

دوفصلنامه هیدروفیزیک

دوره چهارم، شماره اول (بهار و تابستان ۱۳۹۷)

بررسی شوری سطحی آب خلیج فارس با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای
سنجنده‌های مودیس و سنجنده گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B

مریم دبستانی^۱، مهدی محمد مهدیزاده^{۲*}، ابوالحسن غیبی^۳ و جعفر عزیزپور^۴

dabestani.au@gmail.com

^۱ دانشجوی دکترا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

mehdizadeh@hormozgan.ac.ir

^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

abolhassang@yahoo.com

^۳ استادیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

azizpour@inio.ac.ir

^۴ استادیار، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۸

چکیده

این مقاله به بررسی و برآورد تغییرات شوری سطحی آب خلیج فارس با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بر مبنای روشی جدید می‌پردازد. هدف و نوآوری اصلی این کار پژوهشی آن است که بر مبنای روش‌های آماری مناسب و قابل اعتماد از توانایی داده‌های سنجش از راه دور ماهواره‌ای برای برآورد کم‌هزینه، آسان و در بازه زمانی مناسب جهت تعیین شوری سطح خلیج فارس استفاده می‌کند. در این تحقیق از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مودیس و سنجنده گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B استفاده شده است و الگوریتم آماری جدیدی برای آنالیز داده‌های آن‌ها ارائه شده است. الگوریتم جدید مبتنی بر روش رگرسیون خطی چندگانه در نرم‌افزار آماری R است. داده‌های مورد مطالعه به مدت یک سال جمع‌آوری شده است و بر مبنای الگوریتم پیشنهادی در این نرم‌افزار مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل از پردازش داده‌ها بر مبنای روش پیشنهادی حاکی از آن است که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده‌های یاد شده برای تعیین الگوی شوری سطحی آب خلیج فارس دقت کافی را دارند، همچنین بر مبنای روش جدید پیشنهادی می‌توان یک پایگاه داده آماری مفید و با دقت مناسب ایجاد نمود.

واژه‌های کلیدی: شوری سطحی آب، داده‌های سنجنده مودیس، داده‌های سنجنده گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B، خلیج فارس

۱. مقدمه

اقیانوسی است [۱]. در واقع شوری شاخصی اساسی برای چگالی آب محسوب می‌شود و تأثیر مستقیمی بر فرایندهای فیزیکی و بیوشیمیایی آب داشته و توزیع و تغییرات آن

شوری آب یک ویژگی اساسی در بررسی فرایندهای زیستی و فیزیکی مانند بیلان آب، فرایند تبخیر و جریانات دریایی و

استفاده از الگوریتم جنکین-باکس به عنوان روش مناسب تری برای استخراج سری زمانی شوری سطح دریا با استفاده از تصاویر مودیس تشخیص داده شد [۶]. کینگ و همکاران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مریس^۴ و مودیس و یک مدل رگرسیون چندگانه خطی شوری سطح آب را در دریای بوهایی^۵ به دست آوردند. ضریب تعیین کار آن‌ها ۰/۶۴ برای داده‌های مودیس، ۰/۸۳ برای داده‌های مریس و خطای مجذور میانگین مربعات ۱/۳psu بود. سپس آن‌ها مدل سازی آنالیزهای زمانی و مکانی را برای منطقه مورد نظر انجام داده و سری زمانی تغییرات شوری در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۹ معین کردند و به این نتیجه رسیدند که شوری در اکثر نقاط دریای بوهایی افزایش داشته است [۷]. مارگانی و راملان شوری سطح دریا را برای سونامی سال ۲۰۰۴ اندونزی بر مبنای تصاویر مودیس و با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات خطی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها این کار را برای قبل، حین و بعد از سونامی انجام دادند و با ضریب همبستگی ۰/۹۸ با داده‌های مشاهداتی به این نتیجه رسیدند که بعد از سونامی شوری به بیشترین میزان خود می‌رسد و شوری در سطح آب، در مقایسه با قبل از سونامی، تغییر قابل ملاحظه‌ای کرده است [۸]. کورسو و همکاران توزیع آب تازه رودخانه آمزون را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با به کار بردن داده‌های شوری سطح آب گرفته شده از داده‌های ماهواره‌های مودیس و اسموس^۱ و آکواریس^۲ و داده‌های شبیه‌سازی شده^۶ توپاز^۶ مدل سازی کرده‌اند. در نهایت، مقایسه با داده‌های مشاهداتی با ضریب همبستگی بالای ۰/۸۴ داده‌های شوری را به دست آوردند [۹]. امینی و همکارانش برآورد آب معادل برف در استان کرمان برای مدیریت منابع آب با استفاده از داده‌های سنجنده گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B به روش شبکه عصبی و تکنیک رگرسیون چندگانه بررسی کردند و نتایج به دست آمده از روش شبکه عصبی با مقادیر شاخص (خطا MSE= 0.11 و RMSE=0.05) برای ۱۰۴ روز انتخابی و برآورد بهتری نسبت به روش رگرسیون خطی چندگانه با مقادیر شاخص (MSE=7.51 و RMSE=2.74) داشته است [۱۰]. کشتی تحقیقاتی نوا به نام متی میتچیل^۷ در ماه‌های فوریه تا ژوئن ۱۹۹۲ در خلیج فارس،

می‌تواند بر برخی از پدیده‌ها و فرایندهای اقیانوسی مؤثر باشد [۲]. در حال حاضر مطالعات شوری آب دریاها بسیار پراکنده و کم است به صورتی که نمی‌توان نمای مناسبی از تغییرات زمانی و مکانی شوری آب را به صورت جهانی ارائه داد [۳]. از این رو پژوهشگران این حوزه، برای برآورد داده‌های شوری سطح دریا، شناخت توزیع زمانی و مکانی آن، ناگزیر به استفاده از فن سنجنش از راه دور هستند. سنجنش از راه دور ماهواره‌ای نظیر لی پتانسیل جدیدی را برای برآورد شوری سطح آب دریا به وجود می‌آورد که از مزایای آن پوشش مکانی، فضایی وسیع و مشاهدات زمانی نزدیک‌تر به زمان واقع است [۴]. به طور کلی دو رویکرد در به کارگیری سنجنده‌ها در مطالعات شوری، شکل گرفت. برخی از پژوهشگران بر داده‌های سنجنده‌های ماکروویو مطالعات خود را انجام دادند [۵] و برخی نیز از سنجنده‌های اپتیکال استفاده نمودند. بعد از سال ۲۰۰۹ نیز به دلیل اهمیت موضوع پایش شوری سطح آب و کاربرد آن در تمام مطالعات اقیانوس‌شناسی، دو ماهواره اسموس^۱ و آکواریس^۲ به خصوص با مأموریت برداشت داده‌های شوری آب به فضا ارسال شدند [۲]. این دو ماهواره شوری آب اقیانوس‌ها و آب‌های آزاد را با دقت ۰/۲ psu اندازه‌گیری می‌کنند. البته این دو ماهواره به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا با موقعیت آب‌های ایران، برای این پژوهش مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. مطالعات متعددی برای استخراج شوری سطح دریا از داده‌های ماهواره‌ای در این رابطه هست که در ادامه توضیح داده می‌شود. اوراکارت و همکاران در سال ۲۰۱۲ هشت مدل آماری را برای پیش‌بینی شوری از بازتابی اندازه‌گیری مودیس مقایسه کردند و نشان دادند که مدل‌های چندمتغیره در چنین کاربردی در مقایسه با مدل‌های یکنواخت مناسب‌تر هستند. مارگانی و همکارانش شوری سطح آب را از تصاویر مودیس با استفاده از الگوریتم جنکین-باکس^۳ به دست آوردند. همچنین آن‌ها توانایی این الگوریتم را با توانایی الگوریتم حداقل مربعات مقایسه کردند که نتایج ضریب همبستگی الگوریتم‌های جنکین-باکس و حداقل مربعات به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۶ بود. همچنین خطای مجذور میانگین مربعات به ترتیب ۰/۳۴±psu و ۰/۳۲±psu بود. در نهایت

استفاده شده است که شامل، میانگین خطای کمترین مربعات^۱، همچنین ضریب تعیین (R^2) است.

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲-۲. داده‌ها

۱-۱-۲. منطقه مورد مطالعه و داده‌های میدانی

خلیج فارس دریای نیمه بسته با میانگین عمق ۳۷ متر است که از طریق تنگه هرمز به دریای عمان متصل شده است. به دلیل قرار گرفتن در محدوده کم‌بارش، شوری و چگالی آب خلیج فارس بالاست. تنگه هرمز محل تبادل آب چگال خلیج فارس و آب کم‌چگال اقیانوس هند است که باعث گردش آب در خلیج فارس می‌شود [۱۲]. برای جمع‌آوری داده‌های واقعی مربوط به محدوده خلیج فارس از بویه^۱ که در ایستگاه دریایی بوشهر مستقر بود استفاده شده است. این بویه در شکل یک نشان داده شده است که اغلب داده‌هایی به صورت پراکنده از آن جمع‌آوری می‌شود. این بویه از نوع^۲ امواج اقیانوسی است و همان‌گونه که در شکل دو نمایش داده شده است در محدوده جنوب غربی بوشهر با مختصات جغرافیایی $28^{\circ} 55' N$ و $50^{\circ} 45' E$ در خلیج فارس نصب و راه‌اندازی شده است. این بویه داده‌هایی مانند رطوبت هوا، فشار هوا، سرعت باد و ارتفاع موج و ... را با دقت مناسب در اختیار بهره‌بردار قرار می‌دهد. داده‌های شوری که در کار پژوهشی حاضر از اهمیت اصلی برخوردار هستند، نیز با دقت مناسبی در فاصله‌های زمانی هر یک ساعت به وقت گرینویچ از این بویه برداشت می‌شوند.



شکل ۱. تصویری از بویه ایستگاه بوشهر

تنگه هرمز و خلیج عمان فعالیت داشت. از هفت گشت انجام‌شده، شش گشت برای اندازه‌گیری پارامترهای اقیانوس‌شناسی فیزیکی اختصاص داده شد. انواع مشاهدات اقیانوس‌شناختی فیزیکی انجام گرفته است: ۱. بیش از ۵۰۰ نیم رخ هدایت الکتریکی - درجه حرارت - عمق ستون آب؛ ۲. هفت سری سامانه مهار نصب شده که ۶ مورد بازیابی شدند و در مجموع ۱۱ رکورد جدید را در عمق‌های مختلف به دست آورده است. ۳. ۳۶ شناور با موقعیت‌های آرگوس^۸ مستقر شدند. ۴. اندازه‌گیری‌های مداوم کشتی از متغیرهای هواشناسی و اقیانوس‌شناختی ثبت شد. مجموعه داده‌های کامل، گذار فصلی مهم از میانه زمستان تا اوایل تابستان را پوشش می‌دهد. در طی این دوره از زمان، گرمایش خورشیدی یک ترموکلاین شدید ایجاد کرد که لایه ترکیبی سطح را از آب داخلی جدا می‌کند. در این مقاله تنها اندازه‌گیری‌های اقیانوس‌شناسی فیزیکی در حوضه موردنظر در طول گشت‌های ۱ و ۶ بررسی شده است. الگوریتم‌های هیدروگرافی استاندارد برای محاسبه شوری از هدایت الکتریکی، دما و فشار استفاده شد. از شوری و دما، چگالی محاسبه شده است [۱۱].

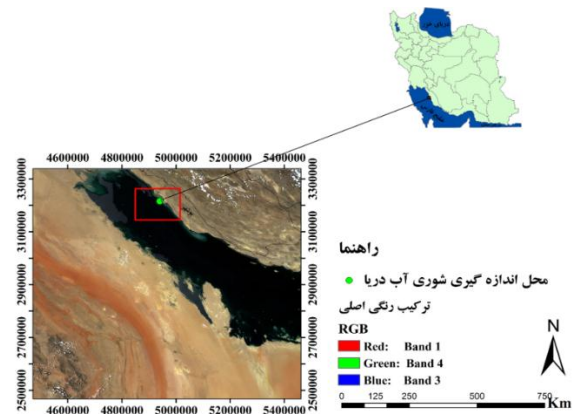
داده برداری میدانی در دریا فرایندی بسیار پرهزینه و زمان‌بر است و این مهم از جمله دلایلی است که محققان را به استفاده از داده‌های ماهواره‌ای تشویق می‌کند. با وجود انجام مطالعات متعدد در خصوص رفتار شوری سطحی منطقه خلیج فارس و استفاده از داده‌های سنجنده‌های دور در این کارها، تاکنون از داده‌های سنجنده گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B^۹ روی ماهواره نوا-۱۶ برای این مقصود استفاده نشده‌اند و داده‌های سنجنده مودیس^{۱۰} نیز به‌ندرت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از این رو تحقیق حاضر تلاش می‌کند تا با جزئیات به این مورد بپردازد. به عبارت دیگر، هدف از این مطالعه، ارائه یک رویکرد جدید برای به‌دست آوردن الگوریتم شوری سطح دریا با استفاده از داده‌های سنجنده‌های دور این دو ماهواره است. در انجام این کار، از دو پارامتر آماری برای ارزیابی تفاوت بین اندازه‌گیری‌های میدانی و داده‌های ماهواره

۷۰۵ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد. این سکوها، خورشید هم زمان هستند و مدار نزدیک قطبی و طول عمر ۶ سال دارند و سطح کل زمین را هر ۱ تا ۲ روز می‌پیمایند. این سنجنده دارای ۳۶ باند طیفی با قدرت تفکیک رادیومتریکی ۱۲ بیت است که از طول موج ۰/۴ تا ۴/۱۴ میکرون را پوشش می‌دهد. قدرت تفکیک مکانی این سنجنده در دو باند اول آن ۲۵۰ متر، در ۵ باند بعدی ۵۰۰ متر و در سایر باندها ۱۰۰۰ متر است [۱۴، ۱۵]. مودیس بعد از داده‌های سطح یک و سطح دو خود، محصولات دیگری نیز دارد که ابتدایی‌ترین محصولات آن داده‌های سطح ۰۹ است. دلیل استفاده از این محصول مودیس در پژوهش پیش رو این است که تصحیحات اتمسفری و برخی تصحیحات هندسی روی تصاویر اعمال شده است. محصولات سطح ۰۹ مودیس که در واقع به محصولات بازتابندگی مودیس معروف هستند، بسته‌های مختلفی را شامل می‌شوند. در این پژوهش از بسته می‌دی ۰۹ جی ۱^۵ که شامل داده‌های روزانه بازتابندگی ۵۰۰ متری مودیس در باندهای ۷، ۴، ۳، ۲، ۱ است، استفاده شده که جزئیات آن در جدول ۱ ارائه شده است [۱۶].

جدول ۱. مشخصات باندهای مودیس

شماره باند	قدرت تفکیک مکانی	عرض باند (نانومتر)
۱	۲۵۰ متر	۶۲۰-۶۷۰
۲	۲۵۰ متر	۸۴۱-۸۷۶
۳	۵۰۰ متر	۴۵۹-۴۷۹
۴	۵۰۰ متر	۵۴۵-۵۶۵
۵	۵۰۰ متر	۱۲۳۰-۱۲۵۰
۶	۵۰۰ متر	۱۶۲۸-۱۶۵۲
۷	۵۰۰ متر	۲۱۰۵-۲۱۵۵

بازتابندگی در تصاویر ماهواره‌ای به صورت نسبت انرژی تابشی یک جسم به انرژی تابشی فرودی به آن جسم تعریف می‌شود. در این تحقیق از تصاویر روزانه ماهواره اکوا-مودیس (بسته می‌دی ۰۹ جی ۱) مربوط به سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ میلادی استفاده شده است. تصاویر یادشده با فرمت اچ‌دی‌اف ۱۶ از سایت سازمان نقشه‌برداری جغرافیایی آمریکا^{۱۷} دانلود شده است و پیش‌پردازش‌ها و کالیبراسیون مربوطه با



شکل ۲. منطقه مورد مطالعه برای برداشت داده و محل نصب بویه در محدوده خلیج فارس

۲-۱-۲. داده‌های ماهواره

در این مطالعه از داده‌های دو ماهواره مهم سنجنش از راه دور استفاده شده است. این ماهواره‌ها عبارت‌اند از (الف) ماهواره نوا سنجنده گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B، (ب) ماهواره آکوا سنجنده مودیس. در ادامه با جزئیات بیشتری به شرح هر کدام می‌پردازیم.

(الف) گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته: این گمانه‌زن با ۲۰ کانال هم‌اکنون بیشترین گستره طیفی ابزارهای سنجنش مایکروویو پرتاب شده به فضا را تشکیل می‌دهد و نسبت به سایر ابزارهای سنجنش مایکروویو به‌طور قابل ملاحظه‌ای پیشرفته‌تر است. قدرت تفکیک مکانی و زمانی بهتر، دقت تابش سنجنی پیشرفته‌تر و تعداد کانال‌های بیشتر نسبت به ابزارهای سنجنش قبلی از ویژگی‌های بارز این گمانه‌زن است. این ابزار سنجنش روی ماهواره‌های مدار قطبی نوا قرار دارد که در ارتفاع ۸۵۰ کیلومتری سطح زمین هر ۱۰۲ دقیقه یک بار به دور زمین می‌چرخد. واحد گمانه‌زن AMSU به دو بخش گمانه‌زن پیشرفته A و B تقسیم‌بندی شده است. کانال‌های ۱ تا ۱۵ مربوط به گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد A و کانال‌های ۱۶ تا ۲۰ مربوط به گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B و هر دو واحد با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر است. این ابزارهای سنجنش برای گمانه‌زنی دما و رطوبت جوی طراحی شده است [۱۳].

(ب) ماهواره آکوا سنجنده مودیس: سنجنده مودیس روی دو سکوی آکوا ۱۳ و ترا ۱۴ نصب شده است که در مدار

X_n ($n=1,2,\dots,n$)، β = ضریب متغیر مستقل، و ε = مانده‌های مدل در این روش است.

برای انجام آنالیزهای لازم، یک معادله رگرسیون خطی چندگانه به داده‌های اولیه ورودی برآزش داده می‌شود و ضرایب مدل برآورد می‌شود. فرض‌های اولیه لازم برای انجام تحلیل رگرسیون خطی چندگانه عبارت‌اند از:

۱. متغیر وابسته باید دارای توزیع نرمال باشد؛
۲. بین متغیرهای مستقل نباید هم‌خطی وجود داشته باشد؛
۳. جمله‌های خطا باید مستقل باشند و واریانس ثابت داشته باشند.

اگر در مجموعه داده‌ها این سه فرض حاکم باشد، آن‌گاه استفاده ما از رگرسیون خطی چندگانه درست است. در غیر این صورت اگر این فرض‌ها برقرار نباشند، به‌طور کلی رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته خطی نیست و باید از روش‌های دیگری استفاده شود. برای انجام رگرسیون خطی چندگانه از نرم‌افزار آماری R استفاده شده است. برای انجام تحلیل، در ابتدا ۷ باند اول سنجنده مودیس به‌عنوان متغیرهای مستقل ورودی و شوری سطح آب به‌عنوان متغیر وابسته انتخاب شد. برای بررسی برقرار بودن اولین فرض لازم رگرسیون از آزمون کلموگراف-اسمیرنوف استفاده شد تا شرط نرمال بودن توزیع متغیر وابسته (داده‌های شوری آب) مورد آزمایش قرار گیرد. برای بررسی شرط (فرض) دوم از ماتریس اسکتر پلات^{۲۳} برای اعمال بر متغیرهای مستقل ورودی (داده‌های بانندی) و تشکیل جدول ضرایب همبستگی استفاده شده است. پس از ایجاد مدل رگرسیون و به‌دست آمدن ضرایب معادله رگرسیون خطی چندگانه، برای بررسی معنی‌داری کل مدل، جدول آنالیز واریانس تشکیل شد. علاوه بر آن برای بررسی درستی فرض سوم برای اطمینان از صحت انجام رگرسیون خطی، نمودار اسکتر پلات مانده‌ها در برابر پیش‌بینی نیز رسم شده است [۱۷].

۴-۲ اعتبارسنجی

یکی از روش‌های مطمئن برای بررسی دقت مقادیر به‌دست آمده، استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی است که

کمک ابزار (مودیس کانزرویویشن-ام‌سی‌تی کی تول‌کیت^{۱۸}) در نرم‌افزار ان‌وی^{۱۹} (نسخه ۵,۳) صورت گرفته است. سپس اطلاعات بانندی پیکسل‌هایی با داده‌های مشاهداتی با نرم‌افزار ارک‌جی‌ای‌اس^{۲۰} استخراج شده است [۱۷].

۲-۲ رابطه داده‌های حاصل سنجنش از دور و داده‌های میدانی

در تحقیق حاضر برای بررسی شوری سطحی آب دریا از رابطه رگرسیون بین داده‌های سنجنده مودیس و گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B با داده‌های میدانی استفاده شده است. به‌منظور امکان کالیبره کردن اطلاعات به‌دست آمده از داده‌های ماهواره، اندازه‌گیری‌های میدانی ضروری است و بدین لحاظ داده‌های واقعی بر اساس داده‌های ایستگاه دریایی بوشهر انتخاب شده‌اند. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد برای تعیین، مقایسه زمانی و مکانی شوری سطحی آب خلیج فارس، از داده‌های سنجنده‌های یادشده مربوط به سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ میلادی در کنار داده‌های میدانی متناظر مربوط به سال‌های مشابه مدنظر قرار گرفته‌اند. با توجه به کاربردهای متعدد شوری آب و با هدف ایجاد ابزاری مناسب برای محاسبه پارامترها، از الگوریتم‌ها و روش‌های موجود (متداول) برای محاسبه SSS^{۲۱} استفاده شده است. بر مبنای داده‌های سنجنده‌های یادشده، از روش رگرسیون خطی چندگانه^{۲۲} در نرم‌افزار آماری R استفاده شده است. در این تحلیل داده‌های ماهواره‌ها به‌عنوان ورودی در نرم‌افزار و خروجی الگوریتم میزان شوری سطحی آب است.

۲-۳ رگرسیون خطی چندگانه

در برخی از مسائل پژوهشی، به‌ویژه آن‌هایی که با هدف ارائه مدلی برای پیش‌بینی انجام می‌شوند، تعیین میزان تأثیر متغیرهای مستقل تحقیق بر متغیر وابسته اهمیت زیادی دارد. یکی از پرکاربردترین روش‌هایی که به واسطه آن این اثرگذاری‌ها بررسی می‌شوند، روش «رگرسیون چندگانه» نام دارد. مدل رگرسیون خطی چندگانه به شرح زیر بیان می‌شود:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \dots + \beta_n X_{n,i} + \varepsilon_{n,i}$$

که در آن $i = Y_i$ = آمین مشاهده متغیر وابسته، α = عرض از مبدأ (مقدار ثابت)، $i = X_{n,i}$ = آمین مشاهده برای متغیر مستقل

گرفت که شرط اول صحت انجام تحلیل رگرسیون خطی در مورد متغیر وابسته داده‌های این سنجنده درست است.

جدول ۲. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بر روی داده‌های سنجنده اول (گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B)

متغیر	آماره آزمون	p
شوری	۰/۲۳۲	۰/۰۰۰

برای بررسی فرض لازم دوم از تحلیل بر ماتریس همبستگی استفاده شده است. جدول ۳ نتایج اعمال این ماتریس را برای داده‌های این سنجنده ارائه می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، میان متغیرهای مستقل همبستگی بالایی وجود ندارد. بنابراین بین متغیرهای مستقل هم خطی وجود نخواهد داشت و از این رو فرض لازم دوم نیز برای داده‌های این سنجنده صادق است.

جدول ۳. ماتریس همبستگی میان متغیرهای مستقل مربوط به داده‌های سنجنده اول

	Tb1	Tb2	Tb3	Tb4	Tb5
Tb1	۱				
Tb2	۰/۸۸۵	۱			
Tb3	-۰/۳۲۳	-۰/۱۳۷	۱		
Tb4	-۰/۴۰۲	-۰/۱۹۹	۰/۸۱۹	۱	
Tb5	-۰/۲۱۰	۰/۰۴۷	۰/۶۲۲	۰/۸۲۳	۱

برای بررسی فرض لازم سوم روش رگرسیون خطی، از رسم نمودار مانده‌ها در برابر مقادیر پیش‌بینی استفاده می‌شود. این نمودار برای معادله رگرسیون داده‌های این سنجنده در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه در این نمودار الگوی خاصی مشاهده نمی‌شود، بنابراین؛ مانده‌ها واریانس ثابتی دارند و فرض لازم سوم نیز برای داده‌های این سنجنده برقرار است.

پس از اطمینان از برقراری و صحت فرضیه‌های سه‌گانه زیربنایی رگرسیون، در ادامه به تحلیل رگرسیون نتایج حاصله برای شوری آب پرداخته می‌شود. اما ابتدا معناداری مدل با استفاده از آزمون آنالیز واریانس بررسی می‌شود. نتایج آزمون آنالیز واریانس، که در جدول ۴ شرح جزئیات آن آمده است، نشان می‌دهند که مدل‌های رگرسیون شوری

هم‌زمان با داده‌های ماهواره‌ای صورت گرفته باشند. برای این منظور می‌توان از دستگاه‌هایی که در تحقیقات اقیانوس‌شناسی برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف دریا به کار می‌روند استفاده کرد. یکی از محدودیت‌های مطالعاتی این تحقیق و اغلب تحقیقات مشابه، کمبود اطلاعات پایه و ناپوستگی در این اطلاعات است. در این مطالعه از داده‌های میدانی ایستگاه بوشهر برای سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ میلادی به منظور اعتبارسنجی خروجی مدل پیشنهادی استفاده شده است. برای مقایسه داده‌های ماهواره‌ای و میدانی، می‌توان از میانگین خطای کمترین مربعات بین این دو داده استفاده کرد که تعریف عمومی آن در رابطه زیر بیان شده است [۱۳].

$$RMSE_{SSS} = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N SSS - SSS_{in situ} \right]^2 \quad (1)$$

در معادله بالا N تعداد داده‌های میدانی، SSS شوری سطحی آب از داده‌های ماهواره‌ای و SSS in situ شوری سطحی آب مربوط به داده‌های میدانی است.

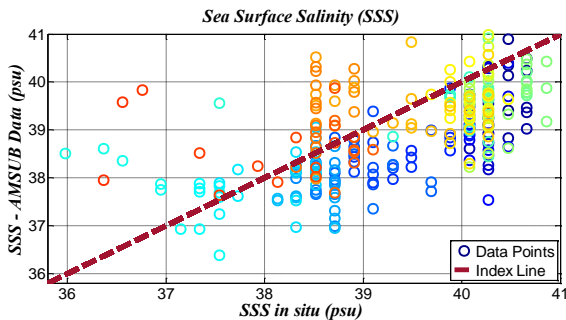
۳. نتایج

۱-۳. نتایج تحلیل شوری آب با استفاده از داده‌های سنجنده گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B

همان‌طور که در بخش ۳-۲ اشاره شد، برای داشتن یک تحلیل مناسب و قابل اعتماد، در این کار پژوهشی از روش رگرسیون چندگانه خطی استفاده شده است. از این رو در اولین گام و به منظور اطمینان از صحت استفاده از این روش، باید فرض‌های اولیه لازم آن که در بخش ۳-۲ بیان شده است مورد بررسی قرار گیرند. بنابراین برای بررسی نرمال بودن متغیرهای مستقل حاصله از داده‌های این سنجنده نیز از آزمون کلموگراف - اسمیرنوف استفاده شده است. همان‌طور که در بخش ۳-۲ اشاره شد این آزمون برای بررسی ادعای مطرح شده در مورد نرمال بودن توزیع داده‌های یک متغیر کمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمون مذکور بر داده‌های این سنجنده در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نتایج این آزمون مقدار ۰/۲ را نشان می‌دهد. این مقدار از میزان ۰/۰۵ که آستانه درست بودن این آزمون است بالاتر است. بنابراین می‌توان نتیجه

است که چون مقداری نزدیک به صفر است، دقت مناسب الگوریتم را نشان می‌دهد.

$$SSS = C_0 + C_1 Tb_3 + C_2 Tb_5 + C_3 (Tb_4 - Tb_1) + C_4 (Tb_2 - Tb_1) \quad (2)$$



شکل ۴. مقادیر میدانی شوری در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به داده‌های سنجنده اول

۲-۳. نتایج تحلیل شوری آب با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس

برای بهینه‌سازی تصاویر با نرخ‌های طیفی از روش‌های کالیبره کردن خطی-تجربی استفاده شده است. از این رو از قاعده و اصول استفاده از بخش‌های تاریک و روشن پیکسل‌ها، برای حذف اثرات اتمسفری استفاده شده است. همچنین برای سنجش نسبت بین باندی و پارامتر شوری سطحی دریا (SSS) از رابطه‌های ۳ و ۴ استفاده شده است [۱۴].

$$MD = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i (MODIS) \quad (3)$$

در رابطه ۳، MD داده دریایی، A_0 عدد ثابت برای هر الگوریتم و A_i ضریب باند مورد استفاده برای هر الگوریتم است.

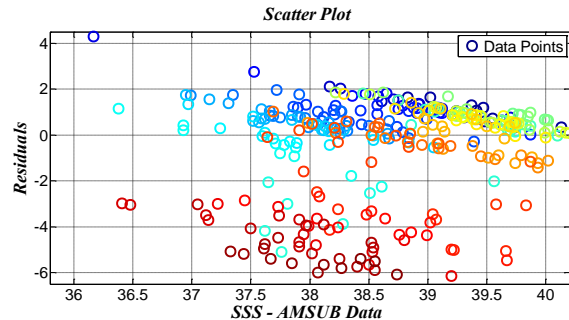
$$R_{rs}(sr^{-1}) = \frac{L_0 - (f * L_s(\lambda))}{E_d(\lambda)} \quad (4)$$

همچنین در رابطه ۴، $R_{rs}(sr^{-1})$ نسبت بازتاب بین‌باندی، پارامتر L_0 برابر تابش به سطح آب، f ضریب ثابت، L_s تابش بازتاب و E_d ضریب ثابت برای باندهاست.

در نهایت مقدار شوری (SSS) را می‌توان از رابطه ۵ محاسبه نمود.

$$SSS = 14.256 - 240.163 \times Band1 - 72.533 \times Band2 + 124.7 \times Band3 + 191.266 \times Band4 + 36.044 \times Band5 - 9.789 \times Band7 \quad (5)$$

معنادار هستند و برای تحلیل داده‌ها می‌توان از روش رگرسیون استفاده کرد ($p < 0.05$).



شکل ۳. نمودار مانده‌ها در برابر مقادیر پیش‌بینی برای شوری آب مربوط به داده‌های سنجنده اول

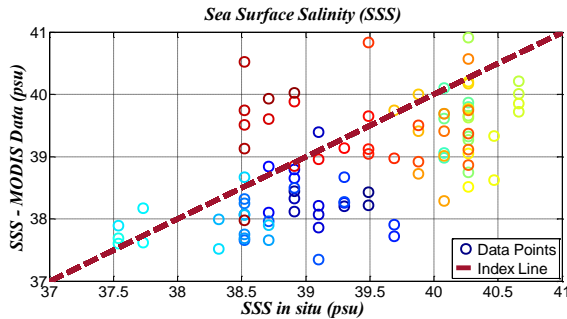
نتایج تحلیل رگرسیون برای شوری در جدول ۴، همچنین شکل ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، متغیرهای Tb_3 ، Tb_5 ، $Tb_4 - Tb_1$ و $Tb_2 - Tb_1$ در مدل معنادار هستند. بنابراین معادله رگرسیون شوری بر حسب باندها را می‌توان به صورت معادله ۲ بیان نمود. در این معادله SSS میزان شوری سطح آب و C_0 ، C_1 ، C_2 ، C_3 ، C_4 ضرایب رگرسیون و Tb_3 ، Tb_5 ، $Tb_4 - Tb_1$ و $Tb_2 - Tb_1$ باندهای سنجنده (گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B) هستند.

جدول ۴. نتایج تحلیل رگرسیون برای شوری مربوط به داده‌های سنجنده اول

متغیر	ضریب رگرسیون	خطای استاندارد	T	معناداری
c	۶۵٫۴۴	۲/۹۱۴	۲۲/۴۴	***
Tb۳	-۰/۰۳۱	۰/۰۱۱	-۲/۹۷۵	***
Tb۵	-۰/۰۵۷	۰/۰۱۱	-۵/۱۰۷	***
Tb۴-Tb۱	۰/۰۲۵	۰/۰۰۶	۴/۳۲۷	***
Tb۲-Tb۱	-۰/۰۸۴	۰/۰۱۵	-۵/۷۸	***

مقایسه میزان شوری حاصل از داده‌های سنجنده (گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B) و داده‌های میدانی در شکل ۴ نشان داده شده است. مقدار ضریب تعیین (R^2) برای داده‌های این مدل برابر با ۰/۸۵ است که نشان می‌دهد در مدل رگرسیونی متغیرهای مستقل ۸۵ درصد از تغییرات متغیر وابسته را تبیین می‌کنند. همچنین مقدار میانگین خطای کمترین مربعات برای داده‌های این الگوریتم برابر با ۰/۰۷ psu

می شود، مقادیر میدانی شوری و مقادیر حاصل از الگوریتم حول نیمساز ربع اول قرار گرفته اند که نشان می دهد مقادیر حاصل از الگوریتم به مقادیر میدانی نزدیک هستند و با یکدیگر تفاوت چندانی ندارند.



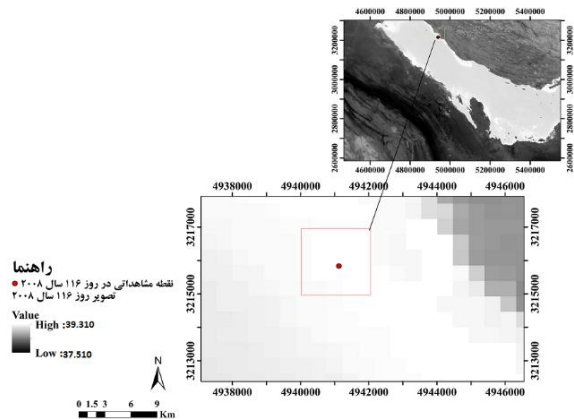
شکل ۷. مقادیر میدانی شوری در مقایسه با مقادیر پیش بینی شده مربوط به داده های سنجنده دوم (مودیس)

مرحله بعد اعتبارسنجی الگوریتم حاصل از اعمال رگرسیون بر داده های مشاهداتی و تصاویر ماهواره ای است که نتایج به دست آمده از مدل رگرسیون خطی چندگانه در جدول ۵ نشان داده شده است. همان گونه که در جدول ۵ ملاحظه می شود مقادیر ضریب تعیین (R^2) به ترتیب برای شوری با استفاده از سنجنده مودیس و گمانه زن مایکروویو پیشرفته واحد B برابر با ۰/۸۱ و ۰/۸۵ است. همچنین میانگین خطای کمترین مربعات به ترتیب برای شوری با استفاده از سنجنده مودیس و گمانه زن مایکروویو پیشرفته واحد B برابر با psu ۰/۶۴ و psu ۰/۰۷ به دست آمده است. این موارد نشان دهنده آن است که قدرت تفکیک مکانی سنجنده گمانه زن مایکروویو پیشرفته واحد B بهتر از سنجنده مودیس است. علاوه بر آن همان گونه که اطلاعات این جدول نشان می دهد از دیدگاه کلی می توان بیان نمود که با وجود کمبود داده های میدانی که وقت گیر و پرهزینه است، می توان با استفاده از داده های ماهواره با دقت بالا شوری سطحی در هر زمان و مکان را به دست آورد.

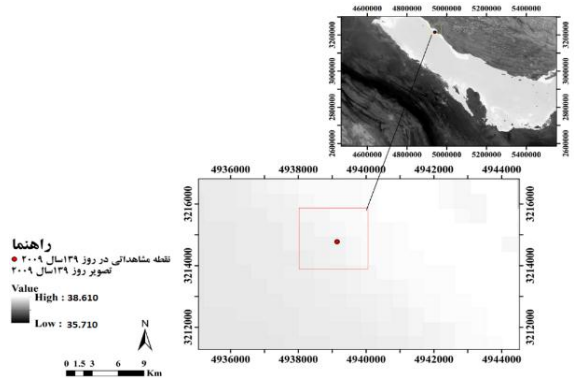
جدول ۵. نتایج حاصل از مدل پیشنهادی برای سنجنده های اول و دوم

مدل	ضریب تعیین R^2	جذر میانگین مربع خطا (RMSE)
SSS AMSU-B	۰/۸۵	psu ۰/۰۷
SSS MODIS	۰/۸۱	psu ۰/۶۴

با توجه به رابطه ۵ مقدار R^2 برای داده های این مدل برابر با ۰/۸۱ است که نشان می دهد در مدل رگرسیونی متغیرهای مستقل ۸۱ درصد از تغییرات متغیر وابسته را تبیین می کنند. همچنین مقدار میانگین خطای کمترین مربعات برای داده های این الگوریتم برابر با psu ۰/۶۴ است که چون مقداری نزدیک به صفر است، دقت مناسب الگوریتم را نشان می دهد. در ادامه به منظور بیان نمونه ای از فایل های رستری حاصل از اعمال الگوریتم بر تصاویر مانند نقاط مشاهداتی را ملاحظه فرمایید. در شکل های ۵ و ۶ نتایج اجرای الگوریتم برای داده های روز ۱۶ سال ۲۰۰۸ و روز ۱۳۹ سال ۲۰۰۹ را نشان می دهند.



شکل ۵. نقشه مدل سازی شوری قبل از اعتبارسنجی برای روز ۱۶ سال ۲۰۰۸



شکل ۶. نقشه مدل سازی شوری قبل از اعتبارسنجی برای روز ۱۳۹ سال ۲۰۰۹

شکل (۷) نمودار مقادیر پیش بینی شده حاصل از الگوریتم را در مقابل مقادیر میدانی شوری مربوط به سنجنده دوم (مودیس) را نشان می دهد. همان طور که در این شکل ملاحظه

در این کار پژوهشی رویکردی جدید برای به دست آوردن الگوریتم مناسب برای تعیین میزان شوری سطح دریا با استفاده از داده‌های سنجنش از راه دور ماهواره‌ای پیشنهاد شد. در انجام این کار، روش کمترین مربعات برای استخراج الگوریتم جدید شوری سطحی آب از سنجنده مودیس و گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B استفاده شد. این الگوریتم پیشنهادی، ضریب تعیین و میانگین خطای کمترین مربعات را برای به دست آوردن نتایج دقیق به کار می‌گیرد و به نحو مطلوبی شوری سطحی آب در خلیج فارس را تعیین می‌کند. در مقایسه با پژوهش‌هایی که قبلاً در این زمینه صورت پذیرفته است، نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل پیشنهادی در این کار پژوهشی از نظر میزان ضریب تعیین، نتیجه مطلوب‌تری را به دست داده است.

علاوه بر آن، نتایج مطلوب حاصل از روش پیشنهادی در این کار تأیید می‌کند که با توجه به کمبود داده‌های میدانی که وقت گیر و پرهزینه است می‌توان با استفاده از داده‌های ماهواره با دقت بالا شوری سطحی در هر زمان و مکان را به دست آورد. از این رو می‌توان ادعا نمود که روش پیشنهادی، که مبتنی بر آنالیز آماری داده‌های ماهواره‌ای است، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی برای ایجاد پایگاه داده مورد اعتماد و دقیق باشد.

مراجع

- [1] Koblinsky CJ, Hildebrand P, LeVine D, Pellerano F, Chao Y, Wilson W, Yueh S, Lagerloef G. Sea surface salinity from space: Science goals and measurement approach. *Radio Science*. 2003 Aug;38(4).
- [2] Ahn YH, Shanmugam P, Moon JE, Ryu JH. Satellite remote sensing of a low-salinity water plume in the East China Sea. In *Annales geophysicae atmospheres, hydrospheres and space sciences*. 2008 Jul 28; 26(7): 2019-203 .
- [3] Klemas V. Remote sensing of sea surface salinity: an overview with case studies. *Journal of Coastal Research*. 2011 Jul 6;27(5):830-38.
- [4] Khorram S. Remote sensing of salinity in the San Francisco Bay Delta. *Remote Sensing of Environment*. 1982 Mar 1;12(1):15-22.
- [5] Font J, Camps A, Ballabrera-Poy J. Microwave aperture synthesis radiometry: paving the path

مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با نتایج حاصل از برخی مقاله‌های دیگر نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در این کار تحقیقاتی نتایج به مراتب مناسب‌تری را داشته است. به عنوان نمونه می‌توان به کار تحقیقاتی ونگ و همکارانش [۱۴]، کینگ و همکارانش [۷]، کورسو و همکارانش [۹] اشاره نمود. علاوه بر این در مدل پیشنهادی ما میزان R^2 کمتری نسبت به برخی مقاله‌های دیگر حاصل شده است که از آن جمله می‌توان به مواردی همچون دقامچه و همکارانش در سال ۲۰۰۹، مارگانی و همکارانش در سال ۲۰۱۴، اشاره نمود [۹، ۷، ۱۶]. همچنین علاوه بر همه این مزایا، بر اساس شاخص RMSE، مدل‌سازی پیشنهادی بر مبنای داده‌های حاصل از سنجنده گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد B نسبت به تمامی پژوهش‌ها نتایج بهتری در برداشت؛ چرا که تاکنون بهترین میانگین خطای کمترین مربعات مربوط به مقاله مارگانی و همکاران در سال ۲۰۱۱ بود که شوری را با دقت 0.32 psu و الگوریتم جنکین - باکس مدل‌سازی کردند [۶]. همچنین مطالعات ونگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ در مورد شدت تغییرات در میزان شوری سطح آب، با نتایج این پژوهش همخوانی دارد [۷].

۶. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اشراف ایران به بخش عظیمی از آب‌های خلیج فارس، لازم است که در موقعیت‌ها و زمان‌های مختلف از نظر فصول و سال‌ها اندازه‌گیری‌های میدانی انجام پذیرد تا بتوان پایگاه داده مناسبی از داده‌های میدانی در ارتباط با شوری آب در اختیار داشت. ایجاد پایگاه داده شوری سطحی آب در خلیج فارس از آن جهت حائز اهمیت است که برداشت مداوم داده‌های میدانی با هزینه‌های بالا و صرف زمان زیاد همراه است. برای رسیدن به این هدف و ایجاد پایگاه داده مناسب می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند تناظریابی و پس از محاسبه پارامترهای لازم، شوری سطحی آب را تعیین نمود. اما راه‌حل ساده‌تر آن است که با اضافه کردن مؤلفه‌های جزرومد، باد و نیروی کریولیس شوری سطحی آب را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تعیین کرد. اما این روش ساده‌تر نیازمند ارائه یک الگوریتم جدید است.

- [16] Daqamseh ST, Shattri M, Mahmud M, Pirasteh S, Marghany AR, Zailani MK. Monitoring ocean parameters using MODIS satellite data. Far East Journal of Ocean Research. 2009.
- [17] بختیار کیا مسعود. برآورد الگوریتم شوری سطح آب دریای عمان با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS. ارائه شده در: مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم زمین؛ ۱۳۹۵ فروردین ۲۴-۲۶؛ شیراز، ایران.
- [18] Marghany M. Linear algorithm for salinity distribution modelling from MODIS data. In 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2009 Jul 12.
- [19] Morel A, Mueller JL. Normalized water-leaving radiance and remote sensing reflectance: Bidirectional reflectance and other factors. Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation. 2002 Feb;2:183-210.
- for sea surface salinity measurement from space. In Remote sensing of the European seas. 2008 Apr 30.
- [6] Marghany M, Hashim M. Retrieving seasonal sea surface salinity from MODIS satellite data using a Box-Jenkins algorithm. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2011 Jul 24.
- [7] Qing s, Zhang J, Cui T, Bao Y. Retrieval of sea surface salinity with MERIS and MODIS data in the Bohai Sea. Remote Sensing of Environment. 2013 Sep 1;136:117-25.
- [8] Ramlan NE, Marghany M, Van Genderen J, Hashim M. Simulation of tsunami effects on sea surface salinity using MODIS satellite data. Earth and Environmental Science. 2014 Aug 10 .
- [9] Korosov A, Counillon F, Johannessen JA. Monitoring the spreading of the Amazon freshwater plume by MODIS, SMOS, Aquarius, and TOPAZ. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2015 Jan 1;120(1):268-83.
- [10] امینی یاسر، علی پور عباس. برآورد آب معادل برف در استان کرمان جهت مدیریت منابع آب با استفاده از داده‌های سنجش از دور مایکروویو غیرفعال به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و تکنیک‌های رگرسیون چندگانه. مجله علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی. ۱۳۹۶؛ ۲۶(۱۰۲): ۶۷-۸۰.
- [11] Reynolds RM. Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition. Marine Pollution Bulletin. 1993 Jan 1;27:35-59.
- [12] Dorgham MM. Environmental conditions and phytoplankton distribution in the Arabian Gulf and Gulf of Oman. 1986 September; 1989(31):36-53.
- [13] Urquhart EA, Zaitchik BF, Hoffman MJ, Guikema SD, Geiger EF. Remotely sensed estimates of surface salinity in the Chesapeake Bay: a statistical approach. Remote Sensing of Environment. 2012 Aug 1;123:522-31.
- [14] Wong MS, Lee KH, Kim YJ, Nichol JE, Li Z, Emerson N. Modeling of suspended solids and sea surface salinity in Hong Kong using Aqua/MODIS satellite images. Korean Journal of Remote Sensing. 2007;23(3):161-9.
- [15] Marghany M. Examining the least square method to retrieve sea surface salinity from MODIS satellite data. 2010;40(30):377-86.

پی‌نوشت

1. Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS)
2. Aquarius
3. Jenkins-Box
4. Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS)
5. Bohaei
6. TOPAZ
7. MT Mitchell
8. Argos
9. Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU-B)
10. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
11. Root Mean Square Error (RMSE)
12. ocean wavescan
13. EOS PM
14. EOS AM
15. MYD09GA
16. HDF
17. USGS
18. MODIS Conservation-MCTK Toolkit
19. ENVI
20. ARC GIS
21. sea surface salinity
22. Multiple linear regression
23. Scatter plot