



مدلسازی خطی وضعیت سلامت صخره‌های مرجانی با استفاده از تصاویر لندست-۸

صادق اسلامی^{۱*}، مهدی حسنلو^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هیدرولوگرافی دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

چکیده:

در میان اقیانوس‌های جهان یکی از غنی‌ترین فرم‌های تنوع زیستی را در ساختارهای زنده‌ای می‌یابیم که مرجان نام دارند. از منظر تنوع زیستی، جزایر مرجانی مانند جنگل‌های استوایی، متنوع‌ترین اکوسیستم‌های جهان هستند. آبینگ‌های مرجانی به عنوان مکان تغذیه‌ای، تولیدمثی، پرورش نوزادان و نیز پناهگاه ماهیان و بسیاری از موجودات آبی عمل می‌نمایند و نیز شاخصی از سلامت اکوسیستم بوده و به لحاظ جذب توریست و مسائل اقتصادی بسیار حائز اهمیت هستند. علم سنجش از دور با توجه به قابلیت پایش مستمر، قابلیت ذخیره‌سازی برای قاصد بلندمدت، توانایی بررسی اکوسیستم بدون تماس مستقیم با آن و همچنین صرفه‌جویی در وقت و در زمان می‌تواند برای بررسی صخره‌های مرجانی مفید باشد. در این مطالعه، با توجه به اثرگذاری ویژگی‌های فیزیکی مثل دمای سطح آب بر روی سلامت و توزیع مرجان‌ها، به بررسی رابطه‌ی بین این پارامترها و سلامت مرجانهای منطقه مورد مطالعه که در این مقاله جزیره مرجانی هرون استرالیا می‌باشد، پرداخته شده است. همچنین در این مطالعه با بررسی ترکیب باندهای تصاویر ماهواره لندست-۸ و ایجاد رابطه بین آن‌ها به بهترین مدل خطی و ترکیبی رسیدیم که وضعیت سلامت مرجان‌ها را بر اساس پارامتر رنگ آب و باندهای تصاویر نشان می‌دهد. در نهایت وضعیت منطقه را به سه کلاس (۱) در آستانه هشدار و خطر، (۲) مرجان‌های مرده (سفید شده) و (۳) مناطق بدون استرس تقسیم‌بندی نمودیم. بهترین مدل جهت رسیدن به این هدف برای این منطقه دارای $R^2 = 0.742$ و $RMSE = 375$ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبینگ‌های مرجانی، مدل‌سازی، جزیره هرون استرالیا، سنجش از دور، تصاویر لندست-۸.

۱- مقدمه

در میان اقیانوس‌های جهان یکی از غنی‌ترین فرم‌های تنوع زیستی را در ساختارهای زنده‌ای می‌یابیم که مرجان نام دارند. آبسنگ‌های مرجانی که به‌ظاهر شبیه صخره‌هایی بی‌جان می‌باشند، درواقع جوامع زنده‌ای هستند که تنوع بالای موجودات ساکن آنها را در کمتر اکوسیستمی می‌توان شاهد بود. از منظر تنوع زیستی، جزایر مرجانی مانند جنگل‌های استوایی، متنوع‌ترین اکوسیستم‌های جهان هستند. این آبزیان حساس به‌ویژه در مناطق گرمسیری جهان نقش بسیار مهمی را در تداوم حیات در اقیانوس‌ها ایفا می‌کنند. همچنین آبسنگ‌های مرجانی نقش مهمی در پایداری جوامع محلی دارند [۱].

همچنین شرایط محیطی نیز در شکل‌گیری صخره‌ها دخالت دارد. مرجان‌ها به آب‌های ۲۲ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد احتیاج دارند و از سطح تا اعماق ۳۰ متر، میان عرض جغرافیایی ۲۶ درجه شمالی و ۲۶ درجه جنوبی به سر می‌برند. آبسنگ‌های مرجانی به‌عنوان مکان تغذیه، تولید مثل، پرورش نوزادان و پناهگاه ماهیان و بسیاری از موجودات آبی عمل می‌کنند و نیز شاخصی از سلامت اکوسیستم هستند [۱]. بسیاری از موجودات نیز به‌صورت هم‌زیست با مرجان‌ها زندگی می‌کنند. از این‌رو تراکم و پراکنش مرجان‌ها باعث تغییر در جمعیت ماهی‌ها و دیگر موجودات می‌شود و تغییرات در ساختار اجتماعات گونه‌های دیگر ارتباط نزدیکی با مرجان‌ها دارد که کمتر رده‌های از جانداران دارای چنین ویژگی‌هایی می‌باشد. از موارد کاربرد سنجش‌از دور در مدیریت مناطق ساحلی، حفظ محیط زیست و منابع طبیعی و بررسی عارضه‌ها در این مناطق می‌باشد. علم سنجش‌از دور با توجه به قابلیت پایش مستمر و مداوم و قابلیت ذخیره‌سازی برای مقاصد بلندمدت و توانایی بررسی اکوسیستم بدون تماس مستقیم با آن و همچنین صرفه‌جویی در وقت و در زمان می‌تواند برای بررسی صخره‌های مرجانی مفید باشد [۱]. صخره‌های مرجانی به‌عنوان مهم‌ترین زیستگاه‌های جانوری در دریا، همواره بیشترین آسیب را از فعالیت‌های انسانی در مناطق دریایی متحمل شده است و وجود آن‌ها به لحاظ مسائل سلامت اکوسیستم، محیط‌زیست، اکولوژی و همچنین فعالیت‌های اقتصادی و تجاری نظری جذب توریست حائز اهمیت می‌باشد. مرجان‌ها علاوه بر درجه حرارت آب مناسب، نیاز به شرایط خاصی از جمله عمق آب، شفافیت، نور و سطح دریا دارند [۱]. به‌عنوان مثال عمق آب به‌طور کلی نباید بیش از ۵۰ متر باشد. شوری مطلوب باید در محدوده ۳۲-۳۵ psu قرار گیرد. آب دریا باید روشن و شفاف باشد، تا اطمینان حاصل شود که عبور نور صورت می‌گیرد. این حساسیت مرجان‌ها که تحت شرایط خاصی به وجود می‌آید، این امکان را به ما می‌دهد که ما با استفاده از سنجش‌از دور با استفاده از باندهای مرئی و غیر مرئی وضعیت مرجان‌ها را بررسی کنیم [۲].

از دیرباز بسیاری از مدل‌ها و داده‌های سنجش از دور اپتیکی مثل Quickbird, ASTER, IKONOS, ETM+, TM منجر به نمایش و طبقه‌بندی صخره‌های مرجانی شد. در ۱۹۷۰ از داده‌های لندست برای تصاویر رقومی مرجان‌های بزرگ استرالیا و ژئومورفولوژی آن استفاده شد [۳]. تصاویر SPOT HRV برای نظارت بر مجمع‌الجزایر پلینری فرانسه در مقیاس وسیع (چشم انداز) استفاده شد و به دقتی بهتر از ۸۵ درصد رسید [۴]. کارکنان دانشکده سنجش از دور دریایی در دانشگاه فلوریدای جنوبی برای اولین بار بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳ یک چارت نقشه‌برداری مربوط به اکوسیستم مرجان‌ها در سراسر جهان را با استفاده از تصاویر چند طیفی 7 Landsat تهیه کردند. همچنین آنها یک سیستم طبقه‌بندی استاندارد ژئومورفولوژی صخره‌های مرجانی را تاسیس و اطلاعات مهمی از موقعیت صخره‌ها و توزیع آنها برای مناطق مختلف دریاها را برای دانشمندان و محققان فراهم کردند [۵].

۲- روش‌های اجرایی

۱-۱- روش تحقیق

یکی از الگوریتم‌های استاندارد مورد استفاده در جهان الگوریتم‌های مربوط به اداره‌ی نظارت و نمایش صخره‌های مرجانی^۱ (NOAA) می‌باشد که با استفاده از تولید نقشه‌ها والگوریتم‌های مختلف و همچنین رابطه‌ی بین گرما و دمای آب سلامت مرجان‌ها را طبقه‌بندی می‌کند [۴]. ایجاد شدن تنش‌های حرارتی و اختلاف بین دمای سطحی آب روزانه و دمای سطحی متوسط منطقه (۱۵ روز تا ۳۰ روزه) بر اثر گرمای بیش از اندازه درنهایت منجر به سفیدی مرجان‌ها (مردن آنها) می‌شود. پس با اندازه دمای سطح آب و تولید نقشه‌های دمای سطحی آب در بازه‌های مختلف به‌سلامت و اکوسیستم مرجان‌ها در تمام نقاط جهان و بررسی پدیده‌های آل نینو و چرخه‌های موجود در اقیانوس آرام به‌طور منظم با استفاده از داده‌های سنجش‌از دور پی می‌بریمالگوریتم Hotspots Coral Bleaching با استفاده از SST_{daily} دمای سطح روزانه و^۲ MMM (بیشترین متوسط ماهانه) و رابطه (۱) به‌صورت روزانه نقشه‌ای را تولید می‌کند.

$$HS = \begin{cases} SST_{daily} - MMM & SST_{daily} > MMM \\ 0 & SST_{daily} \leq MMM \end{cases} \quad \text{رابطه (۱)}$$

با استفاده از الگوریتم‌های HOTSPOTS و بازه‌های تعریف شده برای آن نقشه‌هایی به‌منظور بررسی سلامت محیط‌زیست مرجان‌ها تهیه می‌شود [۵-۶]. (جدول ۱)

جدول ۱: الگوریتم جهانی نظارت و نمایش صخره‌های مرجانی

| میزان استرس | تعریف |
|------------------------------|-----------------|
| بدون استرس (بی خطر) | • HotSpot ≤ |
| در آستانه سفید شدگی مرجان‌ها | ۱ < HotSpot < ۰ |
| هشدار (دارای خطر) | ≤ HotSpot ۱ |

در این مقاله ابتدا داده‌های دمای سطحی آب (SST) مربوط به سنجنده مدلیس برای منطقه مورد نظر جمع‌آوری می‌شود و سپس با توجه به وسعت و نوع آب منطقه مورد مطالعه به بررسی و انتخاب باندهای مناسب ماهواره لندست-۸ می‌پردازیم [۷]. سپس با به دست آوردن بازتابش‌های باندهای مختلف ۱ تا ۷ لندست-۸ و همچنین کمیت رنگ دریا (Ocean Color) به مدل‌های مختلفی دست خواهیم یافت. در نتیجه به بهترین ترکیب خطی که سلامت صخره‌های مرجانی و رنگ دریا و باندهای مختلف را به هم مرتبط می‌کند، دست خواهیم یافت [۸]. پس از تشکیل مدل بار دیگر به‌وسیله داده‌های میدانی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در صورت قابل قبول بودن با اعمال تصحیحات موردنیاز بروی تصاویر با استفاده از نرم‌افزار طبقه‌بندی سلامت مرجان‌های منطقه انجام می‌گردد. در این مقاله پس از بررسی باندها برای رسیدن به مدل مطلوب از مدل رگرسیون چند متغیره^۴ (RRA) استفاده شده است [۹].

$$F(\text{coral reef}) = b_1 + b_2 \times R_2 + b_3 \times R_3 + b_4 \times R_4 + b_5 \times R_5 + \dots \quad \text{رابطه (۲)}$$

در مورد رابطه (۲) می‌توان گفت که مدل رگرسیونی که با بیش از یک متغیر مستقل درگیر است را مدل رگرسیون چند متغیره می‌نامند. مدل‌های رگرسیون خطی چند متغیره اغلب به عنوان توابع تقریب زننده به کار می‌روند [۱۰]. به‌منظور برآورد کردن ضایعه رگرسیون، در رابطه (۲) از روش حداقل مربعات استفاده می‌شود. تفاوت بین مشاهده و مقدار برآورده شده پس‌مانده خطایی مثل $e_i = F(\text{coral reef})_i - \bar{F}(\text{coral reef})_i$ است [۱۱].

¹ National Oceanic and Atmospheric Administration

² El Nino

³ Maximum of monthly mean

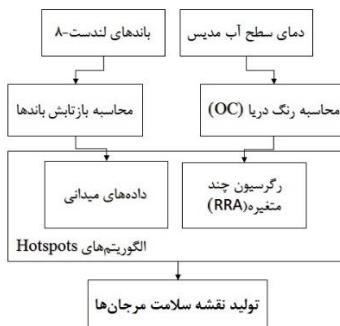
⁴ Ridge Regression Analysis

۲-۲- رنگ دریا^۱ (OC)

رنگ دریا یک ابزار با ارزش برای نظارت بر کیفیت آب و تغییرات در محیط زیست دریایی، که می‌توانند مستقیماً روی سلامتی انسان و امور بازرگانی، خصوصاً در مناطق ساحلی و مرجانی و نزدیک دریاچه‌ها و آبراههای داخلی که بسیاری از جمعیت‌های انسانی در آنجا اقامت دارند، تأثیر بگذارند^[۱۲]. مشاهدات رنگ اقیانوس با اندازه‌گیری در طول موج‌های مختلف مرئی توسط سنجنده، محاسبات و برداشت اثرات به دلیل انعکاس و سهم جوی و تبدیل بازتابش ترک شده‌ی نهایی آب به پارامترهای ژئوفیزیکی معنی دار مانند کلروفیل و غلظت رسوبات معلق به کاربرده می‌شود. الگوریتم مورد استفاده در این مقاله الگوریتم OC4 می‌باشد^[۱۲]. که با توجه به مطالعات انجام شده برای آبهای نوع دوم یا در واقع آبهای نزدیک ساحل کاربرد دقت مناسبی دارد. این الگوریتم از یک نسبت انعکاسی با چهار باند بازتاب آبی_سبز استفاده می‌کند و به شکل رابطه (۳) می‌باشد: [۱۴ و ۱۳]^[۳]

$$x = \log_{10} \frac{\text{MAX}\{Rrs(443) \text{ or } Rrs(490) \text{ or } Rrs(510)\}}{Rrs(555)} \quad C = 10^{\sum_{i=0}^n a_i x^i}, \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه Rrs بازتابش مربوط به طول موج‌های ۴۴۳ و ۴۹۰ و ۵۱۰ نانومتر می‌باشد و در صورت کسر رابطه بیشینه مقدار بازتابش آنها در نظر گرفته می‌شود. در رابطه ۳ مدلی است که غلظت کلروفیل یا در واقع رنگ آب را مشخص می‌کند و دارای ضرائب ثابتی می‌باشد^[۱۴]. درنهایت فلوچارت کلی این مقاله مطابق شکل ۱ می‌باشد.



شکل ۱: فلوچارت روند اجرای مقاله

۳- پیاده‌سازی و نتایج

۳-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

جزیره مرجانی هرون^۲ در مختصات جغرافیایی ۱۵۱.۹۰۸۳۹۷ و ۲۳.۴۳۸۵۳۱- به طول ۸۰۰ متر و در بیشترین عرض ۳۰۰ می‌باشد. همچنین، مساحت آن ۱۶ هکتاری آن مجموعه عظیمی از سخره‌های مرجانی است که در شرق کشور استرالیا و در اقیانوس آرام در نزدیکی مدار رأس الجدى قرار دارد. جزیره هرون در یک محیط پرانرژی که دارای جریان جزر و مدی بالا همراه با گردش آب است، توسعه یافته است^[۱۵]. در واقع بخشی از دیواره بزرگ مرجانی^۳ (GBR) است که در ۸۰ کیلومتری شمال شرق کوئینزلند^۴ استرالیا و ۴۶۰ کیلومتری شمال غرب پایتخت ایالت بریزبن^۵ قرار دارد. سخره‌های مرجانی این جزیره بخشی از پارک دریایی GBR در استرالیا می‌باشد که سالانه دو میلیارد توریست را با خود به این مکان می‌آورد و قطعاً پربازدیدی‌ترین جاذبه‌ی گردشگری در این کشور است. جاذبه‌ای طبیعی و بی‌نظیر که تا فاصله‌ای طولانی در ساحل استرالیا از بوندابرگ تا رأس شمالی کوئینزلند امتداد یافته است. دیواره بزرگ مرجانی، بزرگ‌ترین ساحل مرجانی دنیا، زیستگاه بیش از ۱۵۰۰ نوع ماهی، ۴۱۱ نوع مرجان سخت،

¹ Ocean color

² Heron Island

³ Great Barrier Reef

⁴ Queensland

⁵ Brisbane

همچنین یکسوم مرجان‌های نرم جهان و ۱۳۴ گونه کوسه است؛ این صخره‌های مرجانی در سال ۱۹۸۱ جزو میراث جهانی یونسکو ثبت شدند و مقصد گردشگری-تفریحی بی‌مانندی برای ماجراجویان و علاقه‌مندان به ورزش‌های آبی فراهم نموده است [۱۵]. در سال ۲۰۱۲ اعلام شد که تعداد مرجان‌های بخشی از دیواره بزرگ مرجانی بزرگ طی ۲۷ سال به نصف کاهش یافته است [۱۶]. به گفته دانشمندان دلیل کاهش تعداد این صخره‌های دریایی، توفان‌های بسیار و افزایش دمای سطح زمین و آب دریاها و افزایش جمعیت ستاره‌های دریایی است که غذای این مرجان‌ها را تشکیل می‌دهد [۱۶].

۲-۳- داده‌های میدانی و ماهواره‌ای مورد استفاده

۲-۳-۱- داده‌های MODIS

سنجدنه MODIS که بر روی ماهواره Terra قرار دارد، منطقه‌ای به عرض ۲۳۳۰ کیلومتر را در ۳۶ باند طیفی تصویربرداری می‌کند. تصاویر این سنجدنه برای مطالعات هواشناسی، بررسی دمای سطح آب و خشکی، وضعیت رشد و نمو گیاهان و میزان پراکندگی و مرگ و میر مرجان‌ها و نیز برای تشخیص منبع غذایی موجودات دریایی و سیکل حرکت آب اقیانوس‌ها کاربرد دارد. از جمله محصولات سنجدنه MODIS که پس از انجام پردازش‌های لازم بر روی تصاویر آن، در اختیار کاربران قرار می‌گیرد، نقشه درجه حرارت سطح با توان تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر با دقیقیت 0.05°C درجه سانتی‌گراد برای مناطق آبی و حدود یک درجه برای سطح خشکی می‌باشد. از ترکیب SST با پارامترهای دیگری مانند کلرفیل که از طریق سنجدنه‌های دیگر Terra قابل اندازه‌گیری است می‌توان برای تشخیص محل‌های مناسب برای ماهی‌گیری و پیدا کردن مناطقی که دارای مرجان می‌باشند، استفاده کرد. [۱۷]. داده‌های میدانی مربوط به منطقه موردنظر برای تشکیل مدل مطابق جدول ۲ می‌باشد و داده‌های میدانی استفاده شده برای ارزیابی مدل در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲: داده‌های میدانی استفاده شده برای تشکیل مدل

| تاریخ | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | دمای سطح آب | وضعیت مرجان |
|------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|
| 18/08/2016 | ۱۵۱° ۵۴' ۵۱.۶۶۷۲" | -۲۳° ۲۶' ۲۰.۶۹۸۸" | ۲۴.۴۱۵ | -۰.۴۸۵ |
| 18/08/2016 | ۱۵۱° ۵۴' ۵۲.۶۶۷۲" | -۲۳° ۲۶' ۲۳.۶۸۸" | ۲۴.۴۱۸ | -۰.۴۸۲ |
| 10/07/2015 | ۱۵۱° ۵۴' ۳۸.۵۴۱۶" | -۲۳° ۲۶' ۴۰.۶۶۸" | ۲۴.۹۵۲ | ۰.۰۵۲ |
| 10/07/2015 | ۱۵۱° ۵۷' ۴۵.۲۵۱۴" | -۲۳° ۲۷' ۳۶.۳۲۴" | ۲۴.۸۷۵ | -۰.۰۲۵ |
| 29/03/2016 | ۱۵۱° ۵۴' ۴۵.۳۵۲۸" | -۲۳° ۲۶' ۳۷.۹۳۲" | ۲۳.۹۹ | -۰.۹۱ |
| 18/08/2016 | ۱۵۱° ۵۴' ۴۵.۲۴۰۶" | -۲۳° ۲۶' ۳۷.۹۳۲" | ۲۴.۳۸۹ | -۰.۵۱۱ |
| 29/03/2016 | ۱۵۱° ۵۴' ۴۲.۰۰۰۶" | -۲۳° ۲۶' ۳۶.۹۹۹۶" | ۲۴.۲۶۵ | -۰.۶۳۵ |
| 10/07/2015 | ۱۵۱° ۵۷' ۴۸.۵۴۹" | -۲۳° ۲۷' ۲.۵۹۲" | ۲۴.۸۷۵ | -۰.۰۲۵ |
| 29/03/2016 | ۱۵۱° ۵۷' ۸.۷۷۶۸" | -۲۳° ۲۷' ۱۰.۲۶۷۲" | ۲۴.۸۵۵ | -۰.۰۱۵ |
| 22/08/2014 | ۱۵۱° ۵۵' ۹.۱۳۸" | -۲۳° ۲۶' ۳۵.۶۸۵" | ۲۴.۴۰۵ | ۰.۴۹۵ |
| 18/08/2016 | ۱۵۱° ۵۴' ۴۶.۸۹" | -۲۳° ۲۶' ۳۸.۸۶۸" | ۲۴.۷۷ | -۰.۱۳ |
| 21/08/2015 | ۱۵۱° ۵۳' ۵۹.۹۷۷۸" | -۲۳° ۲۵' ۵۹.۹۸۸" | ۲۵.۹۶ | ۱.۰۶ |
| 29/03/2016 | ۱۵۱° ۵۴' ۴۳.۷۵۸" | ۲۳° ۲۶' ۳۶.۶۳۵۴" | ۲۴.۵۲ | -۰.۳۸ |
| 18/08/2016 | ۱۵۱° ۵۴' ۴۴.۱۹۶۶" | -۲۳° ۲۶' ۳۶.۲۰۷" | ۲۴.۱۵۲ | -۰.۷۴۸ |
| 21/08/2015 | ۱۵۱° ۵۴' ۳۸.۵۴۱۶" | ۲۳° ۲۶' ۴۰.۶۶۸" | ۲۴.۹۵۲ | -۰.۰۵۲ |
| 21/08/2015 | ۱۵۱° ۵۴' ۴۵.۳۵۲۸" | -۲۳° ۲۶' ۵۵.۵" | ۲۴.۸۹۹ | -۰.۰۰۱ |

جدول ۲ : داده‌های میدانی استفاده شده برای تشکیل مدل

| | | | | |
|------------|-----------------|------------------|--------|--------|
| 18/08/2016 | 151° 57' 32.4" | -23° 27' 8.9202" | ۲۴.۲۶۵ | -۰.۶۳۵ |
| 21/08/2015 | 151° 54' 16.33" | 23° 26' 16.64" | ۲۵.۲۵ | ۰.۳۵ |
| 21/08/2015 | 151° 54' 38.80" | 23° 25' 43.14" | ۲۵.۳۳۳ | ۰.۴۳۳ |
| 18/08/2016 | 151° 57' 10.99" | 23° 25' 47.11" | ۲۵.۹۹ | ۱.۰۹ |
| 10/07/2015 | 151° 55' 22.76" | 23° 26' 37.11" | ۲۶.۰۱ | ۱.۱۱ |
| 29/11/2015 | 151° 57' 46.33" | 23° 27' 4.41" | ۲۵.۰۹ | ۰.۶۹ |

جدول ۳ : داده‌های میدانی استفاده شده برای ارزیابی مدل

| تاریخ | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | دمای سطح آب | وضعیت مرجان |
|------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|
| 21/08/2015 | 151° 54' 51.6672" | -23° 26' 20.6988" | ۲۴.۴۱۵ | -۰.۴۸۵ |
| 29/03/2016 | 151° 54' 44.1966" | -23° 26' 36.204" | ۲۴.۵۲ | -۰.۳۸ |
| 29/03/2016 | 151° 55' 45.282" | -23° 26' 46.4598" | ۲۴.۳۴ | -۰.۵۶ |
| 21/08/2015 | 151° 54' 49.0854" | -23° 26' 38.187" | ۲۴.۳۴۹ | -۰.۵۵۱ |
| 29/11/2015 | 151° 56' 55.51" | 23° 26' 48.03" | ۲۵.۰۸۵ | ۰.۱۸۵ |
| 21/08/2015 | 151° 56' 55.51" | 23° 27' 48.03" | ۲۵.۱۶۵ | ۰.۲۶۵ |
| 10/07/2015 | 151° 55' 14.56" | 23° 26' 9.75" | ۲۵.۸۵۶ | -۰.۰۴۴ |
| 10/07/2015 | 151° 57' 38.82" | 23° 27' 8.95" | ۲۴.۵۶۶ | -۰.۳۴۴ |
| 29/11/2015 | 151° 59' 30.81" | 23° 27' 5.58" | ۲۳.۹۸ | -۰.۹۲ |
| 29/11/2015 | 151° 57' 9.81" | 23° 30' 37.83" | ۲۴ | -۰.۹ |
| 21/08/2015 | 151° 58' 13.84" | 23° 27' 0.69" | ۲۴.۲۲۶ | -۰.۶۷۴ |
| 21/08/2015 | 151° 54' 50.10" | 23° 26' 22.00" | ۲۵.۹۲ | ۱.۰۲ |
| 10/07/2015 | 151° 54' 38.51" | 23° 26' 17.53" | ۲۵.۹۶ | ۱.۰۶ |

۲-۲-۲ داده‌های لندست-۸

ماهواره لندست-۸ پروژه مشترک سازمان فضایی آمریکا^۱ و سازمان زمین‌شناسی^۲ این کشور بوده است که به طور موفقیت‌آمیز در ۱۱ فوریه سال ۲۰۱۳ در مدار مربوط به خود قرار گرفت. لندست-۸ اخذ مستمر داده و در دسترس بودن داده‌های لندست را با استفاده از دو سنجنده اصلی تضمین خواهد کرد: (۱) سنجنده OLI که دارای نه باند طیفی در محدوده مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز با طول موج کوتاه در محدوده طیف الکترومغناطیس، (۲) سنجنده TIRS که دارای دو باند در محدوده مادون‌قرمز حرارتی است. تصاویر لندست-۸ مطابق با زمان و موقعیت این داده‌ها بود، دانلود و استفاده شده است. [۱۸].

۳-۳-۳ نتایج و خروجی‌ها

پس از انجام تصحیحات لازم (شامل تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی) به وسیله نرم‌افزار ENVI بازتابش هفت باند و همچنین کمیت رنگ دریا (OC) از نقاط موردنیاز نیز استخراج گردید. همچنین با توجه به محصولات ماهیانه مدیس

¹⁰ NASA

¹¹ USGS

بیشترین مقدار ماهیانه دمای سطح آب برابر ۲۴.۹ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. درواقع طبق الگوریتم‌های جهانی که قسمت قبل ذکر شد، این میزان از مقادیر دمای سطحی آب کم شد و سمت چپ معادله ما یعنی تابع وضعیت مرجان‌ها را تشکیل داد. سپس انتخاب باند به این صورت انجام گرفت که ابتدا با استفاده از نرم افزار متلب مدلی با استفاده از ترکیب بازتابش تمامی باندها تشکیل شد. سپس با مدلی که شامل بازتابش و رنگ دریا بود کار را ادامه دادیم و درنهایت با به دست آوردن همبستگی بین باندها در ENVI به بهترین مدل مربوطه رسیدیم. بدین ترتیب مطابق الگوریتم‌های جهانی نظارت و نمایش صخره‌های مرجانی اعدادی که میزان وضعیت آن‌ها کمتر از یک می‌باشد مناطق و نقاطی بدون استرس و اعدادی که بین صفر و یک‌اند در آستانه سفیدشدنگی می‌باشند و مناطقی که بیشتر از یک هستند مناطق هشدار می‌باشند.

۳-۱-۳- مدل با استفاده از بازتابش تمامی باندها

در این مدل از تمامی باند ماهواره لندست-۸ (باند ۱ الی ۷) استفاده می‌شود. مدل حاصله بهصورت رابطه ۳ می‌باشد:

$$F_{coral\ reef} = b_0 + b_1 \times R_1 + b_2 \times R_2 + b_3 \times R_3 + b_4 \times R_4 + b_5 \times R_5 + b_6 \times R_6 + b_7 \times R_7 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این مدل $F_{coral\ reef}$ سمت تابعی از سلامت مرجان‌ها و b_i ها ضرایب باندهای موردنظر (جدول ۴) و بازتابش باندها می‌باشد. با ۲۲ داده و درجه آزادی ۱۴ به خطای مجدد میانگین ریشه‌ای برابر با ۰.۳۹۵ و ضریب تعیین مدل برابر با ۰.۶۵۷ دست‌یافته (جدول ۵). سپس با داده باقی مانده به آزمایش مدل پرداختیم. با قرار دادن بازتابش باندهای داده‌های باقی‌مانده مقادیر $F_{coral\ reef}$ محاسبه و با مقدار واقعی آن مقایسه گردید که نتیجه قابل قبولی را مشاهده شد (جدول ۵)

جدول ۴: ضرایب محاسبه شده مدل

| b_0 | b_1 | b_2 | b_3 | b_4 | b_5 | b_6 | b_7 |
|--------|---------|----------|---------|----------|--------|---------|---------|
| ۱.۱۲۴۶ | ۰.۷۹۴۹۸ | -۰.۸۹۱۵۱ | ۰.۲۶۰۱۱ | -۰.۳۲۵۲۴ | ۳.۲۰۱۲ | -۰.۷۷۴۴ | -۱۸۹.۸۷ |

جدول ۵: المان‌های دقت برای مدل محاسبه شده بوسیله ۲۲ داده (آموزشی) و ۱۳ داده مورد ارزیابی (تست)

| | R | RMSE | Adjusted R-Squared |
|------------------------------|-------|-------|--------------------|
| ۲۲ داده اولیه برای تشکیل مدل | ۰.۶۵۷ | ۰.۳۹۵ | ۰.۵۷۶ |
| ۱۳ داده ارزیابی مدل | ۰.۸۴۵ | ۰.۸۰۵ | ۰.۶۲۹ |

۳-۲-۳- مدل با استفاده از بازتابش تمامی باندها و رنگ دریا

در این مدل از تمامی باند ماهواره لندست-۸ (باند ۱ الی ۷) به همراه کمیت رنگ دریا استفاده می‌شود. مدل حاصل بهصورت رابطه ۴ می‌باشد:

$$F_{coral\ reef} = b_0 + b_1 \times R_1 + b_2 \times R_2 + b_3 \times R_3 + b_4 \times R_4 + b_5 \times R_5 + b_6 \times R_6 + b_7 \times R_7 + b_8 \times OC \quad \text{رابطه (۴)}$$

ضرایب این مدل مطابق جدول ۶ می‌باشد.

جدول ۶: ضرایب محاسبه شده مدل

| b_0 | b_1 | b_2 | b_3 | b_4 | b_5 | b_6 | b_7 | b_8 |
|----------|---------|----------|---------|----------|--------|---------|---------|-------|
| -۰.۸۰۶۸۹ | ۰.۷۶۸۹۷ | -۰.۹۸۷۴۷ | ۰.۴۲۸۱۵ | -۰.۳۵۸۸۷ | ۳.۱۹۶۹ | -۶.۷۳۱۴ | -۲۰.۴۶۶ | ۳.۱۵۹ |

در این مدل به خطای مجدد میانگین ریشه‌ای برابر با ۰.۷۵۱ و ضریب تعیین مدل ۰.۳۸۳ دست یافتیم (جدول ۸). سپس با داده باقیمانده به آزمایش مدل پرداختیم (جدول ۷).

جدول ۷: المان‌های دقت برای مدل محاسبه شده به وسیله ۲۲ داده (آموزشی) و ۱۳ داده مورد ارزیابی (تست)

| | R | RMSE | Adjusted R-Squared |
|------------------------------|-------|-------|--------------------|
| ۲۲ داده اولیه برای تشکیل مدل | ۰.۷۵۱ | ۰.۳۸۳ | ۰.۵۹۸ |
| ۱۳ داده ارزیابی مدل | ۰.۸۶۱ | ۰.۸۵۳ | ۰.۶۶۲ |

۳-۳-۳- مدل با استفاده از سه باند انتخابی و کمیت رنگ دریا

به منظور بهبود مدل خطی استفاده شده، با بررسی باندهایی که بین آنها همبستگی وجود دارد، با استفاده از نرمافزار ENVI باندهای ۱ و ۲ دارای همبستگی خوبی نسبت به هم می‌باشند. بدین معنی که عدد همبستگی بین آنها به ۱ نزدیک می‌باشد (جدول ۸) و با توجه به امتحان کردن سایر پارامترها در نرمافزار MATLAB درنهایت از ترکیب بازتابش باندهای ۱ و ۲ و ۷ و رنگ دریا استفاده شد.

$$F_{coral\ reef} = b_0 + b_1 \times R_1 + b_2 \times R_2 + b_7 \times R_7 + b_8 \times OC \quad (5)$$

ضرایب این مدل مطابق جدول ۹ می‌باشد. ضمن اینکه در این مدل به $R^2 = 0.752$ رسیدیم (جدول ۱۰).

جدول ۸: میزان همبستگی بین باند ۱ با سایر باندها

| همبستگی | B ₁ | B ₂ | B ₃ | B ₄ | B ₅ | B ₆ | B ₇ |
|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| B1 | ۱ | ۰.۹۹۷۵۹۶ | ۰.۹۸۰۲۰۱ | ۰.۸۷۹۸۱ | ۰.۱۶۶۴۷۱ | ۰.۰۳۴۱۲۵ | -۰.۰۰۷۱۸ |

جدول ۹: ضرایب محاسبه شده مدل

| b ₀ | b ₁ | b ₂ | b ₇ | b ₈ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| -۱.۷۵۵۶ | ۱.۰۸۳۸ | -۰.۸۸۳۵۷ | -۱۱۴.۰۷ | ۲.۲۵۴۹ |

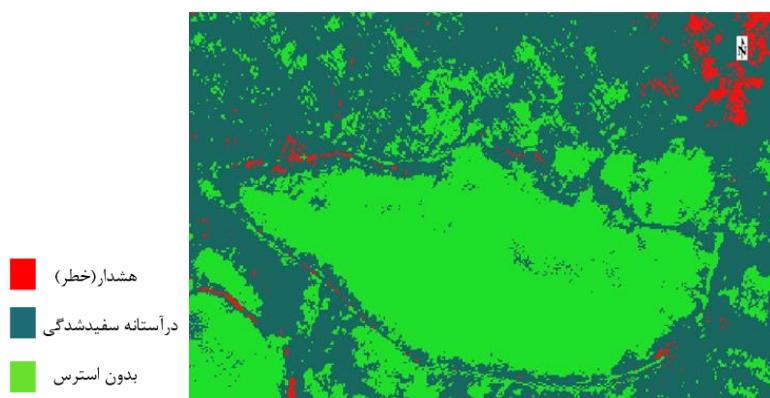
جدول ۱۰: المان‌های دقت برای مدل محاسبه شده به وسیله ۲۲ داده (آموزشی) و ۱۳ داده مورد ارزیابی (تست)

| | R | RMSE | Adjusted R-Squared |
|------------------------------|-------|-------|--------------------|
| ۲۲ داده اولیه برای تشکیل مدل | ۰.۷۵۲ | ۰.۳۷۵ | ۰.۶۶۳ |
| ۱۳ داده ارزیابی مدل | ۰.۹۹۶ | ۰.۴۰۳ | ۰.۹۹۵ |

با قرار دادن بازتابش باندها داده‌های باقیمانده و همچنین کمیت رنگ دریا مقادیر $F_{coral\ reef}$ آن محاسبه و با مقدار واقعی آن مقایسه گردید (جدول ۱۰). همانطور که مشخص است، نتیجه قابل قبولی مشاهده شده می‌شود.

۳-۴- نقشه وضعیت سلامت مرجان‌ها

با استفاده از بهترین مدل خطی بدست آمده که شامل بازتابش باندهای ۱ و ۲ و کمیت رنگ دریا می‌باشد و به کمک نرمافزار ENVI به نقشه وضعیت سلامت مرجان‌ها برای منطقه مورد مطالعه رسیدیم که صخره‌های مرجانی را به سه کلاس بدون استرس، درآستانه سفیدشدن (در آستانه خطر) و هشدار (خطر) طبقه‌بندی می‌کند (شکل ۲).



شکل ۲: طبقه بندی وضعیت سلامت صخره های مرجانی

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی رابطه بین دمای سطح آب و وضعیت سلامت مرجان‌ها پرداخته شده است. همچنین، با بکارگیری پارامترهایی چون بازتابش باندهای تصاویر لندست-۸ و کمیت رنگ دریا دقت مناسب 0.395 ± 0.375 بدست آمده است. از آنجا که تصاویر لندست-۸ دارای توان تفکیک مکانی نسبتاً مناسبی می‌باشند، برای مناطقی با مساحت کم مناسب می‌باشند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد بازتابش باندهای ۱ و ۲ به دلیل داشتن وابستگی بین آن‌ها و همچنین بازتابش باند ۷، ترکیب آن با رنگ دریا که ویژگی مهمی برای مرجان‌ها می‌باشد، می‌تواند بهترین ترکیب برای مدل‌سازی خطی بهمنظور بررسی وضعیت سلامت مرجان‌های منطقه موردنظر باشد. در این مقاله به دقت $R^2 = 0.742$ و $RMSE = 0.742$ رسیدیم. با بررسی و تولید نقشه وضعیت سلامت مرجان‌ها می‌توان به بررسی محیط‌زیست منطقه مورد مطالعه دست یافت. مشخصاً با داشتن داده‌های میدانی بیشتر و با دقت بالاتر و همچنین استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالاتر می‌توان تخمین خوبی از سایر کمیت‌های فیزیکی چون تبخیر و بارش و غیره داشت.

مراجع

- [1] امیر مسعود چگونیان "پیشود دقت روش‌های طبقه‌بندی اکوسیستم‌های مرجانی در تصاویر ماهواره‌ای خلیج فارس" ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران – نقشه‌برداری گرایش سنجش از دور_دانشگاه خواجہ نصیر طوسی (۱۳۹۳)
- [2] Sanghvi, D., et al., Inventory and Monitoring of Coral Reefs of United Arab Emirates (UAE), Arabian Gulf, Using Remote Sensing Techniques Lauer, Matthew, and Shankar Aswani. "Integrating indigenous ecological knowledge and multi-spectral image classification for marine habitat mapping in Oceania." *Ocean & Coastal Management* 51.6 (2008): 495-504., in Climate Change and Island and Coastal Vulnerability. 2013, Springer. p. 114-125
- [3] Smith, V. Elliott, Robert H. Rogers, and Larry E. Reed. "Automated mapping and inventory of Great Barrier Reef zonation with LANDSAT data." *OCEAN 75 Conference*. IEEE, 1975.
- [4] Andréfouët, S., et al. "Typology of atoll rims in Tuamotu Archipelago (French Polynesia) at landscape scale using SPOT HRV images." *International Journal of Remote Sensing* 22.6 (2001): 987-1004.
- [5] Maina, Joseph, et al. "Modelling susceptibility of coral reefs to environmental stress using remote sensing data and GIS models." *Ecological modelling* 212.3 (2008): 180-199.
- [6] Knudby, Anders, et al. "Mapping coral reef resilience indicators using field and remotely sensed data." *Remote Sensing* 5.3 (2013): 1311-1334.
- [7] Liu, Gang, et al. "Reef-Scale Thermal Stress Monitoring of Coral Ecosystems: New 5-km Global Products from NOAA Coral Reef Watch." *Remote Sensing* 6.11 (2014): 11579-11606.
- [8] Remote sensing of coral reef: overview of integrated collaborations, projects and products, image science and analysis laboratory, NASA-Johnson Space Center, <http://eol.jsc.nasa.gov/Reefs/> (2012).

- [9] Xu, Jingping, and Dongzhi Zhao. "Review of coral reef ecosystem remote sensing." *Acta Ecologica Sinica* 34.1 (2014): 19-25.
- [10] Maeder, Jill, et al. "Classifying and mapping general coral-reef structure using Ikonos data." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68.12 (2002): 1297-1306.
- [11] A. H. Bowker, GJ Lieberman Engineering Statistics. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1972.
- [12] A. Bakhvalov, The Aral Sea case study, Leadership for Environment and Development International Inc. 1997
- [13] Farhan, Bilal, and Alan T. Murray. "A GIS-Based Approach for Delineating Market Areas for Park and Ride Facilities." *Transactions in GIS* 9.2 (2005): 91-108.
- [14] "Remote Sensing of Coastal Environments," CRC Press, 09-Dec-2009. [Online]. Available: <https://www.crcpress.com/Remote-Sensing-of-Coastal-Environments/Wang/9781420094411>. [Accessed: 10-May-2016].
- [15] E. T. Harvey, S. Kratzer, and P. Philipson, "Satellite-based water quality monitoring for improved spatial and temporal retrieval of chlorophyll-a in coastal waters," *Remote Sensing of Environment*, vol. 158, pp. 417–430, Mar. 2015.
- [۱۴] نسرین مرادی " بررسی و مدل سازی رنگ اقیانوس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی بالا " پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران – نقشه‌برداری گراییش هیدروگرافی _دانشگاه تهران(۱۳۹۵)
- [16] Authority, Great Barrier Reef Marine Park. "Great barrier reef outlook report 2014." (2014).
- [17] Ahmad, W., and D. T. Neil. "An evaluation of Landsat Thematic Mapper (TM) digital data for discriminating coral reef zonation: Heron Reef (GBR)." *International Journal of Remote Sensing* 15.13 (1994): 2583-2597.
- [18] Minnett, P. J., R. Evans, and O. B. Brown. "MODIS Terra sea surface temperature thermal (SST) and mid-infrared (SST4) data quality summary." (2003).
- [19] "EarthExplorer." [Online]. Available: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. [Accessed: 2016].