

مدل سازی تجربی شفافیت در دریای خزر با استفاده از داده‌های MERIS

حمید طاهری شهرآئینی^{*۱}

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود

*شاهرود، کدپستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱

hamid.taheri@shahroodut.ac.ir

در این تحقیق مدل سازی رگرسیونی خطی تک متغیره به منظور پیش عمق سکی در دریای خزر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سقف (سطح ۱) و کف (سطح ۲) اتمسفر انجام می‌شود. اندازه‌گیری‌های میدانی عمق سکی در دریای خزر توسط ۲۵ گشت دریایی انجام شد. در این تحقیق ۲۵ تصویر سطح یک سنجنده MERIS مورد استفاده قرار گرفت که توسط پردازشگر C2R تبدیل به داده‌های سطح ۲ شدند. قابلیت استخراج عمق سکی از داده‌های ماهواره‌ای سطح ۱ و سطح ۲ توسط رگرسیون خطی تک متغیره بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های سطح ۲ بهتر از داده‌های سطح ۱ است و با استفاده از داده‌های سطح ۲ می‌توان به ترتیب با ضریب همبستگی و درصد خطای مطلق حدود ۰/۸۶ و ۶/۲۸٪ عمق شفافیت دریای خزر را تخمین زد. در نهایت نقشه عمق سکی در دریای خزر از تصاویر MERIS به کمک مدل مذکور استخراج شد.

واژه‌های کلیدی: عمق سکی، مدل شفافیت، مریس، دریای خزر، رگرسیون تک متغیره

| | |
|---------------|---|
| RMSE | جزر میانگین مربع خطا |
| RTSBOA (1/Sr) | میزان بازتابش خروجی از آب در کف اتمسفر |
| RTSTOA (1/Sr) | میزان بازتابش خروجی از آب در سقف اتمسفر |
| SD (m) | عمق سکی |
| TSM (mg/l) | غلظت مواد معلق در آب |
| YEL (1/m) | میزان مواد آلی زرد رنگ محلول در آب |

مقدمه

عمق سکی^۲ (SDD)، یکی از ویژگی‌های مهم نوری آب اقیانوس‌ها و دریاهاست که با کیفیت آب در ارتباط است و در حال حاضر به طور وسیع، ابزاری برای اندازه‌گیری شفافیت و کدورت آب است که با سنجش از دور مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاریخ استفاده از دیسک سکی (SD) را اولین بار، پترو آنگلو سکی^۳، اختر فیزیکدان ایتالیایی، مطرح کرد [۱] که برای تخمین کدورت^۴ یا شفافیت^۵ آب در دریای

علائم و اختصارات

| | |
|---|--|
| $\Delta\Phi$ (deg) | تفاوت زاویه آزیموت خورشیدی و سنجنده |
| θ_s (deg) | زاویه زینت خورشیدی |
| θ_0 (deg) | زاویه زینت سنجنده |
| τ_a (m) | ضخامت اپتیکی اتمسفر |
| CHL (mg/m ³) | غلظت کلروفیل در آب |
| $K_d(490)$ (1/m) | نرخ کاهش نمایی تابش رو به پائین در زیر سطح آب در طول موج ۴۹۰ نانومتر |
| $L_{wn}(\lambda)$ (w/(m ² .sr.nm)) | تابش خروجی از آب در طول موج λ |
| MAPE | میانگین مطلق درصد خطا |
| MBE | میانگین خطای اریبی |
| N | تعداد مشاهدات همزمان ماهواره و عمق سکی |
| R | ضریب همبستگی |
| R ² | ضریب تعیین |

4. Turbidity
5. Transparency

2. Secchi Disk Depth (SDD)
3. Pietro Angelo Secchi

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

تخمین عمق سکی از تصاویر سنجنده IRS-P4 OCM توسعه دادند [۷].
چن^{۱۶} و همکاران در سال ۲۰۰۷، تغییرات زمانی- مکانی عمق سکی را در خلیج تامپا (فلوریدا) با استفاده از تصاویر سنجنده سی ویفز بررسی کردند. در این مطالعه، برای استخراج عمق سکی از تصاویر سنجنده سی ویفز از یک فرآیند دو مرحله‌ای استفاده شد. ابتدا، ضریب کاهیدگی پخش در ۴۹۰ نانومتر، $K_d(490)$ با استفاده از یک الگوریتم نیمه‌تحلیلی از تصاویر سی ویفز استخراج شد. سپس مقادیر عمق سکی با استفاده از یک رابطه تجربی خطی از ضریب کاهیدگی پخش برآورد شد [۸].

کراتزر و همکاران در سال ۲۰۰۷، رابطه بین عمق سکی و نسبت بازتابش‌های خروجی از آب را در دریای بالتیک بررسی کردند و برای به‌دست آوردن الگوریتم عمق سکی از آنالیز رگرسیون بین داده‌های عمق سکی و نسبت بازتابش‌های مختلف استفاده کردند. در این تحقیق آنها رابطه‌ای با بهترین ضریب تعیین (R^2) را که ناشی از برازش یک روند خطی بین داده‌های لگاریتم نسبت بازتابش‌ها و لگاریتم عمق سکی بود، برای توسعه این الگوریتم انتخاب کردند. الگوریتم مذکور سپس برای استخراج عمق سکی به تصاویر مریس اعمال شد [۹].

عمق سکی (شفافیت) ساده‌ترین و مهم‌ترین پارامتر نورسنجی در مطالعات اکوسیستم‌های آبی است. که اطلاعات مفیدی در مورد کدورت و میزان نفوذ نور در آب، در اختیار محققان علوم دریایی قرار می‌دهد. از آنجا که تاکنون، هیچ گونه تحقیقی برای استخراج عمق سکی از تصاویر ماهواره‌ای مریس بر روی دریای خزر صورت نگرفته است؛ بنابراین، در این تحقیق سعی شده است الگوریتم‌های تجربی مختلفی به‌منظور استخراج عمق شفافیت از تصاویر سطح یک ($^{17}R_{ISTOA}$) (داده‌های بازتابش در سقف اتمسفر) و تصاویر سطح دو ($^{18}R_{ISBOA}$) (داده‌های بازتابش در کف اتمسفر) سنجنده مریس در دریای خزر توسعه داده شود. سپس بهترین مدل برای تعیین عمق شفافیت در دریای خزر تعیین و سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای عمق سکی با استفاده از این مدل برای دریای خزر تولید می‌شود.

داده‌ها و روش‌ها

داده‌ها و روش‌ها شامل منطقه مطالعاتی، داده‌های ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های میدانی است که در ادامه هر یک به تفصیل شرح داده می‌شود.

مدیترانه در آوریل ۱۸۶۵ از یک دیسک سفید استفاده کرد و از آن به بعد، به علت مکانیسم ساده آن، استفاده از این وسیله رواج یافت. عمق سکی به بیان ساده به عمقی اطلاق می‌شود که در آن عمق، دیسک سکی ناپدید می‌شود. این عمق، مقیاسی برای شفافیت یا کدورت آب است. شفافیت نشان‌دهنده آن است که نور تا چه عمقی در آب، توانایی نفوذ دارد. عمق سکی، شاخصی از ژرف‌ترین عمقی است که نور در آب نفوذ می‌کند [۲].

اما، توسعه یک الگوریتم که توانایی تخمین عمق سکی یا عمق شفافیت را از تصاویر ماهواره‌ای دارد از جنبه تاریخی جالب است، زیرا ارتباط بین روش نسبتاً جدید ماهواره‌ای و یکی از قدیمی‌ترین اندازه‌گیری‌های استفاده شده در اقیانوس‌شناسی فراهم می‌شود [۳]. همچنین، عمق سکی شاخصی از میزان مواد معلق (جلبک‌ها، ارگانیسم‌های میکروسکوپی و رسوبات) موجود در آب است [۴].

محققان مختلف، به‌منظور نقشه‌برداری این متغیر از تصاویر ماهواره‌ای، تلاش‌های زیادی انجام داده‌اند. خوشبختانه در چند دهه اخیر با ساخت و پرتاب سنجنده‌های رنگ آب همچون مدیس^۷، سی ویفز^۸ و مریس^۹ که قدرت تفکیک مکانی، طیفی و زمانی بالایی دارند [۵]، امکان توسعه الگوریتم‌های تجربی عمق سکی با دقت معقول، فراهم شده است.

پراساد و همکارانش^{۱۰} در سال ۱۹۹۸، رابطه بازتابش‌های خروجی از آب (L_{wn}) برداشت شده توسط رادیومتر با عمق سکی را در آب‌های کدر^{۱۱} جنوب کالیفرنیا مورد مطالعه قرار دادند و الگوریتمی تجربی بر مبنای نسبت بانندی $L_{wn}(490)/L_{wn}(555)$ برای تخمین عمق سکی بر مبنای طول موج‌های متناظر با طول موج باندهای سنجنده سی ویفز توسعه دادند. این الگوریتم قادر بود تقریباً ۹۰ درصد تغییرات عمق سکی در این منطقه را براساس این نسبت بانندی توصیف کند [۶].

کراتزر^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۰۳، رابطه بین ضریب کاهیدگی پخش^{۱۳} در ۴۹۰ نانومتر، $K_d(490)$ (نرخ کاهش نمایی تابش رو به پایین در زیر سطح آب، در طول موج ۴۹۰ نانومتر را $K_d(490)$ می‌نامند) و عمق سکی را با استفاده از تصاویر سنجنده سی ویفز در دریای بالتیک بررسی کردند و دو الگوریتم رگرسیون خطی برای تخمین عمق سکی از تصاویر سی ویفز توسعه دادند [۳].

سورش^{۱۴} و همکاران در سال ۲۰۰۶، در آب‌های دریای عرب^{۱۵} ارتباط بین عمق سکی و خصوصیات نوری ذاتی آب را مورد بررسی قرار دادند و الگوریتمی تجربی بر اساس رگرسیون خطی نسبت باندها برای

13. Diffuse attenuation coefficient
14. Suresh
15. Arabian Sea
16. Chen
17. Remote Sensing Reflectance at Top of Atmosphere
18. Remote Sensing Reflectance at Bottom of Atmosphere

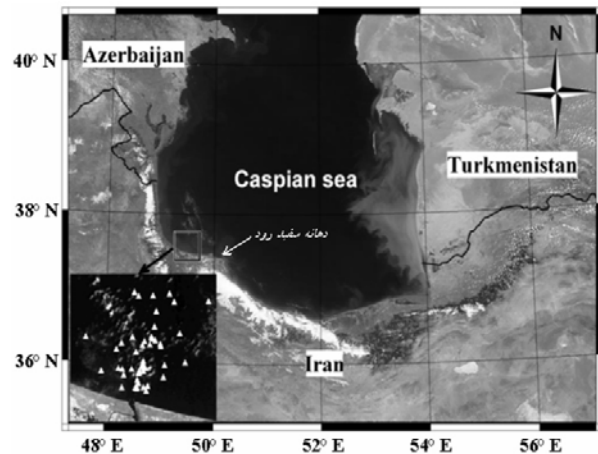
6. Ocean Color Sensors
7. MODerate resolution Imaging Spectrometer (MODIS)
8. Sea-viewing Wide Field of view Sensor (SeaWiFS)
9. MEdium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS)
10. Prasad et al.
11. Turbid water
12. Kratzer

منطقه مطالعاتی

دریاچه خزر، بزرگترین دریاچه بسته دنیا با مساحت ۳۸۶۴۰۰ کیلومتر مربع و ۶۳۸۰ کیلومتر خط ساحلی در بین ۵ کشور ایران، ترکمنستان، آذربایجان، روسیه و قزاقستان واقع شده است. بیشینه عمق آن حدود ۱۰۲۵ متر و درصد شوری آن حدود ۱/۲٪ (حدود ۳۰٪ شوری آب دریا) است.

محیط زیست دریاچه خزر بر اثر بهره برداری عظیم انسانی و تخلیه مقادیر زیادی فاضلاب شهری، صنعتی و کشاورزی تحت فشار بسیار زیادی است. فلزات سنگین، هیدروکربن های نفتی، حشره کش ها، مواد مغذی مانند فسفر و نیترا ت و سایر مواد زاید انسانی از طریق رودخانه ها یا به طور مستقیم به دریاچه خزر می ریزند و محیط زیست آن را تهدید می کنند [۱۱ و ۱۰]. ورود این حجم عظیم آلاینده باعث افزایش کدورت آب و کاهش عمق سکی در آب دریای خزر شده است.

منطقه مطالعه شده در این تحقیق، شامل قسمت های جنوبی دریاچه خزر است که در شکل (۱) نمایش داده شده است. محدوده نمونه برداری میدانی در منطقه مطالعاتی نیز در شکل (۱) به صورت مربع نشان داده شده است که مثلث های داخل مربع، مکان های نمونه برداری این تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۱- تصویر مدیس از دریای خزر (۱۱ ژوئن ۲۰۰۳) به همراه موقعیت منطقه مطالعاتی (مربع) و موقعیت اندازه گیری های میدانی (مثلث ها)

داده های ماهواره ای

سنجنده مریس، یکی از سنجنده های نصب شده بر روی ماهواره انویست^{۱۹} است که از اول مارس سال ۲۰۰۲ تصویربرداری را شروع کرد. این سنجنده در محدوده مرئی و مادون قرمز دارای ۱۵ باند است.

داده های رنگ آب استفاده شده در این تحقیق شامل ۱۳ تصویر سطح ۲۰۱b سنجنده مریس است، که دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰۰ متر (تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی کامل^{۲۱}) و مربوط به روزهای نمونه برداری میدانی در بازه زمانی تیر تا آبان ۱۳۸۴ در دریاچه خزر هستند.

اندازه گیری های میدانی

اندازه گیری های میدانی عمق شفافیت توسط دیسک سکی در بازه تیر تا آبان ۱۳۸۴ هم زمان با عبور سنجنده مریس از روی دریاچه خزر انجام شد. در طول این بازه زمانی، ۲۵ سفر دریایی یک روزه به منظور اندازه گیری عمق شفافیت، از نقاط مختلف قسمت جنوبی غربی دریای خزر (در فاصله بین ساحل تا عمق آب های آزاد) با استفاده از یک دستگاه قایق موتوری انجام شده است. اندازه گیری ها در بازه زمانی اختلاف کمتر از ۴۵ دقیقه با زمان تصویربرداری ماهواره از منطقه مطالعاتی انجام شده است و اختلاف زمانی کمتر از یک ساعت در مطالعات کیفی پهنه های آبی مورد قبول است [۱۲] در شکل (۱) موقعیت نقاط نمونه برداری نشان داده شده است. از آنجا که معمولاً قسمت هایی از تصاویر مریس به پدیده درخشش خورشیدی^{۲۲} آلوده است [۱۳]، به همین دلیل تعدادی از این اندازه گیری های میدانی انجام شده در شرایط درخشش خورشیدی واقع می شوند و قابل استفاده نیستند. این داده ها از مجموع داده های اندازه گیری شده حذف و نهایتاً پس از حذف این داده ها، توصیف آماری داده های باقیمانده به صورت جدول (۱) است. به منظور تعیین شرایط وقوع درخشش خورشیدی، مجموعه ای از تصاویر با درخشش خورشیدی و فاقد آن انتخاب شدند و سپس حدود ۸۳۰۰۰ پیکسل بدون درخشش خورشیدی و ۳۲۰۰۰ پیکسل با درخشش خورشیدی انتخاب و مقدار بازتابش های آنها در باندهای ۱۳ و ۱۴ مشخص شدند. در شرایط وقوع درخشش خورشیدی مقدار بازتابش افزایش چشمگیری می یابد. بررسی بازتابش پیکسل های انتخاب شده نشان داد که آستانه مناسب برای تعیین وقوع درخشش خورشیدی، مقدار بازتابش بیش از ۰/۱۳ در باندهای ۱۳ و ۱۴ تصویر است. بدین ترتیب پیکسل هایی که دارای بازتابش بیش از ۰/۱۳ در هر دو باند ۱۳ و ۱۴ تصویر بودند به عنوان پیکسل حاوی درخشش خورشیدی تعیین شدند.

جدول ۱- توصیف آماری از اندازه گیری های عمق سکی استفاده شده در مدل سازی ها

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

21. Full Resolution (FR) image
22. Sun glint

19. ENVironmental SATellite (ENVISAT)
20. Level 1b.

روش تحقیق

خلاصه روش تحقیق در شکل (۲) نمایش داده شده است که در ادامه تشریح خواهد شد.

از آنجا که مدل‌سازی بر اساس مقادیر بازتابش در سقف (RISTOA) و کف اتمسفر (RISBOA) انجام خواهد شد؛ بنابراین، برای تولید داده‌های بازتابش طیفی در سقف اتمسفر، تصاویر سطح یک- ب سنجنده مریس، که شامل داده‌های تابش طیفی رو به بالا در سقف اتمسفر هستند با استفاده از داده‌های تابش خورشیدی رو به پایین در سقف اتمسفر، تبدیل به بازتابش‌های طیفی در سقف اتمسفر شدند. برای تولید داده‌های بازتابش طیفی در کف اتمسفر، تصاویر سطح یک اولیه مریس با استفاده از پردازشگر C2R²³ سنجنده مریس [۱۵ و ۱۴] پردازش و تبدیل به مقادیر بازتابش طیفی در کف اتمسفر شدند (یعنی تصاویر سطح یک به تصاویر سطح دو تبدیل شد). الگوریتم تصحیح اتمسفریک در پردازشگر C2R² بدین صورت است که ابتدا شبیه‌سازی انتقال تابش در سیستم آب - اتمسفر انجام شده و طی این شبیه‌سازی در شرایط مختلف آب و اتمسفر، پایگاه داده‌ای از بازتابش کف و سقف اتمسفر در طول موج‌های مختلف در شرایط مختلف ایجاد می‌شود. از پایگاه داده مذکور برای ایجاد یک شبکه عصبی مصنوعی که ورودی‌های آن، بازتابش‌های طیفی سقف اتمسفر و خروجی‌های آن، بازتابش‌های طیفی کف اتمسفر است استفاده شده است. بدین ترتیب وقتی که بازتابش‌های طیفی سقف اتمسفر به شبکه عصبی مذکور ارائه می‌شود به‌طور خودکار بازتابش‌های طیفی کف اتمسفر توسط آن محاسبه می‌شود و بدین ترتیب اثر اتمسفر برداشته شده یا به عبارت دیگر تصحیح اتمسفریک انجام شده و تصاویر سطح ۲ ایجاد می‌شوند. به منظور کسب اطلاع در مورد جزئیات پردازشگر C2R² به مراجع [۱۴ و ۱۵] مراجعه شود.

بدین ترتیب پس از حذف داده‌های عمق سکی برداشت شده در شرایط درخشش خورشیدی که قبلاً نحوه حذف آنها توضیح داده شد، دو پایگاه داده ایجاد می‌شود: پایگاه اول، حاوی ۳۷ داده است و هر داده شامل مقادیر همزمان عمق سکی و بازتابش‌های طیفی در سقف اتمسفر، در طول موج‌های مختلف است. به طور مشابه پایگاه دوم نیز، حاوی ۳۷ داده عمق سکی و بازتابش‌های طیفی در کف اتمسفر در طول موج‌های مختلف است. در این مرحله، کل داده‌های موجود در هر پایگاه، به تصادف به دو مجموعه داده مدل‌ساز و آزمون به ترتیب با اندازه‌های ۲/۳ (۲۵)

نمونه) و ۱/۳ (۱۲ نمونه) حجم کل داده‌های هر پایگاه تقسیم شدند. از این دو مجموعه به ترتیب در مراحل مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل‌های توسعه‌یافته استفاده خواهد شد. به‌طور کلی مدل‌سازی تجربی عمق سکی، با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده، و ایجاد ارتباط بین عمق سکی (یا تابعی از آن مثل عکس عمق سکی یا لگاریتم آن) و مقادیر بازتابش در سقف و کف اتمسفر انجام خواهد شد. در این مرحله از مدل‌سازی، از مقادیر بازتابش طیفی در سقف و کف اتمسفر به عنوان متغیرهای برآوردکننده (X) و از عمق سکی، عکس آن یا لگاریتم آن به عنوان متغیرهای برآورد (پاسخ یا Y) در مدل‌سازی استفاده می‌شود.

به‌منظور انتخاب بهترین مقادیر یا نسبت‌های بازتابشی برای مدل‌سازی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده، همانند کراتزر و همکارانش در سال ۲۰۰۷ [۹]، از ضریب تعیین (R²) استفاده خواهد شد. بر این اساس با برقراری ارتباط ساده رگرسیونی بین مقادیر (یا نسبت‌های) بازتابشی مختلف در سقف و کف اتمسفر و مقادیر عمق سکی، ماتریس ضرایب تعیین ایجاد خواهد شد. سپس بهترین مقدار یا نسبت بازتابشی که بیشترین ضریب تعیین را دارد برای مدل‌سازی عمق سکی انتخاب می‌شود و با ایجاد همبستگی خطی بین آنها اقدام به ارزیابی آماری و گرافیکی نتایج مدل‌های رگرسیونی خواهد شد.

به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌های تجربی هم در قسمت مدل‌سازی و هم در قسمت اعتبارسنجی مدل‌ها (با مجموعه داده‌های بخش آزمون)، از معیارهای آماری و گرافیکی متعددی چون ضریب تعیین^{۲۴} (R²)، ضریب همبستگی^{۲۵} (R)، میانگین مطلق درصد خطا^{۲۶} (MAPE)، مجذور میانگین مربع خطا^{۲۷} (RMSE)، میانگین اریبی^{۲۸} (MBE) و نمودارهای پراکندگی^{۲۹} استفاده خواهد شد. بنابراین، مدل‌های رگرسیونی مختلف با هم قیاس شده و بهترین مدل‌ها مشخص می‌شوند و سپس روی مدل‌های حاصله بحث خواهد شد.

در نهایت با استفاده از مدل منتخب، اقدام به اعمال آن روی تصاویر MERIS خواهد شد و نقشه عمق شفافیت در دریاچه خزر ایجاد می‌شود.

نتایج و بحث

در این قسمت نتایج تحلیل‌ها و مدل‌سازی‌های تجربی عمق سکی در دو بخش انجام می‌شود. در بخش اول، مدل‌سازی تجربی عمق سکی براساس مقادیر (یا نسبت‌های) بازتابش در سقف اتمسفر (پایگاه اول) و در بخش دوم، مدل‌سازی بر اساس مقادیر بازتابش در کف اتمسفر (پایگاه دوم) انجام می‌شود.

27. Root Mean Square Error

28. Mean Bias Error

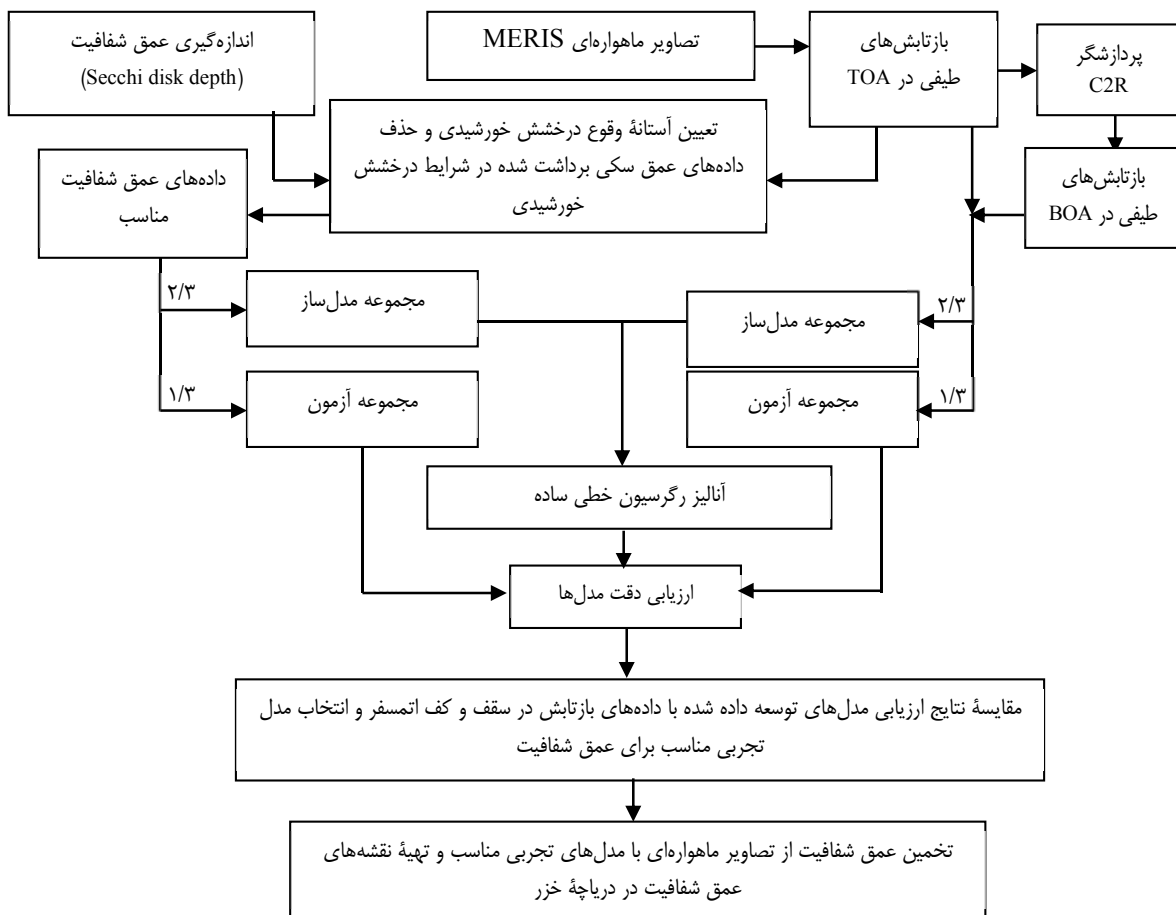
29. Scatter plot

23. Case 2 Regional water algorithm

24. Coefficient of determination

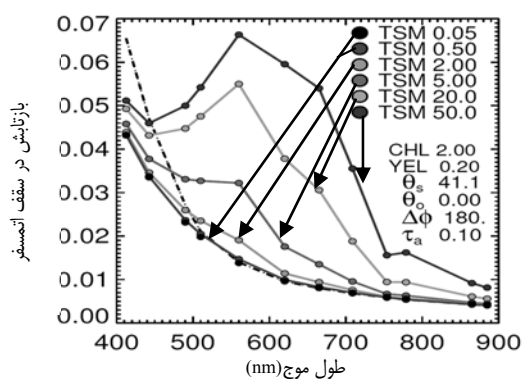
25. Correlation coefficient

26. Mean Absolute Percentage Error



شکل ۲- نمودار روش تحقیق

۵۶۰ نانومتر و عمق سکی مربوط به اثرات اتمسفری است.



شکل ۳- منحنی های طیفی انعکاس آب در سقف اتمسفر

خط چین شکل بیانگر منحنی طیفی آب خالص دریا با ۳۵-۳۸ در هزار غلظت نمک، TSM بیانگر غلظت کل مواد معلق در آب برحسب میلی گرم در لیتر، CHL بیانگر غلظت کلروفیل برحسب میکروگرم در لیتر، YEL بیانگر مواد آلی زرد رنگ محلول در آب

مدل سازی عمق شفافیت با استفاده از بازتابش های طیفی در سقف اتمسفر

به منظور تعیین یکی از متغیرهای بازتابشی در سقف اتمسفر، که بیشترین اهمیت را در مدل سازی و استخراج عمق سکی دارند، از ماتریس ضرایب تعیین استفاده شد. بر این اساس، رابطه و میزان همبستگی مقادیر بازتابش در سقف اتمسفر به صورت تک باند و نسبت باندی در مقابل عمق سکی بررسی شد. نتایج این بررسی ها در جدول (۲) و (۳) ارائه شده است. اهمیت هر متغیر یا نسبت بازتابشی در این دو جدول از روی میزان همبستگی آن با مقادیر اولیه و تبدیل شده (حالت معکوس و لگاریتم) عمق سکی مشخص می شود.

همان طور که در جدول (۲) می بینید، بیشترین همبستگی مربوط به طول موج ۵۶۰ نانومتر است؛ زیرا بیشترین تأثیر ذرات معلق که باعث کدورت آب می شوند روی افزایش بازتابش در طول موج ۵۶۰ نانومتر است. این مطلب در شکل (۳) که منحنی های طیفی بازتابش آب در سقف اتمسفر تحت غلظت های مختلف، مواد معلق را نشان می دهد، به تصویر کشیده شده است. البته کم بودن همبستگی بین بازتابش در طول موج

بنابراین، مدل‌سازی عمق سکی در این قسمت با استفاده از این نسبت بانندی انجام شد. نتایج آماری این مدل‌سازی در جدول (۴) نشان داده شده است.

نتایج ارزیابی این سه مدل نسبت بانندی با داده‌های مجموعه آزمون در جدول (۵) نشان داده شده است. همچنین پراکنش داده‌های عمق سکی مدل‌سازی شده نسبت به داده‌های مشاهداتی در سه حالت مختلف نشان داده شده در جدول (۵)، به ترتیب در شکل (۴) ارائه شده‌اند. همان‌طور که در جدول (۵) می‌بینید تفاوت بسیار کمی بین همبستگی مدل‌های تجربی مختلف وجود ندارد. اگر چه در مطالعات مختلفی از روابط لگاریتمی برای استخراج عمق سکی از تصویر ماهواره‌ای استفاده شده است [۴] و در اینجا نیز لگاریتم عمق سکی به‌طور جزئی همبستگی بیشتری با نسبت بانندی را نشان داده است. اما به‌طور کلی در مطالعات مختلف با آزمون کردن حالت‌های مختلف، رابطه تجربی بین عمق سکی و بازتابش یا نسبت بازتابش‌ها تعیین می‌شود مثل [۱۲ و ۹]. در بخش بعدی خواهید دید که عکس عمق سکی همبستگی بیشتری از لگاریتم عمق سکی با نسبت باندها دارد.

با توجه به نتایج ضعیف سه مدل تجربی توسعه یافته، به صراحت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این مدل‌ها به درستی قادر به مدل‌سازی رفتار مقادیر عمق سکی در مجموعه آزمون نیستند. آنچه مشخص است این است که نقش اتمسفر در این مسئله آنقدر زیاد است که حتی با استفاده از نسبت بانندی نیز امکان تخمین عمق سکی با دقت بالا وجود ندارد.

جدول ۳- ماتریس ضرایب تعیین بین نسبت‌های بازتابش طیفی در سقف اتمسفر و عمق سکی (N=۲۵) (در اینجا نسبت‌هایی با بیشترین ضریب تعیین گزارش شده است)

| | 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 |

برحسب $1/m$ ، $s\theta$ و θ به ترتیب بیانگر زاویهٔ زینت خورشیدی و سنجنده و $\Delta\Phi$ بیانگر تفاوت زاویهٔ آزمون خورشیدی و سنجنده و aT بیانگر ضخامت اپتیکی اتمسفر بر حسب متر [۱۶].

جدول ۲- ماتریس ضرایب تعیین بین مقادیر بازتابش طیفی در سقف اتمسفر و عمق سکی (N=۲۵)

| | 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 |

همان‌طور که نتایج ارائه‌شده در جدول (۲) و (۳) نشان می‌دهد، بیشترین ضرایب تعیین مربوط به رابطهٔ بین عمق سکی و نسبت‌های بانندی است. بهبود همبستگی در شرایط استفاده از نسبت باندها، به دلیل کاهش اثر اتمسفر توسط نسبت باندهاست. بر اساس نتایج جدول (۳)، بهترین نسبت بانندی برای مدل‌سازی عمق سکی نسبت بانندی است.

جدول ۴- نتایج آماری مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از بهترین نسبت بازتابش‌های طیفی در سقف اتمسفر (N=۲۵)

| Algorithm(A) | Model Fitted | RMSE | MBE | R ² |
|-------------------|-----------------------------|------|---------|----------------|
| Rrs(510)/Rrs(560) | SD = - 20.3 + 19.7 *A | 1.09 | 0.00042 | 0.64 |
| | 1/SD = 2.97 - 2.14 *A | 0.14 | 0.00002 | 0.57 |
| | Log (SD) = - 2.57 + 2.53 *A | 0.14 | 0.00003 | 0.65 |

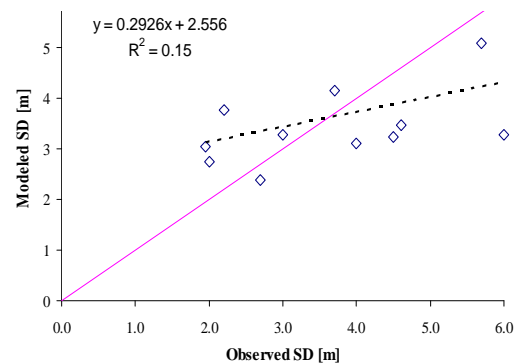
جدول ۵- نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی توسعه یافته عمق سکی با استفاده از داده های بخش آزمون (N=۱۲)

| Model | MAPE | RMSE | MBE | R |
|---|-------|------|-------|------|
| $SD = -20.3 + 19.7 Rrs(510)/Rrs(560)$ | 31.72 | 1.30 | -0.06 | 0.39 |
| $1/SD = 2.97 - 2.14 R510/R560$ | 46.81 | 0.13 | 0.05 | 0.42 |
| $\text{Log}(SD) = -2.57 + 2.53 R510/R560$ | 27.01 | 0.16 | -0.04 | 0.41 |

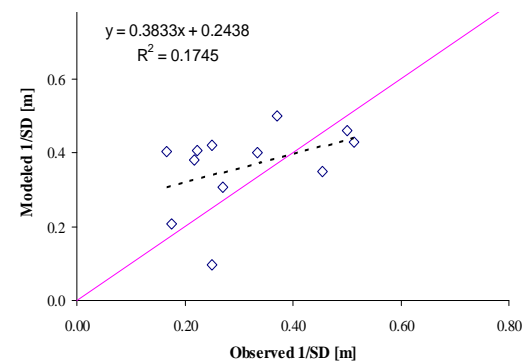
مدل سازی عمق شفافیت با استفاده از بازتابش های طیفی در کف اتمسفر

مشابه حالت قبل، برای تعیین بهترین مقادیر یا نسبت های بازتابش در کف اتمسفر برای مدل سازی عمق سکی، ابتدا رابطه و میزان همبستگی بین مقادیر و نسبت بازتابش های مختلف در کف اتمسفر، و عمق سکی (به علاوه معکوس و لگاریتم آن) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی در جدول (۶) و (۷) نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۶) می توان مشاهده کرد که تمام مقادیر بازتابش (باندها) در بخش سبز، قرمز و مادون قرمز سنجنده مریس (۶۲۰-۸۶۵ نانومتر) همبستگی بسیار خوب و بالایی با عکس عمق سکی نشان می دهند. در اینجا برخلاف حالت قبل، بیشترین ضرایب تعیین بین مقادیر بازتابش به صورت تک باند و معکوس عمق سکی مشاهده می شود. در ضمن ضرایب تعیین به دست آمده از مقادیر بازتابش در کف اتمسفر بالاتر از ضرایب تعیین به دست آمده از مقادیر و نسبت های باندهای در سقف اتمسفر است (جدول های ۲ و ۳). در جدول های (۶) و (۷)، بیشترین ضریب تعیین در حالت تک باند بین $Rrs(620)$ و $Rrs(779)$ با معکوس عمق سکی و در حالت نسبت باندهای بین $Rrs(681)/Rrs(560)$ و معکوس عمق سکی وجود دارد. بنابراین مدل سازی معکوس عمق سکی در این بخش بر اساس مقادیر بازتابش در باندهای $Rrs(620)$ و $Rrs(779)$ و نسبت بازتابشی $Rrs(681)/Rrs(560)$ انجام شد. نتایج آماری این مدل سازی در جدول (۸) نشان داده شده است.

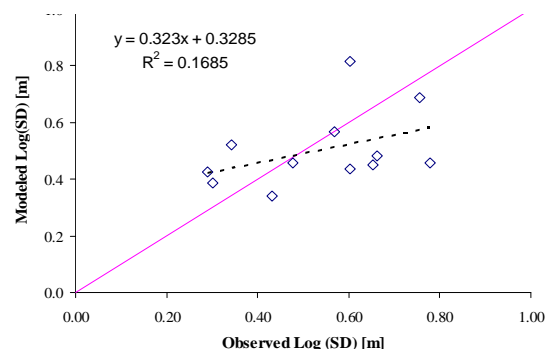
به منظور ارزیابی این سه مدل تجربی، عملکرد و دقت آن ها با استفاده از داده های مجموعه آزمون مورد سنجش قرار گرفت. نتایج آماری و گرافیکی این ارزیابی در جدول (۹) و شکل (۵) نشان داده شده است.



الف- داده های عمق سکی مدل سازی شده در مقابل داده های عمق سکی اندازه گیری شده (مدل سطر اول جدول ۴)



ب- نمودار پراکنش داده های معکوس عمق سکی مدل سازی شده در مقابل داده های معکوس عمق سکی اندازه گیری شده (مدل سطر دوم جدول ۴)



ج- نمودار پراکنش داده های لگاریتم عمق سکی مدل سازی شده در مقابل داده های لگاریتم عمق سکی اندازه گیری شده (مدل سطر سوم جدول ۴)

شکل ۴- نمودار پراکنش

جدول ۶- ماتریس ضرایب تعیین بین مقادیر بازتابش‌های طیفی در کف اتمسفر و عمق سکی (N=۲۵)

| | SD | 1/SD | Log(SD) |
|--------------|------|------|---------|
| Rrs(412) | 0.04 | 0.02 | 0.04 |
| Log Rrs(412) | 0.04 | 0.02 | 0.03 |
| Rrs(442) | 0.08 | 0.06 | 0.08 |
| Log Rrs(442) | 0.08 | 0.06 | 0.07 |
| Rrs(490) | 0.2 | 0.2 | 0.21 |
| Log Rrs(490) | 0.24 | 0.2 | 0.23 |
| Rrs(510) | 0.34 | 0.38 | 0.38 |
| Log Rrs(510) | 0.41 | 0.35 | 0.4 |
| Rrs(560) | 0.47 | 0.58 | 0.55 |
| Log Rrs(560) | 0.57 | 0.48 | 0.56 |
| Rrs(620) | 0.4 | 0.73 | 0.57 |
| Log Rrs(620) | 0.66 | 0.65 | 0.7 |
| Rrs(665) | 0.37 | 0.71 | 0.54 |
| Log Rrs(665) | 0.65 | 0.66 | 0.7 |
| Rrs(681) | 0.38 | 0.71 | 0.54 |
| Log Rrs(681) | 0.66 | 0.66 | 0.7 |

| | SD | 1/SD | Log(SD) |
|--------------|------|------|---------|
| Rrs(709) | 0.36 | 0.71 | 0.53 |
| Log Rrs(709) | 0.66 | 0.67 | 0.71 |
| Rrs(754) | 0.37 | 0.72 | 0.54 |
| Log Rrs(754) | 0.67 | 0.68 | 0.71 |
| Rrs(779) | 0.37 | 0.73 | 0.55 |
| Log Rrs(779) | 0.67 | 0.68 | 0.71 |
| Rrs(865) | 0.38 | 0.72 | 0.55 |
| Log Rrs(865) | 0.67 | 0.67 | 0.71 |

جدول ۷- ماتریس ضرایب تعیین بین نسبت بازتابش‌های مختلف در کف اتمسفر و عمق سکی (N=۲۵) (در اینجا نسبت‌هایی با بیشترین ضریب تعیین گزارش شده است)

| | SD | 1/SD | Log(SD) |
|-------------------|------|------|---------|
| Rrs(681)/Rrs(412) | 0.37 | 0.66 | 0.52 |
| Rrs(510)/Rrs(442) | 0.51 | 0.57 | 0.57 |
| Rrs(681)/Rrs(442) | 0.38 | 0.66 | 0.53 |
| Rrs(681)/Rrs(560) | 0.39 | 0.68 | 0.55 |

جدول ۸- نتایج آماری مدل‌سازی معکوس عمق سکی با استفاده از بهترین بازتابش‌ها و نسبت بازتابش در کف اتمسفر (N=۲۵)

| Algorithm(A) | Model Fitted | RMSE | MBE | R2 |
|-------------------|-----------------------------|------|----------|------|
| Rrs(620) | $1/SD = 0.161 + 70.7 * A$ | 0.11 | -0.00003 | 0.73 |
| Rrs(779) | $1/SD = 0.190 + 515 * A$ | 0.11 | 0.00001 | 0.73 |
| Rrs(681)/Rrs(560) | $1/SD = - 0.138 + 2.08 * A$ | 0.12 | 0.00003 | 0.68 |

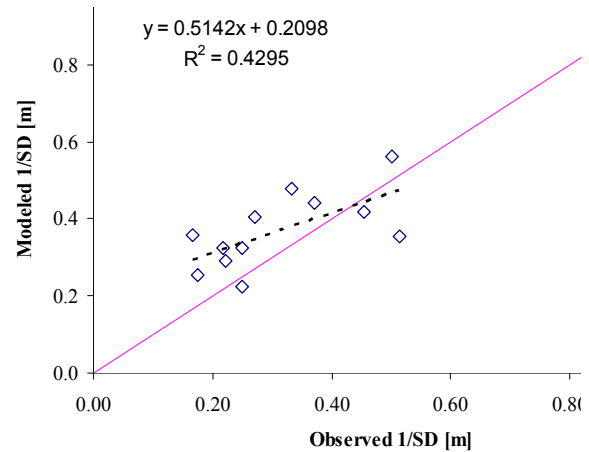
جدول ۹- نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی توسعه‌یافته معکوس عمق سکی با استفاده از داده‌های بازتابش طیفی کف اتمسفر (N=۱۲)

| Model | MAPE | RMSE | MBE | R |
|---|-------|------|------|------|
| $1/SD = 0.161 + 70.7 * Rrs(620)$ | 36.94 | 0.11 | 0.06 | 0.65 |
| $1/SD = 0.190 + 515 * Rrs(779)$ | 31.51 | 0.09 | 0.06 | 0.78 |
| $1/SD = - 0.138 + 2.08 * (Rrs(681)/Rrs(560))$ | 28.57 | 0.11 | 0.08 | 0.86 |

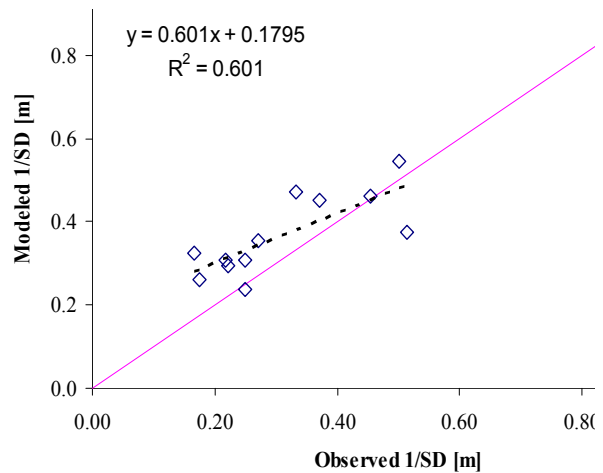
نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی این سه مدل تجربی با استفاده از داده های بخش آزمون نشان دهنده آن است که دقت و رفتار این سه مدل تجربی برای استخراج معکوس عمق سکی نسبتاً مطلوب است. این روابط خطای برآورد پایین، همبستگی بالا و نمودار پراکنش مناسب دارند. در میان این سه مدل تجربی بر اساس نتایج آماری و گرافیکی به دست آمده (جدول ۹ و شکل ۵) می توان مدل تجربی توسعه یافته بر اساس نسبت بانندی $Rrs(681)/Rrs(560)$ را به علت ارائه ضریب همبستگی بالاتر و رفتار بهتر در مدل سازی به عنوان مدل برتر برای استخراج معکوس عمق سکی تعیین کرد. همچنین مقایسه بین نتایج مدل های بهینه توسط داده های سقف و کف اتمسفر (جدول های ۹ و ۵) نشان می دهد که نتایج مدل سازی شفافیت توسط داده های کف اتمسفر بهتر از مدل سازی های انجام شده توسط داده های سقف اتمسفر است که این مسئله بیانگر عملکرد خوب پردازشگر C2R در تبدیل داده های سقف اتمسفر به کف اتمسفر است.

در شکل (۶) منحنی طیفی بازتابش آب در کف اتمسفر تحت غلظت های مختلف مواد معلق در آب نشان داده شده است. همان طور که در این شکل می بینید، میزان بازتابش آب خالص دریا با غلظت نمک ۳۵-۳۸ در هزار که فاقد هیچ ماده دیگری باشد در طول موج های بالاتر از ۵۰۰ نانومتر تقریباً صفر است (خط چین شکل ۶) اما زمانی که مواد معلق به آب افزوده شوند با افزایش مواد معلق، میزان بازتابش آب در محدوده مرئی و مادون قرمز افزایش می یابد، به طوری که پیک بازتابش آن حدود طول موج ۵۶۰ نانومتر خواهد بود که در رابطه توسعه داده شده نیز از طول موج ۵۶۰ نانومتر استفاده شده است $(1/SD = -0.138 + 2.08 * Rrs(681)/Rrs(560))$. همچنین در رابطه مذکور از طول موج ۶۸۱ نانومتر استفاده شده است که میزان افزایش بازتابش در این طول موج با افزایش مواد معلق زیاد است. همان طور که در شکل (۶) می بینید، با افزایش غلظت مواد معلق آب، میزان بازتابش در طول موج های ۵۶۰ و ۶۸۰ نانومتر و نیز نسبت بازتابش آنها $(Rrs(681)/Rrs(560))$ افزایش می یابد. طبق رابطه توسعه داده شده با افزایش $Rrs(681)/Rrs(560)$ مقدار $1/SD$ افزایش می یابد و به عبارت دیگر مقدار SD کاهش می یابد که به مفهوم افزایش کدورت آب است. بنابراین، رابطه توسعه داده شده با فیزیک مسئله نیز کاملاً منطبق است.

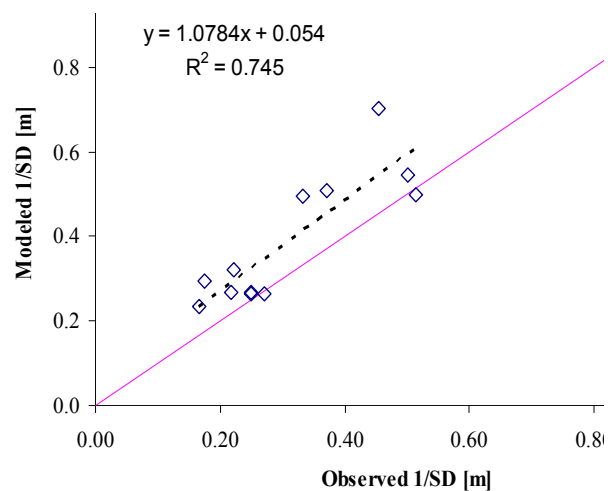
در پایان، الگوریتم توسعه داده شده بر اساس نسبت بانندی $Rrs(681)/Rrs(560)$ بر روی تصاویر مریس اعمال شد و نقشه های عمق شفافیت دریای خزر ایجاد شدند. شکل (۷) یک نمونه از این تصاویر را نشان می دهد که مربوط به ۱۶ آگوست ۲۰۰۵ است، که در



الف- مدل سطر اول جدول ۹



ب- مدل سطر دوم جدول ۹

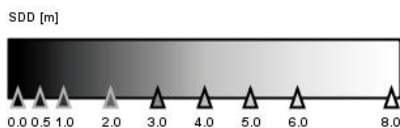
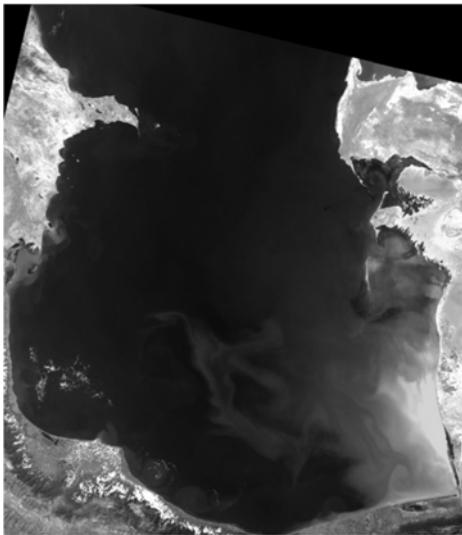


ج- مدل سطر سوم جدول ۹

شکل ۵- نمودار پراکنش داده های معکوس عمق سکی مدل سازی شده در مقابل داده های معکوس عمق سکی اندازه گیری شده

اتمسفرف شدن، بنابراین، این نتایج تلویحاً بیانگر عملکرد خوب پردازشگر C2R در تبدیل داده‌های سقف اتمسفر به کف اتمسفر است.

همچنین نتایج، بیانگر امکان استخراج عمق شفافیت از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مریس (وقتی که توسط یک پردازشگر مناسب تبدیل به داده‌های کف اتمسفر شده باشند) است.

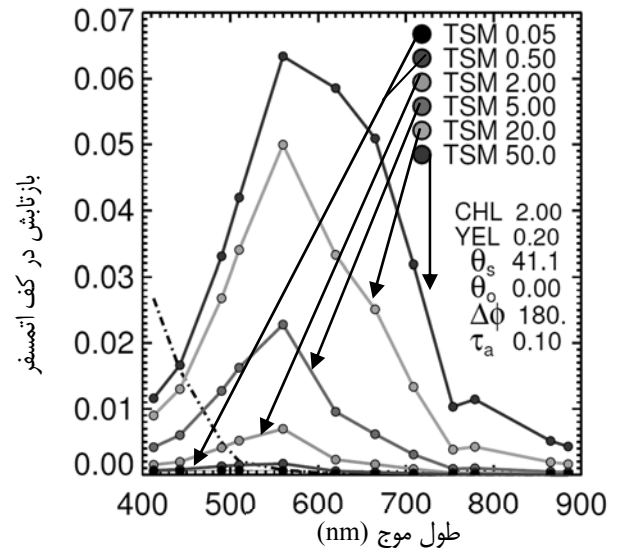


شکل ۷- نقشه عمق شفافیت دریای خزر مربوط به ۱۶ آگوست ۲۰۰۵ به همراه تصویر ترکیب رنگی کاذب آن (تصویر بالایی)

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت بنیاد ملی نخبگان انجام شده است، بنابراین، از این بنیاد به دلیل حمایت‌های مالی این پژوهش قدردانی می‌شود.

آن زمان شکوفایی جلبکی نودولاریا در دریای خزر رخ داد که اثرات شدید این شکوفایی جلبکی روی کاهش عمق شفافیت دریای خزر در محل شکوفایی در این شکل به وضوح دیده می‌شود.



شکل ۶- منحنی‌های طیفی انعکاس آب در کف اتمسفر، تمامی دیگر پارامترهای ارائه شده در شکل با زیرنویس شکل ۳ یکسان است [۱۶].

نتیجه‌گیری

بهترین مدل تجربی شفافیت برای دریای خزر براساس رگرسیون خطی توسط داده‌های بازتابش طیفی در بالای اتمسفر به صورت $\text{Log}(SD) = -2.57 + 2.53(R_{510}/R_{560})$ بود که بیانگر رابطه خطی بین نسبت بازتابش در بالای اتمسفر در طول موج‌های ۵۱۰ و ۵۶۰ نانومتر و لگاریتم عمق شفافیت است. این رابطه دارای ضریب همبستگی ۰/۴۱ بود که بیانگر نبود امکان توسعه مدل مناسب شفافیت از داده‌های بازتابش در بالای اتمسفر است.

بهترین مدل تجربی شفافیت برای دریای خزر براساس رگرسیون خطی توسط داده‌های بازتابش طیفی در کف اتمسفر به صورت $1/SD = -0.14 + 2.08 * (R(681)/R(560))$ بود که بیانگر رابطه خطی بین نسبت بازتابش در کف اتمسفر در طول موج‌های ۵۶۰ و ۶۸۱ نانومتر و عکس عمق شفافیت است. این رابطه دارای ضریب همبستگی ۰/۸۶ و درصد خطای محاسبه عمق شفافیت توسط این رابطه حدود ۲۸/۶٪ بود که بیانگر مدل‌سازی مناسب عمق شفافیت با استفاده از داده‌های بازتابش در بالای اتمسفر است. نظر به اینکه داده‌های سقف اتمسفر توسط پردازشگر C2R تبدیل به داده‌های کف

مراجع

- [9] Kratzer, S., Brockmann, C. and Moore, G., "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*, Vol. 112, 2007, pp. 2284–2300.
- [10] Korshenko, A. N. and Gul, A.G., Pollution of The Caspian Sea, In: *The Caspian Sea Environment (Handbook of Environmental Chemistry)*, Springer, 2005, pp. 109-142.
- [11] Zonn, I. S., Environmental Issues of The Caspian, In: *The Caspian Sea Environment (Handbook of Environmental Chemistry)*, Springer, 2005, pp. 223-242.
- [12] Zhang, Y., Pulliainen, J., Koponen, S. and Hallikainen, M., "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*, Vol. 8, 2003, pp. 251–261.
- [13] Park, Y., Cauwer De, V., Nechad, B. and Ruddick, K., "Validation of MERIS Water Products for Belgian Coastal Waters: 2002–2003", *MERIS and AATSR Calibration and Geographical Validation Workshop*, Frascati, Italy, 2003.
- [14] Doerffer, R., Schiller, H. and Peters, M., The MERIS Case2 Regional Processor, Version 1.1, 2006, Published 8 November 2006 on [http://www.brockmann-consult.de/beam/ plugins. html](http://www.brockmann-consult.de/beam/plugins.html).
- [15] Schröder, T., Fernerkundung, von Wasserinhaltsstoffen in Küstengewässern mit MERIS unter Anwendung expliziter und impliziter Atmosphärenkorrekturverfahren," (Thesis PhD), Freie Universität Berlin, Berlin, Germany, 2005.
- [1] Secchi, P.A., "Relazione della Esperienza Fatte A Bordo Della Pontificia Pirocorvetta L'Immacolata Concezione Per Determinare La Transparenze Del Mare" *Il Nuovo Cimento*, Vol. 20, No. 1, 1864, pp. 205-238.
- [2] Lee, G.F., Jones-Lee, A. and Rast, W., *Secchi Depth as a Water Quality Parameter*, Report of G. Fred Lee & Associates, El-Macero, CA, 1995.
- [3] Kratzer, S., Hakansson, B. and Sahlin, C., "Assessing Secchi and Photic Zone Depth in The Baltic Sea from Satellite Data," *AMBIO A Journal of The Human Environment*, Vol. 32, No. 8, 2003, pp. 577-585.
- [4] Lindell, T., Pierson, D., Premazzi, G. and Zilioli, E., *Manual for Monitoring European Lakes Using Remote Sensing Techniques*, Official Publication of The European Communities, Luxembourg, 1999, p. 9.
- [5] Ruddick, K., de Cauwer, V., Park, Y., Becu, G. and Blauwe, J-P., "Preliminary Validation of MERIS Water Products for Belgian Coastal Waters", *Proceedings of ENVISAT Validation Workshop*, ESA, SP-531, 2002.
- [6] Prasad, K. S., Bernstein, R. L., Kahru, M. and Mitchell, B. G., "Ocean Color Algorithms for Estimating Water Clarity (Secchi Depth) from Sea WiFS," *Journal of Advanced Marine Science and Technology Society*, Vol. 4, No. 2, 1998, pp. 301–306.
- [7] Suresh, T., Naik, P., Bandishte, M., Desa, E., Mascaranahas, A. and Parbhu, S.G., "Secchi Depth Analysis Using Bio-Optical Parameters Measured in The Arabian Sea" *SPIE Proceedings Remote Sensing of The Marine Environment*, Vol. 64, 2006, pp. 66-75.
- [8] Chen, Z., Muller-Karger, F., Hu, C., "Remote Sensing of Water Clarity in Tampa Bay," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 109, 2007, pp. 249–259.