

پایش تغییرات فصلی تالاب میقان با استفاده از داده‌های سنجنش از دور رادار، حرارتی، و اپتیک

محمدحسین حجاریان - دانشجوی کارشناسی ارشد سنجنش‌ازدور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
سارا عطارچی* - استادیار گروه سنجنش‌ازدور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
سعید حمزه - دانشیار گروه سنجنش‌ازدور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

چکیده

تالاب‌ها به تغییرات محیطی و آب‌وهوایی وابسته‌اند. بنابراین، پایش تغییرات پهنه‌های آبی تالاب اهمیت زیادی دارد. هدف از این تحقیق پایش تغییرات فصلی تالاب میقان با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۱ و لندست ۸ در بازه زمانی ماه می ۲۰۱۹ تا ماه ژانویه ۲۰۲۰ است. پهنه تالاب با استفاده از شاخص MNDWI، دمای سطح زمین، تصاویر راداری سنتینل ۱ جداگانه استخراج و سپس نتایج به‌دست‌آمده با خروجی طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان مقایسه شده است. نتایج طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان تغییر شدید پهنه آبی را در فصل‌های مختلف (بیشترین و کمترین مساحت تالاب به ترتیب ۶۱/۱۸ و ۱۹/۲۵ کیلومتر مربع) نشان می‌دهد. در ماه‌های گرم سال، مساحت پهنه آبی تالاب حاصل از طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و اعمال شاخص MNDWI با هم تطابق دارند که نشان‌دهنده کارایی مناسب این شاخص طبقی است. تطابق نتایج حاصل از طبقه‌بندی با مساحت استخراج شده بر اساس ضرایب بازپخش راداری در ماه‌های سرد سال بیشتر بوده است. مقایسه نتایج سنجنده‌های مختلف در پایش تالاب میقان، که تغییرپذیری شدیدی در طول سال دارد، نشان داد رویکرد چندسنجنده‌ای در چنین مطالعاتی مناسب‌تر است.

واژگان کلیدی: تالاب، تصاویر رادار، دمای سطح زمین، سنجنش‌ازدور، شاخص طبقی.

مقدمه

تالاب‌ها یکی از اکوسیستم‌های طبیعی‌اند که نقش مهمی در حفظ تنوع گیاهی و جانوری ایفا می‌کنند. تالاب‌ها، به دلیل قرارگرفتن در بین دو محیط خشکی و آبی، بسیار به تغییرات محیطی حساس‌اند و نیاز به نظارت و پایش مداوم دارند. این مسئله در خصوص تالاب‌هایی که دارای الگوی تغییرات فصلی‌اند اهمیت بیشتری دارد. عواملی چون کاهش بارندگی و خشک‌سالی، افزایش دما، مدیریت نادرست منابع آب، بهره‌برداری غیراصولی از معادن، سدسازی بی‌رویه، رشد سریع جمعیت شهری، و به دنبال آن تغییر کاربری‌ها و تغییر الگوی کشت سبب تهدید حیات تالاب می‌شوند (انصاری، ۱۳۹۷: ۳۲). پایش و تهیه نقشه از منابع طبیعی به‌صورت میدانی به دلیل محدودیت‌های دسترسی، هزینه بالا، پوشش کم، عدم امکان برداشت‌های متوالی و حجم بالای داده‌ها اصولاً مقرون‌به‌صرفه نیست. از این‌رو، انواع متفاوت تصاویر ماهواره‌ای نظیر اپتیک و رادار در مطالعات و مدیریت منابع طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد (ملکی و همکاران، ۱۳۹۷: ۹۴). تصاویر سنجنش از دور به دلیل دوره‌ای بودن اخذ تصویر، قدرت تفکیک زمانی و مکانی مناسب، و همچنین دید منطقه‌ای گسترده در مطالعات زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدرولوژیکی، و منابع طبیعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (امیری و همکاران، ۱۳۹۸: ۵۴). داده‌های اپتیک عموماً دارای قدرت تفکیک مکانی، طیفی، و زمانی مناسبی برای شناسایی اهداف زمینی،

تهیه نقشه کاربری اراضی، و نقشه تغییرات‌اند (شکری و صاحبی، ۱۳۹۶: ۱۲۸). با وجود این، پیچیدگی‌های موجود در چشم‌اندازهای طبیعی سبب می‌شود تصاویر چندطیفی اپتیک همیشه قادر به شناسایی و تفکیک پدیده‌ها نباشند. همچنین، شرایط اتمسفر در هنگام اخذ این نوع داده‌ها مهم است و وجود ابر یا گردوغبار شدید مانع اخذ تصویر اپتیک مناسب می‌شود (پال و ون ژندن، ۱۹۹۸: ۸۲۴). سنجنده‌های SAR، برخلاف داده‌های اپتیک، توانایی اخذ تصویر در همه شرایط آب‌وهوایی را دارند. تصاویر SAR اطلاعات بسیار مفیدی از بافت و ساختار پدیده‌ها ارائه می‌دهند. میزان بازپخش پدیده‌ها در محدوده طیفی ماکروویو، که سنجنده‌های SAR در آن فعالیت می‌کنند، به سطح مقطع، شکل هندسی، جهت قرارگرفتن پدیده، زبری سطح، و محتوای رطوبت آن‌ها وابسته است. بیشتر تصاویر راداری (نظیر تصاویر سنتینل ۱) دارای قدرت تفکیک رادیومتریک بالاتر از داده‌های اپتیک‌اند (امیری و همکاران، ۱۳۹۸: ۶۰).

در مطالعات پایش منابع طبیعی، که از سری زمانی تصاویر استفاده شده است، تصاویر ماهواره‌های سری لندست به علت آرشینو طولانی‌مدت، قدرت تفکیک طیفی و مکانی متوسط و مناسب برای پایش منابع محیطی، دسترسی رایگان به تصاویر، اطمینان از سازگار بودن داده‌های سری‌های مختلف لندست با همدیگر، و برداشت متوالی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است (زو و همکاران، ۲۰۱۴؛ گوتام و همکاران، ۲۰۱۵؛ گوا و همکاران، ۲۰۱۷). گوتام و همکاران (۲۰۱۵) در ارزیابی دینامیک سطح آب در جنوب هند از تصاویر ماهواره لندست سال ۲۰۰۲ و ۲۰۱۴، تبدیل تسلدکپ^۱ و شاخص‌های طیفی نظیر شاخص اختلاف آب نرمال شده (NDWI)^۲، شاخص اصلاح‌شده اختلاف آب نرمال شده (MNDWI)^۳، و شاخص نسبت آب (WRI)^۴ استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استفاده از این شاخص کارایی مناسبی در تفکیک محدوده‌های خشک و مرطوب از همدیگر داشته است. کاپلان و همکاران (۲۰۱۹) برای مطالعه پویایی فصلی دریاچه سیف در منطقه مرکزی آناتولی از داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۱ در بازه زمانی یک سال از فوریه ۲۰۱۷ تا اکتبر ۲۰۱۷ استفاده کردند؛ نتایج حاصل از به‌کارگیری دمای سطح زمین^۵، مقادیر بازپخش راداری در قطبش‌های VV و VH، و شاخص تفاضل نرمال‌شده آبی اصلاح‌شده (MNDWI) به درک پویایی فصلی تالاب سیف منجر شد. امانی و همکاران (۲۰۱۹) به منظور جداسازی طبقات مختلف چند تالاب در کشور کانادا از داده‌های سنتینل ۱، آلوس ۲، و رادارست ۲ استفاده کردند. نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های پولاریزمتریک H/A/Alpha^۶ و Freeman-Durden^۷ گویا این بود که داده‌های به‌دست‌آمده از سنتینل ۱ و آلوس ۲ برای تمایز طبقه‌های تالاب مفیدند. در این تحقیق آمده است که برای مطالعات تالاب‌هایی که گیاهان چوبی (نیزار) دارند داده‌های راداری باند L نسبت به باند C از پتانسیل بیشتری برای کشف و پایش تغییرات برخوردارند. در مطالعات فراوانی، وضعیت تالاب‌ها با استفاده از انواع متفاوت تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی پایش شده است. مثلاً، سنگ فانگ ما و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی کاربرد شاخص‌های طیفی مربوط به آب نظیر NDWI، MNDWI، و NDPI^۸ پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که عملکرد مناسب شاخص به عوامل مختلفی بستگی دارد، همچون شناخت کافی از منطقه، نوع شاخص مورد استفاده، انتخاب حد آستانه مناسب، و استفاده از داده‌های کمکی مانند داده‌های حرارتی (سنگ فانگ ما و همکاران، ۲۰۱۹: ۷۱). سلاگتر و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی بر روی تالاب سنت لوسیا واقع در ساحل شرقی آفریقای جنوبی از تصاویر سنتینل ۱ و سنتینل ۲ در بازه

1. Synthetic Aperture Radar
2. Tasseled Cap Transformation
3. Normalized Difference Water Index
4. Modified Normalized Difference Water Index
5. Water Ratio Index
6. Land Surface Temperature
7. H/A/Alpha Polarization Decomposition
8. Freeman-Durden Polarization Decomposition Method
9. Normalized Difference Pond Index

زمانی دو سال از اکتبر ۲۰۱۶ تا اکتبر ۲۰۱۸ استفاده کردند. در این مطالعه، شاخص‌های MNDWI و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی NDVI^۱ از تصاویر سنتینل ۲ استخراج شد. سپس، باندهای پلاریمتریک سنتینل ۱ در قطبش‌های VH و VV مطالعه شد. در نهایت، با ترکیب تصاویر سنتینل ۱ و سنتینل ۲ اقدام به طبقه‌بندی تالاب شد؛ نتایج این مطالعه نشان داد که ترکیب داده‌های سنتینل ۱ و ۲ می‌تواند دقت طبقه‌بندی را در جداسازی بهتر موقعیت تالاب بسیار بالا ببرد. همچنین، تصاویر سنتینل ۱ در تالاب‌هایی با پوشش گیاهی زیاد توانایی ارائه نتیجه با دقت بسیار بالا را ندارد. همچنین، هر دو تصویر در تشخیص پویایی پهنه آب تالاب کارایی یکسانی داشتند. در مطالعه دیگری ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) با اجرای الگوریتمی به نام SAT^۲ و با استفاده از داده‌های ماهواره رادارست ۲ و سنتینل ۱ با صحت ۹۸ درصد موفق به شناسایی آب‌های سطحی شدند. پدیده‌های خطی نظیر آبراه‌های بسیار باریک یا جاده‌ها سبب ایجاد خطا در خروجی این الگوریتم شده بود و بر این اساس پیشنهاد شد در مطالعات بعدی پیش از اجرای الگوریتم چنین عوارضی ماسک شود. در مطالعات بسیاری به بررسی مناطق آبی و تالاب‌های ایران پرداخته شده است؛ از جمله ابراهیمی خوسفی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی بر روی تالاب میقان ارتباط بین شاخص بارش استاندارد شده (SPI)^۳ و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)^۴ را همراه با مقادیر متوسط شاخص MNDWI در بازه ۲۸ ساله به دست آوردند. همچنین، محمودی و همکاران (۱۳۹۸) از شاخص نرمال شده پوشش گیاهی و الگوهای دمایی سطح زمین با استفاده از داده‌های چندزمانه سنجنده TM^۵ ماهواره لندست در نواحی پیرامونی تالاب میقان استفاده کردند. نتایج نشان داد در بازه زمانی مورد مطالعه در بین سال‌های ۱۳۸۱-۱۳۸۹ طبقات دمایی گرم‌تر در الگوی دمایی منطقه افزایش بیشتری داشته است. در مطالعه‌ای توسط میرعلیزاده و منصوری (۱۳۹۸) مطالعه کمی و کیفی آب‌های سطحی در حوضه رودخانه کارون، زهره، و جراحی در جنوب استان خوزستان با استفاده از تصاویر سال ۲۰۱۸ لندست ۸ صورت پذیرفت. بر طبق نتایج، عملکرد شاخص MNDWI به مراتب بهتر از شاخص NDWI گزارش شد. همچنین، عملکرد شاخص AWEInsh^۶ و AWEIsh^۷ نسبت به بقیه شاخص‌ها نتایج مطلوب‌تری به همراه داشت. طبقه‌بندی نظارت‌شده عملکرد مطلوب‌تری نسبت به طبقه‌بندی نظارت‌نشده و همچنین شاخص‌ها داشت. این مطالعه در پایان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از شاخص‌های طیفی در مناطقی که امکان اخذ داده‌های آموزشی و مطالعات میدانی وجود ندارد بهتر از اعمال طبقه‌بندی است. در مطالعه دیگری اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۳۹۹) به منظور استخراج پهنه آب بر روی رودخانه گاماسیاب استان کرمانشاه نشان دادند که در مجموع شاخص‌های اعمال شده بر روی تصویر لندست ۸ بهترین عملکرد را نسبت به سنجنده لندست ۵ و ۷ داشته و همچنین شاخص WRI^۸ و NDWI نسبت به شاخص MNDWI عملکرد ضعیف‌تری داشته‌اند. در پژوهش ملکی و همکاران (۲۰۲۰) نقشه پوشش تالاب هامون با استفاده از طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان^۹ تصاویر سه سنجنده راداری در دوره‌های خشک و مرطوب تهیه شد. تاریخ اخذ تصاویر در یک دوره یک‌ساله از ماه می ۲۰۱۷ تا ماه سپتامبر ۲۰۱۷ گزارش شد. نتایج نشان داد تصاویر TerraSAR در باند X و تصاویر سنتینل در باند C برای تشخیص پوشش گیاهی درون آب در دوره مرطوب مفید است. علاوه بر این تصاویر سنجنده PALSAR^{۱۰} در باند L، در هر دو قطبش VH و VV قادر به جداسازی پوشش گیاهی تالابی است. نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تصاویر

1. Normalized difference vegetation index
2. Stepwise Automatic Thresholding
3. Standardized Precipitation Index
4. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
5. Thematic Mapper
6. Automated Water Extraction Index no shadow
7. Automated Water Extraction Index shadow
8. Water Ratio Index
9. Support Vector Machine
10. Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar

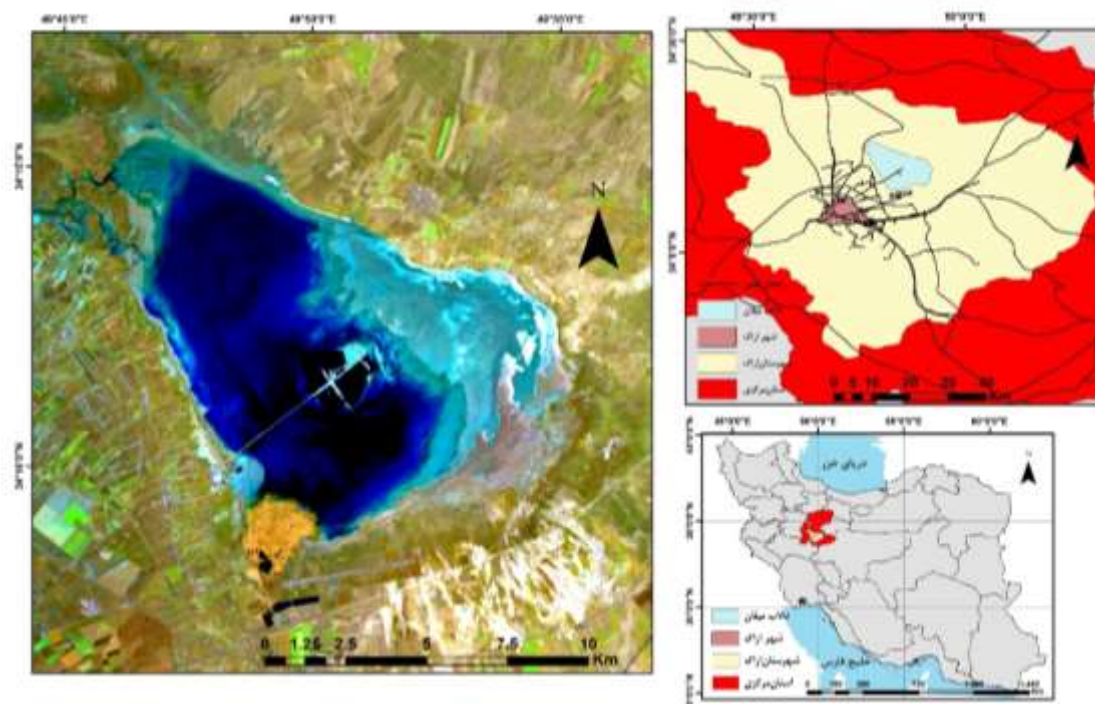
اپتیک و شاخص‌های طیفی در پایش تالاب‌ها اهمیت ویژه‌ای دارند، اما امکان اخذ این تصاویر در همه شرایط آب‌وهوایی وجود ندارد. سنجنده‌های SAR با غلبه بر این محدودیت و امکان تصویربرداری در شرایط ابری مکمل یا جای‌گزین مناسبی برای تصاویر اپتیک در پایش تالاب‌ها به‌شمار می‌آیند. تالاب میقان در مرکز ایران دارای یکی از بزرگ‌ترین ذخیره معدنی سولفات سدیم در خاورمیانه است. جاده دسترسی به طول چهار کیلومتر به‌منظور انتقال مواد از جزیره داخل تالاب به کارخانه در غرب تالاب ساخته شده است. جاده‌کشی جریان چرخشی آب تالاب را تحت تأثیر قرار داده و با تبدیل تالاب به محیط آرام سبب افزایش تبخیر شده است. جاده همچنین ارتباط هیدرولوژیکی قسمت شمال و جنوب تالاب را قطع کرده است؛ به‌طوری‌که قسمت شمالی تالاب از قسمت جنوبی خشک‌تر است (انصاری، ۱۳۹۷: ۳۳ و ۳۴). تغییرات ایجادشده در تالاب، بررسی شرایط آن را ضروری می‌کند.

در تحقیق حاضر به بررسی تغییرات فصلی تالاب میقان با استفاده از تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۱ پرداخته شده است. بدین منظور، پهنه تالاب و نواحی اطراف آن با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان طبقه‌بندی شد. همچنین، این مناطق در فصول مورد مطالعه بر اساس شاخص MNDWI و مقادیر ضریب بازپخش در باندهای VH و VV سنتینل ۱ استخراج و مساحت آن‌ها با نتایج طبقه‌بندی مقایسه شد. رویکرد چندسنجنده‌ای^۱ و بررسی تغییرات فصلی که در این تحقیق به آن پرداخته شده است تاکنون در هیچ پژوهشی در مورد تالاب میقان دنبال نشده است. مزایای سنتینل ۱ نظیر قدرت تفکیک مکانی و رادیومتریک مناسب، دسترسی رایگان، و همچنین جبران محدودیت‌های سنجنده اپتیک لندست ۸ در پیشبرد اهداف تحقیق حاضر نقش بسزایی دارد.

مواد و روش‌ها

تالاب میقان تقریباً در قسمت شمالی شهر اراک بین $34^{\circ} 08'$ تا $34^{\circ} 16'$ عرض شمالی و $49^{\circ} 46'$ تا $49^{\circ} 56'$ طول شرقی قرار دارد و مساحت آن تقریباً معادل $110/4$ کیلومتر مربع است (شکل ۱). پلاهای میقان عمدتاً از ذرات رسوبی ریزدانه، که دارای عناصر کلاستیک (نظیر کوارتز و رس) و تبخیری (نظیر کلسیت، ژپس، و هالیت) هستند، تشکیل شده است.

تغییرات فصلی میزان بارندگی و دما و در نتیجه میزان تبخیر از تالاب سبب شده است تا غلظت عناصر تشکیل‌دهنده تالاب در طول سال متغیر باشد. میانگین سالیانه بارش برابر $299/6$ میلی‌متر، دما برابر $14/08$ درجه سانتی‌گراد، و تبخیر تعرق سالانه $837/2$ میلی‌متر است (بر اساس داده هواشناسی طولانی‌مدت (۱۹۹۰-۲۰۱۸)، نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اراک در فاصله ۱۰ کیلومتری تالاب قرار دارد). اقلیم این منطقه بر اساس روش دوماتن نیمه‌خشک (با ضریب خشکی $12/44$) است (ابراهیمی‌خوسفی و همکاران، ۱۳۹۸: ۳؛ انصاری، ۱۳۹۷: ۳۱).



شکل ۱. موقعیت تالاب میقان در ایران، استان مرکزی، و شهرستان اراک (تصویر لندست ۸، ژانویه ۲۰۲۰ ترکیب باندی طبیعی، باند قرمز (۴)، سبز (۳)، آبی (۲))

اگرچه در بسیاری از مطالعات تغییرات تالاب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در سال‌های متوالی در طول چند سال بررسی می‌شود، به‌منظور پایش مستمر تالاب‌ها، بهتر است این‌گونه اکوسیستم‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه و فصلی نیز مطالعه شود. این امر با توجه به نتایج مطالعه کاپلان و همکاران (۲۰۱۹) می‌تواند تصویر واقع‌بینانه‌تری از پویایی و نوسانات پهنه‌های آبی ارائه نماید. از این‌رو، در این پژوهش سعی شد تصاویر در بازه زمانی یک‌ساله اما در فصول مختلف بررسی شود. برای اجرای این تحقیق، از تصاویر دو ماهواره سنتینل ۱ و لندست ۸ استفاده شده است. تاریخ‌های اخذ تصاویر به‌گونه‌ای انتخاب شده است که کمترین اختلاف زمانی را نسبت به هم داشته باشند (جدول ۱).

جدول ۱. تاریخ اخذ تصاویر مورد استفاده در تحقیق

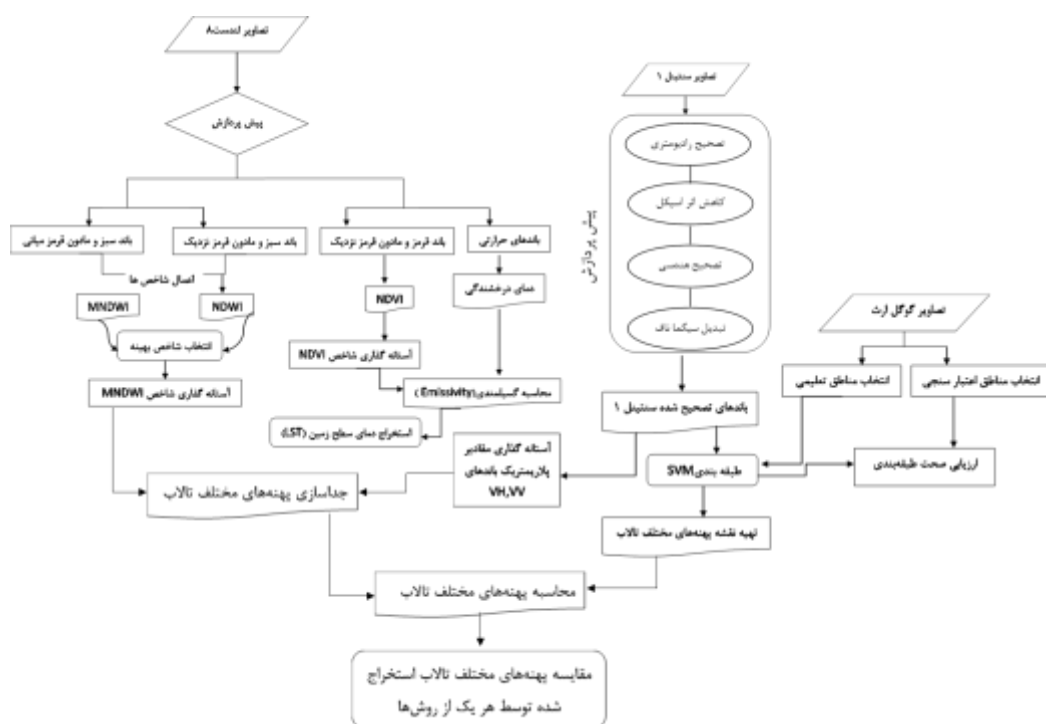
تفاوت	سنتینل ۱	لندست ۸
۲ روز	۱ می ۲۰۱۹	۳ می ۲۰۱۹
-	۶ جولای ۲۰۱۹	۶ جولای ۲۰۱۹
-	۲۳ اگوست ۲۰۱۹	۲۳ اگوست ۲۰۱۹
-	۱۰ اکتبر ۲۰۱۹	۱۰ اکتبر ۲۰۱۹
۳ روز	۲۷ ژانویه ۲۰۲۰	۳۰ ژانویه ۲۰۲۰

مراحل اجرای این تحقیق در شکل ۲ آورده شده است. پس از اخذ تصاویر لندست ۸، تصاویر پردازش شده است. از تصاویر لندست ۸، شاخص‌های طیفی مربوط به آب و LST استخراج شده است. شاخص NDWI بر اساس جذب بالای آب در محدوده مادون قرمز نزدیک و انعکاس زیاد پوشش گیاهی در همین محدوده طیفی استوار است. از این شاخص در سال ۱۹۹۶ توسط Mcfeeters برای تفکیک پهنه‌های آبی استفاده شد. این شاخص عملکرد خوبی در تفکیک مناطق آبی از پوشش گیاهی دارد، اما کارایی آن در مکان‌هایی که دارای زمین‌های بایر یا مناطق ساخته‌شده‌اند محدود است (مک فیترز، ۱۹۹۶: ۱۴۲۷ و ۱۴۲۸). شاخص MNDWI با توجه به محدودیت‌های شاخص NDWI در سال ۲۰۰۶

توسط Xu پیشنهاد شد و برای تشخیص مناطق آبی در مکان‌هایی که دارای زمین‌های بایر و مناطق ساخته‌شده‌اند کارآمدتر عمل می‌کند (خو، ۲۰۰۶: ۳۰۲۷، ۳۰۳۲؛ اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۶). مقادیر بالای صفر در شاخص NDWI و MNDWI متعلق به مناطق آبی‌اند.

لیو و شیائو (۲۰۲۰) گزارش کردند که در هنگام استخراج شاخص‌های طیفی MNDWI، NDWI، و AWEI از داده‌های سنجنده فراطیفی AHSI^۱ ماهواره Gaofen-5 در دو منطقه دریاچه نانی در استان شاندونگ و مخزن ذخیره آب گوانتینگ در استان هبی چین به‌منظور استخراج پهنه آبی، شاخص MNDWI به علت وجود باند SWIR این باند در سنجنده AHSI دارای نویز است. نتوانست کلاس پهنه آبی و زمین را در مقایسه با دو شاخص دیگر از همدیگر تفکیک کند. شاخص NDWI در مناطقی که پهنه آبی با پوشش گیاهی همراه بود بهتر از دو شاخص دیگر عمل کرد. در این مطالعه بیان شد شاخص NDWI می‌تواند سازگاری بهتری با داده‌های سنجنده فراطیفی AHSI در استخراج پهنه‌های آبی داشته باشد.

از LST در کشف تغییرات و مطالعه پویایی تالاب‌ها به‌ندرت استفاده شده است. درحالی‌که LST به انرژی تابشی جذب‌شده توسط زمین بستگی دارد و رابطه نزدیکی با تعادل انرژی سطح، وضعیت آب، و پوشش زمین دارد و برای درک دامنه وسیع فرایندهای موجود در تالاب مناسب است.



شکل ۲. فلوچارت تحقیق

تصاویر راداری دارای الگوهای فلفل‌نمکی نوزمانند به نام اسپکل^۲ هستند که مؤلفه جدانشدنی از تصاویر راداری‌اند. ضروری است اثر اسپکل در این تصاویر کاهش یابد. به‌منظور تصحیح هندسی تصاویر راداری^۳، از مدل رقومی ارتفاع

1. Advanced Hyperspectral Imager
2. Speckle
3. Terrain correction

(SRTM DEM)^۱ منطقه مورد مطالعه استفاده شد. آخرین مرحله از پیش‌پردازش تصاویر راداری سنتینل ۱ تبدیل مقادیر شدت به مقادیر ضریب بازپخش (سیگما ناف^۰ با واحد دسی‌بل) است. برای تبدیل از رابطه ۱ استفاده شده است:

$$\sigma^{\circ}(dB) = 10 \log_{10}(\sigma^{\circ})$$

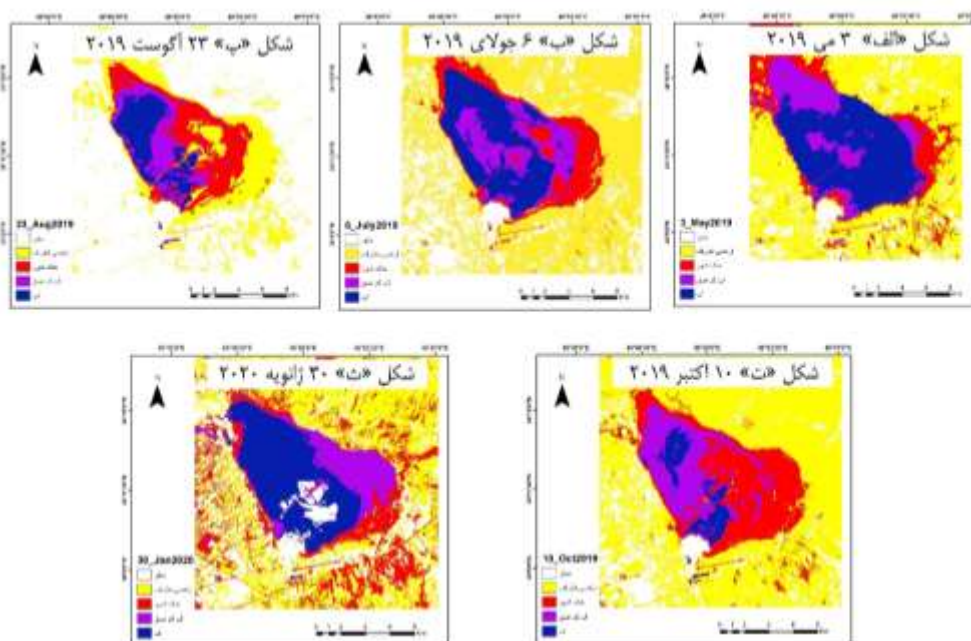
رابطه ۱

وینیک در سال ۱۹۹۸ برای اولین بار طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان را ارائه کرد. این الگوریتم جزو طبقه‌بندی‌های غیرپارامتریک است که حساسیت کمی به چگونگی توزیع آماری داده‌ها و تعداد نمونه‌های آموزشی دارد (بگز، ۱۹۹۸: ۱). در این روش با استفاده از نمونه‌هایی که مرز کلاس‌ها را تشکیل داده‌اند مرز تصمیم‌گیری بهینه برای جداسازی کلاس‌ها به دست می‌آید. این نمونه‌ها را بردار پشتیبان می‌نامند. برای به دست آوردن مرز تصمیم‌گیری دو کلاس از روش حاشیه بهینه بهره گرفته می‌شود؛ حاشیه بهینه به این صورت محاسبه می‌شود که همه نمونه‌های مربوط به یک کلاس در یک طرف مرز و همه نمونه‌های مربوط به کلاس دیگر در طرف دیگر مرز قرار گرفته و مرز تصمیم‌گیری جایی است که حداکثر فاصله نمونه‌های آموزشی هر دو کلاس از هم در امتداد عمود بر مرز تصمیم‌گیری واقع شده باشند (مختاری و نجفی، ۲۰۱۵: ۳۷ و ۳۸؛ نجفی و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۴ و ۹۵).

یافته‌های پژوهش

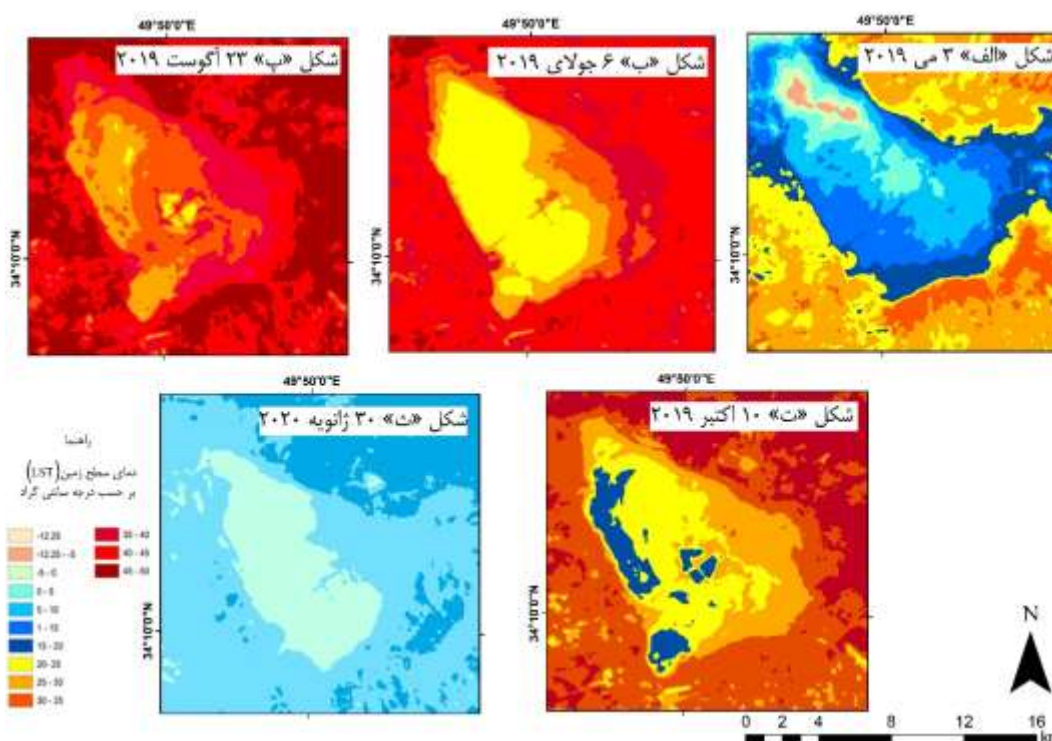
در این منطقه چندین کلاس پوشش زمین وجود دارد: آب کم‌عمق، آب، خاک شور، اراضی اطراف، و سایر. پیشروی و پس‌روی آب در نتیجه تغییرات فصلی سبب شده است تا عمق تالاب در مرکز تالاب با حاشیه‌های آن متفاوت باشد. در بخش‌هایی از تالاب، حل شدن املاح نمکی سبب افزایش شوری می‌شود که با خشک شدن این مناطق سطوح نمکی باقی می‌ماند. وقوع باران‌های شدید سبب گسترش این سطوح می‌شود (قهرودی‌تالی و همکاران، ۱۳۹۱: ۹۸). در اطراف تالاب، زمین‌های زراعی، حوضچه‌های پرورش آرتمیا، و تأسیسات و شرکت‌های صنعتی وجود دارد. بخشی از زمین‌های زراعی از تبدیل مراتع به وجود آمده‌اند که به دلیل کم‌بازده بودن به بیابان تبدیل و سبب افزایش گردوغبار شده‌اند (انصاری، ۱۳۹۷: ۳۴). شکل ۳ تفکیک کلاس‌های متفاوت پوشش زمین را برحسب شاخص MNDWI در ماه‌های متفاوت سال نشان می‌دهد. مقادیر مثبت به مناطق آبی تعلق دارد: مقادیر بین ۰ تا ۰/۴ مناطق آبی کم‌عمق و مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۴ تا ۱ مناطق آبی است. کلاس خاک شور تالاب دارای مقادیر بین ۰/۲- تا ۰ است و اراضی اطراف تالاب هم مقادیر ۰/۳- تا ۱- را به خود اختصاص داده است.

روند تغییرات فصلی تالاب در شکل ۳ مشخص است. در ماه می سال ۲۰۱۹ (شکل «الف») سطح پهنه آبی تالاب زیاد و قابل توجه است. در ماه جولای (شکل «ب») نیز همچنان مساحت پهنه آبی تالاب زیاد است. تا ماه آگوست سال ۲۰۱۹ (شکل «پ») مساحت کاهشی شده و پهنه آبی تالاب کوچک می‌شود. این روند کاهشی پهنه آبی تالاب از این ماه تا اکتبر سال ۲۰۱۹ (شکل «ت») ادامه می‌یابد. دوباره در ماه ژانویه سال ۲۰۲۰ (شکل «ث») پهنه آبی تالاب افزایش یافته است.



شکل ۳. نقشه تالاب بر اساس شاخص MNDWI

شکل ۴ دمای سطح زمین یا LST (برحسب درجه سانتی‌گراد) را در فصول مختلف سال نمایش می‌دهد.

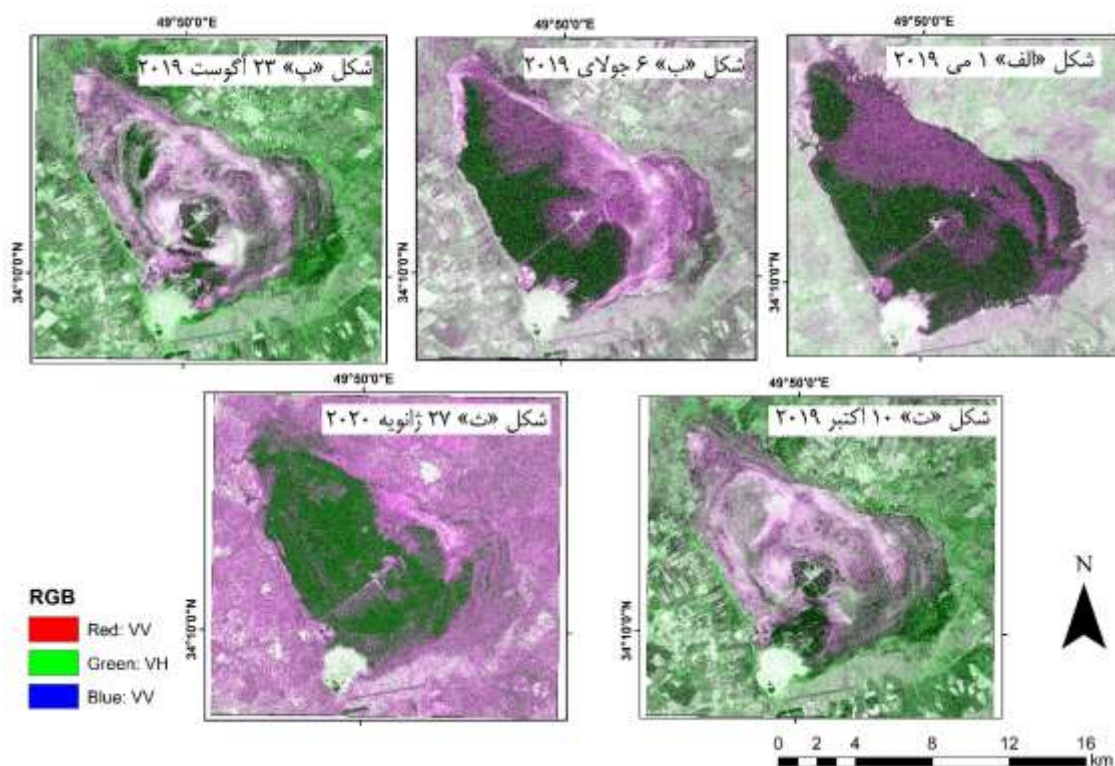


شکل ۴. نقشه دمای سطح زمین در فصول مورد مطالعه

همان‌طور که مشخص است، در طول فصول مختلف کمترین دما در پهنه‌هایی از تالاب ثبت شده که دارای حجم آب قابل توجه بوده است. در کل مساحت تالاب دمای پایین‌تری دارد و در برخی ماه‌ها حتی به زیر صفر هم رسیده است، نظیر ماه می سال ۲۰۱۹ (شکل «الف»). در ماه‌های گرم (ماه جولای (شکل «ب») و ماه آگوست (شکل «پ») سال

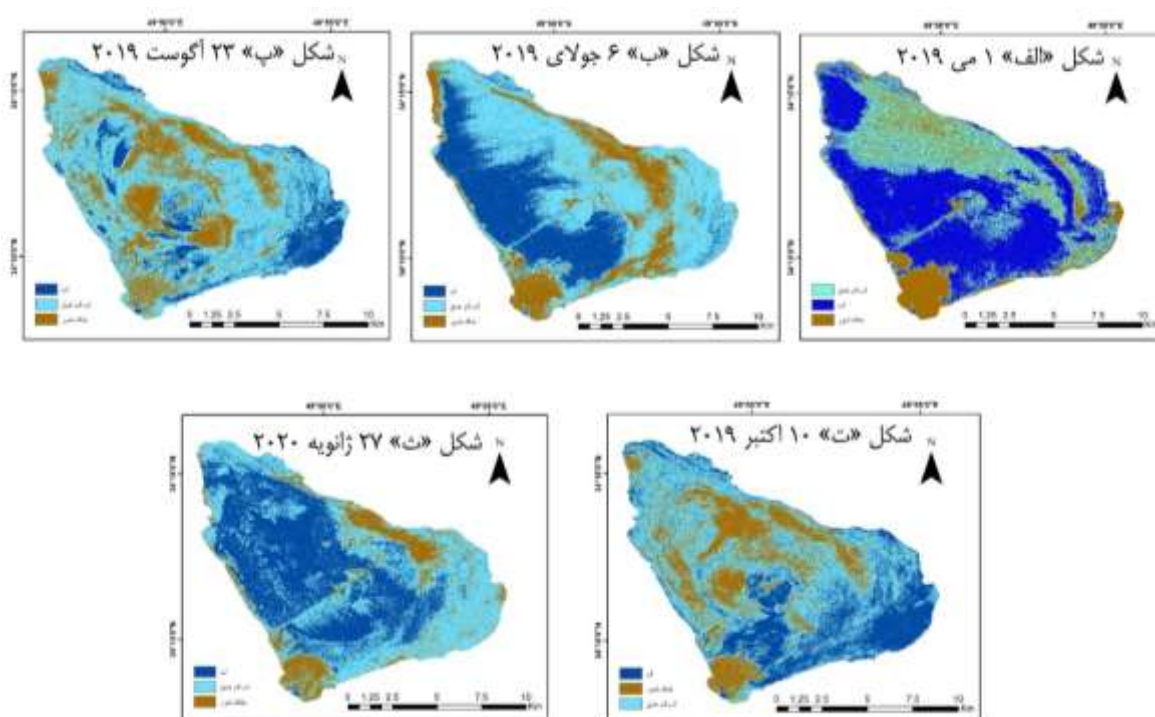
۲۰۱۹) باز هم در پهنه‌های آبی تالاب به نسبت محیط اطراف آن پایین بوده است. در ماه ژانویه سال ۲۰۲۰ (شکل «ث») دمای سطحی محاسبه شده پایین است، به خصوص در پهنه‌های آبی و مرطوب تالاب این امر به وضوح مشخص است.

در شکل ۵ تصاویر باندهای پولاریمتریک سنتینل ۱ آورده شده است. تغییرپذیری سالیانه پهنه تالاب در تصاویر سری زمانی کاملاً مشخص است. مهم‌ترین تفاوت بین تصاویر اپتیک و رادار در این است که مرز تالاب به راحتی در تصاویر سنتینل ۱ تشخیص دادنی است و تفکیک تالاب از سایر کاربری‌ها به آسانی صورت می‌گیرد. طبیعی است در ماه‌هایی از سال، که پهنه آبی تالاب مساحت بیشتری دارد، تشخیص آن در تصاویر آسان است: مثلاً، در ماه می ۲۰۱۹ (شکل «الف») پهنه آبی تالاب نسبت به بقیه کاربری‌ها به راحتی تشخیص دادنی است. ترکیب رنگی انتخاب شده پهنه‌های مختلف تالاب را به نحو مناسبی از یکدیگر تفکیک می‌کند؛ قسمت‌هایی که رنگ تیره‌تری دارند پهنه‌های آبی تالاب‌اند.



شکل ۵. تصاویر سنتینل ۱ از منطقه مورد مطالعه

نتایج حاصل از طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶. طبقه‌بندی تصاویر سنتینل ۱ با روش ماشین بردار پشتیبان (کلاس آب با رنگ آبی تیره، کلاس آب کم عمق با رنگ آبی فیروزه‌ای و کلاس خاک شور با رنگ قهوه‌ای در تصویر مشخص شده است)

جدول ۲. ضریب کاپا و صحت کلی طبقه‌بندی تصاویر سنتینل ۱

SVM		
تاریخ تصاویر	ضریب کاپا	صحت کلی (درصد)
۱ می ۲۰۱۹	۰٫۷۷	۸۶٫۰۸
۶ جولای ۲۰۱۹	۰٫۹۴	۹۶٫۲۱
۲۳ اگوست ۲۰۱۹	۰٫۸۲	۸۸٫۳۰
۱۰ اکتبر ۲۰۱۹	۰٫۷۵	۸۴٫۴۲
۲۷ ژانویه ۲۰۲۰	۰٫۸۲	۸۹٫۱۵

جدول ۳. مساحت قسمت‌های مختلف تالاب (کیلومتر مربع) بر اساس شاخص طیفی (MNDWI)، قطبش‌های VH, VV و طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM)

تاریخ تصاویر	آب	آب کم عمق	خاک شور
۳-May-۱۹	MNDWI	۲۹٫۵	۲۰٫۷۹
	VV	۶۶٫۴۲	۷٫۷۵
۱-May-۱۹	VH	۶۹٫۶	۵۶۱
	SVM	۳۷٫۶۳	۲۰٫۲۴
۶-Jul-۱۹	MNDWI	۳۱٫۱	۳۴٫۸۵

	VV	۳۲,۷۳	۴۲,۲	۴۰,۱
	VH	۳۰,۴۳	۵۰,۷۲	۳۳,۸۸
	SVM	۳۵,۰۶	۵۹,۸۳	۲۱,۶۶
	MNDWI	۲۳,۰۴	۲۰,۹	۵۶,۴۶
-۲۳Aug-۱۹	VV	۲۳,۴	۵۱,۳	۴۰,۳۵
	VH	۱۷,۵۵	۵۲,۱۶	۴۵,۳
	SVM	۱۹,۲۵	۶۸,۳۵	۲۸,۹۵
	MNDWI	۱۳,۸۵	۳۸,۶	۶۴,۶۲
-۱۰Oct-۱۹	VV	۲۰,۸	۴۵,۶۵	۴۸,۸
	VH	۱۵,۷۸	۵۱,۳۶	۴۷,۸۸
	SVM	۳۲,۸۵	۵۴,۹۱	۲۸,۸
	MNDWI	۵۹,۰۲	۳۱,۵۸	۲۴,۶۷
-۳۰Jan-۲۰	VV	۴۱,۵۶	۴۱,۳	۳۲,۱۶
	VH	۳۸,۶۷	۵۵,۸۷	۲۰,۴۸
	SVM	۵۱,۲۸	۵۰,۸۷	۱۴,۴۱

مطابق مقادیر به‌دست‌آمده در جدول ۳ در ماه می ۲۰۱۹، مساحت پهنه آبی استخراج‌شده بر اساس طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان ۶۱/۱۸ کیلومتر مربع برآورد شد. در این ماه نزدیک‌ترین شاخص در این پهنه با مساحت ۶۷/۹۶ کیلومتر مربع مربوط به مساحت استخراج‌شده از شاخص MNDWI است. علاوه بر پهنه آبی تالاب، در پهنه آب کم‌عمق و خاک شور نیز مساحت‌های استخراج‌شده توسط طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان با شاخص MNDWI بسیار به هم نزدیک است. در ماه جولای ۲۰۱۹، مساحت پهنه آبی استخراج‌شده توسط طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان برابر با ۳۵/۰۶ کیلومتر مربع برآورد شد این مقدار با مساحت به‌دست‌آمده از قطبش VV و VH به ترتیب برابر با ۳۲/۷۳ و ۳۰/۴۳ کیلومتر مربع است که بسیار نزدیک به مقدار برآوردشده توسط طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان است. علاوه بر پهنه آبی، پهنه آب کم‌عمق تالاب نیز بر اساس طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان با مقدار ۵۹/۸۳ کیلومتر مربع برآورد شد که در قطبش VH این مساحت با مقدار ۵۰/۷۲ کیلومتر مربع بسیار نزدیک به مساحت استخراج‌شده توسط طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان است. در ماه آگوست ۲۰۱۹، مساحت پهنه آبی تالاب مطابق برآورد انجام‌شده نتایج در همه روش‌ها نسبتاً به هم نزدیک است، ولی در مساحت پهنه آب کم‌عمق مساحت به‌دست‌آمده از شاخص MNDWI با مقدار ۲۰/۹ کیلومتر مربع نسبت به روش‌های دیگر کمترین مقدار ثبت شد که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف این شاخص در تشخیص پهنه آب کم‌عمق در این ماه است. مقادیر ضریب بازپخش در VV در تفکیک کلاس آب و آب کم‌عمق بهتر از شاخص MNDWI عمل کرده است. در ماه اکتبر ۲۰۱۹ مساحت هیچ‌کدام از پهنه‌های تالاب به نتایج به‌دست‌آمده از طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان نزدیک نیست؛ به‌جز پهنه آب کم‌عمق که در طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان مقدار ۵۴/۹۱ کیلومتر مربع و مساحت این پهنه در قطبش VH برابر با ۵۱/۳۶ کیلومتر مربع برآورد شد. در ماه ژانویه ۲۰۲۰ مساحت پهنه آبی استخراج‌شده بر اساس طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان برابر با ۵۱/۲۸ کیلومتر مربع برآورد شد. مساحت این پهنه بر اساس شاخص MNDWI برابر با ۵۹/۰۲ کیلومتر مربع برآورد شد. در مورد پهنه آب کم‌عمق مساحت بر اساس طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان برابر با ۵۰/۸۷ کیلومتر مربع و بر اساس قطبش VH ۵۰/۸۷ کیلومتر مربع برآورد شد. در این ماه در پهنه خاک شور مساحت بر اساس طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان ۱۴/۴۱ کیلومتر مربع است که به ترتیب قطبش VH با

مقدار ۲۰/۴۸ کیلومتر مربع و شاخص MNDWI با مقدار ۲۴/۶۸ کیلومتر مربع نزدیک‌ترین مقدار را با طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان داشتند. به‌طورقطع، حساسیت داده‌های راداری به مقدار رطوبت در جداسازی بهتر مناطق خاک شور و آب کم‌عمق بسیار کمک‌کننده بوده است. در دو ماه می ۲۰۱۹ و ژانویه ۲۰۲۰، که مساحت پهنه آبی تالاب بیشتر از ماه‌های دیگر برآورد شد، نتایج شاخص MNDWI در این پهنه نزدیک با نتایج طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان است. همان‌طور که مشخص است، بیشترین اختلاف بین مساحت‌ها مربوط به کلاس آب کم‌عمق و خاک شور است. به‌طور کل، ماه می ۲۰۱۹ بیشترین اختلاف بین مقدار مساحت کلاس آب کم‌عمق و خاک شور را نشان می‌دهد.

تحلیل نتایج

نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات پیشین در زمینه استفاده از انواع تصاویر ماهواره‌ای در مطالعات تالاب‌ها تطابق دارد. در بحث استفاده از شاخص‌های طیفی از تصاویر سنجنده لندست ۸ طبق مطالعات انجام‌گرفته از جمله گوتام و همکاران (۲۰۱۵)، کاپلان و همکاران (۲۰۱۹)، اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۳۹۹)، میرعلیزاده و منصور (۱۳۹۸)، و ابراهیمی‌خوسفی و همکاران (۱۳۹۸)، شاخص طیفی MNDWI توانسته بهتر از شاخص NDWI عمل کند. عملکرد مناسب شاخص MNDWI در این مطالعه به‌خصوص در استخراج پهنه آبی تالاب حائز اهمیت است که با پژوهش ابراهیم‌خوسفی و همکاران (۱۳۹۸) که بر روی تالاب میقان در بازه زمانی ۲۸ساله پهنه آبی تالاب را با این شاخص استخراج کرده بودند مطابقت دارد. همچنین، لیو و شیائو (۲۰۲۰) عملکرد شاخص MNDWI را بر روی تصاویر ماهواره ابرطیفی Gaofen-5 قابل‌قبول توصیف کردند. در مطالعه حاضر، عملکرد شاخص MNDWI در بیشتر موارد با نتایج حاصل از طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان نزدیک بوده است که خود گویای عملکرد مناسب این شاخص است. این شاخص در استخراج پهنه آب کم‌عمق تالاب عملکرد خوبی ندارد. طبق مطالعه شنگ فانگ ما و همکاران (۲۰۱۹)، یکی از عواملی که در عملکرد شاخص‌ها نقش دارد انتخاب آستانه مناسب است. در این مطالعه سعی شده است با مشاهده تصاویر گوگل‌ارث در تاریخ‌های تقریباً یکسان با تصاویر ماهواره‌ای مقادیر آستانه به‌درستی انتخاب شود. بااین‌حال، نمی‌توان نقش این عامل را در به‌دست‌آوردن نتیجه مطلوب‌تر نادیده گرفت. از طرفی، حساسیت مقادیر ضریب بازپخش باندهای پلاریمتریک سنتینل ۱ به مقدار رطوبت، سبب جداسازی بهتر مناطق آب کم‌عمق توسط تصاویر راداری شد. در طول دوره مورد مطالعه در ماه‌هایی از سال که پهنه آبی تالاب دارای وسعت مناسبی است، دمای هوا نسبت به مناطق اطراف تعدیل شده است و در ماه‌هایی که پهنه آبی تالاب به‌شدت تقلیل یافته دمای سطح تالاب بالاتر ثبت شده است. مقایسه این نتایج با نتایج مطالعه محمودی و همکاران (۱۳۹۸)، که بر روی تالاب میقان در بازه ۸ساله انجام پذیرفت، نشان داد تغییرات دمای سطح در این بازه با خشک شدن و کم‌آب شدن تالاب رابطه مستقیم داشته است و دمای سطح یکی از داده‌های مناسب برای پایش تغییر پهنه آبی تالاب است. عملکرد طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان در این مطالعه بسیار مطلوب ارزیابی شد؛ این عملکرد با مطالعاتی که بر روی طبقه‌بندی تالاب با این روش طبقه‌بندی انجام گرفته است (ملکی و همکاران، ۲۰۲۰) مطابقت دارد. تغییرات فصلی شدید در مساحت تالاب با استفاده از تصاویر راداری، طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان، و همچنین شاخص MNDWI مشاهده شده است که این نتایج با یافته‌های مطالعاتی چون کاپلان و همکاران (۲۰۱۹) که بر روی پویای دریاچه سیف در بازه یک‌ساله انجام پذیرفت و همچنین مطالعه ملکی و همکاران (۲۰۲۰) که در بازه چند ماه از یک دوره یک‌ساله به طبقه‌بندی تالاب هامون پرداختند مطابقت داشت. بر طبق مطالعاتی که مبتنی بر چند سنجنده انجام پذیرفته است، نظیر مطالعه امانی و همکاران (۲۰۱۹)، که با داده‌های سنتینل ۱، آوس ۲، و رادارست ۲ توانست طبقات مختلف تالاب را شناسایی کند، در تالاب‌هایی با گیاهان چوبی داده‌های باند L نسبت به باند C پتانسیل بیشتری برای پایش دارند. با در نظر گرفتن پوشش گیاهی اندک در تالاب میقان، تصاویر سنتینل ۱ استفاده شد. کاپلان و همکاران (۲۰۱۹) نیز به‌منظور درک پویایی دریاچه سیف از داده‌های چندسنجنده‌ای استفاده

کردند با این تفاوت که در این مطالعه طبقه‌بندی صورت نگرفت و فقط آستانه‌گذاری شاخص و مقادیر باندهای پلاریمتریک سنتینل ۱ انجام گرفت. همچنین، سلاگتر و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده هم‌زمان از تصاویر دو ماهواره سنتینل ۱ و سنتینل ۲ توانستند نتایج نگاشت تالاب را بهبود دهند.

نتیجه‌گیری

در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با پایش تالاب‌ها با استفاده از فناوری سنجنش از دور، از تصاویر در دوره‌های زمانی چندین ساله بهره گرفته شده است تا تغییرات بدنه آبی تالاب و کاربری‌های اطراف آن بررسی شود، زیرا اکوسیستم تالاب به تغییرات آب‌وهوایی و کاربری زمین حساس است و از آن تأثیر می‌پذیرد. علاوه بر تغییرات تالاب در بازه‌های زمانی طولانی، در طول یک سال و همراه با تغییرات فصلی، اکوسیستم تالاب دچار نوسانات زیادی می‌شود. تالاب میقان در مرکز ایران نیز، با توجه به وجود تغییرات فصلی در کشور، دچار نوسانات شدید فصلی می‌شود و برای دستیابی به تصویر واقعی از وضعیت تالاب در این پژوهش سعی شد از تصاویر در بازه زمانی یک‌ساله استفاده شود؛ به طوری که الگوی فصلی تغییرات مشخص شود. همچنین، در این مطالعه رویکرد چندسنجنده‌ای مبنای قرار گرفت، زیرا سنجنده‌ها در طول موج‌های متفاوت فعالیت می‌کنند و هر کدام به ویژگی خاصی از پدیده‌ها حساس‌اند. استفاده هم‌زمان از چندسنجنده سبب می‌شود تا از خاصیت مکملی سنجنده‌ها استفاده شود. مساحت تالاب میقان بر اساس شاخص MNDWI، قطبش‌های VH و VV، و طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان محاسبه شد. بین مقادیر مساحت اختلافاتی در فصول مختلف وجود دارد که این اختلاف در فصل بهار شدیدتر است. عملکرد شاخص MNDWI در برآورد میزان پهنه آبی تالاب در بیشتر فصول بسیار نزدیک به طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان است. علاوه بر این، تصاویر باندهای پلاریمتریک VH و VV سنتینل ۱ در تفکیک بدنه تالاب کارایی لازم را دارند. بنابراین، رویکرد چندسنجنده‌ای در مطالعات تالاب بسیار سودمند است، زیرا ویژگی‌های بیشتری از پدیده‌ها را بررسی می‌کند. مساحت تالاب و زمین‌های اطراف آن در دوره مورد مطالعه بسیار دارای نوسان است. بنابراین، استفاده از تصاویر تک‌زمانه برای ارزیابی تالاب مناسب نیست. با توجه به اهمیت تالاب میقان و تأثیر مستقیم عوامل اقلیمی در نوسانات سطح آب، همچنین بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های سطحی و زیرزمینی اطراف تالاب، تغییر الگوی کشت و بهره‌برداری بیش از حد از منابع سولفات سدیم (انصاری، ۱۳۹۷؛ ابراهیمی‌خوسفی و همکاران، ۱۳۹۸)، پایش رطوبت سطحی خاک (رنجبر و آخوندزاده هنزائی، ۱۳۹۸) نیز حائز اهمیت است. بررسی این موضوع در راستای اهداف تحقیق حاضر نیست و پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی بدان پرداخته شود.

منابع

- ابراهیمی خوسفی، ز.؛ خسروشاهی، م.؛ نعیمی، م. و زندی فر، س. (۱۳۹۸). ارزیابی و پایش تغییرات رطوبت تالاب میقان با استفاده از تکنیک دورسنجی و ارتباط آن با شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی، *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، (۲): ۱۰-۱۴.
- اصغری سراسکانرود، ص.؛ جلیلیان، ر.؛ پیروزی نژاد، ن.؛ مددی، ع. و یادگاری، م. (۱۳۹۹). ارزیابی شاخص‌های استخراج آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست (مطالعه موردی: رودخانه گاماسیاب کرمانشاه)، *فصل‌نامه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۰(۵۸): ۵۳-۷۰.
- امیری، ا.؛ عبدالهی کاکروودی، ع. ا. و قدیمی، م. (۱۳۹۸). آشکارسازی خطواره‌های مرتبط با گسل دهشیر با داده‌های سنجش‌ازدور اپتیک و رادار، *فصل‌نامه علوم و فنون نقشه‌برداری*، ۹(۲): ۵۱-۶۴.
- انصاری، ا. (۱۳۹۷). ارزیابی و شناخت وضعیت محیط زیست تالاب میقان اراک جهت تدوین برنامه توسعه پایدار، *پژوهش‌های محیط زیست*، ۹(۱۷): ۲۹-۴۲.
- رنجبر، ص. و آخوندزاده هنزائی، م. (۱۳۹۸). برآورد رطوبت سطح خاک با استفاده از روش‌های SVR و ANN در تصاویر ماهواره‌های سنتینل ۱ و ۲، *مهندسی فناوری اطلاعات مکانی*، ۷(۴): ۲۱۵-۲۳۲.
- شکری، م. و صاحبی، م. (۱۳۹۶). تلفیق تصاویر رادار با روزنه مجازی و اپتیک با استفاده از تبدیل کرولت، *نشریه علمی - پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری*، ۷(۲): ۱۲۷-۱۳۸.
- قهرودی تالی، م.؛ میرزاخانی، ب. و عسگری، آ. (۱۳۹۱). پدیده کویرهایی در تالاب‌های ایران (مطالعه موردی: تالاب میقان)، *نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱(۴): ۹۷-۱۱۲.
- محمودی، س.؛ ساری صراف، ب.؛ رضایی بنفشه، م. و رستم‌زاده، ه. (۱۳۹۸). تأثیر تغییرات محیطی تالاب میقان بر دمای سطح زمین نواحی پیرامونی با استفاده از داده‌های ماهواره لندست، *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، (۳): ۱۰-۱۸.
- ملکی، م.؛ توکلی صبور، س.م.؛ ضیائی‌ان فیروزآبادی، پ. و رئیس‌ی، م. (۱۳۹۷). مقایسه داده‌های اپتیک و رادار در استخراج عوارض و پدیده‌های زمینی، *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، (۲): ۹۳-۱۰۷.
- میرعلیزاده فرد، س. و منصوری، ش. (۱۳۹۸). ارزیابی شاخص‌های سنجش‌ازدور در مطالعات کمی و کیفی آب‌های سطحی با تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ (مطالعه موردی: جنوب استان خوزستان)، *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در علوم منابع طبیعی)*، ۱۰(۲ (پیاپی ۳۵): ۶۳-۸۴.
- نجفی، ا.؛ عزیزی قلاتی، س. و مختاری، م.ح. (۱۳۹۶). کاربرد ماشین بردار پشتیبان در طبقه‌بندی کاربری اراضی حوزه چشمه کیله - چالکرو، *پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۸(۱۵): ۹۲-۱۰۱.
- Amani, M.; Salehi, B.; Mahdavi, S. and Brisco, B. (2019). Separability analysis of wetlands in Canada using multi-source SAR data. *GIScience & Remote Sensing*, 56(8): 1233-1260.
- Amiri, A.; Abdollahi Kakroodi, A. and Ghadimi, M. (2019). Detection Dehshir Fault Lineaments Using Radar and Optical Remote Sensing Data, *Journal of Geomatics Science and Technology*, 9(2): 51-64.

- Ansari, A. (2018). Recognition and Evaluation of the Environmental Status of Meighan Wetland and Planning for a Sustainable Development, *Environmental Research*, 9(17): 29-42.
- Asghari, S.; Jalilyan, R.; Pirozineghad, N.; Madadi, A. and Yadeghari, M. (2020). Evaluation of Water Extraction Indices Using Landsat Satellite Images (Case Study: Gamasiab River of Kermanshah), *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 20(58): 53-70.
- Burges, C.J. (1998). A tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data mining and knowledge discovery*, 2(2): 121-167.
- Ebrahimikhusfi, Z.; Khosroshahi, M.; Naeimi, M. and Zandifar, S. (2019). Evaluating and monitoring of moisture variations in Meyghan wetland using the remote sensing technique and the relation to the meteorological drought indices, *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(2): 1-14.
- Gautam, V. K.; Gaurav.P. K.; Murugan, P. and Annadurai, M. J.A.P. (2015). Assessment of surface water Dynamics in Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI, supervised classification and KT transformation. *Aquatic Procedia*, 4: 739-746.
- Ghahroudi Tali, M.; Mirzakhani, B. and Asgari, A. (2013). Desertification and Playa Expansions in Everglades of Iran (Case Study: Meghan Lake), *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 1(4): 97-112.
- Guo, M.; Li, J.; Sheng, C.; Xu, J. and Wu, L. (2017). A review of wetland remote sensing. *Sensors*, 17(4): 777.
- Kaplan, G.; Avdan, Z. Y. and Avdan, U. (2019). Mapping and monitoring wetland dynamics using thermal, optical, and SAR remote sensing data. *Wetlands Management: Assessing Risk and Sustainable Solutions*, 23-87.
- Liu, Y. and Xiao, C.C. (2020). Water Extraction on the Hyperspectral Images of GAOFEN-5 Satellite Using Spectral Indices. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43: 441-446.
- Ma, S.; Zhou, Y.; Gowda, P. H.; Dong, J.; Zhang, G.; Kakani, V.G.; Wagle, P.; Chen, L.; Flynn, K.C. and Jiang, W. (2019). Application of the water-related spectral reflectance indices: A review. *Ecological Indicators*, 98: 68-79.
- Mahmoodi, S.; Rostamzade, H.; Sari, B. and Rezaei, M. (2019). The effect of Meighan wetland environmental changes on land surface temperature of surrounding areas by using Landsat satellite data, *Journal of RS and GIS for natural Resources*, 10(3): 1-18.
- Maleki, M.; Tavakkoli Sabour, S.; Zeaieanfirouzabadi, P. and Raeisi, M. (2018). Comparison of optic and radar data for terrain feature extraction, *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 9(2): 93-107.
- Maleki, S.; Baghdadi, N.; Soffianian, A.; El Hajj, M. and Rahdari, V. (2020). Analysis of multi-frequency and multi-polarization SAR data for wetland mapping in Hamoun-e-Hirmand wetland. *International Journal of Remote Sensing*, 41(6): 2277-2302.

- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of remote sensing*, 17(7): 1425-1432.
- Mir Alizadehfard, S. and Mansouri, S. (2019). Evaluation of indicators of remote sensing measurement in quantitative and qualitative studies of surface water with Landsat-8 satellite images (Case study: South of Khuzestan province). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(2): 63-84.
- Mokhtari, M. H. and Najafi, A. (2015). Support vector machine and artificial neural network classification methods of land use extraction of satellite images Landsat. *Journal of technology of agriculture and natural resources, water and soil sciences*, 19: 72-35.
- Najafi, A.; Azizi Ghalati, S. and Mokhtari, M.H. (2017). Assessment Kernel Support Vector Machines in Classification of Land uses (Case Study: Basin of Cheshmeh kileh-Chalkrod), *Journal of Watershed Management Research*, 8(15): 92-101.
- Pohl, C. and Van Genderen, J. L. (1998). Review article multi-sensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications, *International journal of remote sensing*, 19(5): 823-854.
- Ranjbar, S. and Akhundzadeh Hanzaei, M. (2019). Estimation of soil surface moisture using SVR and ANN methods in Sentinel 1 and 2 satellite images. *Spatial Information Technology Engineering*, 7(4): 215-232.
- Shokri, M. and Sahebi, M. R. (2017). Fusion of Synthetic Aperture Radar Data and Optic Images based on Curvelet Transform, *Journal of Geomatics Science and Technology*, 7(2): 127-138.
- Slagter, B.; Tsendbazar, N. E.; Vollrath, A. and Reiche, J. (2020). Mapping wetland characteristics using temporally dense Sentinel-1 and Sentinel-2 data: A case study in the St. Lucia wetlands, South Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 86, 102009.
- Xu, H. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International journal of remote sensing*, 27(14): 3025-3033.
- Zhang, W.; Hu, B. and Brown, G. S. (2020). Automatic Surface Water Mapping Using Polarimetric SAR Data for Long-Term Change Detection. *Water*, 12(3): 872.
- Zhu, C.; Zhang, X. and Huang, Q. (2018). Four decades of estuarine wetland changes in the Yellow River delta based on Landsat observations between 1973 and 2013. *Water*, 10(7): 933.
- Zhu, W.; Jia, S. and Lv, A. (2014). Monitoring the fluctuation of Lake Qinghai using multi-source remote sensing data. *Remote Sensing*, 6(11): 10457-10482.