pp. 243–257, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.rse.2016.03.036.
- [6] K. M. De Beurs and G. M. Henebry, "A statistical framework for the analysis of long image time series," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 26, no. 8, pp. 1551–1573, Apr. 2005, doi: 10.1080/01431160512331326657.
- [7] D. P. Roy, J. S. Borak, S. Devadiga, R. E. Wolfe, M. Zheng, and J. Descloitres, "The MODIS Land product quality assessment approach," *Remote Sens. Environ.*, vol. 83, no. 1–2, pp. 62–76, Nov. 2002, doi: 10.1016/S0034-4257(02)00087-1.
- [8] D. Lu, P. Mausel, E. Brondízio, and E. Moran, "Change detection techniques," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 25, no. 12, pp. 2365–2401, 2004, doi: 10.1080/0143116031000139863.
- [9] Q. Yu, P. Gong, N. Clinton, G. Biging, M. Kelly, and D. Schirokauer, "Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery," *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, vol. 72, no. 7, pp. 799–811, Jul. 2006, doi: 10.14358/PERS.72.7.799.
- [10] M. A. White et al., "Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 15, no. 10, pp. 2335–2359, 2009, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x.
- [11] Y. Lin, L. Zhang, N. Wang, X. Zhang, Y. Cen, and X. Sun, "A change detection method using spatial-temporal-spectral information from Landsat images," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 41, no. 2, pp. 772–793, 2020, doi: 10.1080/01431161.2019.1648905.
- [12] M. Lu, E. Pebesma, A. Sanchez, and J. Verbesselt, "Spatio-temporal change detection from multidimensional arrays: Detecting deforestation from MODIS time series," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 117, no. May, pp. 227–236, 2016, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.007.
- [13] Ebadi. H, Sadeghi.V, and Farnood Ahmadi. F. 2021. Change Detection in Multi-Temporal Remote Sensing Images. K.N.Toosi University press.
- [14] Y. Xing, M. Wang, S. Yang, and L. Jiao, "Pan-sharpening via deep metric learning," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 145, pp. 165–183, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2018.01.016.
- [15] Q. Wei, J. Bioucas-Dias, N. Dobigeon, and J.-Y. Tourneret, "Hyperspectral and Multispectral Image Fusion Based on a Sparse Representation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 53, no. 7, pp. 3658–3668, Jul. 2015, doi: 10.1109/TGRS.2014.2381272.

- [16] M. Hirschmugl, C. Sobe, J. Deutscher, and M. Schardt, "Combined use of optical and synthetic aperture radar data for REDD+ applications in Malawi," *Land*, vol. 7, no. 4, pp. 1–17, 2018, doi: 10.3390/land7040116.
- [17] G. Simone, F. C. Morabito, and A. Farina, "Multifrequency and Multiresolution Fusion of SAR Images for Remote Sensing Applications," *Int. Conf. Inf. Fusion*, pp. 1–8, 2001.
- [18] M. Shimoni, D. Borghys, R. Heremans, C. Perneel, and M. Acheroy, "Fusion of PolSAR and PolInSAR data for land cover classification," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 11, no. 3, pp. 169–180, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.jag.2009.01.004.
- [19] C. Pohl and J. L. Van Genderen, "Review article Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 19, no. 5, pp. 823–854, Jan. 1998, doi: 10.1080/014311698215748.
- [20] N. Joshi et al., "A review of the application of optical and radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring," *Remote Sens.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–23, 2016, doi: 10.3390/rs8010070.
- [21] B. Waske and J. A. Benediktsson, "Fusion of support vector machines for classification of multisensor data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 12, pp. 3858–3866, 2007, doi: 10.1109/TGRS.2007.898446.
- [22] J. Reiche, C. M. Souza, D. H. Hoekman, J. Verbesselt, H. Persaud, and M. Herold, "Feature level fusion of multi-temporal ALOS PALSAR and Landsat data for mapping and monitoring of tropical deforestation and forest degradation," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 6, no. 5, pp. 2159–2173, 2013, doi: 10.1109/JSTARS.2013.2245101.
- [23] N. Longbotham et al., "Multi-Modal Change Detection, Application to the Detection of Flooded Areas: Outcome of the 2009–2010 Data Fusion Contest," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 5, no. 1, pp. 331–342, Feb. 2012, doi: 10.1109/JSTARS.2011.2179638.
- [24] W. Jiao, L. Wang, and M. F. McCabe, "Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future," *Remote Sens. Environ.*, vol. 256, p. 112313, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.rse.2021.112313.
- [25] S. R. Suwanlee and J. Som-ard, "Population Estimation Using Land-Use Change Data from Multi-Sensor Images in Maha Sarakham Province, Thailand," *Int. J. Geoinformatics*, pp. 81–95, Jun. 2021, doi: 10.52939/ijg.v17i3.1901.
- [26] P. Coppin, I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys, and E. Lambin, "Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 25, no. 9, pp. 1565–1596, 2004, doi: 10.1080/0143116031000101675.
- [27] R. Bivand and G. Piras, "Comparing implementations of estimation methods for spatial econometrics," *J. Stat. Softw.*, vol. 63, no. 18, pp. 1–36, 2015, doi: 10.18637/jss.v063.i18.
- [28] D. M. Drukker, I. R. Prucha, and R. Raciborski, "Maximum likelihood and generalized spatial two-stage least-squares estimators for a spatial-autoregressive model with spatial-autoregressive disturbances" *Stata J.*, vol. 13, no. 2, pp. 221–241, 2013, doi: 10.1177/1536867x1301300201.
- [29] M. Lu, E. Pebesma, A. Sanchez, and J. Verbesselt, "Spatio-temporal change detection from multidimensional arrays: Detecting deforestation from MODIS time series," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 117, pp. 227–236, 2016, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.007.