



سنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال ششم، شماره یکم، بهار ۱۳۹۳
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.6, No.1, Spring 2014

۶۹-۸۴

کاربرد داده‌های مریس در تخمین عمق شفافیت در دریای خزر با روش‌های رگرسیون خطی تک‌متغیره و چندمتغیره

حمید طاهری شهرآفینی*

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۰۲/۳۱

چکیده

عمق سکی یکی از شاخص‌های شفافیت پهنه‌های آبی است. در پژوهش حاضر برای نخستین بار مدل‌های رگرسیونی خطی تک‌متغیره و چندمتغیره به منظور پایش عمق سکی در دریای خزر با استفاده از تصاویر مریس شرح و بسط داده شده است. برخلاف مطالعات گذشته، در این تحقیق مدل‌ها آزمون می‌شوند تا دقت واقعی آنها در پایش عمق سکی مشخص گردد. اندازه‌گیری‌های میدانی عمق سکی که شامل ۲۵ داده مدل‌ساز و ۱۲ داده آزمون است، در ۲۵ گشت دریایی طی تیرماه تا آبان ماه سال ۱۳۸۴ در بخش جنوبی دریای خزر انجام شد. در این تحقیق از ۲۵ تصویر سنجنده مریس در بازه زمانی اندازه‌گیری‌های میدانی استفاده شد. در رگرسیون تک‌متغیره، همبستگی بین عمق سکی و داده‌های بازتابش طیفی و نسبت آنها بررسی شد و روابطی که بیشترین همبستگی را داشتند انتخاب شدند. سپس با استفاده از داده‌های مدل‌ساز، بهترین مدل‌های خطی تک‌متغیره بین عمق سکی و پارامترهای بازتابشی ارائه و آزمون شد. مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره مناسب به کمک آماره CP مالوز تعیین شدند و از میان آنها بهترین مدل با کمک داده‌های آزمون مشخص شد. نتایج نشان داد که جواب‌های مدل‌سازی چندمتغیره از مدل‌های تک‌متغیره بهتر و در مقایسه با دیگر مطالعات دارای ضریب همبستگی بیشتری است. در بهترین مدل چندمتغیره از داده‌های بازتابش در طول موج‌های ۴۱۲، ۵۱۰، ۵۶۰، ۶۸۱ و ۷۷۹ نانومتر استفاده می‌شود و ضریب همبستگی و درصد خطای این مدل به ترتیب ۰/۷ و ۳۷/۷ درصد است. در نهایت نقشه‌های عمق سکی در دریای خزر از تصاویر مریس به کمک مدل مذکور استخراج شدند.

کلیدواژه‌ها: عمق سکی، آزمون مدل خطی، مریس، پهنه‌های آبی.

۱- مقدمه

عمق سکی^۱ یکی از ویژگی‌های مهم نوری آب اقیانوس‌ها و دریاهاست، که با کیفیت آب ارتباط دارد. این ویژگی اکنون به‌عنوان پارامتری برای اندازه‌گیری شفافیت و کدورت آب با استفاده از سنسور از دور تخمین زده می‌شود. نخستین بار، فیزیکدان ایتالیایی پی‌یترو آنجلو سکی^۲ برای تخمین کدورت یا شفافیت آب دریای مدیترانه از یک دیسک سفید استفاده کرد (Secchi, 1864). سپس استفاده از این وسیله، به‌علت سازوکار ساده آن رواج یافت. عمق سکی به بیان ساده به عمقی اطلاق می‌شود که در آن دیسک ناپدید می‌شود. این عمق مقیاسی برای شفافیت یا کدورت آب قلمداد می‌شود. شفافیت نشان می‌دهد که نور تا چه عمقی توانایی نفوذ در آب را دارد و عمق سکی شاخصی از ژرف‌ترین عمقی است که نور در آب نفوذ می‌کند (Lee et al., 1995). عمق سکی شاخصی از میزان مجموع مواد معلق مختلف موجود در آب مثل جلبک‌ها، ارگانسیم‌های میکروسکوپی و رسوبات نیز به‌شمار می‌آید (Lindell et al., 1999).

اما رسیدن به الگوریتمی که توان تخمین عمق سکی یا عمق شفافیت را از تصاویر ماهواره‌ای داشته باشد از جنبه تاریخی نیز جالب است، زیرا ارتباط بین روش نسبتاً جدید ماهواره‌ای و یکی از قدیمی‌ترین اندازه‌گیری‌های استفاده‌شده در اقیانوس‌شناسی را برقرار می‌سازد (Kratzer et al., 2003). پژوهشگران مختلف برای استخراج این متغیر از تصاویر ماهواره‌ای تلاش‌های زیادی انجام داده‌اند. دکر و پیترز (۱۹۹۳) و لوری و دیگران (۱۹۹۳) از رگرسیون خطی برای تخمین عمق سکی استفاده کردند و به‌ترتیب به R^2 برابر با ۰/۷۵ و ۰/۸۱ دست یافتند. در این مطالعات از داده‌های لندست استفاده شده بود. قزی و دیگران (۱۹۹۸) از رگرسیون خطی تک‌متغیره بین لگاریتم باند ۲ ماهواره لندست و عمق سکی استفاده کردند و با

محدوده عمق سکی ۸ تا ۹/۵ متر به ضریب تعیین ۰/۷۴ دست یافتند.

گیاردینو و همکاران (2001) چهار داده عمق سکی را در یک روز از دریاچه Iseo برداشت کردند و با استفاده از رگرسیون خطی، به استخراج عمق سکی از تصویر لندست پرداختند و به R^2 برابر با ۰/۸۱ دست یافتند.

کراترز و دیگران (2003) رابطه بین ضریب کاهیدگی پخش^۳ در ۴۹۰ نانومتر و عمق سکی را با استفاده از تصاویر سنجنده SeaWiFS در دریای بالتیک بررسی کردند و به دو الگوریتم رگرسیون خطی برای تخمین عمق سکی از تصاویر SeaWiFS دست یافتند که مقدار R^2 آنها برابر با ۰/۷۲ بود.

ژانگ و دیگران (2003a) از رگرسیون خطی چندمتغیره و مدل نیمه‌تجربی برای استخراج عمق سکی از یک تصویر ماهواره‌ای لندست استفاده کردند. نتایج کار آنها نشان داد که مدل رگرسیونی چندمتغیره بهتر از مدل رگرسیونی تک‌متغیره می‌تواند عمق سکی را از تصویر ماهواره‌ای استخراج کند و ضریب تعیین آنها به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۵۲ بود. داده‌های برداشت‌شده در این مطالعه مربوط به یک روز بودند.

سورش و همکاران (2006) ارتباط بین عمق سکی و خصوصیات نوری ذاتی آب را در آب‌های شمال غرب اقیانوس هند بررسی کردند. آنها الگوریتمی تجربی را براساس رگرسیون خطی بین نسبت بازتابش طول موج‌های ۴۹۰ و ۵۵۵ نانومتر که به‌وسیله رادیومتر برداشت شده بود و عمق سکی تهیه کردند. از رابطه به‌دست‌آمده در پژوهش مذکور، مقادیر عمق سکی از تصویر IRS-P4 OCM استخراج شد، اما دقت رابطه یا خطای آن بیان نشده است.

چن و دیگران (2007) عمق سکی و تغییرات زمانی

1. Secchi Depth (SD) or Secchi Disk Depth (SDD)
2. Pietro Angelo Secchi
3. Diffuse attenuation coefficient

تصاویر سطح - یک (Level-1b) سنجنده مریس در دریای خزر ارائه شود. در عین حال کوشش شده است که تا حد ممکن، اشکالات مطالعات قبلی - که ذکر آن رفت - بررسی و برطرف شوند.

۲- مواد و روش‌ها

دریای خزر بزرگ‌ترین دریاچه بسته دنیا با مساحتی حدود ۳۷۰۰۰۰ کیلومتر مربع و ۶۳۸۰ کیلومتر خط ساحلی میان ۵ کشور ایران، ترکمنستان، آذربایجان، روسیه و قزاقستان واقع شده است. بیشینه عمق آن ۱۰۲۵ متر و درصد شوری آن حدود ۱/۲ درصد - نزدیک به ۳۰ درصد شوری آب دریاها آزاد - است. از نظر ریخت‌شناسی (مورفولوژی) کف، دریای خزر به سه بخش شمالی، میانی و جنوبی تقسیم می‌شود که خصوصیت‌های هیدرولوژیکی و اکولوژیکی این بخش‌ها بسیار متفاوت است (Kosarev, 2005).

محیط زیست دریای خزر به دلیل حجم بالای بهره‌برداری انسانی و تخلیه مقادیر زیادی فاضلاب شهری، صنعتی و کشاورزی در آن تحت فشار بسیار زیادی است. فلزات سنگین، هیدروکربن‌های نفتی، حشره‌کش‌ها، مواد مغذی مانند فسفر و نیترات و سایر مواد زاید انسانی از طریق رودخانه‌ها یا به طور مستقیم به دریای خزر می‌ریزند و محیط‌زیست آن را تهدید می‌کنند (Zonn, 2005; Korshenko and Gul, 2005).

منطقه مطالعه‌شده در تحقیق حاضر شامل قسمت‌های جنوبی دریای خزر است که در شکل ۱ نمایش داده شده است. محدوده نمونه‌برداری میدانی در بخش جنوبی دریای خزر در منطقه‌ای به وسعت حدود ۱۵۰ کیلومتر مربع در نزدیکی دهانه تالاب انزلی واقع شده که در شکل ۱ به صورت مربع نشان داده شده است. مثلث‌های داخل مربع، مکان‌های نمونه‌برداری این تحقیق را نشان می‌دهند.

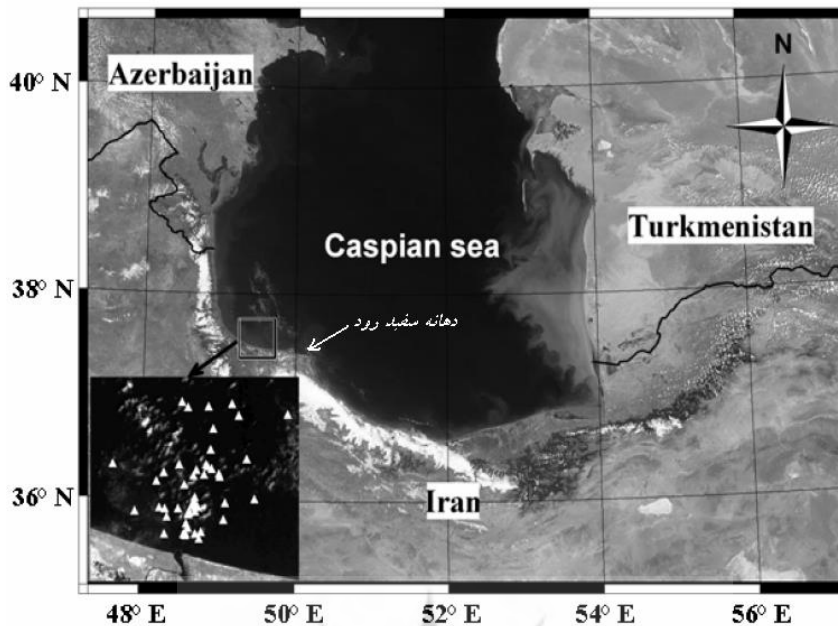
- مکانی و آن را در خلیج تامپا واقع در فلوریدا با استفاده از تصاویر سنجنده SeaWiFS در فرایند دومرحله‌ای بررسی کردند. در این مطالعه ابتدا ضریب کاهیدگی پخش در ۴۹۰ نانومتر، با استفاده از الگوریتمی نیمه‌تحلیلی از تصاویر SeaWiFS استخراج شد. سپس مقادیر عمق سکی با استفاده از رگرسیون تک‌متغیره از ضریب کاهیدگی پخش برآورد گردید. جذر میانگین مربعات خطا در تخمین عمق سکی حدود ۰/۵۵ متر بود.

کراتزر و همکاران (2007) رابطه بین عمق سکی و نسبت‌های بازتابش خروجی از آب را در دریای بالتیک بررسی کردند. آنها برای به‌دست‌آوردن الگوریتم عمق سکی از آنالیز رگرسیون بین داده‌های عمق سکی و نسبت‌های بازتابش مختلف استفاده کردند و رابطه‌ای را با ضریب تعیین ۰/۷۹ که براساس برازش رابطه خطی بین داده‌های لگاریتم نسبت‌های بازتابش و لگاریتم عمق سکی بود به‌دست آوردند. الگوریتم مذکور برای استخراج عمق سکی در تصاویر مریس (MERIS) اعمال شد.

یو و دیگران (2014) از داده‌های متوسط ۸ روزه سطح ۳ سنجنده MODIS و براساس رگرسیون‌های تک‌متغیره و چندمتغیره، مقادیر عمق سکی را استخراج کردند و به ترتیب به ضریب تعیین ۰/۶۸ و ۰/۷۲ دست یافتند.

مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که در بسیاری از آنها از داده‌های عمق سکی مربوط به یک روز یا از یک تصویر ماهواره‌ای استفاده شده است. از طرفی اغلب دقت روابط رگرسیونی صرفاً براساس نتایج برازش بیان شده است و نتایج آنها آزمون نشده است.

از آنجاکه تاکنون هیچ‌گونه تحقیقی به‌منظور استخراج عمق سکی در دریای خزر از تصاویر ماهواره‌ای مریس با استفاده از رگرسیون‌های خطی یک‌متغیره و چندمتغیره صورت نگرفته، در پژوهش حاضر سعی شده است الگوریتم‌های رگرسیونی خطی تک‌متغیره و چندمتغیره مختلفی به‌منظور استخراج عمق شفافیت از



شکل ۱. تصویر MODIS دریای خزر مربوط به تاریخ ۱۱ ژوئن ۲۰۰۳ به همراه نمایش منطقه مطالعاتی و موقعیت اندازه‌گیری‌های میدانی به ترتیب به صورت مربع و مثلث

و اختلاف زمانی کمتر از یک ساعت در مطالعات کیفی پهنه‌های آبی پذیرفتنی است (Zhang et al., 2003b). معمولاً قسمت‌هایی از تصاویر مریس به پدیده درخشش خورشیدی^۲ آلوده است (Park et al., 2003)، به همین دلیل امکان استفاده از برخی اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده که در شرایط درخشش خورشیدی قرار داشتند، وجود نداشت. این داده‌ها از مجموع داده‌های اندازه‌گیری شده حذف شدند و در نهایت توصیف آماری ۳۷ داده باقی‌مانده به صورت جدول ۱ به دست آمد.

جدول ۱. توصیف آماری از اندازه‌گیری‌های عمق سکی استفاده شده در مدل‌سازی‌ها

پارامتر	تعداد	میانگین	حداقل	حداکثر
SD(m)	۳۷	۳/۵۸	۱	۸

خلاصه روش تحقیق که در شکل ۲ نمایش داده شده است، در اینجا شرح داده می‌شود. از آنجا که

سنجنده مریس یکی از سنجنده‌های نصب شده روی ماهواره^۱ Envisat است که از اول مارس سال ۲۰۰۲ شروع به تصویربرداری کرد. این سنجنده در محدوده مرئی و مادون قرمز طیف بازتابشی خورشید دارای ۱۵ باند قابل برنامه‌ریزی است.

تصاویر استفاده شده در این تحقیق شامل ۲۵ تصویر سطح یک سنجنده مریس است که به روزهای نمونه‌برداری میدانی در بازه زمانی تیر تا آبان سال ۱۳۸۴ در دریای خزر تعلق دارد.

اندازه‌گیری‌های میدانی عمق شفافیت به وسیله دیسک سکی در بازه زمانی ذکر شده هم‌زمان با عبور سنجنده مریس از روی دریای خزر انجام شد. در این بازه زمانی، ۲۵ سفر دریایی یک‌روزه با قایق موتوری به منظور اندازه‌گیری عمق شفافیت از نقاط مختلف جنوب‌غربی دریای خزر و در فاصله بین ساحل تا عمق آب‌های آزاد انجام شد. در شکل ۱ موقعیت نقاط اندازه‌گیری عمق سکی نشان داده است. در بازه زمانی پژوهش، اختلاف کمتر از ۴۵ دقیقه با زمان تصویربرداری ماهواره از منطقه مطالعاتی به دست آمده

1. Environmental satellite
2. Sun glint

تعیین مناسب هستند برای مدل‌سازی عمق سکی انتخاب می‌شوند و با استفاده از آنها مدل‌های رگرسیونی و مدل‌هایی که به وسیله داده‌های مدل‌ساز و آزمون تهیه شده‌اند، ارزیابی می‌شوند.

برای ارزیابی دقت مدل‌های تجربی، از معیارهای آماری و گرافیکی متعددی چون ضریب تعیین، ضریب همبستگی (R)، میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAPE)، میانگین اریبی (MBE) و نمودارهای پراکنندگی استفاده خواهد شد. بدین ترتیب مدل‌های رگرسیونی تک‌متغیره مختلف با یکدیگر مقایسه و بهترین مدل تک‌متغیره مشخص می‌شود.

آب دریا ترکیبی است از آب، جامدات معلق، مواد آلی محلول، فیتوپلانکتون و اجزای دیگر و بازتابش سطح آب در یک طول موج مشخص، هم‌زمان تحت تأثیر تمامی اجزای آب قرار دارد. از طرفی دیگر، تأثیر هر یک از اجزای آب روی بازتابش سطح آب در طول موج‌های مختلف نیز متفاوت است. بنابراین در تهیه مدل‌های تخمین کیفیت آب باید به چنین مواردی توجه داشت. به همین دلیل، استفاده از مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره که هم‌زمان از چندین باند بازتابشی برای تخمین یک پارامتر کیفی استفاده می‌کنند متداول است (Su et al., 2008).

در پژوهش حاضر، مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی چندمتغیره نیز انجام شده است. شکل کلی مدل رگرسیون خطی چندمتغیره برای ارزیابی مقادیر عمق سکی را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان کرد.

$$Y = C_0 + \sum_{i=1}^k C_i R_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن مقدار R_i بیانگر بازتابش در باند λ_m و C_i و C_0 بیانگر ضرایب مدل هستند که بایستی طی آنالیز رگرسیون تعیین شوند. Y می‌تواند مقدار عمق سکی، عکس یا لگاریتم آن باشد. برای انتخاب بهترین زیرمجموعه از مقادیر بازتابشی یا باندها برای مدل‌سازی عمق سکی، ابتدا همه زیرمجموعه‌های ممکن از مقادیر

مدل‌سازی براساس مقادیر بازتابش در بالای جو (PTSTOA) انجام خواهد شد، برای تولید داده‌های بازتابش طیفی در بالای جو که واحد آن $1/sf$ است، کفایت این موارد محاسبه شوند: نسبت تصاویر سطح یک سنجنده مریس، که شامل داده‌های تابش طیفی رو به بالا در بالای جو (T) هستند و واحد آن به صورت $w/m^2/sf/nm$ است و داده‌های تابش رو به پایین خورشیدی در بالای جو (E) که واحد آن $w/m^2/nm$ است؛ بنابراین خواهیم داشت $R_{rs}=T/E$. داده‌های E مربوط به هر تصویر ماهواره‌ای سطح یک سنجنده مریس به همراه تصویر آن ارائه می‌شود. بدین ترتیب پایگاه داده‌ای ایجاد می‌شود که حاوی ۳۷ داده است و هر داده شامل مقادیر نسبتاً هم‌زمان عمق سکی و بازتابش‌های طیفی در بالای جو طول موج‌های مختلف است. در این مرحله، کل داده‌ها به‌طور تصادفی به دو مجموعه داده مدل‌ساز و آزمون به ترتیب با اندازه‌های $2/3$ و $1/3$ حجم کل داده‌ها که به ترتیب شامل ۲۵ و ۱۲ نمونه‌اند، تقسیم شدند. از این دو مجموعه به ترتیب در مراحل مدل‌سازی و آزمون مدل‌های شرح و بسط یافته استفاده خواهد شد.

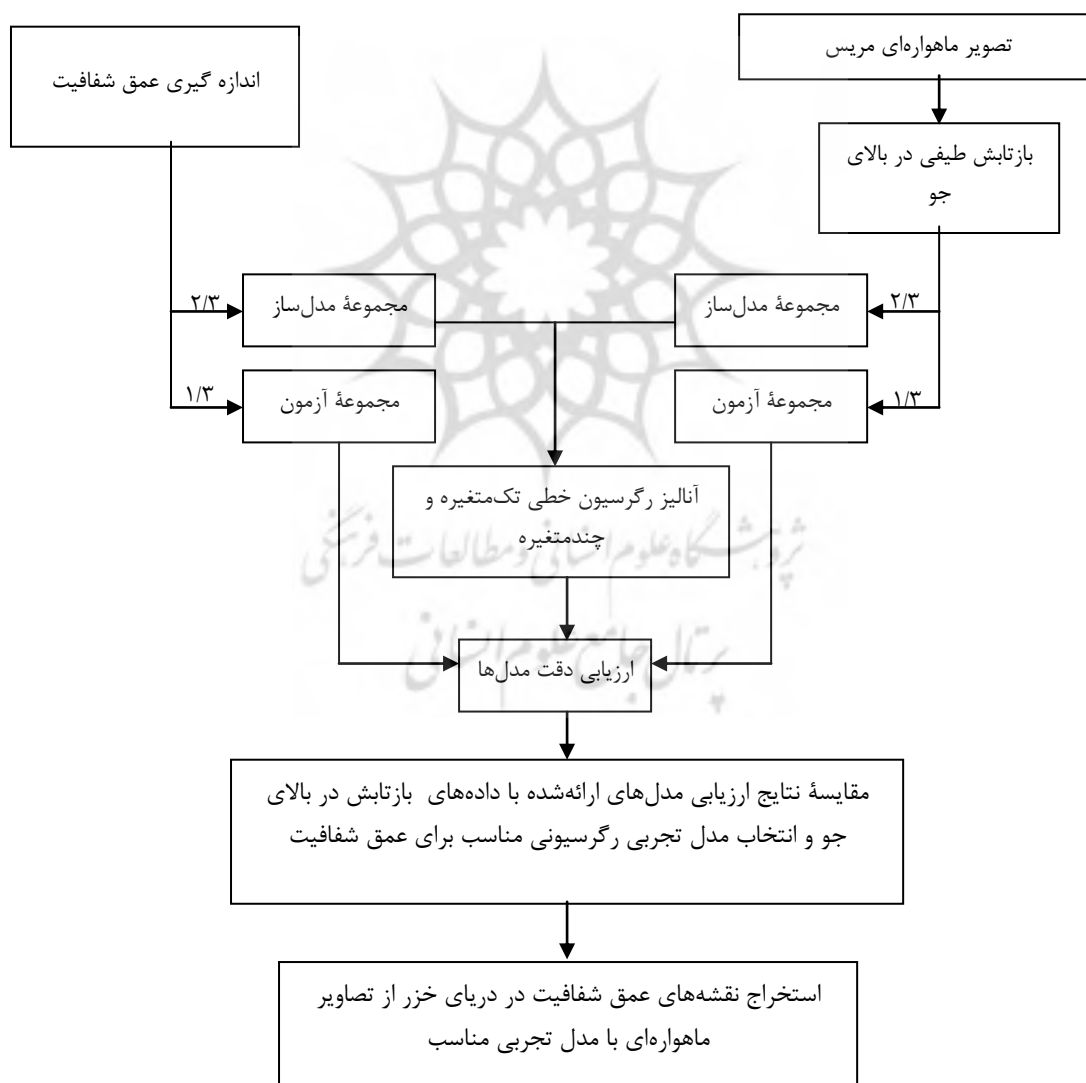
به‌طور کلی مدل‌سازی تجربی عمق سکی، با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی تک‌متغیره و ایجاد ارتباط بین عمق سکی یا تابعی از آن مثل عکس عمق سکی یا لگاریتم آن با مقادیر بازتابش طیفی در بالای جو انجام خواهد شد. در این مرحله از مدل‌سازی، از مقادیر بازتابش طیفی در بالای جو به‌عنوان متغیرهای ورودی و از عمق سکی، عکس آن، یا لگاریتم آن به‌عنوان متغیر خروجی یا پاسخ در مدل‌سازی استفاده می‌شود. در مدل‌سازی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی تک‌متغیره، برای انتخاب مقادیر یا نسبت‌های بازتابش مناسب، از ضریب تعیین (R^2) استفاده خواهد شد. بر این اساس با برقراری ارتباط ساده رگرسیونی بین مقادیر یا نسبت‌های بازتابش در بالای جو و مقادیر عمق سکی، ماتریس ضرایب تعیین ایجاد خواهد شد. سپس مقادیر یا نسبت‌های بازتابشی که دارای ضریب

متغیرهای برآوردکننده در مدل رگرسیون چندمتغیره به‌علاوه یک است (Mallows, 1973). در این آماره، مدلی مناسب‌تر است که مقدار آماره Cp مالوز آن کمترین اختلاف را با مقدار P مدل داشته باشد. مشابه رگرسیون تک‌متغیره، مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره ارائه شده نیز ارزیابی می‌شوند تا بهترین مدل چندمتغیره مشخص گردد. در نهایت از بین مدل تک‌متغیره مناسب و مدل چندمتغیره مناسب، بهترین مدل انتخاب می‌شود و با استفاده از آن نقشه عمق شفافیت دریای خزر از تصاویر مریس استخراج می‌گردد.

بازتابشی براساس مقادیر ضریب تعیین ارزیابی می‌شوند. سپس تعدادی از مدل‌ها که دارای ضریب همبستگی و میانگین مربعات خطای مناسب‌اند انتخاب می‌شوند و از میان آنها مدل‌هایی با آماره Cp مالوز مناسب‌تر برای مدل‌سازی عمق سکی و معکوس و لگاریتم آن انتخاب می‌شوند. رابطه Cp مالوز به‌صورت رابطه (۲) است.

$$C_p = \frac{SSE}{MSE} + 2P - N \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن SSE بیانگر مجموع مربعات خطای مدل، MSE میانگین مربعات خطای مدل، N تعداد کل داده‌های استفاده‌شده در مدل‌سازی و P تعداد



شکل ۲. فلوجارت روش تحقیق

۳- نتایج و بحث

می‌شود. همان‌طور که نتایج جدول‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهند، بیشترین ضرایب تعیین مربوط به رابطه بین عمق سکی و نسبت‌های باندی است. براساس نتایج جدول ۳، بهترین نسبت باندی برای مدل‌سازی عمق سکی نسبت باندی (Rrs(510)/Rrs(560) است؛ به همین دلیل مدل‌سازی عمق سکی در این قسمت با استفاده از این نسبت باندی انجام شد. نتایج آماری این مدل‌سازی در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

به‌منظور تعیین متغیرهای بازتابشی مناسب برای مدل‌سازی و استخراج عمق سکی، از ماتریس ضرایب تعیین استفاده شد و میزان همبستگی مقادیر بازتابش در بالای جو به‌صورت تک‌باند و نسبت باندی در مقابل عمق سکی بررسی گردید. نتایج این بررسی‌ها در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. اهمیت هر متغیر یا نسبت بازتابش در این دو جدول، با میزان همبستگی آن با عمق سکی و معکوس و لگاریتم آن مشخص

جدول ۲. ماتریس ضرایب تعیین بین مقادیر بازتابش در بالای جو و عمق سکی

Rrs parameter	SD	1/SD	Log(SD)
Rrs(412)	0.07	0.09	0.08
Log Rrs(412)	0.07	0.08	0.08
Rrs(442)	0.09	0.12	0.11
Log Rrs(442)	0.09	0.11	0.1
Rrs(490)	0.16	0.18	0.18
Log Rrs(490)	0.16	0.17	0.17
Rrs(510)	0.23	0.25	0.25
Log Rrs(510)	0.24	0.25	0.25
Rrs(560)	0.41	0.46	0.46
Log Rrs(560)	0.45	0.45	0.47
Rrs(620)	0.3	0.39	0.36
Log Rrs(620)	0.32	0.37	0.37
Rrs(665)	0.25	0.33	0.3
Log Rrs(665)	0.27	0.31	0.31
Rrs(681)	0.25	0.32	0.3
Log Rrs(681)	0.27	0.31	0.31
Rrs(709)	0.21	0.26	0.25
Log Rrs(709)	0.23	0.25	0.26
Rrs(754)	0.1	0.08	0.1
Log Rrs(754)	0.11	0.08	0.1
Rrs(779)	0.1	0.08	0.1
Log Rrs(779)	0.12	0.08	0.11
Rrs(865)	0.08	0.05	0.07
Log Rrs(865)	0.08	0.04	0.07
Rrs(885)	0.07	0.04	0.06
Log Rrs(885)	0.08	0.03	0.06

جدول ۳. ماتریس ضرایب تعیین بین نسبت‌های بازتابی مناسب و عمق سکی

Rrs ratio	SD	1/SD	Log(SD)
Rrs(560)/Rrs(412)	0.44	0.44	0.47
Log(Rrs(560)/Rrs(412))	0.47	0.43	0.47
Rrs(560)/Rrs(442)	0.50	0.48	0.52
Log(Rrs(560)/Rrs(442))	0.52	0.47	0.53
Rrs(560)/Rrs(490)	0.59	0.57	0.62
Log(Rrs(560)/Rrs(490))	0.60	0.55	0.62
Rrs(490)/Rrs(560)	0.62	0.54	0.62
Log(Rrs(490)/Rrs(560))	0.60	0.55	0.62
Rrs(510)/Rrs(560)	0.64	0.57	0.65
Log(Rrs(510)/Rrs(560))	0.63	0.58	0.65

جدول ۴. نتایج آماری مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از بهترین نسبت باندی و ۲۵ داده مدل‌ساز

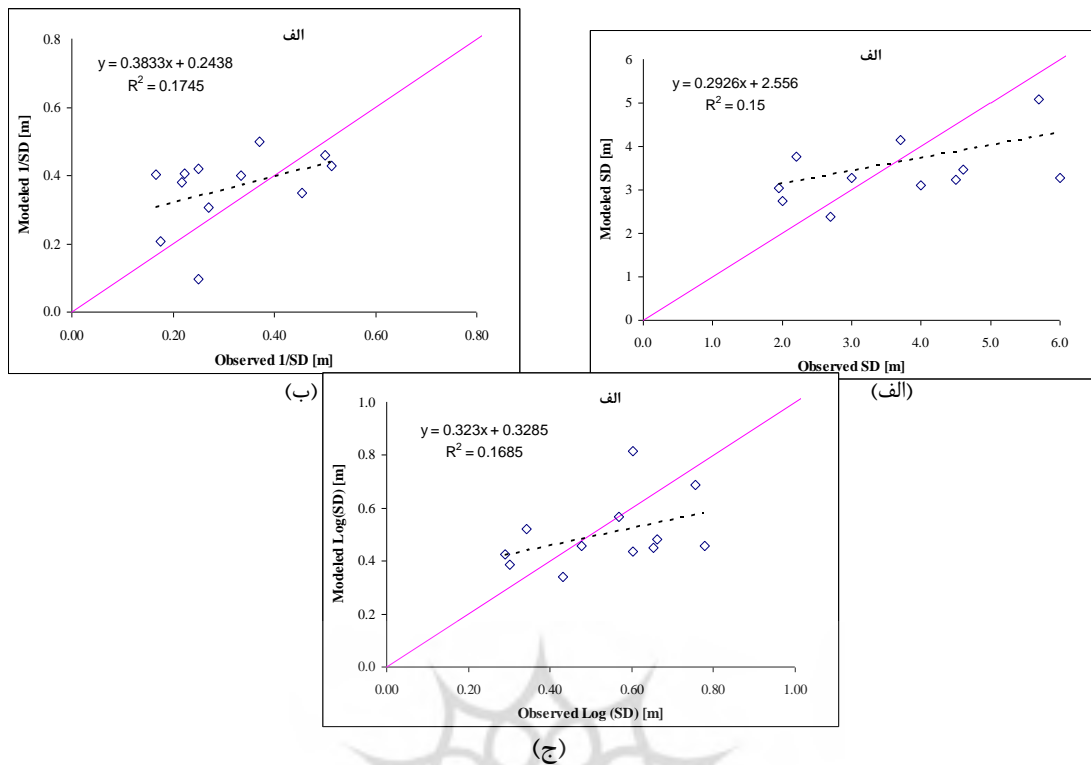
Input parameter (A)	Fitted Model	MBE	R ²
Rrs(510)/Rrs(560)	SD = - 20.3 + 19.7 *A	0.00042	0.64
	1/SD = 2.97 - 2.14 *A	0.00002	0.57
	Log (SD) = - 2.57 + 2.53 *A	0.00003	0.65

جدول ۵. نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی ارائه‌شده عمق سکی با استفاده از ۱۲ داده آزمون

Model	MAPE	MBE	R
SD = - 20.3 + 19.7 Rrs(510)/Rrs(560)	31.72	-0.06	0.39
1/SD = 2.97 - 2.14 R510/R560	46.81	0.05	0.42
Log (SD) = - 2.57 + 2.53 R510/R560	27.01	-0.04	0.41

سه مدل ارائه‌شده در جدول ۴ با استفاده از داده‌های مجموعه آزمون، ارزیابی شدند و نتایج این ارزیابی در جدول ۵ نشان داده شد. پراکندگی داده‌های عمق سکی مدل‌سازی شده به وسیله مدل‌های ارائه‌شده در جدول ۵ نسبت به داده‌های مشاهداتی، در شکل ۳ آمده است. با توجه به نتایج ضعیف این سه مدل تجربی، به صراحت می‌توان نتیجه گرفت که این سه به‌درستی قادر به مدل‌سازی رفتار مقادیر عمق سکی در مجموعه آزمون نیستند. یکی از دلایل ضعف این مدل‌ها می‌تواند تأثیرات جوی باشد و اگرچه استفاده از نسبت باندی در این مدل‌ها تا حدودی در کاهش آثار جوی مؤثر است، اما به نظر می‌رسد که کافی نیست. طبق الگوریتم شرح داده‌شده در بخش مواد و روش‌ها، عملیات رگرسیون خطی چندمتغیره نیز روی داده‌ها انجام شد و بهترین مدل‌های چندمتغیره انتخاب شدند. در جدول ۶ این مدل‌ها به همراه نتایج آماری آنها در مرحله مدل‌سازی با استفاده از ۲۵ داده مدل‌ساز نشان داده شده است. به منظور ارزیابی این سه مدل، عملکرد و دقت آنها به وسیله ۱۲ داده آزمون بررسی شد و نتایج آماری آن در جدول ۷ ارائه گردید. نتایج گرافیکی این ۳ مدل در مرحله آزمون نیز در شکل ۴ نمایش داده شد.

کاربرد داده‌های مریس در تخمین عمق شفافیت در دریای خزر با روش‌های رگرسیون خطی تک‌متغیره و چندمتغیره



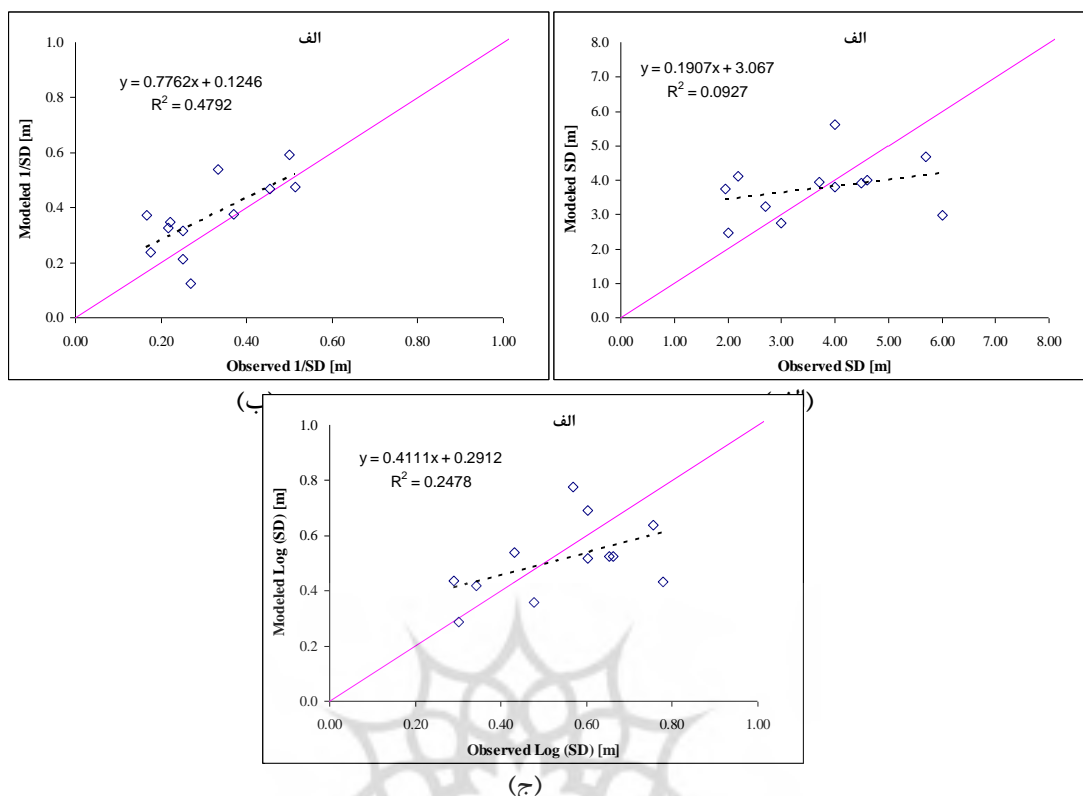
شکل ۳. نمودار پراکندگی؛ (الف) مدل سطر اول جدول ۴ (ب) مدل سطر دوم جدول ۴ (ج) مدل سطر سوم جدول ۴

جدول ۶. نتایج آماری مدل‌سازی عمق سکی به روش رگرسیون چندمتغیره با استفاده از بهترین مدل‌ها و ۲۵ داده مدل‌ساز

Model	MBE	R ²
$SD = 7.27 + 157 Rrs(510) - 257 Rrs(560) + 76.9 Rrs(885)$	-0.05	0.63
$1/SD = -0.087 + 10.1 Rrs(412) - 48.2 Rrs(510) + 38.1 Rrs(560) + 24.8 Rrs(681) - 23.6 Rrs(779)$	0.01	0.92
$Log(SD) = 1.04 - 29.4 Rrs(442) + 62.2 Rrs(490) - 39.4 Rrs(560) - 8.89 Rrs(681) + 14.6 Rrs(779)$	0.003	0.83

جدول ۷. نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی ارائه‌شده عمق سکی با استفاده از ۱۲ داده آزمون

Model	MAPE	MBE	R
$SD = 7.27 + 157 Rrs(510) - 257 Rrs(560) + 76.9 Rrs(885)$	30.52	0.03	0.30
$1/SD = -0.087 + 10.1 Rrs(412) - 48.2 Rrs(510) + 38.1 Rrs(560) + 24.8 Rrs(681) - 23.6 Rrs(779)$	37.66	0.04	0.69
$Log(SD) = 1.04 - 29.4 Rrs(442) + 62.2 Rrs(490) - 39.4 Rrs(560) - 8.89 Rrs(681) + 14.6 Rrs(779)$	24.31	-0.03	0.50



شکل ۴. نمودار پراکندگی؛ (الف) مدل سطر اول جدول ۷، (ب) مدل سطر دوم جدول ۷، (ج) مدل سطر سوم جدول ۷

روش‌های رگرسیونی در تخمین عمق سکی، اساساً مرحله‌آزمون انجام نشده و نتایج مرحله‌برازش مدل رگرسیونی ارائه شده و به کار گرفته شده‌اند. تعدادی از این مطالعات در جدول ۸ ارائه شده‌اند.

نتایج برازش بهترین مدل رگرسیون خطی چندمتغیره در مطالعه حاضر که در جدول ۶ ارائه شده است، ضریب تعیین $0/92$ را نشان می‌دهد. رابطه مذکور با استفاده از ۲۵ داده برداشت شده در بازه زمانی ۴ ماهه به دست آمده است. مقایسه این رابطه با مطالعات پیشین (جدول ۸)، آشکارا برتری آن را نشان می‌دهد، زیرا ضریب تعیین مدل ارائه شده بهتر از تمامی موارد ذکر شده در جدول ۸ است. از طرفی از لحاظ بازه زمانی انجام اندازه‌گیری میدانی و تعداد داده‌ها نیز وضعیت مناسبی دارد. ضریب تعیین مدل ارائه شده نیز از ضریب تعیین مدلی که کراتزر و همکاران (۲۰۰۷) داده‌های مریس به دست آورده‌اند، بالاتر است.

با توجه به نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی این سه مدل رگرسیونی (جدول ۷ و شکل ۴) و مقایسه آن با نتایج ارزیابی سه مدل رگرسیونی عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی (جدول ۵ و شکل ۳) می‌توان نتیجه گرفت که دقت مدل‌سازی این سه مدل رگرسیونی جدید بهبود یافته است. بررسی آماری و گرافیکی نتایج روش رگرسیونی چندمتغیره آشکارا نشان می‌دهند که بهترین روش برای تخمین عمق سکی از تصاویر مریس، مدل رابطه (۳) است.

رابطه (۳)

$$\begin{aligned} 1/SD = & -0/087 + 10/1Rrs(412) - \\ & 48/2Rrs(510) + 38/1Rrs(560) + \\ & 24/8Rrs(681) - 23/6Rrs(779) \end{aligned}$$

به نظر می‌رسد در روش رگرسیون چندمتغیره به علت استفاده از چندین باند، تأثیر جو در مدل‌ها به صورت غیرصریح و به گونه‌ای مطلوب‌تر نشان داده می‌شود. در مطالعات پیشین در خصوص کاربرد

کاربرد داده‌های مریس در تخمین عمق شفافیت در دریای خزر با روش‌های رگرسیون خطی تک‌متغیره و چندمتغیره

جدول ۸. نتایج برخی مطالعات گذشته در خصوص کاربرد روش‌های رگرسیونی به‌منظور استخراج عمق سکی از تصاویر ماهواره‌ای

مطالعه موردی	سنجنده	مدت زمان اندازه‌گیری	تعداد داده	روش رگرسیون	R ²	منبع
Green Bay, western part of Michigan Lake	TM	۴ روز	۵۵	b ^۱	0.87	Lathrop et al., 1991
Peel-Harvey Estuary, Australia	TM	۴ روز	-	c ^۲	0.81	Lavery et al., 1993
Loosdrecht lakes and Northern Recht lakes, The Netherlands	TM	یک روز	۱۰	a ^۲	0.86	Dekker and Peters, 1993
			۹	A	0.81	
Southern California	SeaWiFS	۱۹۹۳-۱۹۹۴	۳۲۸	b	0.89	Prasad et al., 1998
Gulf of Finland and Archipelago Sea	TM	یک روز	۵۳	a	0.52	Zhang et al., 2003a
				c	0.74	
Gulf of Finland and Archipelago Sea	TM & ERS2-SAR	یک روز	۵۳	c	0.77	Zhang et al., 2003b
New York Harbor	TM	-	۲۱	a	0.85	Hellweger et al., 2004
Hemerfjarden Bay, Northwestern part of Baltic Sea	MERIS	۲۰۰۰-۲۰۰۲	۵۴	b	0.79	Kratzer et al., 2007
			۲۰۰۲		0.86	
Tampa Bay, Florida	SeaWiFS	۱۹۹۷-۲۰۰۵	۸۰	a	0.67	Chen et al., 2007
				a	0.42	
Yellow Sea and East China Sea	8-day MODIS	۳ هفته	۶۲	b	0.68	Yu et al., 2014
				C	0.72	

۱. رگرسیون تک‌متغیره براساس نسبت باندها

۲. رگرسیون چندمتغیره

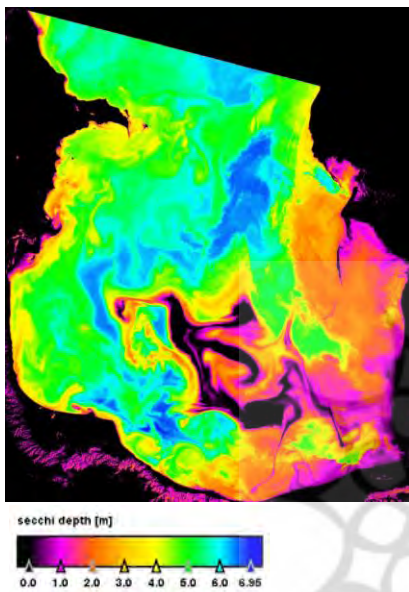
۳. رگرسیون تک‌متغیره

دیگران (2003a) و یو و همکاران (2014) که در جدول ۸ ارائه شده‌اند کاملاً انطباق دارد. تفاوت بین نتایج مرحله برآزش مدل رگرسیون و آزمون آن که در جدول‌های ۴ و ۵ و جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده‌اند آشکارا نشان می‌دهد که دقت واقعی مدل رگرسیونی کمتر از مقداری است که در مرحله برآزش

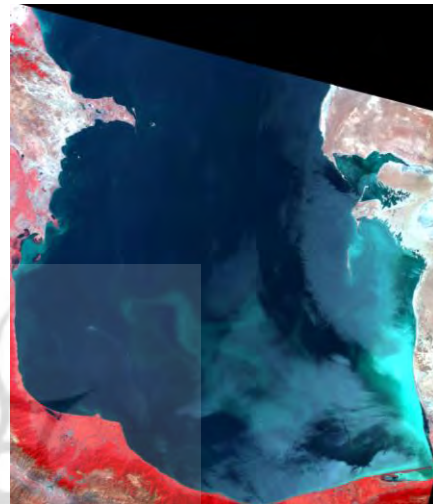
نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که مدل رگرسیونی چندمتغیره بهتر از رگرسیون‌های تک‌متغیره می‌تواند عمق شفافیت را تخمین بزند و روش‌های رگرسیونی تک‌متغیره براساس نسبت باندها، و روش رگرسیونی تک‌متغیره به‌ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند. این نتایج با نتایج مطالعات ژانگ و

تصاویر را نشان می‌دهد که مربوط به ۱۹ اوت و اول سپتامبر سال ۲۰۰۵ است. در آن زمان شکوفایی جلبکی نودولاریا در دریای خزر به اوج خود رسیده بود و تأثیر شدید این شکوفایی جلبکی روی کاهش عمق شفافیت دریای خزر در محل شکوفایی به وضوح دیده می‌شد.

مشخص می‌شود و برخلاف بسیاری از مطالعات گذشته، باید هنگام استفاده از مدل رگرسیونی برای پیش عمق سکی در پهنه‌های آبی، به این نکته توجه کرد. در پایان، الگوریتم ارائه شده براساس رابطه (۳) روی تصاویر مریس اعمال شد و نقشه‌های عمق شفافیت دریای خزر به دست آمد. شکل ۵ دو نمونه از این



(الف)



(ب)

شکل ۵. نقشه عمق شفافیت دریای خزر به همراه تصویر ترکیب رنگی کاذب آن (الف) مربوط به ۱۹ اوت ۲۰۰۵، (ب) مربوط به اول سپتامبر ۲۰۰۵

۴- نتیجه‌گیری

بهترین مدل تجربی شفافیت برای دریای خزر براساس رگرسیون خطی به‌وسیله داده‌های بازتابش طیفی در بالای جو به صورت رابطه $\text{Log}(SD) = -2/57 + 2/53(R_{510}/R_{560})$ بود که بیانگر رابطه خطی بین نسبت بازتابش در بالای جو در طول موج‌های ۵۱۰ و ۵۶۰ نانومتر و لگاریتم عمق شفافیت است. ضریب همبستگی این رابطه براساس داده‌های آزمون ۰/۴۱ به دست آمد که نشان می‌دهد نمی‌توان مدل مناسب شفافیتی از داده‌های بازتابش در بالای جو به دست آورد.

بهترین مدل تجربی شفافیت برای دریای خزر براساس رگرسیون خطی چندمتغیره به صورت رابطه زیر به دست آمد، که بیانگر رابطه خطی بین بازتابش طیفی در طول موج‌های ۴۱۲، ۵۱۰، ۵۶۰، ۶۸۱ و ۷۷۹ نانومتر و عکس عمق شفافیت است.

$$1/SD = -0/087 + 10/1Rrs(412) - 48/2Rrs(510) + 38/1Rrs(560) + 24/8Rrs(681) - 23/6Rrs(779)$$

ضریب همبستگی این رابطه حدود ۰/۷ و درصد خطای محاسبهٔ عمق شفافیت آن حدود ۳۷/۷ به دست آمد. مقایسهٔ مطالعه حاضر با مطالعات پیشین، مدل‌سازی مناسب عمق شفافیت با استفاده از رگرسیون چندمتغیرهٔ داده‌های بالای جو و تخمین آن به کمک داده‌های سنجندهٔ مریس را نشان می‌دهد. همچنین نتایج بررسی حاضر نشان دادند که در به‌کارگیری مدل‌های رگرسیونی در پایش کیفی پهنه‌های آبی - برخلاف مطالعات پیشین - می‌بایست مدل رگرسیونی را آزمون کرد و به نتایج آن توجه داشت. در نهایت، اعمال رابطهٔ به دست آمده در تصاویر مریس به خوبی توانست بروز پدیدهٔ شکوفایی جلبک و کاهش عمق سکی را در دریای خزر به تصویر بکشد.

۵- سپاس‌گزاری

این تحقیق با حمایت بنیاد ملی نخبگان انجام شده است؛ لذا از این بنیاد به خاطر حمایت مالی از پژوهش حاضر قدردانی می‌شود.

۶- منابع

Chen, Z., Muller-Karger, F., Hu, C., 2007, **Remote Sensing of Water Clarity in Tampa Bay**, Remote Sensing of Environment, 109: 249° 259.

Dekker, A.C., Peters, S.W.M., 1993, **The Use of the Thematic Mapper for the Analysis of Eutrophic Lakes: A Case Study in the Netherlands**, International Journal of Remote Sensing, 14: 799° 821.

Ghezzi, P., Giardino, C., Pepe, M., Zilioli, E., 1998, **Report on the 2nd Salmon Joint Meeting, Venice**, CEC Progress Report.

Giardino, C., Pepe, M., Brivio, P.A., Ghezzi, P., Zilioli, E., 2001, **Detecting Chlorophyll, Secchi Disk Depth and Surface Temperature in a Sub-alpine Lake using Landsat Imagery**, The Science of the Total Environment, 268: 19-29.

Hellweger, F.L., Schlosser, P., Lall, U., Weissel, J.K., 2004, **Use of Satellite Imagery for Water Quality Studies in New York Harbor**, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 61: 437° 448.

Korshenko, A.N., Gul, A.G., 2005, **Pollution of the Caspian Sea**, The Caspian Sea Environment (Handbook of Environmental Chemistry), Edited by: Kosarev A.N., Springer, PP. 109-142.

- Kosarev, A.N., 2005, **Physico-Geographical Conditions of the Caspian Sea**, In: The Caspian Sea Environment (Handbook of Environmental Chemistry), Edited by: Kosarev A.N., Springer, PP. 5-31.
- Kratzer, S., Brockmann, C., Moore, G., 2007, **Using MERIS Full Resolution Data to Monitor Coastal Waters - A Case Study from Himmerfjärden**, a Fjord-like Bay in the Northwestern Baltic Sea, Remote Sensing of Environment, 112: 2284-2300.
- Kratzer, S., Hakansson, B., Sahlin, C., 2003, **Assessing Secchi and Photic Zone Depth in the Baltic Sea from Satellite Data**, Remote Sensing for the Environment, 32: 577-585.
- Lathrop, R.G., Lillesand, T.M., Yandell, B.S., 1991, **Testing the Utility of Simple Multirate Thematic Mapper Calibration Algorithms for Monitoring Turbid Inland Waters**, International Journal of Remote Sensing, 12: 2045-2063.
- Lavery, P., Pattia, R. A., Tchi, C., Wyllie, P., Hick, P., 1993, **Water Quality Monitoring in Estuarine Waters using the Landsat Thematic Mapper**, Remote Sensing of Environment, 46: 268-280.
- Lee, G.F., Jones-Lee, A., Rast, W., 1995, **Secchi Depth as a Water Quality Parameter**, Report of G. Fred Lee & Associates, El-Macero, CA.
- Lindell, T., Pierson, D., Premazzi, G., Zilioli, E., 1999, **Manual for Monitoring European Lakes using Remote Sensing Techniques**, Official Publication of the European Communities, Luxembourg.
- Mallows, C.L., 1973, **Some Comments on C_p** , Technometrics, 15: 661-675.
- Park, Y., Cauwer De, V., Nechad, B., Ruddick, K., 2003, **Validation of MERIS Water Products for Belgian Coastal Waters: 2002-2003**, MERIS and AATSR Calibration and Geographical Validation Workshop, 20-24 October, Frascati, Italy.
- Prasad, K.S., Bernstein, R.L., Kahru, M., Mitchell, B.G. 1998, **Ocean Color Algorithms for Estimating Water Clarity (Secchi depth) from SeaWiFS**, Journal of Advanced Marine Science and Technology Society, 4: 301-306.
- Secchi, P.A., 1864, **Relazione della Esperienza Fatta A Bordo Della Pontificia Pirocorvetta L'Immacolata Concezione Per Determinare La Transparenza Del Mare**, Il Nuovo Cimento, 20: 205-238.
- Su, Y.F., Liou, J.J., Hou, J.C., Hung, W.C., Hsu, S.M., Lien, Y.T., Su, M.D., Cheng, K.S., Wang, Y.F., 2008, **A Multivariate Model for Coastal Water Quality Mapping Using Satellite Remote Sensing Images**, Sensors, 8: 6321-6339.
- Suresh, T., Naik, P., Bandishte, M., Desa, E., Mascaranahas, A., Parbhu, S.G., 2006, **Secchi Depth Analysis Using Bio-Optical Parameters Measured in the Arabian Sea**, Remote Sensing of the Marine Environment, 64: 66-75.

- Yu, D.F., Xing, Q.G., Lou, M.J., Shi, P., 2014, **Retrieval of Secchi Disk Depth in the Yellow Sea and East China Sea Using 8-day MODIS Data**, 35th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE35), 22-26 April 2013, Beijing, China.
- Zhang, Y., Pulliainen, J., Koponen, S., Hallikainen, M., 2003a, **Empirical Algorithms for Secchi Disk Depth Using Optical and Microwave Remote Sensing Data from the Gulf of Finland and the Archipelago Sea**, Boreal Environment Research, 8: 251-261.
- Zhang, Y., Pulliainen, J., Koponen, S., Hallikainen, M., 2003b, **Water Quality Retrievals from Combined Landsat TM Data and ERS-2 SAR Data in the Gulf of Finland**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41: 622-629.
- Zonn, I.S., 2005, **Environmental Issues of the Caspian**, The Caspian Sea Environment (Handbook of Environmental Chemistry), Springer, Edited by: Kosarev A.N., PP. 223-242.

