



دانشکده علوم زمین  
پایان نامه کارشناسی ارشد  
گرایش زمین شناسی زیست محیطی

عنوان

تعیین روش مدلسازی معکوس مناسب جهت استخراج پارامترهای کیفی آب  
دریای خزر با کمک داده‌های ماهواره‌ای

نگارش

حسین شریفی

استاد راهنما

دکتر حمید طاهری شهرآئینی

تیر ۱۳۸۹

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

((به نام خداوند بخشنده بخشایشگر))

تقدیم به:

صاحب و ولی نعمتم آقا امام زمان (عج)

پدر و مادرم

آموزگارانم

که با لطف و عنایت بی دریغشان راه سیر و تکامل من را باز نمودند  
آنهایی که کوشیدند تا بدانم ثمره درس و عقیده ام این باشد  
که جهان را پروردگاریست مهربان و بی همتا.

## تشکر و قدردانی

اکنون که با عنایت به لطف و رحمت الهی کلیه مراحل این پایان نامه به اتمام رسیده است، جا دارد از همه عزیزانی که اینجانب را در تهیه این پایان نامه مساعدت نموده‌اند تشکر و قدردانی نمایم.

در ابتدا لازم می‌دانم از استاد محترم جناب آقای دکتر حمید طاهری شهرآئینی که راهنمایی رساله ام را بر عهده داشتند و همچنین به خاطر فراهم سازی تصاویر ماهواره‌ای و داده های میدانی این پایان نامه، تشکر و قدردانی ویژه‌ای داشته باشم. بی شک بدون حمایت و راهنمایی این استاد محترم انجام این تحقیق مقدور نمی‌بود.

بر خود لازم می‌دانم در اینجا از کلیه اساتید زمین شناسی که ذره ذره بر دانشم افزودند کمال تشکر و قدردانی ویژه‌ای داشته باشم.

در پایان نیز از تمام دوستانی که به نحوی مرا در مراحل مختلف تحصیلی همراهی و همدلی نمودند، کمال تقدیر را دارم.

## چکیده

پایش ترکیبات کیفی آب در پهنه‌های آبی مثل کلروفیل-a، مواد معلق و مواد آلی زرد رنگ محلول در آب یک ضرورت شناخته شده برای متخصصین آب و محیط زیست است. اما بررسی تغییرات زمانی و مکانی ترکیبات کیفی آب با روش‌های سنتی اندازه‌گیری میدانی، بسیار مشکل، وقت‌گیر و هزینه‌بر است. در چند دهه اخیر سنجش از دور به ابزار بسیار مفید و کارآمدی، در زمینه مطالعات کیفی آب تبدیل شده است. در حال حاضر تقریباً برخی از پارامترهای کیفی آب با این روش به طور معقول قابل اندازه‌گیری و کمی‌سازی هستند. با این وجود یکی از مهم‌ترین چالش‌های اصلی در سنجش از دور کیفی آب، یافتن و یا توسعه روش‌های مدل‌سازی مناسب است به طوری که این روش‌ها قادر باشند در پهنه‌های آبی مختلف پارامترهای کیفی آب را از تصاویر ماهواره‌ای با دقت معقول استخراج نمایند. در این پایان‌نامه عملکرد و دقت پنج مدل معکوس Case 2 سنجنده MERIS، شامل MEGS، C2R، FUB\WeW، ALM و هیبرید ALM-ANN، در دریای خزر به منظور استخراج کلروفیل-a، رنگدانه کل، مواد معلق و مواد آلی زرد رنگ، با استفاده از داده‌های میدانی مورد ارزیابی و اعتبار سنجی قرار گرفت. نقش تصحیح اثرات مجاورتی با استفاده از پردازشگر ICOL، بر میزان بهبود دقت مدل‌سازی این روش‌های معکوس نیز در این منطقه بررسی شد. همچنین با استفاده از روش‌های تجربی مختلف سعی شد الگوریتم‌های مختلفی به منظور استخراج عمق سکی (شفافیت) از تصاویر MERIS توسعه یابد.

در بخش ارزیابی مدل‌های معکوس، انطباق داده‌های میدانی با اطلاعات ماهواره‌ای بر اساس سه حالت مختلف برداشت اطلاعات (پیکسل مرکزی، میانگین 3x3 پیکسلی و میانه 3x3 پیکسلی) انجام شد. در این بخش، نتایج ارزیابی مدل‌های معکوس در مورد استخراج کلروفیل-a و رنگدانه کل، نشان داد که بهترین مدل معکوس برای استخراج این پارامترهای کیفی در دریای خزر، مدل معکوس هیبرید ALM-ANN است. در مورد استخراج CDOM، مدل‌های معکوس را می‌توان به ترتیب اولویت به صورت ALM، C2R، FUB\WeW و MEGS رده بندی نمود. برای استخراج SPM نیز نتایج ارزیابی مدل‌های معکوس نشان داد، که مدل معکوس ALM دارای بهترین عملکرد و مدل معکوس MEGS دارای ضعیف‌ترین عملکرد در

مدل‌سازی SPM در دریای خزر می‌باشند. همچنین نتایج ارزیابی مدل‌ها در حالت‌های مختلف پیکسلی نشان داد که میانگین جعبه پیکسلی  $3 \times 3$ ، بهترین روش برای استخراج داده‌های کیفی از تصاویر ماهواره-ای در مدل‌سازی Chl-a، SPM و CDOM است. در مورد استفاده از پردازشگر ICOL، نتایج ارزیابی مدل‌ها معکوس نشان داد که استفاده از این پردازشگر در مدل‌سازی کلروفیل-a و رنگدانه کل تنها باعث بهبود دقت مدل‌سازی ALM می‌شود. در مورد مدل‌سازی CDOM نیز استفاده از پردازشگر ICOL تنها باعث بهبود دقت مدل‌سازی C2R شده است. همچنین در مدل‌سازی SPM، پردازشگر ICOL، دقت مدل‌سازی دو مدل C2R و FUB\WeW را بهبود بخشیده است.

از طرفی عملکرد مدل‌های معکوس مختلف در راستای یک مقطع عرضی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که هر پنج مدل معکوس تقریباً از رفتار مدل‌سازی مشابهی برخوردار هستند. با استفاده از این مقطع عرضی مرز بین آب‌های ساحلی و آب‌های آزاد نیز تعیین شد (حدود ۸ کیلو متر). همچنین عملکرد دو مدل معکوس C2R و MEGS به منظور استخراج کلروفیل-a با استفاده از روابط بایو اپتیکال جدیدی که برای دریای خزر توسعه یافته بود، مورد ارزیابی و اعتبار سنجی قرار گرفت. نتایج اعتبار سنجی نشان داد که عملکرد مدل معکوس MEGS با استفاده از این روابط بایو اپتیکال جدید، بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است. البته در مورد مدل معکوس C2R، اعمال این روابط جدید، تاثیر زیادی بر بهبود عملکرد مدل‌سازی کلروفیل-a نداشته است. نتایج قیاس این دو مدل اعتبار سنجی شده با مدل هیبرید ALM-ANN، بار دیگر نشان داد که مدل هیبرید ALM-ANN، بهترین مدل معکوس برای ارزیابی کلروفیل-a در دریای خزر است. نتایج اعتبار سنجی با استفاده از روش Shifting در مورد CDOM و SPM نیز نشان داد که این روش تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر بهبود دقت مدل‌سازی مدل‌های معکوس بخصوص C2R و ALM دارد. در مورد مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از داده‌های انعکاسی در TOA و BOA، نتایج نشان داد که روش رگرسیون خطی ساده می‌تواند مدل عمق سکی ساده و معقولی را برای دریای خزر ارائه نماید. با این وجود نتایج کلی مدل‌سازی عمق سکی بیانگر آن است که روش ALM بهتر از بقیه روش‌های تجربی است. سرانجام با استفاده از مدل‌های معکوس مختلف، نقشه‌های توزیع مکانی غلظت ترکیبات کیفی آب در دریای خزر با استفاده از تصاویر MERIS تولید شد.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول : مقدمه .....	۱
۱-۱- طرح مسئله و ضرورت انجام تحقیق .....	۴
۲-۱- سنجش از دور رنگ آب .....	۵
۳-۱- طبقه بندی آب‌ها .....	۶
۱-۳-۱- آب‌های Case 1 .....	۶
۲-۳-۱- آب‌های Case 2 .....	۷
فصل دوم: نگرش‌های مختلف در مدل‌سازی معکوس .....	۹
۱-۲- پیش زمینه .....	۹
۲-۲- نگرش تجربی .....	۱۰
۳-۲- نگرش‌های مدل محور .....	۱۲
۱-۳-۲- روش های جبری .....	۱۲
۲-۳-۲- روش‌های بهینه سازی غیر خطی .....	۱۴
۳-۳-۲- روش تفسیر اجزای اصلی .....	۱۵
۴-۳-۲- روش شبکه‌های عصبی .....	۱۶
۵-۳-۲- روش یادگیری فعال (ALM) .....	۱۹
۴-۲- اهداف تحقیق .....	۲۶
فصل سوم: پردازشگرهای مدل محور Case 2 سنجنده MERIS .....	۲۸
۱-۳- سنجنده MERIS .....	۲۸
۲-۳- پردازشگرهای Case 2 .....	۳۱
۱-۲-۳- پردازشگر استاندارد سازمان فضایی اروپا (MEGS 7.4) .....	۳۲
۲-۲-۳- پردازشگر منطقه‌ای C2R .....	۳۳
۳-۲-۳- پردازشگر FUB\WeW .....	۳۵
۴-۲-۳- پردازشگر فازی ALM .....	۳۷
۳-۳- پردازشگر ICOL .....	۳۷
فصل چهارم: منطقه مطالعاتی و داده‌های میدانی .....	۳۹
۱-۴- دریای خزر .....	۳۹
۲-۴- اندازه گیری‌های میدانی .....	۴۱
۳-۴- داده‌های ماهواره‌ای .....	۴۲
فصل پنجم: مدل‌سازی معکوس پارامترهای کیفی براساس روش‌های مدل محور .....	۴۴
۱-۵- مقدمه .....	۴۴
۱-۱-۵- فرآیند ارزیابی و اعتبارسنجی .....	۴۵

- ۴۵ ..... ۲-۱-۵- مروری بر فعالیت‌های اعتبار سنجی محصولات سطح ۲ سنجنده MERIS
- ۴۷ ..... ۲-۵- مواد و روش‌ها
- ۴۷ ..... ۱-۲-۵- اندازه‌گیری‌های میدانی پارامترهای کیفی
- ۴۷ ..... ۲-۲-۵- داده‌های ماهواره‌ای
- ۴۸ ..... ۳-۲-۵- روش تحقیق
- ۴۹ ..... ۱-۳-۲-۵- اعمال تصحیح Smile و ICOL بر روی تصاویر سطح یک
- ۴۹ ..... ۲-۳-۲-۵- پردازش تصاویر سطح یک
- ۵۰ ..... ۳-۳-۲-۵- استخراج پارامترهای کیفی از تصاویر ماهواره‌ای
- ۵۰ ..... ۴-۳-۲-۵- ارزیابی دقت و عملکرد پردازشگرها
- ۵۰ ..... ۵-۳-۲-۵- اعتبار سنجی روابط بایو اپتیکال در پردازشگر C2R و MEGS
- ۵۱ ..... ۶-۳-۲-۵- بررسی رفتار پردازشگرها
- ۵۱ ..... ۷-۳-۲-۵- ایجاد نقشه‌های سری زمانی تغییرات پارامترهای کیفی
- ۵۱ ..... ۳-۵- معیارهای ارزیابی مدل‌های معکوس
- ۵۲ ..... ۴-۵- روش انتخاب مدل و حالت پیکسلی بهتر
- ۵۲ ..... ۵-۵- ارزیابی مدل‌های معکوس و نتایج آن
- ۵۳ ..... ۱-۵-۵- ارزیابی دقت مدل‌ها معکوس بدون پیش پردازش ICOL
- ۵۳ ..... ۱-۱-۵-۵- ارزیابی کلروفیل-a و رنگدانه کل
- ۵۳ ..... ۱-۱-۵-۵- غلظت کلروفیل-a سطحی
- ۵۷ ..... ۲-۱-۵-۵- غلظت رنگدانه کل سطحی
- ۶۰ ..... ۳-۱-۵-۵- غلظت میانگین عمقی کلروفیل-a
- ۶۳ ..... ۴-۱-۵-۵- غلظت میانگین عمقی رنگدانه کل
- ۶۶ ..... ۵-۱-۵-۵- ارزیابی نهایی مدل‌سازی کلروفیل-a و رنگدانه کل
- ۶۷ ..... ۲-۱-۵-۵- ارزیابی CDOM
- ۶۷ ..... ۱-۲-۱-۵-۵- CDOM سطحی
- ۷۰ ..... ۲-۲-۱-۵-۵- میانگین عمقی CDOM
- ۷۲ ..... ۳-۲-۱-۵-۵- ارزیابی نهایی مدل‌سازی CDOM سطحی و میانگین عمقی
- ۷۳ ..... ۳-۱-۵-۵- ارزیابی میانگین عمقی SPM
- ۷۶ ..... ۲-۵-۵- ارزیابی دقت مدل‌های معکوس با پیش پردازش ICOL
- ۷۶ ..... ۱-۲-۵-۵- ارزیابی کلروفیل-a سطحی
- ۷۸ ..... ۲-۲-۵-۵- ارزیابی رنگدانه کل سطحی
- ۷۹ ..... ۳-۲-۵-۵- ارزیابی میانگین عمقی کلروفیل-a
- ۸۰ ..... ۴-۲-۵-۵- ارزیابی میانگین عمقی رنگدانه کل
- ۸۲ ..... ۵-۲-۵-۵- ارزیابی CDOM سطحی
- ۸۳ ..... ۶-۲-۵-۵- ارزیابی میانگین عمقی CDOM
- ۸۵ ..... ۷-۲-۵-۵- CDOM میانگین عمقی SPM



۸۶	۵-۲-۸- اثرات پردازشگر ICOL در مناطق ساحلی
۸۹	۵-۶- اعتبارسنجی مدل‌های معکوس و نتایج آن
۹۳	۵-۷- بررسی تاثیر Shifting بر بهبود نتایج مدل‌ها
۱۰۰	۵-۸- بررسی رفتار مدل‌های معکوس
۱۰۲	۵-۹- تولید سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای
۱۰۲	۵-۱۰- خلاصه و نتیجه‌گیری
۱۰۶	<b>فصل ششم: مدل‌سازی تجربی عمق سکی</b>
۱۰۶	۶-۱- مقدمه
۱۰۹	۶-۲- هدف تحقیق
۱۰۹	۶-۳- اطلاعات استفاده شده
۱۰۹	۶-۳-۱- اندازه‌گیری‌های میدانی عمق سکی
۱۱۰	۶-۳-۲- داده‌های ماهواره‌ای
۱۱۰	۶-۴- روش تحقیق
۱۱۱	۶-۴-۱- جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها
۱۱۱	۶-۴-۲- استخراج مقادیر انعکاسی از تصاویر MERIS
۱۱۲	۶-۴-۳- تقسیم داده‌ها
۱۱۲	۶-۴-۴- مدل‌سازی
۱۱۳	۶-۴-۴-۱- معیارهای گزینش بهترین مقادیر انعکاسی برای مدل‌سازی
۱۱۵	۶-۴-۵- معیارهای ارزیابی مدل‌های تجربی
۱۱۵	۶-۴-۶- روش انتخاب مدل تجربی برتر
۱۱۶	۶-۵- نتایج و بحث
۱۱۶	۶-۵-۱- مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده
۱۱۶	۶-۵-۱-۱- مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از انعکاسات طیفی در TOA
۱۲۰	۶-۵-۱-۲- مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از انعکاسات طیفی در BOA
۱۲۴	۶-۵-۲- مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی چندگانه
۱۲۵	۶-۵-۲-۱- مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از انعکاسات طیفی در TOA
۱۳۱	۶-۵-۲-۲- مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از انعکاسات طیفی در BOA
۱۳۳	۶-۵-۳- مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از مدل ALM تجربی
۱۳۳	۶-۵-۳-۱- مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از انعکاسات طیفی در TOA
۱۳۸	۶-۵-۳-۲- مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از انعکاسات طیفی در BOA
۱۴۱	۶-۶- رتبه‌بندی و انتخاب مدل تجربی برتر
۱۴۱	۶-۶-۱- رتبه‌بندی مدل‌های تجربی توسعه یافته براساس مقادیر انعکاسی در TOA و انتخاب مدل تجربی برتر
۱۴۳	۶-۶-۲- رتبه‌بندی مدل‌های تجربی توسعه یافته براساس مقادیر انعکاسی در BOA و انتخاب مدل تجربی برتر
۱۴۴	۶-۷- تولید تصاویر سری زمانی تغییرات عمق سکی در دریای خزر از تصاویر MERIS
۱۴۴	۶-۸- نتیجه‌گیری

۱۴۵.....	فصل هفتم: نتایج کلی و پیشنهادات
۱۴۵.....	۱-۷- نتایج کلی
۱۴۶.....	۲-۷- پیشنهادات
۱۴۷.....	مراجع
۱۵۴.....	ضمیمه الف : معادله انتقال تشعشع
۱۵۸.....	ضمیمه ب : اندازه گیری های میدانی در دریای خزر
۱۵۹.....	ضمیمه پ : سری زمانی تصاویر پارامترهای کیفی
۱۶۳.....	ضمیمه ت : سری زمانی تصاویر عمق سکی

## فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۵	۱-۱- نمای شماتیکی از فرآیندهای موثر در سیگنال دریافتی توسط سنجنده (Zhang et al., 2003).....
۹	۱-۲- فرآیند کلی مدل سازی معکوس و استخراج پارامترهای کیفی آب .....
۱۷	۲-۲- نمای شماتیکی از یک شبکه عصبی با یک لایه مخفی .....
۲۱	۳-۲- آلوگوریتم روش ALM (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶) .....
۲۱	۴-۲- الف) داده‌های تصویر شده روی صفحه $x_1-y$ ، ب) داده‌های تصویر شده روی صفحه $x_2-y$ .....
	۵-۲- الف) نتایج اعمال IDS روی یک نقطه در صفحه $x_1-y$ ، ب) نتایج اعمال IDS روی تمامی نقاط موجود در صفحه $x_1-y$ ، نتایج اعمال IDS روی تمامی نقاط موجود در صفحه $x_2-y$ (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶) .....
۲۲	۶-۲- الف) مسیر استخراج شده از شکل ۲-۵، ب) مسیر استخراج شده از شکل ۲-۵ ج) (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶) .....
۲۳	۷-۲- فضای متغیرهای تقسیم شده به چهار زیر فضا، به همراه بهترین توابع غیر خطی متناظر .....
۲۵	۱-۳- ماهواره Envisat و موقعیت سنجنده MERIS روی آن (Rast et al., 1999) .....
۲۸	۲-۳- نمایی اجمالی از ساختار شبکه عصبی استفاده شده در مدل کیفی آب پردازشگر استاندارد MERIS (Doerffer and Schiller, 1997) .....
۳۳	۳-۳- ساختار شبکه عصبی استفاده شده در پردازشگر C2R برای بازیابی غلظت پارامترهای کیفی آب (C) از انعکاسات سنجش از دوری (r) و اطلاعات هندسی (g) (Schiller and Doerffer, 2006) .....
۳۴	۴-۳- فلوجارت پردازشگر FUB/WeW (Schroeder et al., 2007) .....
۳۶	۵-۳- فلوجارت پردازشگر ICOL (Santer and Zgolski, 2008) .....
۳۸	۱-۴- موقعیت دریای خزر در بین ۵ کشور حاشیه آن .....
۴۰	۲-۴- تصویر MODIS از دریای خزر (۱۱ ژوئن ۲۰۰۳) به همراه موقعیت منطقه مطالعاتی (مربع) و موقعیت اندازه گیری‌های میدانی (مثلث‌ها) (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶) .....
۴۱	۱-۵- فلوجارت روش تحقیق .....
۴۸	۲-۵- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی کلروفیل-a سطحی .....
۵۴	۳-۵- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی رنگدانه کل سطحی .....
۵۸	۴-۵- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی میانگین عمقی کلروفیل-a .....
۶۱	۵-۵- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی میانگین عمقی رنگدانه کل .....
۶۴	۶-۵- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی CDOM سطحی .....
۶۸	۷-۵- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی میانگین عمقی CDOM .....
۷۱	شکل ۵-۸- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی میانگین عمقی SPM .....
۷۴	۹-۵- نتایج گرافیکی ارزیابی چهار مدل معکوس C2R (ستون اول-چپ)، مدل معکوس FUB\WeW (ستون دوم)، مدل معکوس ALM (ستون سوم) و مدل معکوس ALM-ANN هیبریدی (ستون چهارم) با استفاده از مقادیر کلروفیل-a سطحی .....
۷۷	

- ۵-۱۰- نتایج گرافیکی ارزیابی چهار مدل معکوس C2R (ستون اول-چپ)، مدل معکوس FUB\WeW (ستون دوم)، مدل معکوس ALM (ستون سوم) و مدل معکوس ALM-ANN هیبریدی (ستون چهارم) با استفاده از مقادیر رنگدانه کل سطحی ..... ۷۹
- ۵-۱۱- نتایج گرافیکی ارزیابی چهار مدل معکوس C2R (ستون اول-چپ)، مدل معکوس FUB\WeW (ستون دوم)، مدل معکوس ALM (ستون سوم) و مدل معکوس ALM-ANN هیبریدی (ستون چهارم) با استفاده از مقادیر میانگین عمقی کلروفیل-a ..... ۸۰
- ۵-۱۲- نتایج گرافیکی ارزیابی چهار مدل معکوس C2R (ستون اول-چپ)، مدل معکوس FUB\WeW (ستون دوم)، مدل معکوس ALM (ستون سوم) و مدل معکوس ALM-ANN هیبریدی (ستون چهارم) با استفاده از مقادیر میانگین عمقی رنگدانه کل ..... ۸۱
- ۵-۱۳- نتایج گرافیکی ارزیابی سه مدل معکوس C2R (ستون اول)، FUB\WeW (ستون دوم) و ALM (ستون سوم) با استفاده از مقادیر سطحی CDOM ..... ۸۳
- ۵-۱۴- نتایج گرافیکی ارزیابی سه مدل معکوس C2R (ستون اول)، FUB\WeW (ستون دوم) و ALM (ستون سوم) با استفاده از مقادیر میانگین عمقی CDOM ..... ۸۴
- ۵-۱۵- نتایج گرافیکی ارزیابی سه مدل معکوس C2R (ستون اول)، FUB\WeW (ستون دوم) و ALM (ستون سوم) با استفاده از مقادیر میانگین عمقی SPM ..... ۸۵
- ۵-۱۶- تصویر ترکیب رنگی MERIS FR-L1b مربوط به ۱۶ آگوست ۲۰۰۵ به همراه موقعیت مقطع عرضی ..... ۸۶
- ۵-۱۷- استخراج غلظت کلروفیل-a در راستای مقطع عرضی از تصاویر پردازش شده با چهار مدل معکوس مورد مطالعه در دو حالت استفاده از تصاویر سطح یک با و بدون پیش پردازش ICOL (۱۶ آگوست ۲۰۰۵) ..... ۸۷
- ۵-۱۸- استخراج CDOM در راستای مقطع عرضی از تصاویر پردازش شده با سه مدل معکوس مورد مطالعه در دو حالت استفاده از تصاویر سطح یک با و بدون پیش پردازش ICOL (۱۶ آگوست ۲۰۰۵) ..... ۸۷
- ۵-۱۹- استخراج غلظت SPM در راستای مقطع عرضی از تصاویر پردازش شده با سه مدل معکوس مورد مطالعه در دو حالت استفاده از تصاویر سطح یک با و بدون پیش پردازش ICOL (۱۶ آگوست ۲۰۰۵) ..... ۸۸
- ۵-۲۰- رابطه بین  $a_{pig(442)}$  و غلظت کلروفیل-a میدانی در دریای خزر برای دو مدل معکوس C2R و MEGS ..... ۹۰
- ۵-۲۱- نتایج گرافیکی ارزیابی دو مدل معکوس C2R و MEGS با معادله مرجع (ستون اول C2R) و سوم (MEGS)) و با معادله اعتبار سنجی شده جدید (ستون دوم C2R) و چهارم (MEGS)) با استفاده از مقادیر میانگین عمقی کلروفیل-a ..... ۹۱
- ۵-۲۲- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل های معکوس ALM (ستون اول)، ALM هیبریدی (ستون دوم)، MEGS (نتایج اعتبار سنجی) (ستون سوم) و C2R (نتایج اعتبار سنجی) (ستون چهارم)، با استفاده از مقادیر میانگین عمقی کلروفیل-a ..... ۹۲
- ۵-۲۳- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل معکوس ALM (ستون اول)، مدل معکوس C2R (ستون دوم) و مدل معکوس FUB\WeW (ستون سوم) قبل از اعمال Shifting با استفاده از مقادیر سطحی CDOM ..... ۹۵
- ۵-۲۴- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل معکوس ALM (ستون اول)، مدل معکوس C2R (ستون دوم) و مدل معکوس FUB\WeW (ستون سوم) بعد از اعمال Shifting با استفاده از مقادیر سطحی CDOM ..... ۹۶
- ۵-۲۵- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل معکوس ALM (ستون اول)، مدل معکوس C2R (ستون دوم) و مدل معکوس FUB\WeW (ستون سوم) قبل از اعمال Shifting با استفاده از مقادیر میانگین عمقی CDOM ..... ۹۷

- ۵-۲۶- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل معکوس ALM (ستون اول)، مدل معکوس C2R (ستون دوم) و مدل معکوس FUB\WeW (ستون سوم) بعد از اعمال Shifting با استفاده از مقادیر میانگین عمقی CDOM ..... ۹۷
- ۵-۲۷- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل معکوس ALM (ستون اول)، مدل معکوس C2R (ستون دوم) و مدل معکوس FUB\WeW (ستون سوم) قبل از اعمال Shifting با استفاده از مقادیر میانگین عمقی SPM ..... ۹۸
- ۵-۲۸- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل معکوس ALM (ستون اول)، مدل معکوس C2R (ستون دوم) و مدل معکوس FUB\WeW (ستون سوم) بعد از اعمال Shifting با استفاده از مقادیر میانگین عمقی SPM ..... ۹۹
- ۵-۲۹- تصاویر MERIS-FR مربوط به ۸ آوریل و ۱ سپتامبر ۲۰۰۵ به همراه موقعیت مقطع عرضی در آن ..... ۱۰۱
- ۵-۳۰- مقادیر غلظت کلروفیل-a، جذب CDOM و SPM استخراج شده از مدل‌های معکوس در راستای مقطع عرضی نشان داده شده در شکل ۵-۲۹ ..... ۱۰۱
- ۶-۱- فلوجارت روش تحقیق ..... ۱۱۰
- ۶-۲- الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های عمق سکی مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز) ..... ۱۱۸
- ۶-۳- الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز) ..... ۱۱۸
- ۶-۴- الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های لگاریتم عمق سکی مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های لگاریتم عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز) ..... ۱۱۸
- ۶-۵- الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های عمق سکی مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون) ..... ۱۱۹
- ۶-۶- الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون) ..... ۱۱۹
- ۶-۷- الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های لگاریتم عمق سکی مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های لگاریتم عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون) ..... ۱۲۰
- ۶-۸- الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از Rrs(620) در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز) ..... ۱۲۲
- ۶-۹- الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از Rrs(779) در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز) ..... ۱۲۲
- ۶-۱۰- الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از Rrs(681)/Rrs(560) در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز) ..... ۱۲۲
- ۶-۱۱- الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از Rrs(620) در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون) ..... ۱۲۳
- ۶-۱۲- الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از Rrs(779) در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون) ..... ۱۲۳
- ۶-۱۳- الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از Rrs(681)/Rrs(560) در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون) ..... ۱۲۴

- ۱۴-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۵۱۰، ۵۶۰ و ۸۸۵ نانومتر در مقابل داده‌های عمق سکی اندازه‌گیری شده ..... ۱۲۸
- ۱۵-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۴۱۲، ۵۱۰، ۵۶۰، ۶۸۱ و ۷۷۹ نانومتر در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده ..... ۱۲۸
- ۱۶-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های لگاریتم عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۴۴۲، ۴۹۰، ۵۶۰، ۶۸۱ و ۷۷۹ نانومتر در مقابل داده‌های لگاریتم عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌سازی) ..... ۱۲۹
- ۱۷-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مدل توسعه یافته بر مبنای مقادیر انعکاسی در باندهای ۵۱۰، ۵۶۰ و ۸۸۵ نانومتر در مقابل داده‌های عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون) ..... ۱۲۹
- ۱۸-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۴۱۲، ۵۱۰، ۵۶۰، ۶۸۱ و ۷۷۹ نانومتر در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌سازی) ..... ۱۳۰
- ۱۹-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های لگاریتم عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۴۴۲، ۴۹۰، ۵۶۰، ۶۸۱ و ۷۷۹ نانومتر در مقابل داده‌های لگاریتم عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌سازی) ..... ۱۳۰
- ۲۰-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۷۵۴ و ۷۷۹ نانومتر در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌سازی) ..... ۱۳۲
- ۲۱-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مدل دو متغیره در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون) ..... ۱۳۳
- ۲۲-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های عمق سکی مدل‌سازی شده با چهار قانون فازی در مقابل داده‌های عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون) ..... ۱۳۶
- ۲۳-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با هشت قانون فازی در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون) ..... ۱۳۶
- ۲۴-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های لگاریتم عمق سکی مدل‌سازی شده با هشت قانون فازی در مقابل داده‌های لگاریتم عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون) ..... ۱۳۶
- ۲۵-۶- دیاگرام تقسیم بندی سلسله مراتبی (HPD) مدل تجربی ALM با ۴ قانون فازی به منظور استخراج عمق سکی ..... ۱۳۷
- ۲۶-۶- دیاگرام تقسیم بندی سلسله مراتبی (HPD) مدل تجربی ALM با ۸ قانون فازی به منظور استخراج معکوس عمق سکی ..... ۱۳۷
- ۲۷-۶- دیاگرام تقسیم بندی سلسله مراتبی (HPD) مدل تجربی ALM با ۸ قانون فازی به منظور استخراج لگاریتم عمق سکی ..... ۱۳۸
- ۲۸-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با شصت دو قانون فازی در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون) ..... ۱۳۹

۶-۲۹- دیاگرام تقسیم بندی سلسله مراتبی (HPD) مدل تجربی ALM با ۳۲ قانون فازی به منظور استخراج معکوس

عمق ..... ۱۴۰

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۲۹	۱-۳- کانال‌های طیفی MERIS و مشخصات آنها (Bézy et al., 2000).....
۲۹	۲-۳- خصوصیات اصلی سنجنده MERIS (Bézy et al., 2000).....
۳۰	۳-۳- اهداف اولیه ماموریت MERIS (Rast, 1987).....
۳۱	۴-۳- خصوصیات تصاویر سطح یک سنجنده MERIS (European Space Agency, 2002).....
۳۳	۵-۳- دامنه IOPs استفاده شده برای آموزش شبکه عصبی پیش خور در مدل کیفی آب پردازشگر استاندارد MERIS (Doerffer and Schiller, 1997).....
۳۵	۶-۳- دامنه تغییرات خصوصیات نوری استفاده شده برای شبیه سازی طیف انعکاس خروجی از آب پردازشگر C2R (Schiller and Doerffer, 2006).....
۳۶	۷-۳- محدود تغییرات IOP های استفاده شده برای شبیه سازی طیف انعکاسی در TOA (Schroeder, 2005).....
۴۳	۱-۴- مشخصات زمانی نمونه برداری‌های انجام شده در بازه تیر تا آبان ماه ۱۳۸۴ به همراه زمان عبور سنجنده MERIS.....
۴۳	۲-۴- دامنه تغییرات پارامترهای کیفی در نمونه‌های میدانی دریای خزر.....
۵۳	۱-۵- نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ پردازشگر مورد بررسی با کمک داده‌های، غلظت کلروفیل-a سطحی برای سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3).....
۵۶	۲-۵- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ مدل معکوس برای مدل سازی کلروفیل-a سطحی در سه حالت پیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی.....
۵۶	۳-۵- نتایج آماری ارزیابی عملکرد پنج مدل معکوس برای مدل سازی کلروفیل-a سطحی به همراه نتایج امتیاز دهی به معیارهای آماری و گرافیکی.....
۵۷	۴-۵- نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ پردازشگر مورد بررسی با کمک داده‌های، غلظت رنگدانه کل سطحی برای سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3).....
۵۹	۵-۵- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ مدل معکوس برای مدل سازی رنگدانه کل سطحی در سه حالت پیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی.....
۵۹	۶-۵- نتایج آماری ارزیابی عملکرد پنج مدل معکوس برای مدل سازی رنگدانه کل سطحی به همراه نتایج امتیاز دهی به معیارهای آماری و گرافیکی.....
۶۰	۷-۵- نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ پردازشگر مورد بررسی با کمک داده‌های، غلظت میانگین عمقی کلروفیل-a برای سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3).....
۶۲	۸-۵- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ مدل معکوس برای مدل سازی میانگین عمقی کلروفیل-a در سه حالت پیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی.....
۶۳	۹-۵- نتایج آماری ارزیابی عملکرد پنج مدل معکوس برای مدل سازی میانگین عمقی کلروفیل-a به همراه نتایج امتیاز دهی به معیارهای آماری و گرافیکی.....



- ۵-۱۰- نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ پردازشگر مورد بررسی با کمک داده‌های، غلظت میانگین عمقی رنگدانه کل برای سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3)..... ۶۳
- ۵-۱۱- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی رنگدانه کل در سه حالت پیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی ..... ۶۵
- ۵-۱۲- نتایج آماری ارزیابی عملکرد پنج مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی رنگدانه کل به همراه نتایج امتیاز دهی به معیارهای آماری و گرافیکی ..... ۶۵
- ۵-۱۳- نتایج امتیاز دهی به بهترین مدل معکوس انتخاب شده برای مدل‌سازی غلظت کلروفیل-a و رنگدانه کل در دو حالت سطحی و میانگین عمقی ..... ۶۶
- ۵-۱۴- نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ پردازشگر مورد بررسی با کمک داده‌های CDOM سطحی برای سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3) ..... ۶۷
- ۵-۱۵- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ مدل معکوس برای مدل‌سازی CDOM سطحی در سه حالت پیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی ..... ۶۹
- ۵-۱۶- نتایج آماری ارزیابی عملکرد چهار مدل معکوس برای مدل‌سازی CDOM سطحی به همراه نتایج امتیاز دهی به معیارهای آماری و گرافیکی ..... ۶۹
- ۵-۱۷- نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ پردازشگر مورد بررسی با کمک داده‌های میانگین عمقی CDOM برای سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3) ..... ۷۰
- ۵-۱۸- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی CDOM در سه حالت پیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی ..... ۷۲
- ۵-۱۹- نتایج آماری ارزیابی عملکرد چهار مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی CDOM به همراه نتایج امتیاز دهی به معیارهای آماری و گرافیکی ..... ۷۲
- ۵-۲۰- نتایج امتیاز دهی به بهترین مدل‌های معکوس انتخاب شده برای مدل‌سازی مقادیر سطحی و میانگین عمقی CDOM ..... ۷۳
- ۵-۲۱- نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ پردازشگر مورد بررسی با کمک داده‌های میانگین عمقی SPM برای سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3) ..... ۷۳
- ۵-۲۲- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی SPM در سه حالت پیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی ..... ۷۵
- ۵-۲۳- نتایج آماری ارزیابی عملکرد چهار مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی SPM به همراه نتایج امتیاز دهی به معیارهای آماری و گرافیکی ..... ۷۵
- ۵-۲۴- نتایج آماری ارزیابی مدل‌های معکوس به منظور استخراج کلروفیل-a سطحی با استفاده از تصاویر Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL ..... ۷۷
- ۵-۲۵- نتایج آماری ارزیابی مدل‌های معکوس به منظور استخراج رنگدانه کل سطحی با استفاده از تصاویر Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL ..... ۷۸
- ۵-۲۶- نتایج آماری ارزیابی مدل‌های معکوس به منظور استخراج مقادیر میانگین عمقی کلروفیل-a با استفاده از تصاویر Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL ..... ۷۹

۲۷-۵	نتایج آماری ارزیابی مدل های معکوس به منظور استخراج مقادیر میانگین عمقی رنگدانه کل با استفاده از
۸۱	تصاویر Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL .....
۲۸-۵	نتایج آماری ارزیابی مدل های معکوس به منظور استخراج مقادیر سطحی CDOM با استفاده از تصاویر Level
۸۳	1 با و بدون پیش پردازش ICOL .....
۲۹-۵	نتایج آماری ارزیابی مدل های معکوس به منظور استخراج مقادیر میانگین عمقی CDOM با استفاده از تصاویر
۸۴	Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL .....
۳۰-۵	نتایج آماری ارزیابی مدل های معکوس به منظور استخراج مقادیر میانگین عمقی SPM با استفاده از تصاویر
۸۵	Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL .....
۳۱-۵	معادلات بایو اپتیکال استفاده شده برای تبدیل ضریب جذب رنگدانه ((apig(442)) به غلظت Chl-a در دو
۸۹	مدل معکوس C2R و MEGS (Sorenson and Hokedal, 2006) .....
۳۲-۵	معادلات بایو اپتیکال جدید توسعه یافته برای تبدیل ضریب جذب رنگدانه ((apig(442)) به غلظت Chl-a در دو
۹۰	مدل معکوس C2R و MEGS برای دریای خزر .....
۳۳-۵	نتایج آماری ارزیابی استخراج کلروفیل-a با دو مدل معکوس C2R و MEGS با استفاده از معادله تبدیل
۹۱	مرجع و معادله اعتبار سنجی شده .....
۳۴-۵	نتایج آماری ارزیابی عملکرد چهار مدل معکوس برای مدل سازی میانگین عمقی کلروفیل-a به همراه نتایج
۹۳	امتیاز دهی به معیارهای آماری و گرافیکی .....
۳۵-۵	نتایج آماری ارزیابی مدل های معکوس قبل و بعد از اعمال Shifting، به منظور مدل سازی مقادیر سطحی
۹۶	CDOM .....
۳۶-۵	نتایج آماری ارزیابی مدل های معکوس قبل و بعد از اعمال Shifting، به منظور مدل سازی مقادیر میان عمقی
۹۸	CDOM .....
۳۷-۵	نتایج آماری ارزیابی مدل های معکوس قبل و بعد از اعمال Shifting، به منظور مدل سازی مقادیر میان عمقی
۹۹	SPM .....
۱۱۱	۱-۶ توصیف آماری از اندازه گیری های عمق سکی استفاده شده در مدل سازی تجربی .....
۱۱۱	۲-۶ باندهای استفاده شده از MERIS در مدل سازی تجربی .....
۱۱۷	۳-۶ الف) ماتریس ضرایب تعیین ( $R^2$ ) بین مقادیر انعکاسی (RfSTOA) و عمق سکی (N=۲۵) .....
۱۱۷	۴-۶ ماتریس ضرایب تعیین ( $R^2$ ) بین نسبت های انعکاسی و عمق سکی (N=۲۵) .....
۱۱۸	۵-۶ نتایج آماری مدل سازی عمق سکی با استفاده از بهترین نسبت باندهای (N=۲۵) .....
۱۱۹	۶-۶ نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی توسعه یافته عمق سکی با استفاده از داده های بخش آزمون (N=۱۲) .....
۱۲۱	۷-۶ الف) ماتریس ضرایب تعیین ( $R^2$ ) بین مقادیر انعکاسی (RfSBOA) و عمق سکی (N=۲۵) .....
۱۲۱	۸-۶ ماتریس ضرایب تعیین ( $R^2$ ) بین نسبت های انعکاسی مختلف در BOA و عمق سکی (N=۲۵) .....
۱۲۲	۹-۶ نتایج آماری مدل سازی معکوس عمق سکی با استفاده از بهترین نسبت باندهای BOA (N=۲۵) .....
۱۲۳	۱۰-۶ نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی توسعه یافته معکوس عمق سکی با استفاده از داده های بخش آزمون (N=۱۲) .....

۱۱-۶- مقادیر محاسبه شده $R^2$ (adj), $R^2$ , MSE و آماره $C_p$ برای بهترین مدل‌های رگرسیونی عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در TOA.....	۱۲۶
۱۲-۶- مقادیر محاسبه شده $R^2$ (adj), $R^2$ , MSE و آماره $C_p$ برای بهترین مدل‌های رگرسیونی معکوس عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در TOA.....	۱۲۷
۱۳-۶- مقادیر محاسبه شده $R^2$ (adj), $R^2$ , MSE و آماره $C_p$ برای بهترین مدل‌های رگرسیونی لگاریتم عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در TOA.....	۱۲۷
۱۴-۶- نتایج آماری مدل‌سازی عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی با استفاده از بهترین زیر مجموعه‌های شناسایی شده در TOA ( $N=25$ ).....	۱۲۸
۱۵-۶- نتایج آماری ارزیابی سه مدل رگرسیونی عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی با استفاده از داده‌های بخش آزمون ( $N=12$ ).....	۱۲۹
۱۶-۶- مقادیر محاسبه شده $R^2$ (adj), $R^2$ , MSE و آماره $C_p$ برای بهترین مدل‌های رگرسیونی معکوس عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در BOA.....	۱۳۱
۱۷-۶- نتایج آماری مدل‌سازی معکوس عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۷۵۴ و ۷۷۹ نانومتر ( $N=25$ ).....	۱۳۲
۱۸-۶- نتایج آماری ارزیابی مدل دو متغیره معکوس عمق سکی با استفاده از داده‌های مجموعه آزمون.....	۱۳۲
۱۹-۶- نتایج بخش آزمون (ارزیابی) مدل ALM تجربی توسط داده‌های عمق سکی میدانی ( $N=12$ ).....	۱۳۵
۲۰-۶- نتایج بخش آزمون (ارزیابی) مدل ALM تجربی توسط داده‌های معکوس عمق سکی میدانی ( $N=12$ ).....	۱۳۵
۲۱-۶- نتایج بخش آزمون (ارزیابی) مدل ALM تجربی توسط داده‌های لگاریتم عمق سکی میدانی ( $N=12$ ).....	۱۳۵
۲۲-۶- نتایج رتبه بندی متغیرها استفاده شده با توجه به نقش آن‌ها در فضای تقسیم و توابع تک متغیره (دیاگرام HPD شکل ۶-۲۵).....	۱۳۷
۲۳-۶- نتایج رتبه بندی متغیرها استفاده شده با توجه به نقش آن‌ها در فضای تقسیم و توابع تک متغیره (دیاگرام HPD شکل ۶-۲۶).....	۱۳۷
۲۴-۶- نتایج رتبه بندی متغیرها استفاده شده با توجه به نقش آن‌ها در فضای تقسیم و توابع تک متغیره (دیاگرام HPD شکل ۶-۲۷).....	۱۳۸
۲۵-۶- نتایج بخش آزمون (ارزیابی) مدل ALM تجربی توسط داده‌های معکوس عمق سکی میدانی ( $N=12$ ).....	۱۳۹
۲۶-۶- نتایج رتبه بندی متغیرها استفاده شده با توجه به نقش آن‌ها در فضای تقسیم و توابع تک متغیره (دیاگرام HPD شکل ۶-۲۹).....	۱۴۰
۲۷-۶- خلاصه نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی عمق سکی (رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی چندگانه و ALM) به همراه نتایج امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی.....	۱۴۲
۲۸-۶- خلاصه نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی معکوس عمق سکی (رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی چندگانه و ALM) به همراه نتایج امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی.....	۱۴۲
۲۹-۶- خلاصه نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی لگاریتم عمق سکی (رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی چندگانه و ALM) به همراه نتایج امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی.....	۱۴۲

۶-۳۰- خلاصه نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی معکوس عمق سکی (رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی چندگانه و ALM) به همراه نتایج امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی.....۱۴۳

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- طاهری شهرآئینی ح، شریفی ح، (۱۳۸۹)، " توسعه مدل رگرسیونی تخمین عمق شفافیت در دریای خزر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MERIS"، اولین همایش ملی - منطقه- ای اکولوژی دریای خزر، ۱۱ و ۱۲ خرداد ۱۳۸۹، ساری.
- ۲- طاهری شهرآئینی ح، شریفی ح، (۱۳۸۹)، " توسعه یک مدل بیوپتیکالی به منظور تخمین غلظت کلروفیل-a در دریای خزر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MERIS"، اولین همایش ملی - منطقه‌ای اکولوژی دریای خزر، ۱۱ و ۱۲ خرداد ۱۳۸۹، ساری.
- ۳- طاهری شهرآئینی ح، شریفی ح، (۱۳۸۹)، " ارزیابی عملکرد سنجنده MERIS در تخمین پارامترهای کیفی آب دریای خزر"، اولین همایش ملی - منطقه‌ای اکولوژی دریای خزر، ۱۱ و ۱۲ خرداد ۱۳۸۹، ساری.

## فهرست علائم اختصاری

AE	Adjacency Effect
ALM	Active Learning Method
AOM	Anthropogenic organic mater
AOP	Apparent Optical Properties
AOT	Aerosol Optical Thickness
BOA	Bottom of Atmosphere
C2R	Case 2 Regional
CCD	Charge Coupled Device
CDOM	Colored dissolved organic mater
Chl-a	Chlorophyll-a
COASTLOOC	Coastal Surveillance Through Observation of Ocean Color
DOM	Dissolve organic matter
ENVISAT	Environment Satellite ( <a href="http://envisat.esa.int">http://envisat.esa.int</a> )
ESA	European Space Agency ( <a href="http://www.esa.it/export/esaCP/index.html">http://www.esa.it/export/esaCP/index.html</a> )
ffNN	Feed forward network
FR	Full Resolution
FUB/WeW	Freie Universitaet Berlin/Institut fur Weltraumwissenschaften
GKSS	Gesellschaft fur Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH
ICOL	Improve Contrast between Ocean and Land
IDS	Ink Drop Spread
IOPs	Inherent Optical Properties
L1, L2	Level 1, Level 2
MAVT	MERIS-ATSR validation and calibration team
MEGS	MERIS-ESA Ground Segment Prototype Software
MERIS	MEDium Resolution Imaging Spectrometer
MODIS	MOderate Resolution Imaging Spectrometer
MOMO	Matrix Operator Method Code
NN	Neural Network
R2	Coefficient of Determination
REVAMP	Regional Validation of MERIS Chlorophyll products
RMSE	Root Mean Square Error
RR	Reduced Resolution
RRS	Radiance Reflectance (Remote Sensing Reflectance)
RTE	Radiative Transfer Equation
SDD	Secchi Disk Depth
SeaWiFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SPM	Suspended Particulate matter
TOA	Top Of Atmosphere
TOSA	Top of standard atmosphere
TSM	Total suspended material

# فصل اول

## مقدمه

### ۱-۱- طرح مسئله و ضرورت انجام تحقیق

اصطلاح کیفیت آب به طور کلی به منظور توصیف وضعیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب به کار می‌رود. بر این اساس پارامترهای مختلفی نیز بر کیفیت آب تاثیر گذار می‌باشند که شناسایی و درک رفتار آنها، می‌تواند نقش زیادی در کنترل و بهبود کیفیت آب داشته باشد. مطالعه کیفیت آب در اقیانوس‌ها و دریاها با توجه به نقش آنها در چرخه هیدرولوژی و اکولوژیکی زمین از اهمیت زیادی برخوردار است. بیش از ۴۰ پارامتر کیفی مختلف بر وضعیت کیفی آب در آب‌های شیرین و آب‌های اقیانوسی تاثیرگذار می‌باشند (Barale & Schlittenhardt, 1993). Ritchie & Schiebe (1998) از غلظت کلروفیل-a و رنگدانه‌های فیتوپلانکتونی، مواد معلق، مواد آلی محلول (DOM)<sup>۱</sup>، مواد شیمیایی، مواد مغذی، آفت کش‌ها و نفت به عنوان مهم‌ترین پارامترهای کیفی تاثیر گذار بر وضعیت کیفیت آب، در این محیط‌ها یاد می‌کنند. از میان این پارامترها، سه پارامتر کیفی غلظت کلروفیل-a، مواد معلق و مواد آلی حل شده از جایگاه ویژه‌ای در مطالعات کیفیت آب برخوردار هستند. فیتوپلانکتون‌ها (یا جلبک‌ها) موجودات ذره بینی و شناوری در آب هستند که حلقه اولیه در زنجیره غذایی دریایی را تشکیل می‌دهند و در همه جای توده‌های آبی که مواد مغذی به اندازه کافی در دسترس است و نور

---

<sup>۱</sup> Dissolve organic matter

خورشید به آن نفوذ می‌کند وجود دارند. کلروفیل-a (Chl-a) که مهم‌ترین رنگدانه فتوسنتزی می‌باشد معمولاً به عنوان شاخص فیتوپلانکتون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. غلظت کلروفیل-a در آب بیانگر غلظت یا جرم بیولوژیکی فیتوپلانکتون‌ها می‌باشد (IOCCG, 2000). فیتوپلانکتون‌ها نقش کلیدی روی اکولوژی دریاها دارند و تغییرات الگوی توزیع و فراوانی آن‌ها می‌تواند روی کل اکوسیستم و سیکل جهانی کربن تاثیر گذار باشد (Falkowski, 1994). جلبک از نظر تخلیه اکسیژن و تحت تاثیر قرار دادن حیات آبی نیز می‌تواند بسیار مهم باشد به عنوان مثال فیتوپلانکتون‌ها با کاهش میزان نور ورودی به آب یا اکسیژن محلول در آب، می‌توانند زندگی دیگر گونه‌های بیولوژیکی موجود در آب را به شدت تحت تاثیر قرار دهند. به طور کلی فیتوپلانکتون‌ها نسبت به شرایط محیطی بسیار حساس می‌باشند. وقوع غلظت‌های بالای فیتوپلانکتون در واکنش به ورود مواد مغذی گیاهی (به خصوص فسفر) ناشی از فعالیت‌های انسانی موجب آثار مضر متعدد در محیط‌های دریایی شده و حتی می‌تواند به شدت صنعت ماهی‌گیری را تحت تاثیر قرار دهد. به همین خاطر پایش وجود جلبک بخاطر اثرات شدید اکولوژیک، اقتصادی و بهداشتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

برخلاف فیتوپلانکتون‌ها، مطالعه مواد معلق (TSM<sup>۲</sup>) عمدتاً در مناطق ساحلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مواد معلق به کلیه ذرات معلق در آب که فاقد رنگدانه فیتوپلانکتونی هستند و قطری بیش از ۰/۴۷ میکرومتر دارند اطلاق می‌شود. مواد معلق معمولاً از رسوبات (ذرات معدنی) تشکیل شده است. سالانه بیش از ۲۰ میلیارد تن رسوب از طریق رودخانه‌ها به اقیانوس‌ها آورده می‌شوند (Milliman & Syvitski, 1992). مطالعه ترکیب، انتقال و سرنوشت رسوبات در مناطق ساحلی از دو جنبه بیولوژیکی (سلامت اکوسیستم) و مدیریت و مهندسی سواحل حائز اهمیت است. انتقال مقادیر زیادی جامدات معلق توسط رودخانه‌ها به محیط‌های ساحلی علاوه بر اینکه در بلند مدت نقش مهمی در تغییر شکل و تکامل خطوط ساحلی بازی می‌کند عامل بالقوه‌ای نیز جهت انتقال آلاینده‌هایی چون فسفات، آمونیم، فلزات سنگین و برخی از باکتری‌های بیماری‌زا و همچنین عامل موثری بر میزان

---

<sup>۲</sup> Total Suspended Material or Suspended Particulate Matter (SPM)



کدورت آب در محیط‌های ساحلی می‌باشد، بنابراین نقش تاثیر گذاری بر کیفیت آب در مناطق ساحلی دارند (Luoma, 1989 ; Rast et al., 1999).

مواد آلی رنگی محلول ( $^3\text{CDOM}$ )، بخشی از مواد آلی محلول (DOM) در آب است که به آن‌ها مواد زرد رنگ<sup>۴</sup> نیز گفته می‌شود. به طور کلی این مواد، به دو دسته مواد آلی رنگی محلول طبیعی (شامل مواد آلی تجزیه شده طبیعی مثل ریشه گیاهان و بقایای جانوری) و مواد آلی رنگی محلول انسان زاد ( $^5\text{AOM}$ ): شامل ضایعات کشاورزی و آلاینده‌های آلی صنعتی) قابل تفکیک است. رشد سریع فعالیت-های کشاورزی و صنعتی در برخی مناطق باعث ورود مقادیر قابل ملاحظه‌ای CDOM چه به طور مستقیم و یا از طریق رودخانه‌ها به محیط‌های ساحلی شده است. در محیط‌های دریایی مخصوصاً مناطق ساحلی که غلظت CDOM بالا است، این ترکیبات نقش اساسی در تعدادی از فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی (مثل چرخه کربن جهانی، عملکرد زنجیره‌های غذایی میکروبی و نفوذ نور خورشید) ایفا می‌کنند (Mopper et al., 1991; Siegel et al., 2000; Siegel and Michaels, 1996; Moran et al., 1997). مطالعه این پارامتر می‌تواند اطلاعات با ارزشی در مورد آلاینده‌های آلی و منابع متناظر آن در اختیار محققین قرار دهد (Wang et al., 2006).

Transparency یا شفافیت آب (و یا عمق سکی<sup>۶</sup>)، نیز یکی دیگر از پارامترهای مهم کیفیت آب می‌باشد که اطلاعات با ارزش در زمینه‌های لیمینولوژی و اقیانوس شناسی در اختیار محققین قرار می‌دهد. ارتباط بسیار نزدیکی بین این پارامتر و دیگر پارامترهای کیفی آب همچون غلظت کلروفیل-a و غلظت رسوبات معلق در اکوسیستم‌های آبی مختلف، بویژه در مناطق ساحلی دیده شده است . با توجه به مطالب مذکور اهمیت پایش کیفی و تعیین پراکنش مکانی این ترکیبات (Chl-a, TSM, ) در پهنه‌های آبی مختلف روشن می‌شود.

---

<sup>۳</sup> Colored dissolved Organic Matter

<sup>۴</sup> Yellow substance or Gelbstoff

<sup>۵</sup> Anthropogenic Organic Matter

<sup>۶</sup> Secchi Depth (SD)

اما پایش ناهمگنی‌ها و تغییرات زمانی ترکیبات داخل آب در تمامی قسمت‌های یک پهنه آبی توسط روش‌های مرسوم اندازه‌گیری میدانی، بسیار مشکل و حتی غیر ممکن است (Dekker et al., 1991; George, 1997) زیرا این اندازه‌گیری‌ها از لحاظ زمانی و مکانی بسیار محدود هستند و چنان‌چه بخواهیم این محدودیت را حذف نموده و اقدام به اندازه‌گیری متناوب در یک پهنه آبی وسیع نماییم این عملیات بسیار هزینه‌بر خواهد بود (Liew and Kwoh, 2003). از طرفی دیگر برخی از پارامترهای کیفی از تغییرات زمانی و مکانی بالایی برخوردار هستند، در نتیجه نمونه برداری‌های میدانی که در زمان‌های خاصی از چند نقطه ثابت داده برداری می‌کنند قادر به توصیف این گونه تغییرات نیستند.

در چنین شرایطی استفاده از روش‌هایی مانند سنجش از دور که قادر به ارائه یک دید اجمالی<sup>۷</sup> از کل پهنه آبی می‌باشد می‌تواند نقش یک منبع اطلاعاتی بسیار با ارزش را ایفا نماید (Harma et al., 2001). سنجش از دور می‌تواند از لحاظ مکانی کل پهنه آبی را پوشش داده و به طور متناوب و ارزان، عملیات پایش را با دقت معقول به انجام رساند. امروزه تعدادی سنجنده رنگ آب<sup>۸</sup>، که برای پایش کیفی آب‌ها مناسب هستند توسعه داده شده‌اند مثل MODIS<sup>۹</sup>، SeaWIFS<sup>۱۰</sup> و MERIS<sup>۱۱</sup>.

## ۱-۲- سنجش از دور رنگ آب<sup>۱۲</sup>

به طور کلی سنجش از دور رنگ آب یکی از تکنیک‌های سنجش از دور انفعالی<sup>۱۳</sup> است. در سنجش از دور رنگ آب، سنجنده نصب شده بر روی ماهواره، هواپیما یا دیگر تجهیزات فضایی میزان تشعشع دریافتی در طول موج‌های مختلف در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک را ثبت می‌نماید. همان‌طور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است سیگنال دریافتی توسط سنجنده مربوط به اندرکنش اتمسفر،

---

<sup>۷</sup> Synoptic

<sup>۸</sup> Ocean color sensor

<sup>۹</sup> MOderate Resolution Imaging Spectrometer

<sup>۱۰</sup> Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor

<sup>۱۱</sup> MEdition Resolution Imaging Spectrometer

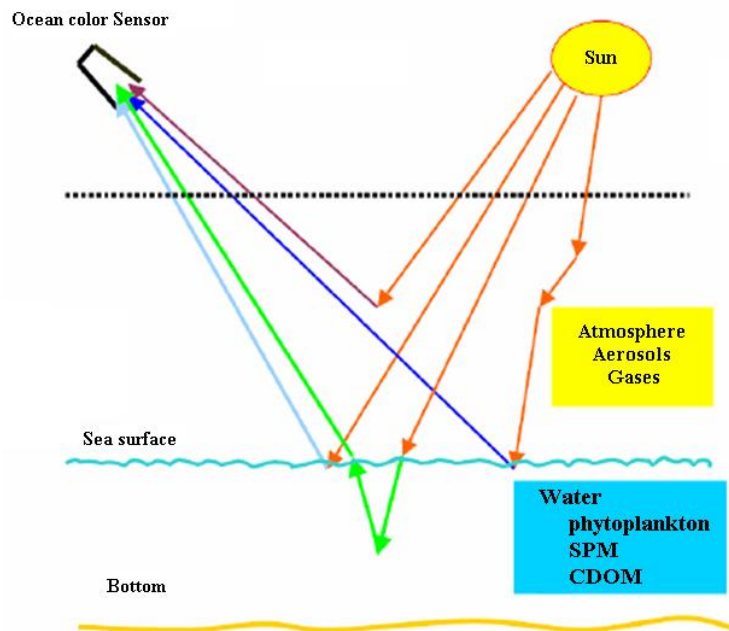
<sup>۱۲</sup> Ocean color remote sensing

<sup>۱۳</sup> Passive

آب و ترکیبات آن با نور خورشید است. اندرکنش مذکور می تواند به صورت فرآیندهای مختلفی انجام شود. این فرآیندها شامل موارد زیر می باشند:

- ۱- پراکندگی نور خورشید توسط اتمسفر،
- ۲- انعکاس مستقیم نور خورشید از سطح آب،
- ۳- انعکاس غیر مستقیم نور خورشید از سطح آب،
- ۴- نور انعکاسی از داخل آب.

تنها بخشی از سیگنال دریافتی که مربوط به اندرکنش نور خورشید با توده آب است (نور انعکاسی از داخل آب) حاوی اطلاعاتی از اجزای آب می باشد که برای محاسبه ترکیبات آب مناسب است. بقیه بخش ها که بیش از ۸۰٪ سیگنال دریافتی را تشکیل می دهند (نویز<sup>۱۴</sup>) برای تشخیص پارامترهای کیفی آب مناسب نمی باشند (Morel, 1980). این بخش ها در صورت امکان، بایستی در فرآیند تصحیح اتمسفری<sup>۱۵</sup> از سیگنال کل کسر شوند.



شکل ۱-۱- نمای شماتیکی از فرآیندهای موثر در سیگنال دریافتی توسط سنجنده در بالای اتمسفر ( Zhang et

al., 2003

<sup>۱۴</sup> Noise

<sup>۱۵</sup> Atmospheric correction

مدل‌سازی معکوس<sup>۱۶</sup>، فرآیند استخراج پارامترهای کیفی آب، از داده‌های تشعشع خروجی از آب است. این تشعشع خروجی از آب می‌تواند توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای در قسمت بالای اتمسفر اندازه‌گیری شود.

دو استراتژی مختلف برای استخراج پارامترهای کیفی آب از داده‌های ماهواره‌ای دریافت شده در بالای اتمسفر (<sup>۱۷</sup>TOA) وجود دارد که شامل روش یک مرحله‌ای و روش دو مرحله‌ای می‌باشند. در روش دو مرحله‌ای، ابتدا تشعشع خروجی از آب در پایین اتمسفر (<sup>۱۸</sup>BOA)، به کمک تشعشع دریافتی در TOA، محاسبه می‌شود که به این فرآیند تصحیح اتمسفری نیز گفته می‌شود. سپس غلظت ترکیبات موجود در آب، از مقادیر تشعشع خروجی از آب در BOA استخراج می‌شود. اما در روش تک مرحله‌ای، ترکیبات موجود در آب، مستقیماً توسط سیگنال دریافتی در TOA محاسبه می‌شود (Zhang, 2003). از آنجایی که روش تک مرحله‌ای عملکرد بهتری از روش دو مرحله‌ای دارد (Schroeder et al., 2004; Schroeder, 2005) اخیراً مورد توجه زیادی قرار گرفته است (Li et al., 2003; Gordon et al., 1997; Taheri Shahraini, 2007).

### ۱-۳- طبقه بندی آب‌ها

(Morel and Prieur (1977) آب‌ها را بر حسب خواص اپتیکی آن‌ها به دو دسته Case 1 و Case 2 تقسیم بندی نمودند.

#### Case 1-۱-۳- آب‌های Case 1

در این آب‌ها کلروفیل و رنگدانه‌های مربوطه، نقش اساسی در خواص اپتیکی آب و همچنین تعیین کل ضریب جذب ایفا می‌کنند (Mobley, 1994; Zhang, 2003). به همین دلیل بین پارامترهای

---

<sup>۱۶</sup> Inverse modeling

<sup>۱۷</sup> Top of Atmosphere

<sup>۱۸</sup> Bottom of Atmosphere

اپتیکی و غلظت کلروفیل در این آب‌ها همبستگی مناسبی وجود دارد ( Gordon and Morel, 1983; Carder et al., 1999). آب‌های Case 1 از آب‌های خیلی تمیز (Oligotrophic) تا آب‌های بسیار کدر (Eutrophic) را شامل می‌شوند (Mobley, 1994). آب‌های اقیانوسی معمولاً از نوع آب‌های Case 1 هستند.

### ۱-۳-۲- آب‌های Case 2

این گروه شامل آن دسته از آب‌هایی می‌باشد که خصوصیات نوری آن‌ها علاوه بر فیتوپلانکتون تحت تاثیر اجزای نوری دیگری چون مواد معلق (TSM) و مواد آلی محلول (CDOM) قرار دارد ( Mobley, 1991; Fischer et al., 1994). به عبارت دیگر ترکیبات غیر فیتوپلانکتونی سهم قابل توجهی در خواص اپتیکی دارند و اثرات آن‌ها مستقل از غلظت فیتوپلانکتون می‌باشد این وضعیت باعث پیچیدگی نوری در آب‌های Case 2 شده است. همبستگی پایین ویژگی‌های نوری این ترکیبات با هم (میزان جذب و پراکندگی نور) باعث شده است که این ترکیبات به صورت متغیرهای مستقل بررسی شوند. این آب‌ها معمولاً در نواحی ساحلی، خورها و آب‌های داخلی<sup>۱۹</sup> قرار دارند ( Fischer et al., 1991).

در این پایان نامه، عملکرد و دقت مدل‌های معکوس مشهور به منظور استخراج پارامترهای کیفی آب، در دریای خزر که جزء آب‌های Case 2 به شمار می‌رود مورد ارزیابی و اعتبار سنجی قرار می‌گیرند تا مدل‌های معکوس مناسب جهت استخراج کلروفیل-a، مواد معلق و مواد آلی زرد رنگ مشخص شوند. از طرفی مدل‌های معکوس تجربی، به منظور استخراج عمق سکی در دریای خزر توسعه داده می‌شود. در ادامه مباحثی که در این پایان نامه ارائه خواهد شد به اختصار توضیح داده می‌شود. در فصل ۲ روش‌های مدل‌سازی معکوس مشهور و متعارف ارائه شده اند و به اهداف اصلی تحقیق نیز اشاره می‌گردد.

---

<sup>۱۹</sup> Inland

توضیحات مربوط به مدل‌های معکوس (پردازشگرهای مدل محور) Case 2 که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند مانند C2R<sup>۲۰</sup>، FUB/WeW<sup>۲۱</sup>، ALM<sup>۲۲</sup> و MEGS<sup>۲۳</sup> در فصل ۳ ارائه می‌شود. در فصل ۴ اطلاعاتی در مورد منطقه مطالعاتی، داده‌های میدانی و داده‌های ماهواره‌ای ارائه می‌گردد. در فصل ۵ مدل‌سازی معکوس مدل محور با استفاده از مدل‌های معکوس اشاره شده در فصل ۳ انجام می‌شود. ارزیابی دقت مدل‌های مختلف جهت تخمین پارامترهای کیفی آب دریای خزر (Chl-a, CDOM, SPM) از تصاویر MERIS و اعتبار سنجی (Validation) آن‌ها در این فصل انجام خواهد شد، و در نهایت مدل‌های معکوس مناسب جهت تخمین پارامترهای کیفی مذکور در دریای خزر شناسایی می‌شوند. همچنین سری زمانی نقشه‌های کیفیت آب دریای خزر نیز در این بخش ارائه می‌گردد.

مدل‌سازی عمق سکی با روش‌های تجربی در فصل ۶ ارائه خواهد شد. در این فصل نقشه‌های سری زمانی عمق سکی در دریای خزر نیز ارائه می‌گردد.

و در پایان (فصل ۷) نتایج این پایان نامه به همراه پیشنهاداتی به منظور ادامه کار ارائه می‌شود.

---

<sup>۲۰</sup> Coastal case 2 Regional processor

<sup>۲۱</sup> the Freie Universitaet Berlin/Institut fur Weltraumwissenschaften

<sup>۲۲</sup> Active learning Method

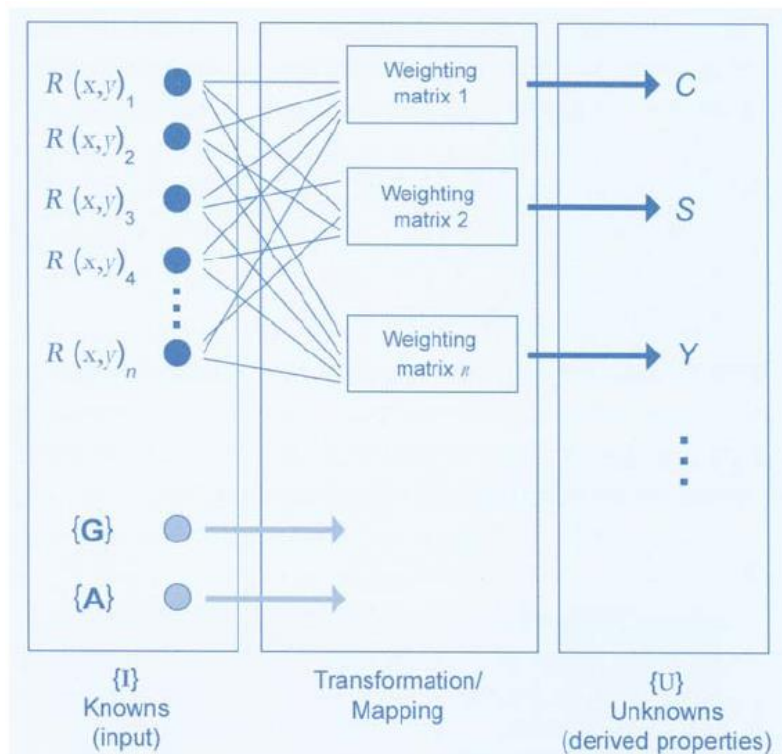
<sup>۲۳</sup> MERIS Ground Segment data processing prototype

## فصل دوم

### نگرش‌های مختلف در مدل‌سازی معکوس

#### ۲-۱- پیش زمینه

در این فصل نگرش‌ها و الگوریتم‌هایی که تاکنون به منظور استخراج پارامترهای کیفی آب از داده‌های ماهواره‌ای برای آب‌های Case 2 توسعه داده شده‌اند بررسی و مرور می‌شوند. شکل ۲-۱ فرآیند کلی مدل‌سازی معکوس را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱ - فرآیند کلی مدل‌سازی معکوس و استخراج پارامترهای کیفی آب  
( $(X,Y)$  نشانگر موقعیت جغرافیایی داده‌های مورد نظر می‌باشند) (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶)

داده‌های سنجش از دور حاوی مجموعه‌ای از انعکاس‌ها یا تشعشع‌های طیفی زاویه‌ای ( $R_1 \dots R_n$ ) می‌باشند که نشانگر خواص ظاهری اپتیکی آب (AOP)<sup>۱</sup> می‌باشند. چنانچه فرآیند تصحیح اتمسفریک انجام نشده باشد این داده‌ها حاوی اطلاعاتی در مورد وضعیت اتمسفر نیز می‌باشند.  $n$  بیانگر تعداد باندهای طیفی استفاده شده در مدل‌سازی معکوس می‌باشد. علاوه بر داده‌های انعکاس یا تشعشع طیفی زاویه‌ای، اطلاعات هندسی  $\{G\}$  نیز نیاز می‌باشد تا بتوان هندسه سنجنده و زوایای بین زمین، خورشید و سنجنده را تعیین نمود. همچنین ممکن است که اطلاعات کمکی  $\{A\}$  مثل موقعیت جغرافیایی، فصل، سرعت باد و غیره مورد استفاده واقع شود. این مقادیر ورودی می‌توانند به عنوان بردار مقادیر شناخته شده  $\{I\}$  در نظر گرفته شوند. مقادیر پارامترهایی که بایستی توسط مقادیر ورودی  $\{I\}$  تخمین زده شوند در طرف دیگر شکل ۱-۲ نمایش داده شده‌اند که می‌توانند شامل کلروفیل-a (C)، مواد معلق (S)، مواد زرد رنگ (Y)، عمق سکی (SD) و غیره باشند. این پارامترهای ناشناخته تحت عنوان  $\{U\}$  در شکل ۱-۲ نمایش داده شده‌اند. اساساً سنجش از دور آب‌های Case 2 مربوط به استخراج این پارامترهای کیفی آب می‌شود. نقش الگوریتم‌های رنگ آب یا مدل‌سازی‌های معکوس، تبدیل بردار ورودی  $\{I\}$  به بردار خروجی (ناشناخته‌ها)  $\{U\}$  می‌باشد. دو گروه اساسی از الگوریتم‌ها وجود دارند که بر پایه نگرش‌های مختلف می‌باشند. این دو نگرش شامل نگرش تجربی و نگرش مدل محور می‌باشند.

## ۲-۲- نگرش تجربی<sup>۲</sup>

تمامی الگوریتم‌های تجربی بین اندازه‌گیری‌های اپتیکی و غلظت ترکیبات موجود در آب ارتباط برقرار می‌کنند. متداول‌ترین مدل تجربی، از نسبت انعکاس‌ها در طول موج‌های متفاوت (Color ratio) استفاده می‌کند و می‌تواند به صورت رابطه ۱-۲ بیان شود.

$$P = \alpha \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^\beta + \gamma \quad (1-2)$$

<sup>۱</sup> Apparent Optical properties

<sup>۲</sup> Empirical-based approach



که  $p$  یک کمیت فیزیکی است که بایستی تخمین زده شود (مثل کلروفیل- $a$ ، مواد معلق، مواد زرد رنگ و عمق سکی) و  $R_i$  انعکاس (یا تشعشع) در کانال طیفی  $i$  می‌باشد. ضرایب  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  از طریق برازش بین انعکاس‌ها (یا تشعشع‌ها) و پارامتر مورد نظر ( $P$ ) محاسبه می‌شوند و برازش مذکور بر پایه داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. جزئیات الگوریتم‌های تجربی به خوبی توسط Gordon and Morel (1983) و Sathyendranath and Morel (1983) بیان شده است.

معمولاً زمانی که از این الگوریتم‌ها، در آب‌های Case 2 استفاده می‌شود نتایج بدست آمده، نسبتاً دارای دقت کمی می‌باشد (Schalles et al., 1998; Kallio et al., 2001). اما دقت این الگوریتم‌ها، زمانی که از تعداد باندهای بیشتری استفاده شود بهبود خواهد یافت، زیرا بدین صورت می‌توان محدوده وسیع‌تری از تغییرات پارامتر مورد نظر را بررسی نموده و یا ساختارهای طیفی خاص و پیچیده‌تر را مورد توصیف قرار داد (Hoge and Swift, 1986; Cippolini et al., 1999; Harma et al., 2001).

همچنین الگوریتم‌های تجربی برای آب‌های Case 2 می‌توانند با استفاده از باندهایی که برای آب‌های Case 2 مناسب‌تر هستند بهبود یابد. به عنوان مثال تحقیقات نشان می‌دهد زمانی که غلظت کلروفیل- $a$  در آب بالاست، بهتر است که از طول موج‌های بلندتر به جای نسبت باندهای آبی و سبز استفاده شود بدین ترتیب اثر مواد زرد رنگ روی الگوریتم‌ها کاهش می‌یابد (Dekker et al., 1991; Gitelson, 1992; Sathyendranath et al., 1997; Schalles et al., 1998).

الگوریتم‌های تجربی دارای فواید مختلفی هستند. این الگوریتم‌ها ساده هستند و به سادگی می‌توان آنها را توسعه داد و تنها به یک سری اندازه‌گیری‌های محدود که محدوده پارامترهای مورد نظر را پوشش می‌دهند نیاز دارند. الگوریتم‌های تجربی به سادگی قابل استفاده و آزمایش می‌باشند. این الگوریتم‌ها از زمان اجرای بسیار پایینی برخوردار هستند و نتایج آنها معمولاً پایدار است.

یک سری محدودیت در استفاده از الگوریتم‌های تجربی وجود دارد. الگوریتم‌های تجربی توسعه داده شده فقط برای داده‌هایی معتبر هستند که خصوصیات آماری آنها با داده‌های استفاده شده به منظور

توسعه مدل تجربی یکسان باشد. این الگوریتم‌ها به تغییرات ترکیب پارامترهای کیفی آب ( به عنوان مثال تغییرات ناشی از اثرات منطقه‌ای و فصلی) وابسته‌اند و خطای استخراج پارامترها می‌تواند به سرعت از محدوده قابل قبول خارج شود. مشکل دیگر استفاده از روابط تجربی این است که نمی‌توان بطور سیستماتیک آنالیز حساسیت را انجام داد تا بتوان خطاهای مربوط به هر کدام از منابع خطا را محاسبه نمود (IOCCG, 2000).

## ۲-۳- نگرش‌های مدل محور<sup>۳</sup>

یک بیان ساده از الگوریتم‌های مدل محور، استفاده از مدل‌های بایو اپتیکی، به منظور بیان رابطه ترکیبات آب و انعکاس یا تشعشع طیفی زاویه‌ای خروجی از آب می‌باشد. علاوه بر این، استفاده از مدل انتقال تشعشع<sup>۴</sup> به منظور شبیه سازی انتشار نور در آب و اتمسفر، از الگوریتم‌های مدل محور محسوب می‌گردد.

به منظور توسعه این گونه مدل‌های معکوس، معادله انتقال تشعشع (ضمیمه الف)، جهت تولید پایگاه داده‌ای از مقادیر مختلف غلظت ترکیبات آب و تشعشع یا انعکاس طیفی متناظر با آن مورد استفاده قرار می‌گیرد و سپس با استفاده از این پایگاه داده مصنوعی، اقدام به استخراج مدل معکوس (تبدیل انعکاس یا تشعشع طیفی زاویه‌ای به غلظت ترکیبات داخل آب) می‌شود. تاکنون روش‌های مدل‌سازی معکوس مختلفی با شدت خبرگی و پیچیدگی‌های متفاوت توسعه داده شده‌اند. روش مدل‌سازی معکوس مذکور، جهت استخراج پارامترهای کیفی Chl-a، SPM و CDOM در این پایان نامه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه روش‌های توسعه داده شده مرور می‌شوند.

## ۲-۳-۱- روش‌های جبری

ساده‌ترین روش در نگرش مدل محور، روش جبری است که در این روش توسط یک سری روابط جبری، یک مدل رنگ آب به پارامترهای کیفی آب مرتبط می‌شود. در این روش ابتدا با استفاده از

---

<sup>۳</sup> Model-base approach

<sup>۴</sup> Radiative Transfer

داده‌های تجربی، ضرایب یک مدل رنگ آب که ارتباط بین خصوصیات اپتیکی ذاتی آب<sup>۵</sup> (IOPs) و انعکاس یا تشعشع طیفی زاویه‌ای را بیان می‌کند مشخص می‌شود. همچنین روابط بین خصوصیات اپتیکی ذاتی آب و غلظت پارامترهای کیفی آن توسط داده‌های تجربی مشخص می‌شوند. بدین ترتیب برای طول موج‌های مختلف روابط جبری مستقلی بدست می‌آید که با حل پی در پی روابط جبری مذکور، پارامترهای ناشناخته که همان پارامترهای کیفی هستند مشخص می‌شوند. چنانچه روابط غیرخطی باشند و حل صریح معادلات جبری امکان پذیر نباشد می‌توان از جدول مراجعه‌ای<sup>۶</sup> استفاده نمود. مثال‌هایی از این روش را می‌توان در Carder et al. (1999) و Lee et al. (1996;1999) یافت. به عنوان مثال یکی از مدل‌های رنگ آب که به طور تحلیلی بیان می‌شود و به وفور از آن استفاده می‌شود در رابطه (۲-۲) نشان داده شده است. در این مدل، انعکاس زیر سطح آب دریا (R) به ضریب جذب<sup>۷</sup> (a) و ضریب پراکندگی برگشتی<sup>۸</sup> (b<sub>b</sub>) مرتبط می‌شود. این مدل توسط Gordon and Brown (1973) ارائه شده است.

$$R(\lambda) = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b(\lambda)} \quad (2-2)$$

که  $\lambda$  بیانگر طول موج است و عامل تناسب  $f$ ، که بین ۰,۳ تا ۰,۵ تغییر می‌نماید وابسته به میدان‌های نوری محیط و خواص اپتیکی آب است (Morel and Gentili, 1993). رابطه بین ترکیبات موجود در آب (Chl-a, SPM, CDOM) و ضرایب جذب و پراکندگی برگشتی طیفی ( $b_b(\lambda)$ ,  $a(\lambda)$ ) توسط داده‌های تجربی تعیین می‌شوند. سپس رابطه استخراج شده می‌تواند جانشین ضرایب مذکور در رابطه (۲-۲) شود. بدین ترتیب بین انعکاس طیفی ( $R(\lambda)$ ) و ترکیبات مختلف یک سری روابط جبری به وجود می‌آید. اگرچه خطاهای مربوط به اندازه‌گیری‌ها و داده‌های تجربی می‌تواند روی رابطه خصوصیات اپتیکی ذاتی آب و پارامترهای کیفی آب و همچنین مدل رنگ آب تأثیر گذار باشد اما زمانی که این روش برای آب‌های Case 2 مورد استفاده قرار می‌گیرد جواب-

<sup>۵</sup> Inherent Optical Properties (IOPs)

<sup>۶</sup> Look-up table

<sup>۷</sup> Absorption Coefficient

<sup>۸</sup> Back Scattering Coefficient

های نسبتاً دقیقی می‌دهد (Lee et al., 1996, 1999; Carder et al., 1999). عیب این روش این است که برای تعداد کم پارامترهای ناشناخته مفید است و زمانی که تعداد پارامترهای ناشناخته افزایش می‌یابد بهتر است که از روش‌هایی که قابلیت استخراج هم‌زمان تعداد زیادی از پارامترهای ناشناخته را دارند استفاده نمود. تعدادی از این روش‌های خیره‌تر در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار می‌گیرند.

### ۲-۳-۲- روش بهینه‌سازی غیر خطی

در این روش یک مدل مستقیم مثل مدل انتقال تشعشع، توسط کمینه کردن مستقیم اختلاف بین تشعشع محاسبه شده و اندازه‌گیری شده، می‌تواند به صورت یک مدل معکوس عمل کند. روش‌های مختلفی برای انجام فرآیند کمینه‌سازی وجود دارد که به عنوان مثال می‌توان از روش Levenberg-marquardt نام برد (Nelder and Mead, 1965). در روش بهینه‌سازی غیر خطی سعی بر این است که اختلاف بین تشعشعات اندازه‌گیری شده توسط ماهواره ( $L_{Sat}$ ) و تشعشعات مدل‌سازی شده ( $L_{Mod}$ ) یا  $\chi^2$  ( $\sum_{\lambda} (L_{Sat} - L_{Mod})$ ) که مجموعه مجذور اختلاف مذکور روی تمامی طول موج‌ها می‌باشد کمینه شود. کمینه شدن با تغییر مقادیر ورودی‌های مدل (پارامترهای کیفی آب) حاصل می‌شود. این روش مدل‌سازی معکوس با دیگر روش‌های مدل‌سازی معکوس مثل روش شبکه‌های عصبی و روش تفسیر اجزای اصلی (PCI)<sup>۹</sup> (در بخش‌های بعدی توضیح داده شده‌اند) متفاوت است. زیرا در روش‌های مذکور بایستی یک پایگاه داده مصنوعی توسط حل مستقیم معادله انتقال تشعشع شبیه‌سازی شود و سپس به کمک این داده‌ها، مدل معکوس ایجاد می‌شود. در حالی که در روش بهینه‌سازی غیر خطی، پایگاه داده مصنوعی مورد نیاز نمی‌باشد. در نگرش‌هایی که از داده‌های شبیه‌سازی شده استفاده می‌کنند بایستی داده‌های مذکور برای محدوده وسیع و مناسبی از پارامترها شبیه‌سازی شود. البته اغلب مشکل است که محدوده و توزیع فراوانی غلظت‌هایی که نشانگر تغییرات طبیعی پارامترهای کیفی هستند را مشخص نمود.

---

<sup>۹</sup> Principal Component Interpretation (PCI)

تحقیقات زیادی به منظور اعمال روش بهینه‌سازی غیرخطی روی داده‌های ماهواره‌ای یا انعکاس‌های اندازه‌گیری شده صورت گرفته است. بعنوان مثال Doerffer and Fischer (1994) از یک مدل انتقال تشعشع و روش سیمپلکس به منظور استخراج کلروفیل-a، مواد معلق، مواد زرد رنگ و ضخامت اپتیکی<sup>۱۰</sup> آئروسول‌های اتمسفری در دریای شمال از داده‌های CZCS<sup>۱۱</sup> استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که توزیع فراوانی پارامترهای کیفی مستخرج توسط روش بهینه‌سازی و اندازه‌گیری‌های میدانی از سازگاری مناسبی برخوردارند.

البته در استفاده از روش بهینه‌سازی بایستی به چند نکته توجه نمود. بایستی به ساختار مدل مستقیم توجه خاص داشت و ساختار آن را به شکلی تنظیم نمود که تا حد ممکن اطمینان حاصل شود که پارامترهای ناشناخته به طور مستقل از یکدیگر استخراج می‌شوند. همچنین یکی از مشکلات اساسی این روش مدل‌سازی معکوس، زمان بر بودن آن است. البته می‌توان سرعت این روش را با حدس اولیه مناسب کاهش داد اما سرعت آن همچنان نسبتاً کم است. در بخش‌های بعدی به سه نگرش دیگر اشاره خواهد شد که از سرعت محاسبات بالایی برخوردارند.

## ۲-۳-۳- روش تفسیر اجزای اصلی

ایده اصلی روش تفسیر اجزای اصلی (PCI)، یافتن یک رابطه خطی بین مجموعه‌ای از تشعشعات طیفی در TOA و مجموعه‌ای از پارامترهای کیفی آب می‌باشد. در این روش از مدل‌سازی انتقال تشعشع، به منظور تولید پایگاه داده‌ای، از داده‌های تشعشع طیفی مطابق با طول موج‌های ماهواره مورد نظر و پارامترهای کیفی آب استفاده می‌شود (Krawczyk et al., 1993; 1999). سپس توسط اعمال روش آنالیز اجزای اصلی (PCA) به داده‌های تشعشع طیفی در TOA، اقدام به مستقل کردن آنها می‌شود. سپس یک رابطه خطی بین اجزای اصلی (PC)های مختلف ایجاد می‌شود (رابطه ۲-۳،

---

<sup>۱۰</sup> Optical thickness

<sup>۱۱</sup> Coastal Zone Color Scanner

سمت راست) تا به کمک آن، رابطه غیر خطی هر پارامتر کیفی آب (رابطه ۲-۳، سمت چپ) را محاسبه نمود (Krawczyk et al., 2003).

$$P_i + m * \log(P_i) = \sum_{j=1}^n (k_{ij} PC_j) + A_i \quad (3-2)$$

که  $P_i$  یک تخمین از پارامتر کیفی  $i$  ام مثل  $Chl-a$ ،  $SPM$  یا  $CDOM$  می‌باشد.  $K_{ij}$  ضریب وزنی  $PC_j$  برای پارامتر کیفی  $i$  ام می‌باشد.  $PC_j$  نشانگر زامین  $PC$ ،  $A_i$  مقدار عرض از مبداء پارامتر کیفی  $i$  ام و  $z$  نشانگر شماره  $PC$  است که بین ۱ تا  $n$  تغییر می‌کند،  $n$  تعداد کانال‌های طیفی در ماهواره مورد نظر و  $m$  نیز یک عدد ثابت است (Krawczyk et al., 1999; 2003). علت استفاده از رابطه غیر خطی هر پارامتر کیفی (سمت چپ رابطه ۲-۳) در نظر گرفتن ماهیت غیر خطی بین تشعشع و پارامترهای کیفی موثر در خواص اپتیکی آب می‌باشد.

از مزایای اصلی این روش، طبیعت خطی این الگوریتم است که آن را بسیار ساده می‌کند. همچنین این الگوریتم پایدار بوده و از سرعت اجرای بسیار بالایی برخوردار است و می‌توان آن را روی هر سیستم کامپیوتری اجرا نمود.

## ۲-۳-۴- روش شبکه‌های عصبی

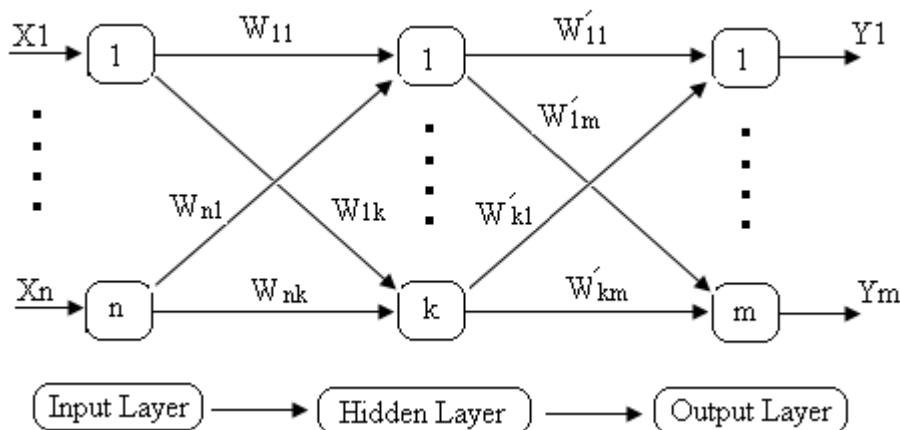
ایده استفاده از روش شبکه عصبی به منظور مطالعات رنگ آب برای اولین بار توسط Schiller and Doerffer (1994) در Bio-Optics Meeting تیم علمی SeaWiFS ارائه شد. به طور کلی این روش یکی از مهم‌ترین روش‌های مدل‌سازی معکوس معادله انتقال تشعشع است. در حال حاضر تقریباً بیشتر مدل‌های معکوس کنونی سنجنده MERIS بر پایه روش شبکه‌های عصبی توسعه یافته‌اند. از این مدل‌های معکوس می‌توان به مدل‌های معکوس Case 2 چون  ${}^{12}C2R$  (Doerffer et al., 2006)، FUB/Wew (Schroeder and Schaale, 2005) و مدل معکوس شبکه عصبی آژانس فضایی اروپا (MEGS) اشاره نمود.

---

<sup>۱۱</sup> Case 2 regional processor

روش شبکه‌های عصبی همانند یک روش برازش غیر خطی عمل می‌کند و بین انعکاس‌های طیفی و غلظت پارامترهای کیفی آب ارتباط غیرخطی برقرار می‌کند. مثال‌هایی از تحقیقات انجام شده توسط Zhang (2003), Schiller and Doerffer (1999) و Schroeder et al. (2004) ارائه شده‌اند.

شبکه‌های عصبی شامل تعداد زیادی گره (یا نرون<sup>۱۳</sup>) می‌باشند. یک شبکه عصبی پرسپترون<sup>۱۴</sup> چندلایه، به صورت یک لایه از ورودی‌ها، یک لایه از خروجی‌ها و یک یا چند لایه مخفی<sup>۱۵</sup> بین آن‌ها بیان می‌شوند. در شکل ۲-۲ ساختار یک شبکه عصبی ساده با یک لایه مخفی نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- نمای شماتیکی از یک شبکه عصبی با یک لایه مخفی

همانطور که از شکل ۲-۲ مشخص است نرون‌های شبکه از طریق یک سری وزن‌ها ( $w$  و  $w'$  ها) به هم متصل هستند. این شبکه دارای ورودی‌های  $X_1$  و ...  $X_n$  (نورودی) و خروجی‌های آن شامل  $Y_1$  و ...  $Y_m$  (خروجی) می‌باشد و یک لایه مخفی که دارای  $K$  نرون است در بین آنها قرار دارد. برای هر نرون شبکه، به عنوان مثال برای نرون  $k$  ام لایه مخفی، مقدار ورودی به نرون از طریق حاصل ضرب مقادیر نرون‌های لایه ورودی در وزن‌های مربوطه آن بدست می‌آید (رابطه ۲-۴) یعنی :

$$Z_{in(K)} = \sum_{i=1}^n X_i \cdot W_{ik} \quad (۲-۴)$$

که  $X_i$  مقدار ورودی  $i$  ام،  $W_{ik}$  مقدار وزن بین نرون  $i$  ام از لایه ورودی و نرون  $k$  ام از لایه مخفی

<sup>۱۳</sup> Neuron  
<sup>۱۴</sup> perceptron  
<sup>۱۵</sup> Hidden layer

می‌باشد و  $Z_{in(k)}$  مقدار کل ورودی به نرون  $k$  ام لایه مخفی است.

اما مقدار خروجی نرون از طریق یک تابع پیوسته مشتق پذیر اکیداً صعودی بدست می‌آید که معمولاً از توابعی مثل  $\exp$ ،  $\tanh$  و یا Sigmoid بدین منظور استفاده می‌شود. بعنوان مثال چنانچه از تابع  $\tanh$  استفاده شود مقدار خروجی نرون  $k$  ام از لایه مخفی ( $Z_{out(k)}$ ) از رابطه (۵-۲) بدست می‌آید.

$$Z_{out(K)} = \tanh (Z_{in(K)}) \quad (5-2)$$

با عملیاتی مشابه، مقدار خروجی‌های دیگر شبکه نیز قابل محاسبه است. پس چنان چه وزن‌های روی اتصالات نرون‌های مختلف مشخص باشند می‌توان یک تابع غیرخطی یا یک تابع لجستیک<sup>۱۶</sup> را با این شبکه تخمین زد و مقادیر ورودی‌ها را به شبکه داده و از شبکه خروجی دریافت نمود. تابع لجستیک برای مطالعات سنجش از دور و مدل‌سازی معکوس بسیار مناسب است زیرا رابطه بین لگاریتم غلظت پارامترهای کیفی آب و انعکاس به صورت یک تابع شبیه به تابع لجستیک می‌باشد. شبکه عصبی می‌تواند یک تخمین‌گر عمومی<sup>۱۷</sup> باشد. ضرایب موجود در شبکه عصبی (مثل وزن‌ها و بایاس‌ها<sup>۱۸</sup>) در فرایند یادگیری یا آموزش، توسط کمینه کردن اختلاف بین غلظت‌های استفاده شده در شبیه سازی-ها و غلظت‌های بدست آمده از شبکه عصبی محاسبه می‌شوند. کمینه کردن اختلاف مذکور در شبکه-های عصبی می‌تواند به روش‌های مختلفی انجام شود. اگرچه معمولاً از روش پس انتشار خطا<sup>۱۹</sup> در شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. به منظور کسب اطلاعات بیشتر در مورد شبکه‌های عصبی و روش‌های آموزش آن به (Fausset 1994) مراجعه شود.

در فاز بهره برداری از شبکه عصبی، انعکاس یا تشعشعات طیفی به عنوان ورودی به شبکه عصبی معرفی می‌شود و خروجی آن غلظت پارامترهای کیفی آب است.

موفقیت یک شبکه عصبی ابتدائاً به مدل استفاده شده به منظور تولید داده‌های شبیه سازی شده یا داده‌های آموزش شبکه دارد. بایستی مدل استفاده شده به طور مناسبی خواص اپتیکی ترکیبات آب و

---

<sup>۱۶</sup> Logistic function

<sup>۱۷</sup> Universal approximator

<sup>۱۸</sup> Bias

<sup>۱۹</sup> Error Back propagation



انتقال تشعشع درسیستم را بیان کند. شبکه عصبی یک ابزار بسیار قدرتمند برای استخراج ترکیبات داخل آب است. این روش می‌تواند از پیچیده‌ترین شکل معادله انتقال تشعشع استفاده نماید و از سرعت پردازش بسیار بالایی برخوردار است به طوری که می‌تواند به منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای به صورت بلا درنگ مورد استفاده واقع شود. نتایج تحقیقات (Schiller and Doerffer, 1999) نشان داد که شبکه عصبی خصوصیات غیر خطی مدل را به خوبی بازسازی کرده است و توانایی استخراج پارامترهای کیفی آب‌های Case 2 را دارا است.

نتایج بررسی و مقایسه حساسیت به نویز روش‌های شبکه عصبی و بهینه سازی غیر خطی نشان داد که علیرغم روش بهینه سازی غیر خطی، روش شبکه عصبی نسبت به نویز مقاوم است. همچنین در مقایسه با روش‌های بهینه سازی، سرعت شبکه عصبی حدود ۱۰۰ برابر بیشتر است (Hughes et al., 2001). همچنین تحقیقات (Zhang et al., 2003) از مقاومت شدید شبکه‌های عصبی نسبت به نویز خبر می‌دهد.

## ۲-۳-۵- روش یادگیری فعال (ALM)

با ارائه مفاهیم فازی و استنتاجات مرتبط با آن توسط Zadeh (1965) و Mamdani (1976)، یک نگرش جدید به روش مدل‌سازی و محاسبه انسان باز نموده شد. اگر چه روش‌های مدل‌سازی قدرتمند مختلفی با استفاده از این روش‌های فازی توسعه و به کار گرفته شدند (Tanaka and Sano, 1994, Otsubo and Hayashi, 1996). اما به نظر می‌رسد که به خاطر محاسبات دقیق و ریاضی موجود در آن‌ها، ساختار آن‌ها با روش حقیقی یادگیری و مدل‌سازی انسان متفاوت باشد (Bagheri Shouraki and Honda, 1999). البته ساختار روش مدل‌سازی انسان شبیه روش‌های مذکور است اما از پیچیدگی‌های ریاضی اجتناب می‌کند. (Bagheri Shouraki and Honda, 1997) یک روش مدل‌سازی فازی جدیدی را ابداع نمودند که نه تنها از ریاضیات مقدماتی استفاده می‌نماید بلکه می‌تواند توسط شبکه عصبی بیولوژیکی نیز پیاده سازی شود. این روش جدید، روش یادگیری فعال (ALM) نامیده شد. این روش شبیه‌ترین روش فازی به روش مدل‌سازی انسان است که از ریاضیات بسیار مقدماتی

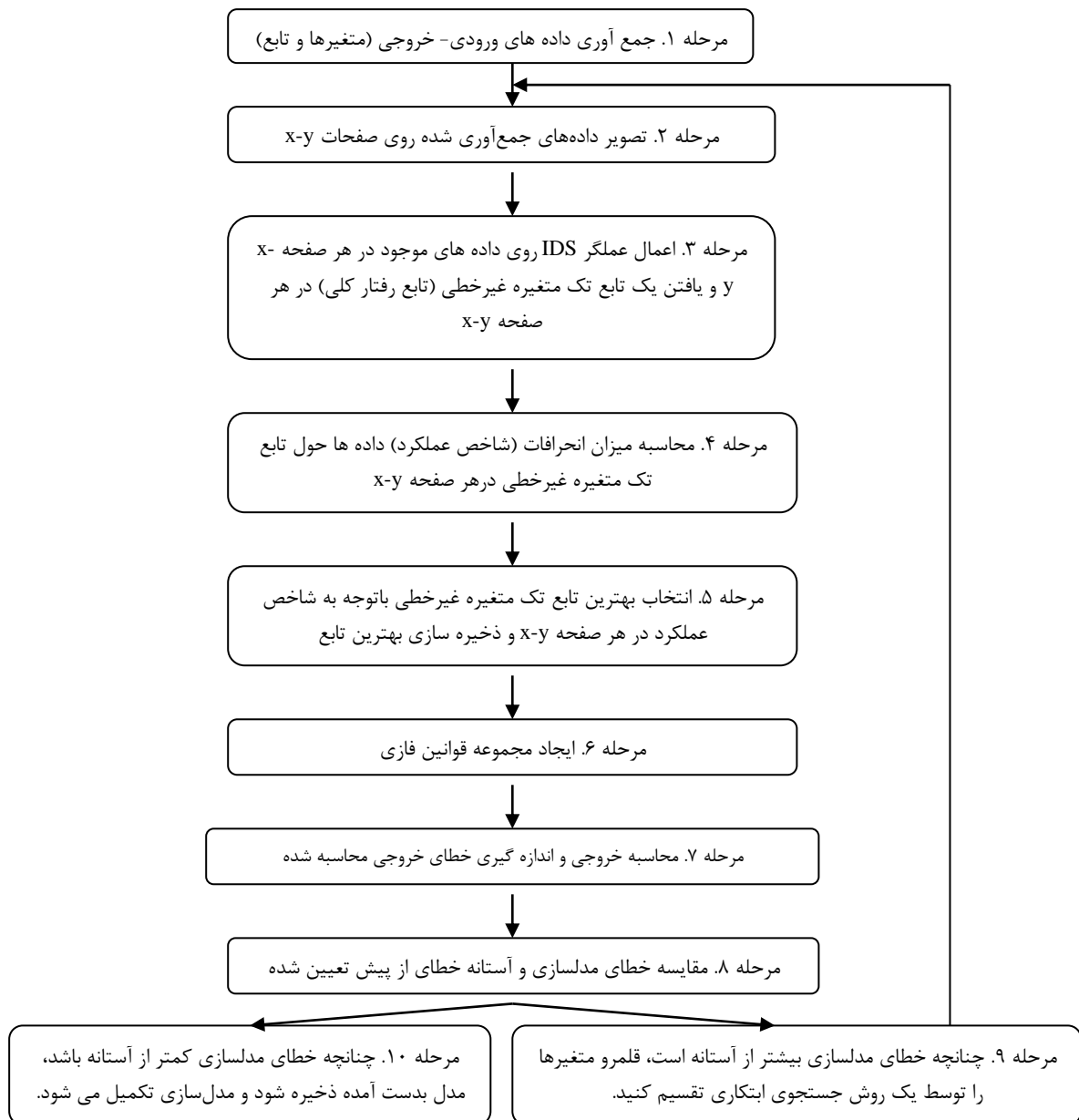
استفاده می‌نماید و دقت آن با افزایش تعداد تکرار فرآیند ALM به طور نامحدود افزایش می‌یابد. (1997) Bagheri Shouraki and Honda نشان دادند که ALM یک تخمین‌گر عمومی است. ایده استفاده از روش ALM به منظور مدل‌سازی معکوس معادله انتقال تشعشع در مطالعات رنگ آب برای اولین بار توسط طاهری شهرآئینی (۱۳۸۶) ارائه شد.

با مطالعه رفتار انسان در تعامل با سیستم‌های چند ورودی- چند خروجی، در می‌یابیم که انسان ابتدا سعی می‌کند که رابطه بین ورودی و خروجی را صرف نظر از اثر سایر ورودی‌ها، به صورت کمی شناسایی نموده و سپس با کنار هم قرار دادن رفتارهای شناسایی شده جزئی، رفتار کل سیستم را شناسایی نماید. بنابراین به یک سیستم چند ورودی- چند خروجی به صورت چند سیستم تک ورودی- تک خروجی نگریسته و به جای مطالعه رفتار یک سیستم چند ورودی- چند خروجی، رفتار چند سیستم تک ورودی- تک خروجی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

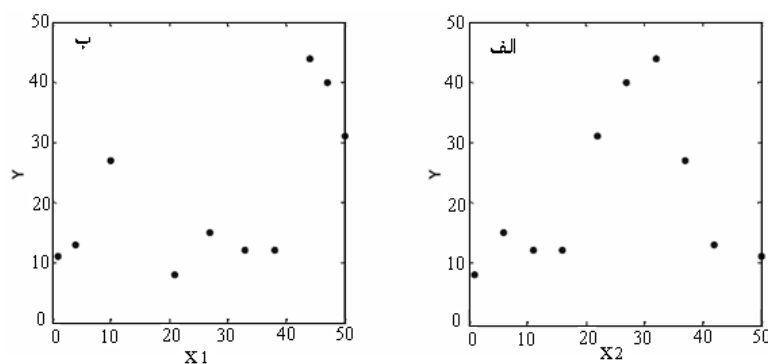
مراحل مختلف مدل‌سازی یک سیستم غیر خطی به روش ALM در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. به منظور درک بهتر روش مدل‌سازی ALM، یک مسئله ساختگی کوچک در نظر گرفته می‌شود که دارای دو متغیر است و این مسئله در هر مرحله از الگوریتم ALM حل می‌شود (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶). در نظر بگیرید که مسئله ساختگی دارای دو متغیر  $x_1$  و  $x_2$  به عنوان ورودی و یک تابع به عنوان خروجی ( $y$ ) است.

مرحله ۱- الگوریتم مربوط به جمع آوری داده از سیستم مورد نظر است.

مرحله ۲- در این مرحله داده‌های جمع‌آوری شده روی صفحات  $x-y$  تصویر می‌شوند. شکل ۲-۴ داده‌های تصویر شده روی صفحات  $x_1-y$  و  $x_2-y$  را نشان می‌دهد.



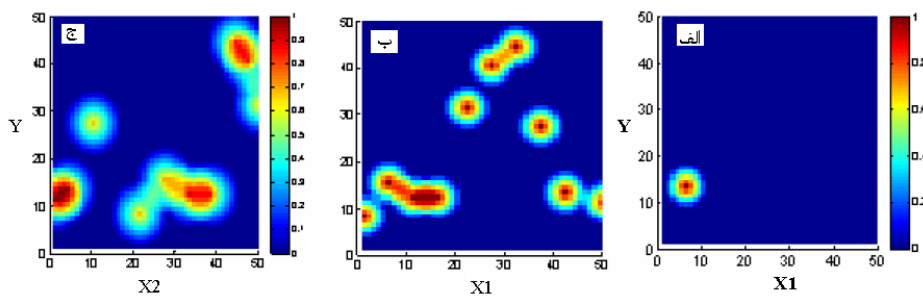
شکل ۲-۳- الگوریتم روش ALM ( طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶ )



شکل ۲-۴- (الف) داده های تصویر شده روی صفحه  $X_1-Y$ ، (ب) داده های تصویر شده روی صفحه  $X_2-Y$  (طاهری

شهرآئینی، ۱۳۸۶)

مرحله ۳- قلب محاسبات ALM یک درون‌یاب فازی است که روش پخش قطره جوهر<sup>۲۰</sup> (IDS) نامیده می‌شود. IDS به طور فازی به دنبال یک مسیر پیوسته ممکن روی داده‌های درون‌یابی شده در هر صفحه می‌گردد (Bagheri Shouraki and Honda, 1997; 1999). در IDS، هر داده روی هر صفحه  $x-y$  به صورت یک منبع نور در نظر گرفته می‌شود که الگوی انتشار نور آن به صورت مخروط یا هرم می‌باشد و با افزایش فاصله از نقطه (منبع) میزان نور کاهش می‌یابد تا اینکه نهایتاً به صفر می‌رسد. شعاع قاعده مخروط الگوی نوردهی<sup>۲۱</sup> بستگی به موقعیت نقاط در صفحه  $x-y$  دارد. شعاع قاعده مخروط الگوی نوردهی آن قدر زیاد در نظر گرفته می‌شود که تمامی قلمرو متغیر، نوردهی شود. شکل ۲-۵ الف الگوی نوردهی مخروطی شکل یک نقطه در صفحه  $x_1-y$  را نشان می‌دهد و شکل‌های ۲-۵ ب و ۲-۵ ج نتایج نهایی نوردهی با استفاده از یک الگوی نوردهی مخروطی شکل را در صفحات  $x_1-y$  و  $x_2-y$  نشان می‌دهند.



شکل ۲-۵ الف) نتایج اعمال IDS روی یک نقطه در صفحه  $x_1-y$ ، ب) نتایج اعمال IDS روی تمامی نقاط موجود در صفحه  $x_1-y$ ، ج) نتایج اعمال IDS تمامی نقاط موجود در صفحه  $x_2-y$  (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶)

همان طور که در این شکل‌ها می‌بینید روشنایی ایجاد شده در بعضی از مناطق مربوط به ترکیب الگوی نوردهی نقاط مختلف در صفحات  $x_1-y$  و  $x_2-y$  می‌باشد. مقایر نشان داده شده در شکل‌های ۲-۵ ب و ۲-۵ ج مقادیر نوردهی شده (IL) می‌باشند. اکنون با محاسبه مرکز ثقل روی جهت  $y$  در

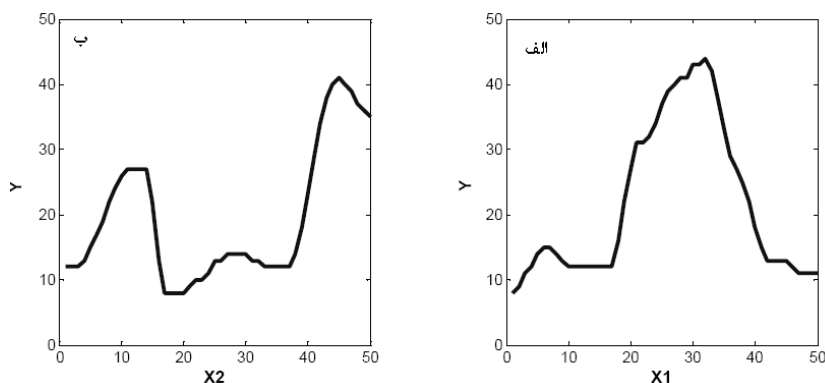
<sup>۲۰</sup> Ink Drop Spread (IDS)

<sup>۲۱</sup> Illumination Pattern

شکل‌های ۵-۲ ب و ۵-۲ ج، می‌توان مسیره‌ها یا رفتارهای کلی<sup>۲۲</sup> یا توابع غیر خطی تک متغیره غیر صریح<sup>۲۳</sup> را تولید نمود. مرکز ثقل مذکور با استفاده از رابطه ۶-۲ محاسبه می‌شود.

$$Y(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{ij} \times \mathbf{IL}(x_i, y_j))}{\sum_{j=1}^m y_{ij}} \quad (6-2)$$

که  $m, j = 1 \dots m$  قدرت تفکیک جهت  $y$ ،  $x_i$  نشانگر  $i$  امین موقعیت در روی محور  $x$ ،  $y_{ij}$  مقدار خروجی موقعیت  $j$  ام روی محور  $y$  و موقعیت  $i$  ام روی محور  $x$  می‌باشد.  $\mathbf{IL}(x_i, y_j)$  مقدار نوردهی شده روی صفحه  $(x-y)$  در نقطه  $(x_i, y_j)$  و  $y(x_i)$  مقدار تابع مورد نظر متناظر با نقطه  $x_i$  می‌باشد. شکل ۶-۲ مسیره‌های ایجاد شده توسط IDS برای صفحات  $x_1-y$  و  $x_2-y$  می‌باشند.



شکل ۶-۲ الف) مسیر استخراج شده از شکل ۵-۲ ب، مسیر استخراج شده از شکل ۵-۲ ج (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶)

در مرحله بعدی (مرحله چهارم) میزان انحراف یا عملکرد مسیر روی هر صفحه  $x_i-y$  محاسبه می‌شود. این عملکرد یا انحراف، میزان دوری یا نزدیکی نقاط در هر صفحه را به مسیر محاسبه شده در آن صفحه نشان می‌دهد. معیارهای مختلفی برای محاسبه این عملکرد وجود دارد مثل درصد خطای

مطلق<sup>۲۴</sup>  $(PAE = \sum_{i=1}^m [|T(i) - M(i)| / T(i)] \times 100 / m)$ ، میانگین اریبی<sup>۲۵</sup>  $(MBE = \sum_{i=1}^m [T(i) - M(i)] / m)$ ،

ضریب همبستگی<sup>۲۶</sup>  $(R = Cov(T, M) / \sqrt{Cov(T, T) \times Cov(M, M)})$  و مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۲۷</sup>

<sup>۲۲</sup> General Behavior

<sup>۲۳</sup> Non-Linear Implicit One-Variable Function

<sup>۲۴</sup> Absolute Percentage Error

<sup>۲۵</sup> Mean Bias Error

<sup>۲۶</sup> Correlation of coefficient

$(RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^m [T(i) - M(i)]^2 / m})$ ، که  $m$  تعداد داده‌های اندازه گیری شده،  $T(i)$  و  $M(i)$  به ترتیب  $i$

امین داده اندازه گیری شده و داده مدل می‌باشند. COV بیانگر کوواریانس است.

مقدار PAE و دیگر معیارها توسط مقایسه بین داده‌های حقیقی (اندازه گیری شده) (شکل ۲-۴) و داده های مدل شده توسط مسیرهای استخراج شده (شکل ۲-۶) محاسبه می‌شوند. در این مسئله ساختگی، مقادیر PAE مسیرهای روی صفحات  $x_1-y$  و  $x_2-y$  به ترتیب  $2/3$  و  $8/10$  می‌باشند.

در مرحله پنجم، با توجه به مقادیر PAE،  $x_1$  به عنوان بهترین یا مؤثرترین ورودی یا متغیر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مسیر روی صفحه  $x_1-y$  بایستی به صورت یک جدول مراجعه‌ای<sup>۲۸</sup>، یک شبکه Hetero-associative (Fausset, 1994) یا روش‌های تطبیق منحنی<sup>۲۹</sup> به صورت فازی (Takagi and Sugeno, 1985) ذخیره شود.

در مرحله ششم، مجموعه قوانین فازی ایجاد می‌شوند. اما در اولین تکرار الگوریتم ALM فقط یک قانون وجود دارد که آن قانون  $y=f(x_1)$  می‌باشد.  $f(x_1)$  مسیر ذخیره شده در مرحله پنجم (شکل ۲-۶ الف) می‌باشد.

در مرحله هفتم، خطای مدل‌سازی توسط قوانین فازی محاسبه می‌شود.

در مرحله هشتم، خطای مدل‌سازی با میزان آستانه از پیش تعریف شده مقایسه شده و نتایج این قیاس نشان می‌دهد که فرایند مدل‌سازی بایستی ادامه یابد (مرحله نهم) یا متوقف شود (مرحله دهم). فرض کنید که مدل‌سازی از طریق مرحله نهم ادامه می‌یابد. در مرحله نهم، قلمرو یک یا تعدادی از متغیرها با استفاده از یک روش جستجوی ابتکاری تقسیم می‌شود. تقسیم بندی می‌تواند به صورت قطعی<sup>۳۰</sup> یا فازی<sup>۳۱</sup> انجام شود. فرض کنید که تقسیم بندی با استفاده از یک روش جستجوی ابتکاری بطور قطعی انجام شود و فضای متغیرها به چهار زیر فضای مختلف تقسیم شود (شکل ۲-۷). اکنون

---

<sup>۲۷</sup> Root Mean Square Error

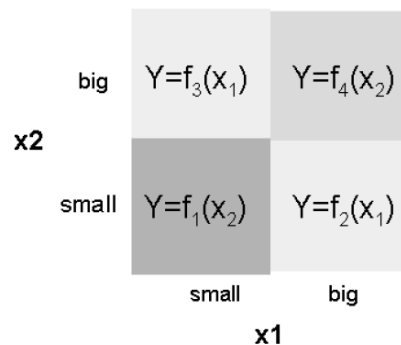
<sup>۲۸</sup> . Look-up Table

<sup>۲۹</sup> . Curve Fitting

<sup>۳۰</sup> . Crisp

<sup>۳۱</sup> . Fuzzy

تمامی فرآیندها از مرحله دوم به بعد برای هر کدام از زیر فضاها تکرار می‌شود و سپس بهترین مسیر برای هر زیرفضا تعیین می‌شود.



شکل ۲-۷- فضای متغیرهای تقسیم شده به چهار زیر فضا، به همراه بهترین توابع غیر خطی متناظر

با توجه به شکل ۲-۷ قوانین فازی ایجاد شده پس از تقسیم فضای متغیرها به روش قطعی به چهار زیر فضای مختلف، به صورت زیر می‌باشند:

If ( $x_1$  is small &  $x_2$  is small) then  $y=f_1(x_2)$

If ( $x_1$  is big &  $x_2$  is small) then  $y=f_2(x_1)$

If ( $x_1$  is small &  $x_2$  is big) then  $y=f_3(x_1)$

If ( $x_1$  is big &  $x_2$  is big) then  $y=f_4(x_2)$

که  $f_1$  تا  $f_4$  مسیرهای استخراج شده برای زیر فضاهای مختلف در فضای متغیرها است (شکل ۲-۷).

این قوانین فازی نشان می‌دهند که بایستی برای هر زیر فضا بهترین مسیر تعیین شود و همچنین تعداد مسیرها با تعداد قوانین یا تعداد بخش‌های فضای متغیرهای تقسیم شده یکسان است. به عبارت دیگر هر زیر فضا در فضای متغیرها، معادل یک مسئله کامل در اولین تکرار الگوریتم می‌باشد.

این تکرارها و تقسیم فضای متغیرها آن قدر ادامه می‌یابد تا خطای مدل بدست آمده از آستانه خطای از پیش تعیین شده کمتر شود. سپس فرایند مدل‌سازی متوقف می‌شود (مرحله دهم).

مدل‌سازی غیر خطی به دانش اولیه از رفتار غیر خطی سیستم نیاز دارد که معمولاً در مدل‌سازی معکوس معادله انتقال تشعشع این دانش وجود ندارد (Keiner and Brown, 1999). با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد روش ALM، این روش توانایی اتخاذ رفتار غیر خطی سیستم را دارا است و همچنین از ریاضیات بسیار ساده‌ای برخوردار می‌باشد، به نحوی که قابلیت بیان توسط شبکه

های عصبی بیولوژیکی را دارا است. این روش به منظور مدل‌سازی معکوس معادله انتقال تشعشع بسیار مناسب به نظر می‌رسد (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶). همچنین نتایج تحقیقات حساسیت به نویز روش ALM نشان داد که این روش از مقاومت بالایی نسبت به نویز برخوردار است که عامل اصلی آن عملگر پخش قطره جوهر (IDS) است (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶). توانایی شناخت متغیرهای مهم و اصلی سیستم، رتبه بندی آن‌ها و حذف متغیرهای اضافی از دیگر توانمندی‌های ALM می‌باشد (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶). برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد جزئیات روش ALM به Bagheri (1997; 1999) یا Shouraki and Honda (1997; 1999) یا طاهری شهرآئینی (۱۳۸۶) مراجعه شود. با استفاده از مدل ALM یک مدل معکوس توسط طاهری شهرآئینی (۱۳۸۶) توسعه یافته است.

## ۲-۴- اهداف تحقیق

تصاویر و داده‌های ماهواره‌ای دریافتی توسط سنجش از دور حاوی نویز می‌باشند. این نویز می‌تواند مربوط به اثر نویز دستگاه، اتمسفر و زبری سطح آب در سیگنال دریافتی توسط ماهواره باشد (Durand et al., 2000). این نویزها می‌توانند عملکرد روش‌های مدل‌سازی معکوس را تحت تاثیر قرار دهند (Hughes et al., 2001). بنابراین روش مدل‌سازی معکوس استفاده شده، باید نسبت به نویز بسیار مقاوم باشد. همان طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد روش‌های شبکه عصبی و روش فازی بر طبق مطالعات صورت گرفته از مقاومت بالایی نسبت به نویز برخوردار هستند. همچنین دارای سرعت پردازش بالایی در مدل‌سازی نیز می‌باشند. در نتیجه در ادامه، مدل‌سازی معکوس مدل محور با استفاده از پردازشگرهای<sup>۳۲</sup> شبکه عصبی و فازی، در دریای خزر انجام می‌شود. این پردازشگرهای شبکه عصبی و فازی، مدل‌های معکوس مدل محوری هستند که برای پردازش تصاویر MERIS در آب‌های Case 2 توسعه یافته‌اند. از این پردازشگرها می‌توان به پردازشگر شبکه عصبی C2R.

---

<sup>۳۲</sup> processors



FUB/WeW و MEGS و پردازشگر فازی ALM (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶) اشاره کرد که در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به طور کلی اهداف اصلی این تحقیق شامل :

۱- مقایسه روش‌های مدل محور (مدل‌های معکوس فازی و شبکه عصبی (پردازشگرها)) برای

مدل‌سازی پارامترهای کیفی آب دریای خزر (Chl-a، SPM، CDOM) و انتخاب مدل

معکوس مناسب‌تر برای تخمین پارامترهای کیفی آب.

۲- انجام فرآیند اعتبار سنجی روش‌ها در دریای خزر و بررسی اثر روش‌های مختلف اعتبار

سنجی (مانند تغییر ضرایب، تصحیح اثرات مجاورتی و Shifting) روی نتایج مدل‌های

مختلف.

۳- تولید سری زمانی و نقشه‌های توزیع مکانی پارامترهای کیفی در دریای خزر.

۴- استفاده از نگرش‌های تجربی (ALM) با نگرش تجربی و روش‌های رگرسیونی ساده و چندگانه

خطی) به منظور تخمین عمق سکی (SD) در دریای خزر و مقایسه روش‌های مختلف و

عملکرد آن‌ها، و انتخاب مدل مناسب برای استخراج عمق سکی و ایجاد نقشه‌های سری زمانی

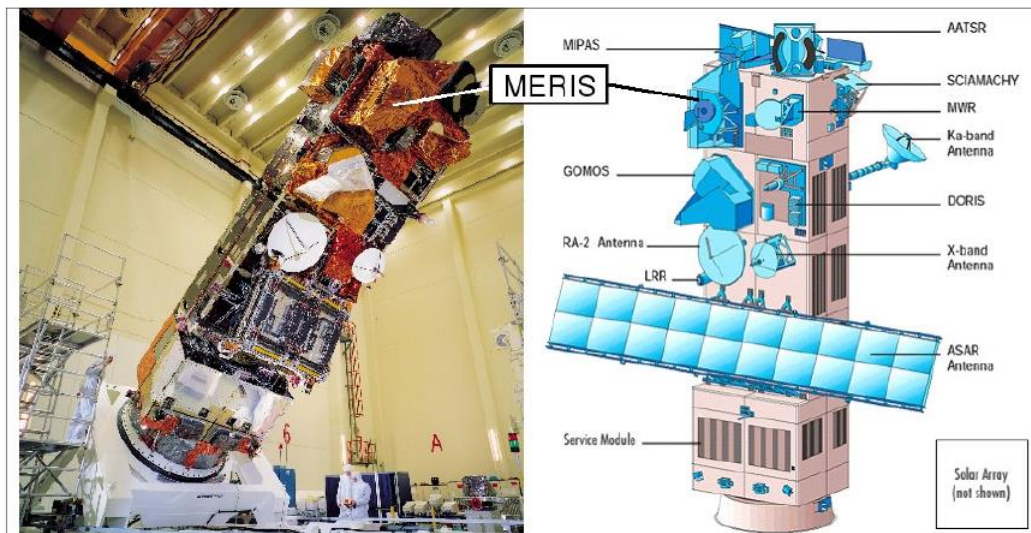
تغییرات عمق سکی در دریای خزر با استفاده از مدل تجربی برتر.

## فصل سوم

### پردازشگرهای مدل محور Case 2 سنجنده MERIS

#### ۱-۳- سنجنده MERIS

طیف سنجنده ماهواره‌ای MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) (شکل ۱-۳) یکی از سنجنده‌های نصب شده بر روی ماهواره زیست محیطی Envisat<sup>۱</sup> است که از اول مارس سال ۲۰۰۲ شروع به تصویر برداری نمود. این سنجنده در محدوده مرئی و مادون قرمز طیف انعکاسی خورشید دارای ۱۵ باند قابل برنامه‌ریزی می‌باشد (جدول ۱-۳).



شکل ۱-۳- ماهواره Envisat و موقعیت سنجنده MERIS روی آن (Rast et al., 1999)

<sup>۱</sup> Environmental satellite (Envisat)

جدول ۱-۳- کانال‌های طیفی MERIS (باند‌ها) و مشخصات آنها (Bézy et al., 2000)

NO	Band center (nm)	Band width (nm)	Primary application
1	412.5	10	Yellow substance and detritus pigments
2	442.5	10	Chlorophyll absorption maximum
3	490	10	Chlorophyll and other pigments
4	510	10	Suspended sediment, red tides
5	560	10	Chlorophyll absorption minimum
6	620	10	Suspended sediment
7	665	10	Chlorophyll absorption & fluo. reference
8	681.25	7.5	Chlorophyll fluorescence peak
9	708.75	10	Fluo. reference, atmosphere corrections
10	753.75	7.5	Vegetation, cloud
11	760.625	3.75	O2 R- branch absorption band
12	778.75	15	Atmosphere corrections
13	865	20	Vegetation, water vapor reference
14	885	10	Atmosphere corrections
15	900	10	Water vapor, land

CCD<sup>۲</sup> موجود در MERIS اقدام به داده برداری مکانی عمود بر مسیر حرکت زمین می‌نماید.

MERIS دارای میدان دید  $68/5^\circ$  و عرض جازوب ۱۱۵۰ کیلومتر است و در فاصله ۸۰۰ کیلومتری از

زمین قرار دارد. توصیفی از خصوصیات اصلی این سنجنده در جدول ۲-۳ نشان داده شده است.

جدول ۲-۳- خصوصیات اصلی سنجنده MERIS FR (Bézy et al., 2000)

Swath width	1150 km
Localization accuracy	< 2 km without use of landmark
pixel size (FR)	along track : 300 m across track: 260 m at nadir
Inter band registration	< 0.15 pixel
Spectral bands	15 bands programmable in position: 390 nm - 1040 nm width: 1.25 nm - 30 nm
Spectral resolution	1.7 nm
Polarization sensivity	< 0.3%
Signal dynamics	up to albedo 1.0
Radiometric resolution	NEDR < 0.0002
Revisit period	2 to 3 days
Absolute accuracy	2% to 4% relative to the sun
Signal stability	0.2% along the orbit

<sup>۲</sup> Charge Coupled Device

داده‌های MERIS دارای دو قدرت تفکیک مکانی مختلف می‌باشند، داده‌های قدرت تفکیک مکانی کامل<sup>۳</sup> (FR) و کاهشده<sup>۴</sup> (RR) که به ترتیب دارای دو قدرت تفکیک مکانی ۳۰۰ و ۱۲۰۰ متر می‌باشند.

اهداف اولیه ماموریت MERIS در جدول ۳-۳ ارائه شده است. به طور کلی اندازه گیری رنگ آب در طول موج‌های مختلف در اقیانوس‌ها و مناطق ساحلی مهمترین هدف آن می‌باشد که این داده‌های رنگ آب می‌توانند توسط یک مدل معکوس مناسب به داده‌های غلظت Chl-a، CDOM و TSM تبدیل شوند.

جدول ۳-۳- اهداف اولیه ماموریت MERIS (Rast, 1987)

Scientific and application oriented objectives	Possible extensions to land applications
1. Chlorophyll concentration/suspended sediment	1. Synoptical monitoring of vegetation indicators
2. Water quality/dissolved organics	2. Inland water bodies monitoring
3. Shallow water depth/bottom classification	3. Large scale (area) mapping
4. Relationship between sea water optical properties and biophysical properties	
5. Time series of biological and physical processes	
6. Global radiation absorption by turbid water	
7. Global and regional primary production	
8. Pollution monitoring/coastal processes	

تصاویر MERIS با سطوح مختلف تولید می‌گردد. محصولات و تصاویر MERIS استفاده شده در این تحقیق، به دو صورت داده‌های سطح ۱b<sup>۵</sup> و سطح ۲<sup>۶</sup> ارائه می‌شود. داده‌ها یا تصاویر سطح ۱b شامل تشعشعات TOA در ۱۵ باند طیفی مختلف (جدول ۳-۱) می‌باشند. توصیف مختصری از این داده‌ها در جدول ۳-۴ ارائه شده است. داده‌ها یا تصاویر سطح ۲ سنجنده MERIS شامل انعکاسات BOA (انعکاسات طیفی در سطح آب)، غلظت کلروفیل-a، غلظت کل مواد معلق و ضریب جذب مواد زرد رنگ است. این داده‌ها با استفاده از چندین مدل معکوس مختلف (پردازشگرها) که در ادامه به آن اشاره خواهد شد قابل استخراج از داده‌های سطح ۱b سنجنده MERIS می‌باشند.

<sup>۳</sup> Full Resolution  
<sup>۴</sup> Reduced Resolution  
<sup>۵</sup> MERIS Level 1b  
<sup>۶</sup> MERIS Level 2

جدول ۳-۴- خصوصیات تصاویر سطح ۱b سنجنده MERIS (European Space Agency, 2002)

Name	Level 1b Full Resolution
Identifier	MER FR 1P
Product Level	1b
Description	TOA radiance for the 15 MERIS bands at full resolution, calibrated, geo-located, annotated with Product Confidence Data, calibration data, classification flags, and environment parameters. The user will be able to order adjacent scenes covering the full MERIS swath and any number of adjacent scenes pairs leading up to the complete MERIS orbit of 17500 km, depending on the availability of the Full Resolution data. Radiometric and geometric continuity is guaranteed between adjacent scenes.
File Size	2241 lines x 2241 pixels (scene)
Pixel Spacing	approximately 300 m x 300 m (along-track x across track)
Coverage	approximately 575 km x 575 km (scene), 296 x 296 km
Bits/Pixel	16
Unit	$10^{-3} \text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$
Accuracy	From 400 to 900 nm < 2%, From 900 to 1050 nm < 5%

### ۲-۳- پردازشگرهای Case 2

در این بخش ویژگی پردازشگرهای Case 2 مورد مطالعه در این تحقیق ارائه خواهد شد. در ابتدا پردازشگر استاندارد آژانس فضایی اروپا (MEGS) و سپس پردازشگر C2R (توسعه یافته توسط GKSS)<sup>۷</sup> و بعد از آن پردازشگر FUB/WeW (توسعه یافته در دانشگاه برلین) و در آخر پردازشگر ALM مورد بحث قرار خواهند گرفت.

به طور کلی، می‌توان از نظر ساختاری، دو پردازشگر نخست مورد مطالعه را به دو بخش اصلی، الگوریتم تصحیح اتمسفری و الگوریتم کیفی آب تقسیم کرد. وظیفه بخش اول تعیین طیف انعکاس خروجی از آب در پایین اتمسفر ( $RL_w(\lambda)$ ) از کل طیف انعکاسی در بالای اتمسفر ( $RL_{toa}(\lambda)$ ) است و بخش دوم مسئول محاسبه پارامترهای کیفی آب از طیف انعکاس خروجی از آب می‌باشد (روش دو مرحله‌ای). در صورتی که در دو پردازشگر شبکه عصبی FUB/WeW و فازی ALM، پارامترهای کیفی آب مستقیماً از طیف انعکاسی در بالای اتمسفر استخراج می‌شود (روش تک مرحله‌ای). در این

<sup>۷</sup> Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH

بخش توضیحاتی در مورد ساختار و نحوه عملکرد این پردازشگرها ارائه خواهد شد. پارامترهای کیفی که توسط این پردازشگرها از داده‌های سطح یک MERIS (انعکاسات طیفی در بالای اتمسفر) استخراج می‌شود، سه پارامتر کیفی غلظت کلروفیل-a، غلظت کل مواد معلق و جذب مواد زرد رنگ است که سه محصول استاندارد سطح دو MERIS برای آب‌های Case 2 می‌باشند (Doerffer, 2002).

### ۳-۲-۱- پردازشگر استاندارد آژانس فضایی اروپا (MEGS)

این پردازشگر Case 2 یک الگوریتم شبکه عصبی است که بعد از فرآیند تصحیح اتمسفری، از لگاریتم انعکاسات سنجش از دوری خروجی از آب ( $RL_w$ )، در هشت باند MERIS، به همراه اطلاعاتی چون زاویه زنیت دید و خورشید و اختلاف آزیموت آن‌ها، به منظور استخراج سه خصوصیت نوری ذاتی، ضریب جذب رنگدانه فیتوپلانکتون ( $a_{pig}$ )، ضریب پراکندگی تمام ذرات معلق ( $b_b$ ) و ضریب جذب مواد زرد رنگ ( $a_y$ ) در ۴۴۲ نانومتر استفاده می‌کند (شکل ۳-۲). باندهای استفاده شده برای این منظور باند ۴۱۲، ۴۴۲، ۴۹۰، ۵۱۰، ۵۶۰، ۶۲۰، ۶۶۵، ۷۰۸ هستند (Doerffer and Schiller, 1997). سپس خصوصیات نوری ذاتی، ضریب جذب رنگدانه فیتوپلانکتون و ضریب پراکندگی ذرات معلق با استفاده از دو ضریب تبدیل<sup>۸</sup> (رابطه ۳-۱) به ترتیب به غلظت کلروفیل-a (برحسب  $\mu g/l$ )، کل مواد معلق (برحسب  $mg/l$ ) تبدیل می‌شوند (Delwart, 2002).

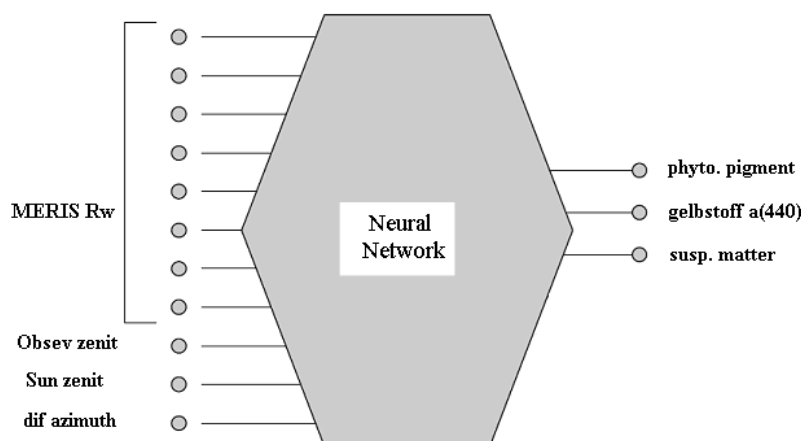
$$Chl - a = 26.212 * a_{pig(442)}^{0.77135} \quad (1-3)$$

$$TSM = 1.73 * b_{b(442)}$$

در این پردازشگر از یک شبکه عصبی پیش خور<sup>۹</sup> به منظور استخراج غلظت ترکیبات کیفی، از انعکاسات خروجی از آب استفاده می‌شود. به منظور آموزش این شبکه عصبی پیش خور از انعکاسات خروجی از آب متناظر با دامنه غلظت‌های ارائه شده در جدول ۳-۵ استفاده شده است. این انعکاسات خروجی از آب با کد مونت کارلو برای این دامنه غلظت محاسبه شده است.

<sup>۸</sup> Conversion factors

<sup>۹</sup> Feed forward network (ffNN)



شکل ۳-۲- نمایی اجمالی از ساختار شبکه عصبی استفاده شده در مدل کیفی آب پردازشگر استاندارد MERIS (Doerffer and Schiller, 1997)

جدول ۳-۵- دامنه غلظت استفاده شده برای آموزش شبکه عصبی پیش خور در مدل کیفی آب پردازشگر استاندارد MERIS (Doerffer and Schiller, 1997)

Range of independent variables for calculating water leaving radiance reflectance			
variable	concentration unit	min	max
phytoplankton pigment, Chlorophyll a	$\mu\text{g/l}$	0.003	50
mineralic suspended matter	$\text{mg/l}$	0.03	50
gelbstoff, absorption at 440 nm	$a(440) \text{ m}^{-1}$	0.002	2
solar zenith angle	degree	0	75
viewing zenith angle	degree	0	41
difference between solar and viewing azimuth	degree	0	180

### ۳-۲-۲- پردازشگر منطقه‌ای C2R

بخش الگوریتم کیفی آب C2R نیز یک شبکه عصبی می‌باشد (شکل ۳-۳) که سه خصوصیت نوری ذاتی ضریب جذب رنگدانه فیتوپلانکتون ( $a_{\text{pig}}$ )، ضریب پراکندگی تمام ذرات معلق ( $b_b$ ) و ضریب جذب مواد زرد رنگ ( $a_y$ ) در ۴۴۲ نانومتر را بعد از فرآیند تصحیح اتمسفری، با استفاده از لگاریتم انعکاسات خروجی از آب در هشت باند طیفی MERIS استخراج می‌کند. این ضرایب با استفاده از روابط تجربی تأیید شده توسط (Sorensen et al (2004) و Babin et al (2003) به طور مستقیم به غلظت کلروفیل-a (برحسب  $\mu\text{g/l}$ ) و غلظت کل مواد معلق (برحسب  $\text{mg/l}$ ) تبدیل می‌شوند (رابطه ۳-۳).

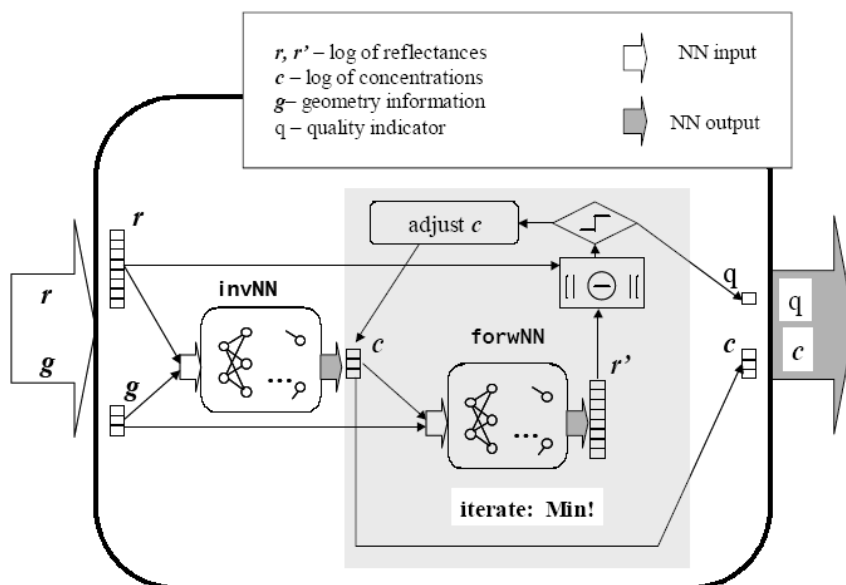
۲). این روابط تبدیل و معادلات آن براساس نتایج بدست آمده از پروژه‌های COAST-LOOC<sup>۱۰</sup>،

MAVT<sup>۱۱</sup> و REVAMP<sup>۱۲</sup> می‌باشند (Doerffer and Schiller, 2006).

$$Chl - a = 21 * a_{pig(442)}^{1.04} \quad (2-3)$$

$$TSM = 1.72 * b_{b(442)}$$

در این پردازشگر برای استخراج خصوصیات نوری ذاتی آب، از یک شبکه عصبی که توسط جدول بزرگی (550k) از داده‌های شبیه سازی شده، آموزش دیده است استفاده می‌شود. این داده‌های شبیه سازی شده با استفاده از مدل مستقیم بر مبنای کد انتقال تشعشع HYDROLIGHT تولید شده است (Mobley, 1994). برای تولید داده‌های آموزشی، مدل مستقیم، با IOPهای اندازه گیری شده در طی سفرهای دریایی در دریای شمال، بخشی از دریای بالتیک، دریای مدیترانه و آتلانتیک شمالی تغذیه شده است. دامنه این پارامترها در جدول ۳-۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳- ساختار شبکه عصبی استفاده شده در پردازشگر C2R2 برای بازیابی لگاریتم غلظت پارامترهای کیفی آب (C) از لگاریتم انعکاسات سنجش از دوری (r) و اطلاعات هندسی (g) (Doerffer and Schiller, 2006)

<sup>۱۰</sup> Coastal Surveillance Through Observation of Ocean Color

<sup>۱۱</sup> MERIS-ATSR validation and calibration team

<sup>۱۲</sup> Regional Validation of MERIS Chlorophyll products



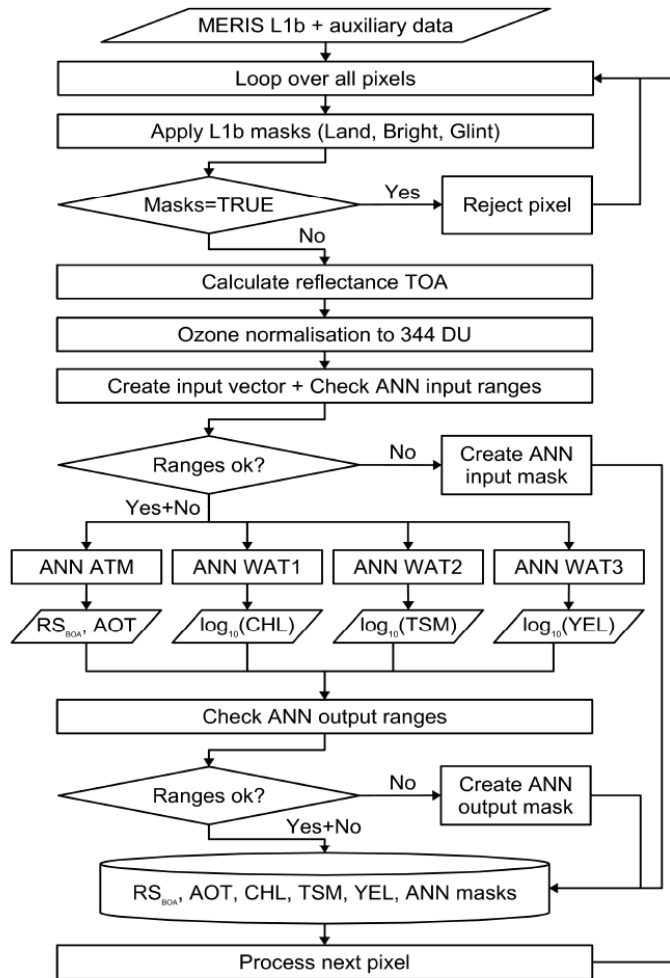
جدول ۳-۶- دامنه تغییرات پارامترهای استفاده شده برای شبیه سازی طیف انعکاس خروجی از آب پردازشگر C2R (Doerffer and Schiller, 2006)

Component / property	value range
Phytoplankton pigment absorption	random selection from > 200 absorption spectra, normalized at 442 nm (MERIS band 2)
Gelbstoff absorption $a_{gelb}$ at 442 nm	0.005 - 5.0 m-1
particle scattering $b_b$ at 442 nm	0.005 - 30.0 m-1
White particle scattering $bp_w$ at 442 nm	0.005 - 30.0 m-1
phytoplankton pigment absorption $a_{pig}$ at 442 nm	0.001 - 2.0 m-1
Minimum particle scattering at 442 nm	$0.25 * a_{pig}(442 \text{ nm})$
Bleached particle absorption	$0.1 * bp(442) + ran\_gauss * 0.03 * bp(442)$
Sun zenith angle	0 - 80 degree
Viewing zenith angle	0 - 50 degree
Difference between sun and viewing azimuth angle	0 - 180 degree

### ۳-۲-۳- پردازشگر FUB/WeW

بر خلاف دو پردازشگر پیشین فرآیند بازیابی پارامترهای کیفی آب در این پردازشگر به صورت مستقیم انجام می‌شود. هسته این پردازشگر شامل ۴ شبکه عصبی است (شکل ۳-۴). یکی از این شبکه‌های عصبی فرآیند تصحیح اتمسفری را انجام می‌دهد و انعکاسات BOA و ضخامت نوری آئروسول در ۴ طول موج ۴۴۰، ۵۵۰، ۶۷۰ و ۸۷۰ نانومتر را استخراج می‌نماید. در حالی که سه شبکه عصبی دیگر غلظت اجزای کیفی آب (Chl-a, TSM, CDOM) را مستقیماً از تشعشعات اندازه گیری شده در TOA استخراج می‌نمایند (Schroeder et al., 2007).

دامنه تغییرات پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی‌های انتقال تشعشع، شبکه‌های عصبی این پردازشگر، در جدول ۳-۷ ارائه شده است.



شکل ۳-۴- فلوچارت پردازشگر FUB/Wew (Schroeder et al., 2007)

جدول ۳-۷- محدود تغییرات پارامترهای استفاده شده برای شبیه سازی طیف انعکاسی در TOA (Schroeder, 2005)

Variable	Unit	Min	Max
Chl-a	mg/m3	0.05	50
SPM	mg/l	0.05	50
$a_{CDOM}$ @ 443 nm	1/m	0.005	1
Aerosal @ 550 nm		0.04	1.25
Surface air pressure	kPa	980	1040
Wind speed	m/s	1.5	7.2
Solar zenith angle ( $\theta_s$ )	degree	0.08	75.7
Observation zenith angle ( $\theta_v$ )	degree	0	41
Difference between observation and solar azimuth angle ( $\Delta\phi$ )	degree	0	180
Relative Humidity	%	70	99

### ۳-۲-۴- پردازشگر فازی ALM

فرآیند بازیابی ترکیبات کیفی آب در پردازشگر ALM، نیز به صورت مستقیم از تشعشعات طیفی در TOA انجام می‌شود. به منظور استخراج ترکیبات کیفی آب با استفاده از مدل معکوس ALM، این مدل معکوس با استفاده از ۱۴۰۰۰ داده شبیه سازی شده مقادیر انعکاسی در TOA، که توسط Schroeder (2005)، با استفاده از کد انتقال تشعشع MOMO (Fell and Fischer, 2001) برای دامنه پارامترهای جدول ۳-۷ تولید شده است، آموزش داده شد (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶). IOP های استفاده شده برای تولید داده‌های شبیه سازی شده، متعلق به پایگاه داده COASTLOOC (Babin, 2000) می‌باشد.

### ۳-۳- پردازشگر ICOL<sup>۱۳</sup>

پیچیدگی‌های نوری در محیط‌های ساحلی با نزدیک شدن به طرف ساحل (خشکی) مضاعف می‌شود. مهمترین دلیل این موضوع اختلاف شدید انعکاسی بین آب و خشکی‌های مجاور آن است. در این رخداد از آن جایی که سطح خشکی‌های مجاور، به طور کلی روشن‌تر از آب‌های داخلی است در نتیجه، خشکی‌ها دارای انعکاس بالاتری از آب‌های داخلی بویژه در طیف مادون قرمز نزدیک هستند. حال، زمانی که فوتون‌های منعکس شده از خشکی، به طرف میدان دید سنجنده روی سطح آب، در مجاورت خشکی پراکنده می‌شوند این پدیده باعث افزایش مقادیر تشعشع اندازه گیری شده توسط سنجنده در این مناطق می‌شود این اختلال تشعشعی (انعکاسی) که به اصطلاح اثر مجاورتی<sup>۱۴</sup> نامیده می‌شود باعث ایجاد خطا در تخمین پارامترهای کیفی در مناطق آبی نزدیک به ساحل خواهد شد. در نتیجه این اثر، لازم است دو گزینه زیر انتخاب گردد

۱- حذف داده های تشعشعی (پیکسل‌ها) واقع در نزدیکی خشکی

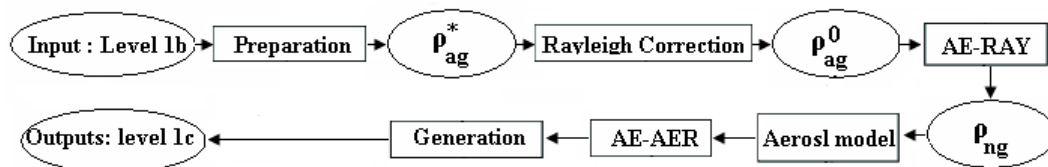
۲- تصحیح اثرات آن.

<sup>۱۳</sup> Improved Contrast between Ocean and land

<sup>۱۴</sup> Adjacent effect (AE)

پردازشگر ICOL، پردازشگر توسعه یافته جهت تصحیح اثرات مجاورتی در تصاویر MERIS است. توصیف مختصری از الگوریتم این پردازشگر در اینجا ارائه می‌گردد. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد فرآیند تصحیح اثرات مجاورتی و روابط ریاضی استفاده شده در آن می‌توانید به Santer and Schmechrig (2000) مراجعه کنید. مراحل اجرای این الگوریتم در شکل ۳-۵ نشان داده شده است که شامل:

- ۱- واحد آمایش (preparation module): تبدیل تشعشعات TOA (داده‌های سطح یک) به انعکاسات TOA ( $\rho_{ag}^*$ ) بعد از تصحیح ضریب انتقال گازها (در این فرآیند باندهای ۷۶۱ و ۹۰۰ نانومتر بدون تغییر باقی می‌مانند).
- ۲- واحد رایلی (Rayleigh module): تصحیح پراکندگی رایلی (پراکندگی ملکولی) برای تمام پیکسل‌ها.
- ۳- واحد AE\_RAY: تصحیح اثرات مجاورتی (AE) از پیکسل‌هایی که در مجاورت خشکی قرار دارند (تصحیح اثرات مجاورتی با تصحیح پراکندگی رایلی).
- ۴- واحد آئروسول: تعیین مدل آئروسول روی پیکسل‌ها.
- ۵- واحد AE\_AER: تصحیح اثرات مجاورتی (با تصحیح اثر آئروسول‌ها).
- ۶- واحد تولید: در این واحد خروجی فرآیند به صورت تشعشعات level 1c در باند MERIS تبدیل می‌شود که مشابه تشعشعات level 1b سنجنده MERIS است.



شکل ۳-۵-فلوچارت پردازشگر ICOL (Santer and Zgolski, 2008)

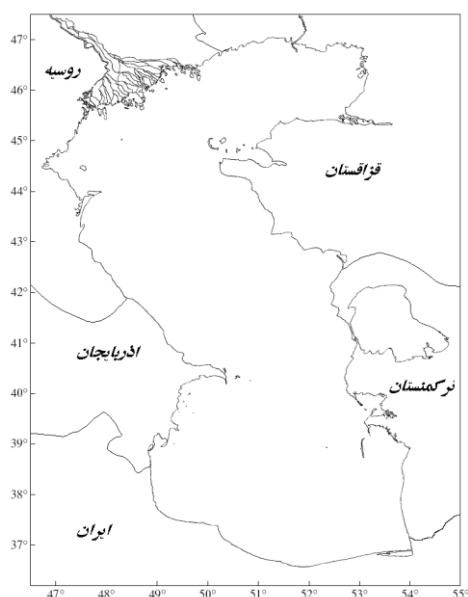
به طور کلی این فرآیند روی کل تصویر سطح یک MERIS اعمال می‌شود. البته تنها مقادیر تشعشع طیفی در پیکسل‌هایی که در فاصله کمتر از ۳۰ کیلومتر به خشکی قرار دارند تصحیح می‌شود (Santer and Zgolski, 2008).

## فصل چهارم

### منطقه مطالعاتی و داده‌های میدانی

#### ۴-۱- دریای خزر

دریای خزر بزرگترین دریاچه بسته دنیا با مساحت ۳۸۶۴۰۰ کیلومتر مربع و ۶۳۸۰ کیلو متر خط ساحلی در بین ۵ کشور ایران، ترکمنستان، آذربایجان، روسیه، قزاقستان واقع شده است (شکل ۴-۱). بیشینه عمق آن حدود ۱۰۲۵ متر و درصد شوری آن حدود ۱/۲٪ (حدود ۳۰٪ شوری آب دریا) است. از نظر مورفولوژی کف، دریای خزر به سه بخش شمالی، میانی و جنوبی تقسیم می‌شود که این بخش‌ها دارای خصوصیات هیدرولوژیکی و اکولوژیکی بسیار متفاوتی هستند (Kosarev, 2005). در بخش شمالی دریای خزر عمق کم (۵-۶ متر)، کدورت بالا و در اثر ورود حجم عظیم آب رودخانه ولگا، شوری در نزدیکی دهانه این رودخانه بسیار پایین است (Tuzhilkin and Kosarev, 2005). در صورتی که در بخش‌های میانی و جنوبی عمق افزایش یافته و میزان شوری نیز بالاتر است. حدود ۱۳۰ رودخانه جریان‌های خود را به داخل دریای خزر تخلیه می‌کنند که مهمترین آنها رودخانه ولگا می‌باشد، این در حالی است که سهم رودخانه‌های شمال ایران در تأمین آب دریای خزر بسیار ناچیز و تنها حدود ۵ درصد می‌باشد (CEP, 2002). بر همین اساس کیفیت آب دریای خزر از شمال به طرف جنوب و از غرب به طرف شرق تغییرات مهمی دارد و مرتباً از کیفیت آن کاسته می‌گردد که دلیل اصلی آن ورود عمده آب‌های شیرین از قسمت شمال، بویژه ولگا است.



شکل ۴-۱- موقعیت دریای خزر در بین ۵ کشور حاشیه آن

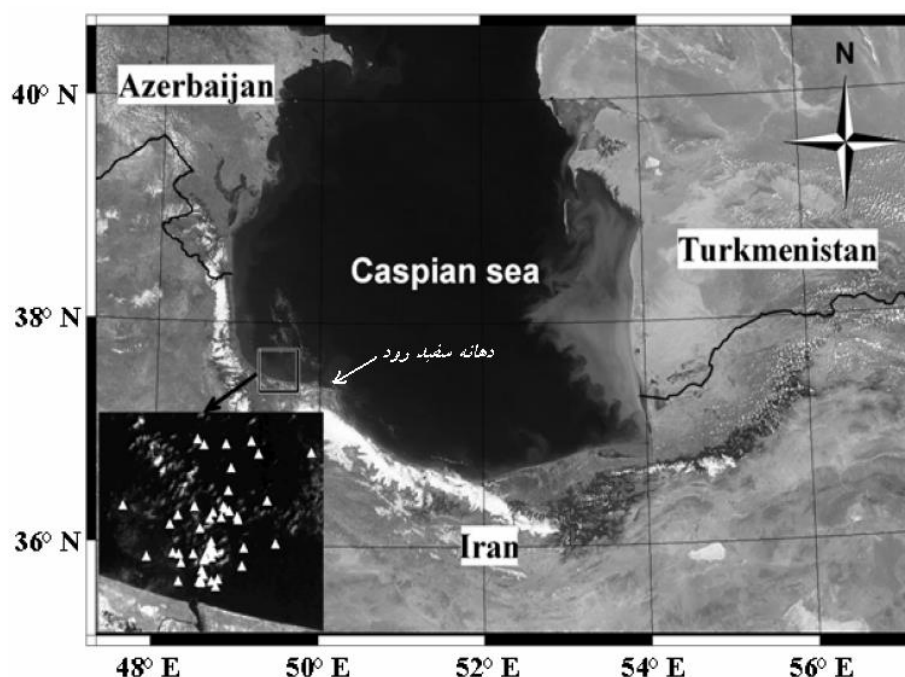
حدود ۱۲۸ رودخانه کوچک و بزرگ در ایران به دریای خزر می‌ریزند که در میان آن‌ها چهار رودخانه بزرگ به نام‌های سفید رود، سلمان، شفا رود و تنکابن وجود دارند. مناطق جنوبی و جنوب غرب دریای خزر مناطق کوهستانی و دارای آب و هوای نیمه حاره‌ای با تابستان‌های مرطوب و گرم و زمستان‌های معتدل هستند (Kosarev, 2005 ; Kosarev and Yablonskaya, 1994). درجه حرارت سطحی آب در بخش جنوبی دریای خزر دارای حداقل ۹ تا ۱۲ درجه سلسیوس در بهمن و حداکثر بیش از ۲۷ درجه سلسیوس در ماه مرداد است (Ginzburg et al., 2005). از ۶۳۸۰ کیلومتر خط ساحلی دریای خزر بیش از ۹۰۰ کیلومتر از آن مربوط به سواحل ایران است.

تالاب‌های ساحلی دریای خزر شامل تعداد بسیار زیادی مناطق آبی کم عمق، شور یا شیرین می‌باشند که از تنوع زیستی خاصی برخوردار هستند. در دریای خزر ۷ گونه مختلف ماهی‌های خاویاری وجود دارند که بعضی از آن‌ها در دنیا منحصر به فرد می‌باشند. دریای خزر حدود ۹۰ درصد خاویار جهان را تولید می‌کند.

محیط زیست دریای خزر در اثر بهره برداری عظیم انسانی و تخلیه مقادیر زیادی فاضلاب شهری، صنعتی و کشاورزی تحت فشار بسیار زیادی است. فلزات سنگین، هیدروکربن‌های نفتی، حشره کش-ها، مواد مغذی مانند فسفر و نیترات و سایر مواد زاید انسانی از طریق رودخانه‌ها یا به طور مستقیم به

دریای خزر می‌ریزند و محیط زیست آن را تهدید می‌کنند ( Zonn, 2005; Korshenko and Gul, 2005).

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل قسمت‌های جنوبی دریای خزر می‌باشد که در شکل ۲-۴ نمایش داده شده است. محدود نمونه برداری میدانی در منطقه مطالعاتی نیز شامل قسمتی می‌باشد که در شکل ۲-۴ با مربع نشان داده شده است.



شکل ۲-۴- تصویر MODIS از دریای خزر (۱۱ ژوئن ۲۰۰۳) به همراه موقعیت منطقه مطالعاتی (مربع) و موقعیت اندازه گیری‌های میدانی (مثلث‌ها) (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶)

## ۲-۴- اندازه گیری‌های میدانی

برای انجام این تحقیق از نتایج اندازه گیری‌های میدانی که در بازه تیر تا آبان ماه ۱۳۸۴ هم‌زمان با عبور سنجنده MERIS از روی دریای خزر توسط طاهری شهرآئینی (۱۳۸۶) انجام شده است استفاده می‌شود. در طول این بازه زمانی، ۲۵ سفر دریایی یک روزه به منظور نمونه برداری‌های کیفی آب، از نقاط مختلف قسمت جنوبی غربی دریای خزر (در فاصله بین ساحل تا عمق آب‌های آزاد) با

استفاده از یک دستگاه قایق موتوری انجام شده است. در شکل ۴-۲ و جدول ۴-۱ به ترتیب موقعیت نقاط نمونه برداری و مشخصات زمانی نمونه برداری‌ها، به همراه زمان عبور سنجنده MERIS در روز نمونه برداری نشان داده شده است. در این نمونه برداری‌های میدانی، دو نمونه از هر نقطه، یکی از سطح آب و نمونه دیگر از عمق آب برداشت شده است. عمق نمونه برداری در نمونه برداری عمقی، کمی بالاتر از عمق سکی می‌باشد. میانگین این دو عمق اندازه گیری به عنوان شاخص غلظت یکنواخت در ستون آب در نظر گرفته شده است. از آن جایی که معمولاً قسمت‌هایی از تصاویر MERIS به پدیده درخشش خورشیدی<sup>۱</sup> آلوده می‌باشد (Park et al., 2003)، به همین دلیل تعدادی از این اندازه گیری‌های میدانی انجام شده در شرایط درخشش خورشیدی واقع می‌شوند و قابل استفاده نمی‌باشند. این داده‌ها از مجموع داده‌های اندازه گیری شده حذف و نهایتاً پس از حذف این داده‌ها، داده‌های باقیمانده که شامل ۳۷ داده Chl-a، ۳۷ داده رنگدانه کل<sup>۲</sup> (مجموع غلظت Phaeopigments و Chl-a در یک نمونه)، ۳۴ داده CDOM و ۱۸ داده TSM از دریای خزر می‌باشند به منظور ارزیابی مدل‌های معکوس مورد استفاده قرار می‌گیرند. محدوده تغییرات غلظت Chl-a، Pigment، TSM و CDOM در دو حالت سطحی و میانگین عمقی در نمونه‌های مختلف آب دریای خزر به همراه عمق SD در جدول ۴-۲ نشان داده شده است. برای جزئیات بیشتر در مورد اندازه گیری‌های میدانی به ضمیمه ب مراجعه شود.

### ۴-۳- داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های رنگ آب استفاده شده در این تحقیق شامل ۱۲ تصویر سطح ۱b و سطح ۲، سنجنده MERIS FR است که مربوط به روزهای نمونه برداری میدانی در بازه زمانی تیر تا آبان ماه ۱۳۸۴ در دریای خزر می‌باشد. به علاوه به منظور تولید سری زمانی سالانه تغییرات پارامترهای کیفی در دریای خزر، از تصاویر خارج از این محدوده زمانی (از آوریل ۲۰۰۵ تا دسامبر ۲۰۰۵) نیز استفاده خواهد شد.

---

<sup>۱</sup> Sun glint

<sup>۲</sup> Pigment



جدول ۴-۱- مشخصات زمانی نمونه برداری‌های انجام شده در بازه تیر تا آبان ماه ۱۳۸۴ به همراه زمان عبور سنجنده

MERIS (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶)

شماره سفر	روز نمونه برداری (همزمان با عبور MERIS)	زمان نمونه برداری	زمان تصویر برداری MERIS	تعداد نمونه گیری
۱	۸ ژوئای	۸:۳۰	۷:۲۷	۱
۲	۹ ژوئای	۶:۵۵ - ۷:۳۰	۶:۵۵	۳
۳	۱۲ ژوئای	۷:۵۵	۷:۰۱	۱
۴	۱۸ ژوئای	۷:۲۰ - ۷:۵۵	۷:۱۳	۳
۵	۲۲ ژوئای	۸:۱۵ - ۸:۴۵	۶:۴۷	۳
۶	۲۴ ژوئای	۸:۱۵ - ۸:۰۰	۷:۲۴	۳
۷	۲۵ ژوئای	۷:۳۷	۶:۵۳	۱
۸	۲۸ ژوئای	۸:۰۰	۶:۵۹	۱
۹	۳۱ ژوئای	۷:۰۰ - ۷:۳۰	۷:۰۴	۳
۱۰	۶ آگوست	۶:۵۵ - ۷:۲۰	۷:۱۵	۳
۱۱	۱۰ آگوست	۶:۳۰ - ۶:۵۷	۶:۱۵	۳
۱۲	۱۳ آگوست	۷:۰۷ - ۷:۳۰	۶:۵۵	۲
۱۳	۱۶ آگوست	۷:۱۵ - ۷:۳۰	۷:۰۱	۳
۱۴	۱۹ آگوست	۷:۵۰ - ۸:۱۸	۷:۰۷	۳
۱۵	۳۱ آگوست	۸:۲۶ - ۸:۴۲	۷:۳۰	۳
۱۶	۱ سپتامبر	۸:۰۵ - ۸:۳۸	۶:۵۸	۳
۱۷	۱۶ سپتامبر	۸:۱۰	۷:۲۷	۱
۱۸	۲۰ سپتامبر	۸:۰۰	۷:۰۱	۱
۱۹	۲۳ سپتامبر	۸:۴۶ - ۹:۳۵	۷:۰۷	۳
۲۰	۲ اکتبر	۷:۰۰ - ۷:۲۶	۷:۲۴	۳
۲۱	۳ اکتبر	۶:۳۹ - ۷:۰۸	۶:۵۳	۳
۲۲	۱۵ اکتبر	۷:۰۸ - ۷:۳۰	۷:۱۵	۳
۲۳	۱۶ اکتبر	۷:۴۶ - ۸:۱۱	۶:۴۴	۳
۲۴	۱۸ اکتبر	۰۷:۵۰	۷:۲۴	۱
۲۵	۲۵ اکتبر	۸:۲۴ - ۸:۵۲	۷:۰۱	۳

جدول ۴-۲- دامنه تغییرات پارامترهای کیفی در نمونه‌های میدانی دریای خزر

	کلروفیل-a ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	رنگدانه کل ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	مواد آلی رنگی ( $1/\text{m}$ )	مواد معلق ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	عمق سکی (m)
سطحی	۱,۲ - ۳۷,۵	۲,۵ - ۵۱,۱	۰,۱۷ - ۱,۰۴	-	
میانگین عمقی	۱,۵ - ۳۰,۷	۲,۵ - ۴۲,۳	۰,۱۷ - ۰,۷۵	۶,۳۰ - ۲۱,۲۵	۱ - ۸

## فصل پنجم

### مدل سازی معکوس پارامترهای کیفی بر اساس روش های مدل محور

#### ۵-۱- مقدمه

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای روی ارزیابی عملکرد و دقت روش‌های مختلف مدل‌سازی معکوس معادله انتقال تشعشع به منظور استخراج پارامترهای کیفی آب‌های Case 2، از داده‌های سنجش از دوری سنجنده MERIS روی دریای خزر صورت نگرفته است. تنها مطالعه سنجش از دور کیفی آب با این سنجنده، در این منطقه مربوط به مطالعات طاهری شهرآئینی (۱۳۸۶) می‌باشد که ایشان برای اولین بار از روش یادگیری فعال (ALM)، برای مدل‌سازی معکوس معادله انتقال تشعشع به منظور استخراج پارامترهای کیفی آب، از تصاویر سطح یک این سنجنده در این منطقه استفاده کرد. در این فصل مدل‌سازی معکوس پارامترهای کیفی با استفاده از چهار پردازشگر<sup>۱</sup> شبکه عصبی و فازی، C2R، FUB/WeW، MEGS و ALM در دریای خزر انجام می‌شود و عملکرد و دقت این پردازشگرها به منظور استخراج غلظت کلروفیل-a (Chl-a)، کل مواد معلق (TSM) و مواد زرد رنگ (CDOM) از داده‌های MERIS-FR در دریای خزر مورد ارزیابی و اعتبار سنجی قرار می‌گیرد و بهترین پردازشگر (روش مدل‌سازی معکوس) انتخاب خواهد شد.

---

<sup>۱</sup> processors

## ۵-۱-۱- فرآیند ارزیابی و اعتبار سنجی

ارزیابی و اعتبار سنجی ماهواره‌ی به مفهوم ساده، مقایسه همزمان داده‌های جمع آوری شده توسط ماهواره و اندازه گیری شده‌ی میدانی، جهت تعیین خطاهای موجود بین آنها، در راستای اصلاح الگوریتم‌های پردازشی و رسیدن به نتایج بهینه می‌باشد. تاکنون فعالیت‌های زیادی به منظور ارزیابی و اعتبار سنجی عملکرد پردازشگر استاندارد MERIS (MEGS) به منظور استخراج پارامترهای کیفی انجام شده است که در ادامه ارائه می‌شود.

## ۵-۱-۲- مروری بر فعالیت‌های اعتبار سنجی محصولات سطح ۲ سنجنده MERIS

همزمان با پرتاب ماهواره زیست محیطی ENVISAT-1 به فضا، تحقیقات زیادی به منظور کالیبراسیون و اعتبار سنجی محصولات سطح ۲ سنجنده MERIS، به منظور بهبود عملکرد پردازشگر عملیاتی آن صورت پذیرفت. در این تحقیقات از دو استراتژی مختلف نمونه برداری میدانی زیر، جهت اعتبار سنجی و ارزیابی محصولات سطح ۲ سنجنده MERIS استفاده شده است.

(۱) ایستگاه‌های سری زمانی (time series stations) (Zibordi et al., 2002; Antoine et al., 2002).

(۲) اندازه گیری در سفرهای دریایی مشخص و اتفاقی (Sorensen et al., 2002; Pasterkamp et al., 2002; Ruddick et al., 2002).

به طور کلی نتایج ارائه شده از این تحقیقات بسیار متفاوت است. تحقیقات انجام شده توسط Pasterkamp et al. (2002) در سواحل دریای شمال (هلند) نشان داد که پردازشگر استاندارد سطح ۲ MERIS (MEGS)، غلظت کلروفیل-a (Chl-a) را به طور قابل ملاحظه‌ی بیشتر از غلظت میدانی آن و جذب مواد زرد (CDOM) را نیز کمتر از نمونه‌های متناظر میدانی برآورد کرده است. این در حالی است که نتایج مقایسات در مورد کل مواد معلق (SPM) و طیف انعکاس خروجی از آب تقریباً معقول بوده، به طوری که در مورد طیف انعکاس خروجی از آب، میزان اختلاف بین اندازه گیری های میدانی و انعکاسات متناظر استخراجی از تصاویر سطح ۲، برای باندهای ۱ تا ۵ کمتر از ۰/۰۰۵ و برای

باند‌های ۶ تا ۱۱ کمتر از ۰/۰۰۱ مشاهده شد. تحقیقات (Zibordi et al. (2002) در سایت AAOT<sup>۲</sup> ایتالیا نشان داد که پردازشگر استاندارد سطح ۲ MERIS با میانگین خطای مطلق ۱۲٪، تشعشعات نرمال شده‌ی خروجی از آب را در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی آن تخمین زده است. در این مطالعه به علت تعداد کم نمونه‌های مورد مقایسه (Match-up) هیچ نتیجه‌گیری در مورد پارامترهای کیفی آب ارائه نشده است. تحقیقات انجام شده در دریاچه Constance (بین آلمان، سوئیس و استرالیا) توسط (Gege & Platter (2003) نشان داد، انطباق خوبی بین غلظت Chl-a و SPM استخراجی از MERIS و نمونه‌های متناظر میدانی آن مشاهده می‌شود. این در حالی است که این پردازشگر مقادیر CDOM را حدود ۲/۴ برابر کمتر از مقادیر متناظر میدانی آن برآورد کرده است. همچنین تحقیقات انجام شده توسط (Martinez et al (2004) در آب‌های جنوبی دریای شمال نشان داد که پردازشگر استاندارد سطح ۲ MERIS، غلظت Chl-a و CDOM را به ترتیب حدود ۲۰٪ و ۴۲٪ کمتر از مقادیر میدانی آنها و غلظت SPM را نیز حدود ۱۶٪ بیشتر از مقادیر میدانی آن برآورد کرده است. تحقیقات (Sorensen et al. (2006) در آب‌های Skagerrak (نروژ) نشان داد که انطباق خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری میدانی Chl-a و SPM، با مقادیر متناظر استخراجی از پردازشگر C2R وجود دارد. این نتایج در حالی بدست آمد که مطالعات اعتبار سنجی اولیه انجام شده توسط Sorensen et al. (2004) در این منطقه بر روی پردازشگر استاندارد سطح ۲ MERIS (MEGS) نشان داد که این پردازشگر غلظت کلروفیل-a را تقریباً دو برابر مقادیر میدانی برآورد می‌کند. در این تحقیقات همچنین ضرایب تبدیل (روابط بایو‌اپتیکال) استفاده شده در پردازشگر استاندارد MERIS و C2R که به منظور تبدیل مقادیر  $a_{pig(442)}$  و  $b_{b(442)}$  به غلظت Chl-a و SPM مورد استفاده قرار می‌گیرند با استفاده از نمونه‌های میدانی مورد اعتبار سنجی قرار گرفتند. نتایج این بخش نیز نشان داد ضریب تبدیل بدست آمده بین Chl-a و  $a_{pig(442)}$  در آب‌های Skagerrak تقریباً دو برابر ضریب تبدیل استفاده شده در پردازشگر استاندارد MERIS و تقریباً مشابه ضریب تبدیل در پردازشگر C2R است. اما در مورد ضریب تبدیل SPM، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین ضریب تبدیل بدست آمده در این منطقه و

---

<sup>۲</sup> the Acqua Alta Oceanographic Tower (AAOT)

ضرایب تبدیل استفاده شده در این دو پردازشگر مشاهده نشد. تحقیقات (Park et al. 2006) در آب-های ساحلی بلژیک (جنوب دریای شمال) نشان داد انطباق خوبی بین طیف تشعشع خروجی از آب اندازه گیری شده میدانی و طیف تشعشع خروجی از آب استخراجی از محصولات سطح ۲ MERIS در بخش سبز تا قرمز طیف وجود دارد در صورتی که میزان انحراف بین این دو اندازه گیری در بخش آبی طیف زیاد است. همچنین نتایج مقایسات در مورد SPM نشان دهنده خطای نسبی ۶۰٪ است. مقایسه عملکرد دو پردازشگر استاندارد MERIS (MEGS) و پردازشگر FUB/WeW در دریای بالتیک توسط Kratzer et al. (2007) نشان داد که پردازشگر MEGS مقادیر کلروفیل-a و SPM را به ترتیب تا حدود ۵۹٪ و ۲۸٪ بیش از مقادیر متناظر میدانی و مقادیر CDOM را نیز تا حدود ۸۱٪ کمتر از مقادیر متناظر میدانی آن برآورد کرده است. در حالی که پردازشگر FUB/WeW مقادیر SPM، CDOM و Chl-a را به ترتیب تا حدود ۶۰٪، ۷۸٪ و ۵۶٪ کمتر از مقادیر متناظر میدانی برآورد می-کند. تحقیقات (Alikas & Reinart 2007) در دو دریاچه بزرگ Vättern و Vänern در سوئد و دریاچه Peipsi در استونی- روسیه نشان داد که همبستگی معقولی ( $R^2=0.52$ ) بین مقادیر Chl-a میدانی و استخراجی از پردازشگر استاندارد MERIS در هر سه دریاچه دیده می-شود، این درحالی است که در مورد SPM و CDOM، همبستگی بین مقادیر میدانی و استخراجی از MERIS مشاهده نشد.

در ادامه، پردازشگرهای مختلف (مدل‌های معکوس) Case 2 سنجنده MERIS، در دریای خزر مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت و سپس اعتبار سنجی روی آنها انجام خواهد شد.

## ۵-۲- مواد و روش‌ها

### ۵-۲-۱- اندازه گیری‌های میدانی پارامترهای کیفی

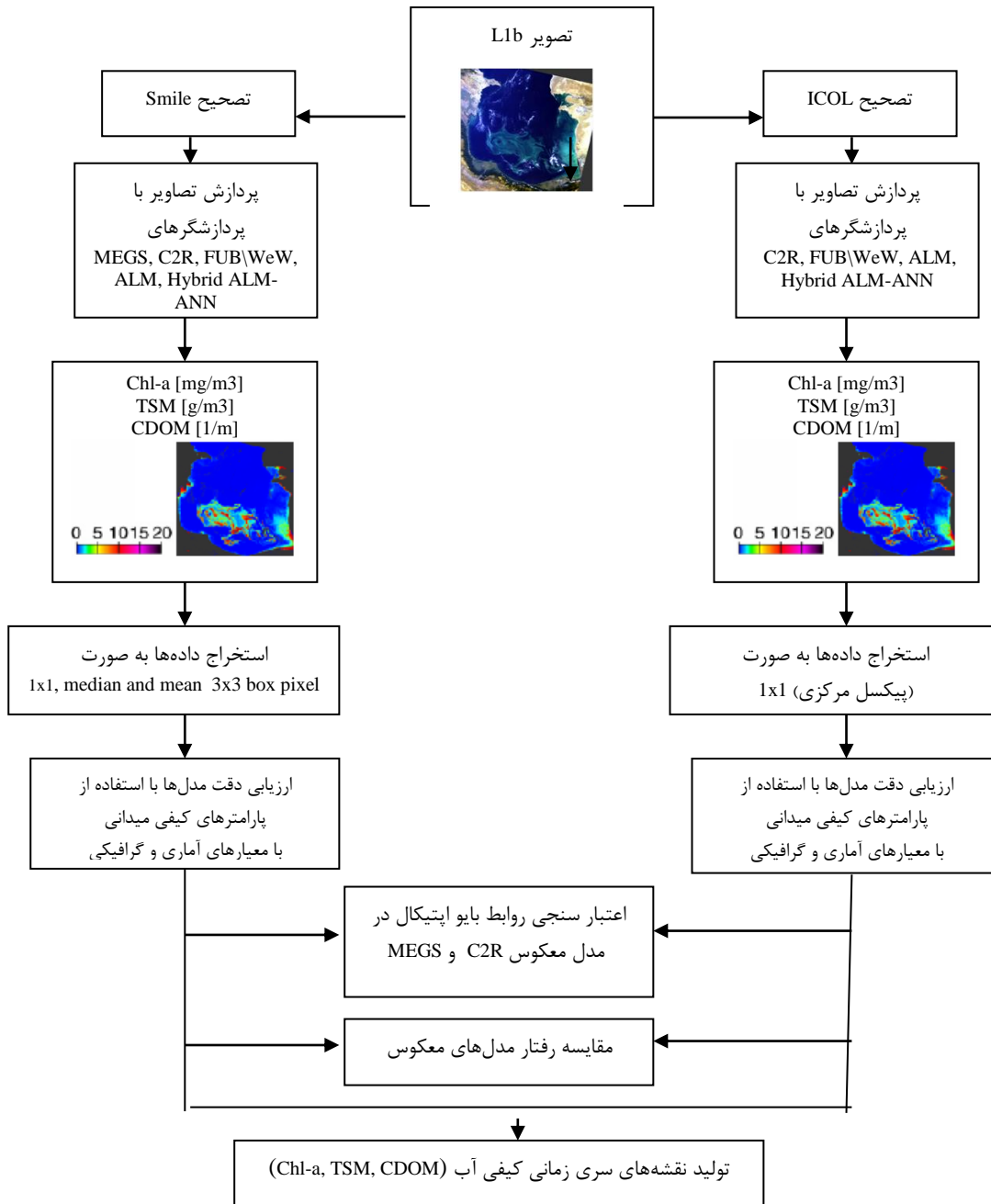
داده‌های کیفی اشاره شده در بخش ۴-۲ (جدول ۴-۲) به منظور ارزیابی و اعتبار سنجی پردازشگرهای مورد استفاده در این فصل استفاده می‌شوند. این داده‌ها شامل ۳۷ داده Chl-a، ۳۷ داده Pigment، ۳۴ داده CDOM و ۱۸ داده SPM از دریای خزر می‌باشند

## ۵-۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های رنگ آب استفاده شده در این فصل شامل ۱۲ تصویر سطح یک (Rr<sub>STOA</sub>) و ۱۲ تصویر سطح دو MERIS FR مربوط به روزهای نمونه برداری میدانی است.

## ۵-۲-۳- روش تحقیق

خلاصه روش تحقیق استفاده شده در این بخش در شکل ۵-۱ نمایش داده شده است. که در ادامه تشریح خواهد شد.



شکل ۵-۱- فلوجارت روش تحقیق

## ۵-۲-۳-۱- اعمال تصحیح Smile و ICOL بر روی تصاویر سطح یک

اولین پیش پردازش انجام شده بر روی تصاویر سطح یک MERIS، اعمال تصحیح Smile به منظور رفع اثرات Smile (اثرات ناشی از اختلاف طول موج دریافتی در یک باند توسط CCDهای مختلف) که حدود ۱ نانومتر است) و اختلاف مذکور در پیکسل‌های مختلف یک CCD (که حدوداً ۰/۱ نانومتر است) و اعمال تصحیح ICOL به منظور حذف اثرات مجاورتی از پیکسل‌های مجاور ساحل است. از آن جایی که فرآیند مدل‌سازی معکوس، فرآیندی بسیار پیچیده و حساس می‌باشد و نیاز به داده‌هایی با دقت بالا جهت استخراج دقیق پارامترهای کیفی دارد، انجام این پیش پردازش ضروری است. برای انجام این پیش پردازش از دو پردازشگر توسعه یافته برای همین منظور، که در نرم افزار BEAM 4.5<sup>۳</sup> (نرم افزار پردازش تصاویر ماهواره‌ای MERIS) وجود دارد استفاده شد. این نرم افزار به صورت رایگان از سایت [Http://www.brockmann-consult.de/](http://www.brockmann-consult.de/) یا <http://envisat.esa.int/beam> قابل بارگذاری و استفاده می‌باشد.

## ۵-۲-۳-۲- پردازش تصاویر سطح یک

در این مرحله تصاویر سطح ۱b که فرآیند تصحیح Smile و ICOL بر روی آنها صورت گرفته است توسط چهار پردازشگر MERIS، C2R، FUB/WeW، ALM و پردازش شده و تبدیل به تصاویر و محصولات سطح دو سنجنده MERIS می‌شوند. عملیات پردازش دو پردازشگر C2R و FUB/WeW در داخل نرم افزار BEAM 4.5 و عملیات پردازش پردازشگر ALM در نرم افزار 7 Matlab انجام شد. پردازشگر MERIS، پردازشگر عملیاتی آژانس فضایی اروپا است و تصاویر پردازش شده آن به صورت تصاویر سطح ۲ از آژانس فضایی اروپا دریافت شده است. در این مرحله همچنین از مدل معکوس هیبرید ALM-ANN که توسط طاهری شهرآئینی (۱۳۸۶)، به منظور استخراج کلروفیل-a، در دریای خزر توسعه یافته است نیز استفاده می‌شود. مطالعات طاهری شهرآئینی (۱۳۸۶) نشان داد که ترکیب

---

<sup>3</sup> the Basic ENVISAT Toolbox for (A)ATSR and MERIS (BEAM)

دو مدل فازی ALM و مدل شبکه عصبی FUB\WeW، در مورد استخراج کلروفیل-a در دریای خزر می‌تواند منجر به بهبود نتایج مدل‌سازی کلروفیل-a شود در نتیجه، این محقق مدل هیبرید ALM-ANN را برای استخراج کلروفیل-a در دریا خزر توسعه داد که در این بخش استفاده خواهد شد.

### ۵-۲-۳-۳- استخراج پارامترهای کیفی از تصاویر ماهواره‌ای

در این بخش پارامترهای کیفی غلظت Chl-a، SPM و CDOM از تصاویر سطح دو هر چهار پردازشگر استخراج شدند. در این مرحله به منظور بررسی اثر اختلاف زمانی بین تصویر برداری و نمونه برداری میدانی، سعی شد پارامترهای کیفی از تصاویر سطح ۲ سنجنده MERIS در سه حالت، پیکسل مرکزی، 1x1 (مطابق با مختصات نمونه میدانی)، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3 در اطراف این پیکسل مرکزی، استخراج و سپس با مقادیر میدانی مقایسه شود.

### ۵-۲-۳-۴- ارزیابی دقت و عملکرد پردازشگرها

این مرحله در دو بخش انجام خواهد شد ابتدا دقت مقادیر پارامترهای کیفی استخراجی از تصاویر سطح دو (پنج پردازشگر) با استفاده از مقادیر متناظر میدانی آنها در دو حالت سطحی و میانگین عمقی، توسط معیارهای آماری و گرافیکی مختلف ارزیابی می‌شود. قیاس دقت روش‌های مختلف مدل‌سازی معکوس (پردازشگرها) با هم و انتخاب بهترین مدل معکوس (پردازشگر) نیز در این بخش انجام می‌شود. در بخش دوم میزان تاثیر پیش پردازش ICOL بر افزایش عملکرد و دقت استخراج پارامترهای کیفی توسط چهار پردازشگر C2R، FUB/WeW، ALM، و هیبرید ALM-ANN بررسی خواهد شد.

### ۵-۲-۳-۵- اعتبار سنجی روابط بایو اپتیکال در پردازشگر C2R و MEGS

قبلا (فصل سوم) اشاره شد که، دو پردازشگر C2R و MEGS برای تبدیل ضریب جذب کلروفیل-a (  $a_{442}$ ) به غلظت کلروفیل-a از دو ضریب تبدیل ( رابطه بایو اپتیکال) استفاده می‌نمایند. در این بخش این ضریب تبدیل بر روی دریای خزر مورد اعتبار سنجی قرار خواهد گرفت و سعی می‌شود ضریب تبدیل جدیدی برای دریای خزر توسعه یابد.



## ۵-۲-۳-۶- بررسی رفتار پردازشگرها

اهمیت واکنش صحیح پردازشگرها به تغییرات غلظت پارامترهای کیفی در آب، بسیار مهم می‌باشد. در این بخش رفتار پنج پردازشگر مورد بررسی در طول یک مقطع عرضی عمود بر ساحل در دریای خزر، در دو زمان مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۵-۲-۳-۷- ایجاد نقشه‌های سری زمانی تغییرات پارامترهای کیفی

در مرحله پایانی مطالعه، نقشه‌های سری زمانی تغییرات پارامترهای کیفی با استفاده از هر پنج پردازشگر ایجاد خواهد شد.

## ۵-۳- معیارهای ارزیابی مدل‌های معکوس ( پردازشگرها)

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های معکوس مختلف، از معیارهای آماری و گرافیکی متعددی استفاده شد. معیارهای آماری استفاده شده در این تحقیق شامل ضریب همبستگی ( $R$ )، مجذور میانگین مربع خطا ( $RMSE$ )، میانگین مطلق درصد خطا ( $MAPE$ ) و میانگین اربیبی ( $MBE$ ) می‌باشند. نظر به اینکه لگاریتم داده‌ها از توزیع نرمال تری نسبت به حالت غیر لگاریتم داده‌ها برخوردار است به همین دلیل اعمال پارامترهای آماری همزمان بر روی حالت لگاریتمی و غیر لگاریتمی داده‌ها صورت می‌گیرد. اما از آن جایی که پارامترهای آماری تنها یک شاخص عددی از عملکرد مدل‌ها را ارائه می‌نمایند و قادر به بیان رفتارهای غیر خطی خاص بین مدل و داده‌های میدانی نیستند در نتیجه از چند معیار گرافیکی مختلف مثل، نمودار پراکندگی، فراوانی نسبی و نمودار چارک-چارک ( $q-q$ ) نیز به منظور نمایش این رفتارهای غیر خطی استفاده خواهد شد (Chambers et al., 1983).

جهت مقایسه نمودارهای پراکندگی، مدلی مناسب‌تر در نظر گرفته می‌شود که داده‌های آن به خط ۱:۱ نزدیکتر و پراکندگی و داده‌های پرت آن کمتر باشد به عبارتی رفتار خطی داشته باشد. در مورد تابع توزیع فراوانی نسبی نیز، مدلی مناسب‌تر است که شکل توزیع فراوانی آن با شکل توزیع فراوانی داده‌های میدانی سازگارتر باشد. نمودار  $q-q$  نیز نموداری گرافیکی برای مقایسه رفتار دو مجموعه از

داده‌ها است. در این نمودار اگر رفتار دو مجموعه یکسان باشد داده‌های پلات شده در نمودار  $q-q$  رفتاری خطی از خود نشان می‌دهند. رفتارهای غیر خطی در  $q-q$ ، بیانگر عدم رفتار مشابه بین داده‌های مدل و داده‌های میدانی است.

## ۴-۵- روش انتخاب مدل و حالت پیکسلی بهتر

به منظور انتخاب بهترین مدل معکوس، از بین چهار مدل معکوس مورد استفاده، برای مدل‌سازی پارامترهای کیفی آب دریای خزر، از یک روش امتیاز دهی ساده استفاده شد. در این روش نتایج هر کدام از معیارهای آماری و گرافیکی مدل‌های معکوس با هم قیاس شده و بر حسب میزان مطلوبیت معیار مورد نظر، امتیازی از ۱ تا ۴ (به استثنای کلروفیل- $a$  که از ۱ تا ۵) به هر معیار تعلق می‌گیرد. در نهایت جمع امتیازات کسب شده از تمامی معیارهای آماری و گرافیکی محاسبه شده و مدلی با امتیاز بیشتر، به عنوان مدل برتر شناخته خواهد شد. بر همین اساس مدل‌های دیگر نیز رتبه بندی می‌شوند. در این روش معیارهای آماری و گرافیکی مشابه، امتیازات یکسان دریافت می‌کنند. در مورد انتخاب بهترین حالت پیکسلی برای مدل‌سازی نیز، از همین روش امتیاز دهی استفاده خواهد شد. البته در این حالت امتیازاتی از ۱ تا ۳ به هر حالت پیکسلی تعلق می‌گیرد و حالت‌های مشابه، امتیازات یکسان می‌گیرند.

## ۵-۵- ارزیابی مدل‌های معکوس و نتایج آن

همان طور که در بخش روش تحقیق توضیح داده شد این بخش شامل دو قسمت است. در قسمت اول که ابتدا ارائه خواهد شد. دقت استخراج پارامترهای کیفی توسط مدل‌های معکوس، بدون پیش پردازش اولیه ICOL نشان داده شده است و در قسمت دوم، دقت استخراج پارامترهای کیفی با اعمال پیش پردازش ICOL ارائه خواهد شد. نظر به این که توزیع آماری داده‌های میدانی همگن نیست (ضمیمه ب) و بیشتر داده‌های میدانی، دارای غلظت پایین هستند و درصد نمونه‌هایی با غلظت بالا

پایین است، در نتیجه برای درک صحیح رفتار غیر خطی داده‌ها تمام معیارهای گرافیکی در این بخش در مقیاس لگاریتمی ارائه خواهد شد.

## ۵-۵-۱- ارزیابی دقت مدل‌های معکوس بدون پیش پردازش ICOL

### ۵-۵-۱-۱- ارزیابی کلروفیل-a و رنگدانه کل

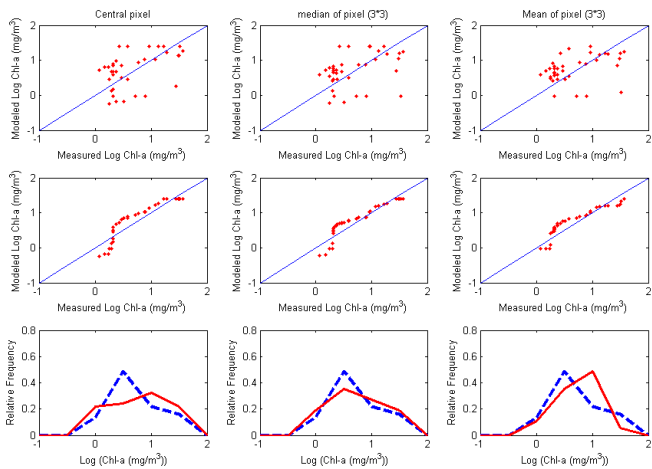
#### ۵-۵-۱-۱-۱- غلظت کلروفیل-a سطحی

نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی دقت پنج مدل معکوس ALM, C2R, FUB\WeW, MEGS و هیبرید ALM-ANN، در سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانگین و میانه یک جعبه پیکسلی 3x3 در اطراف پیکسل مرکزی)، به منظور استخراج غلظت کلروفیل-a از تصاویر سطح یک MERIS، با استفاده از داده‌های غلظت کلروفیل-a سطحی (اندازه گیری میدانی) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی در جدول ۵-۱ و شکل ۵-۲ نشان داده شده است.

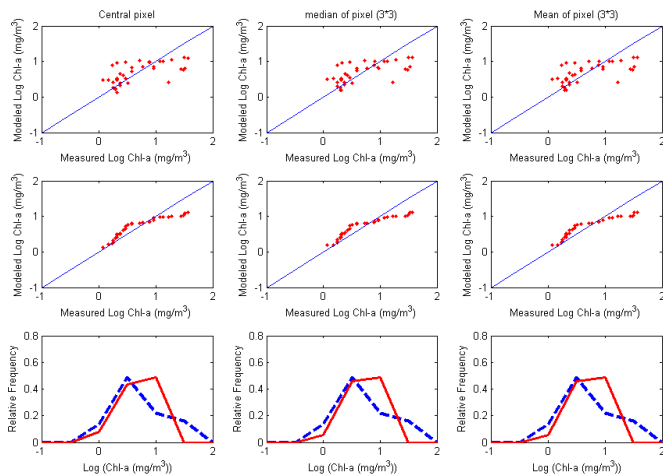
جدول ۵-۱- نتایج آماری ارزیابی دقت ۵ مدل معکوس مورد بررسی با کمک داده‌های غلظت کلروفیل-a سطحی برای سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3)

	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
ESA (Central pixel)	140.56	113.28	9.87	0.5	0.95	0.06	0.47	0.47
ESA (median pixel)	124.11	100.64	10.74	0.51	-0.13	0.03	0.32	0.38
ESA (mean of pixels)	114.02	95.74	9.71	0.47	-0.63	0.08	0.39	0.37
C2R (Central pixel)	68.58	63.36	9.3	0.35	-2.8	0	0.54	0.63
C2R (median pixel)	69.34	65.15	9.24	0.35	-2.8	0	0.56	0.64
C2R (mean of pixels)	69.55	65.53	9.23	0.35	-2.8	0.01	0.57	0.64
FUB/WeW (Central pixel)	107.01	76.28	13.65	0.41	0.78	-0.09	0.43	0.72
FUB/WeW (median pixel)	91.55	73.75	11	0.44	-0.16	-0.13	0.54	0.7
FUB/WeW (mean of pixels)	82.87	67.77	11.35	0.37	-0.2	-0.1	0.52	0.75
ALM (Central pixel)	51.8	56.42	11.28	0.45	-5.66	-0.25	0.41	0.56
ALM (median pixel)	50.65	55.23	11.28	0.45	-5.61	-0.25	0.4	0.56
ALM (mean of pixels)	51.18	55.83	11.28	0.45	-5.63	-0.25	0.41	0.56
Hybrid ALM-ANN (Central pixel)	57.48	46.49	9.76	0.34	-2.9	-0.14	0.48	0.75
Hybrid ALM-ANN (median pixel)	61.4	48.64	9.78	0.35	-2.81	-0.13	0.48	0.72
Hybrid ALM-ANN (mean of pixels)	60.26	48.01	9.44	0.33	-2.81	-0.13	0.51	0.74

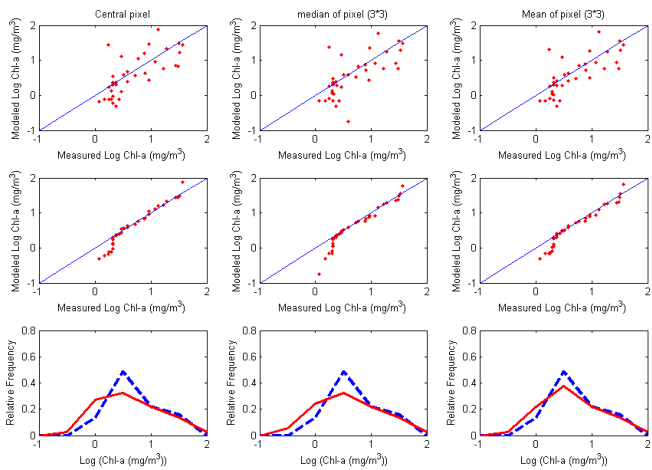
### MEGS



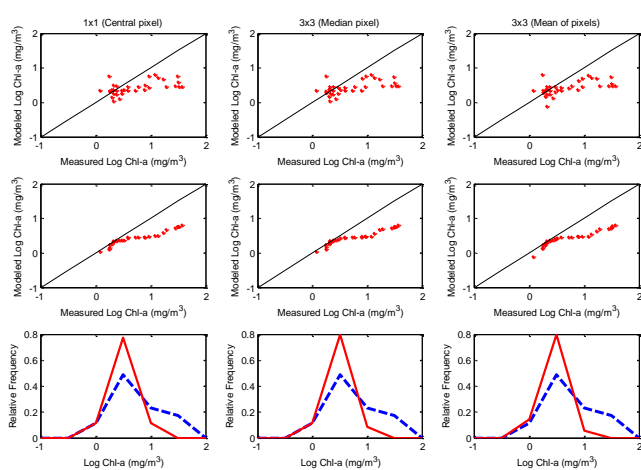
### C2R



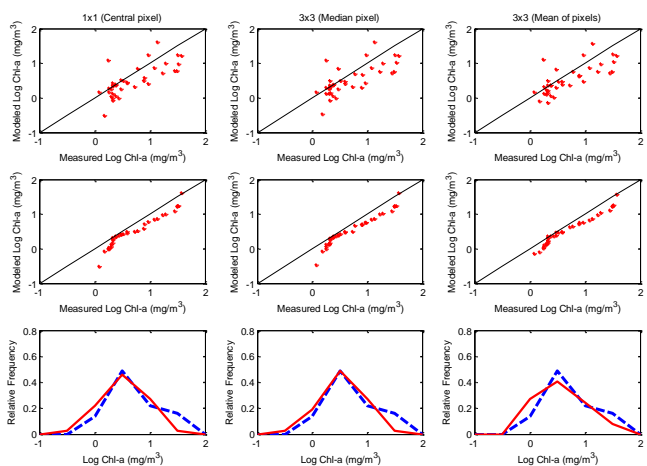
### FUB\WeW



### ALM



### Hybrid ALM-ANN



شکل ۵-۲- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی کلروفیل a-سطحی، الف) نمودار پراکندگی (سطر اول هر بخش) و ب) نمودار q-q (سطر دوم هر بخش)، داده‌های کلروفیل a-مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های کلروفیل a-سطحی؛ ج) نمودار فراوانی نسبی (سطر سوم هر بخش) مقادیر کلروفیل a-سطحی (خط چین) به همراه مقادیر کلروفیل a-مدل‌سازی شده (خط پر)

با توجه به نتایج آماری بدست آمده، به طور کلی می‌توان به این مطلب اشاره کرد که هر پنج مدل تمایل به برآورد کمتر مقادیر میدانی کلروفیل-a سطحی دارند (اریبی منفی). نتایج گرافیکی نیز بیانگر آن است که تمام مدل‌های معکوس حداقل در قسمتی از کل دامنه غلظت کلروفیل-a، رفتار معقولی را ارائه می‌نمایند، هر چند انحراف نمونه‌های پلات شده از خط ۱:۱ در کران پایین و بالای غلظت‌ها، که در نمودارهای q-q به روشنی مشخص است گویای ضعف این مدل‌های معکوس در مدل‌سازی صحیح غلظت‌های بالا و پایین کلروفیل-a سطحی است. این مشکل در نمودارهای فراوانی نسبی برخی از مدل‌های معکوس مثل MEGS، C2R و ALM نیز به روشنی مشاهده می‌شود، جایی که شکل فراوانی نسبی غلظت‌های مدل شده، عمدتاً در کران بالای غلظت‌ها، متفاوت از شکل فراوانی نسبی غلظت‌های کلروفیل-a سطحی (میدانی) می‌باشد. البته در مورد دو پردازشگر FUB/WeW و هیبرید ALM-ANN، مخصوصاً هیبرید ALM-ANN، نتایج گرافیکی گویای انطباق فوق العاده، نتایج مدل با داده‌های میدانی است. در مورد روند تغییر غلظت پارامترهای کیفی در تصاویر ماهواره‌ای، به طور طبیعی انتظار می‌رود که این روند تدریجی صورت گیرد یعنی تغییر غلظت از یک نقطه کم غلظت به طرف نقاط پر غلظت به تدریج باشد. بنابراین اختلاف جزئی پارامترهای آماری و گرافیکی برای سه حالت پیکسلی مختلف که در جدول ۵-۱ و شکل ۵-۲ ارائه شده است غیر منتظره نمی‌باشد. با این حال به منظور بررسی حالت‌های مختلف پیکسلی بر دقت مدل‌سازی مدل‌های مختلف، از روش امتیاز دهی اشاره شده در بخش ۵-۴ استفاده شد. نتایج و روش امتیاز دهی مذکور برای تمام مدل‌ها در جدول ۵-۲ نشان داده شده است. همان طور که نتایج رتبه بندی در این جدول نشان می‌دهد در بیشتر موارد (البته به جز در ALM) استفاده از میانگین جعبه پیکسلی 3x3 باعث بهبود دقت مدل-سازی کلروفیل-a شده است. حال بر اساس بهترین حالت پیکسلی بدست آمده، عملکرد مدل‌های معکوس مختلف با هم قیاس شده و بهترین مدل معکوس برای مدل‌سازی کلروفیل-a سطحی مشخص می‌شود. به منظور انتخاب بهترین مدل معکوس مجدداً از روش امتیاز دهی اشاره شده بخش ۵-۴ استفاده شد. نتایج امتیاز دهی و رتبه بندی مدل‌ها در جدول ۵-۳ نشان داده شده است.

جدول ۵-۲- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۵ مدل معکوس برای مدل سازی کلروفیل-a سطحی در سه حالت

پیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی

	MAPE (Score)	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS (Central pixel)	140.56(1)	9.87(2)	0.95 (1)	0.47(3)	1	1	1	10	3
MEGS (median pixel)	124.11(2)	10.74(1)	-0.13 (3)	0.32 (1)	1	3	3	14	2
MEGS (mean of pixels)	114.02(3)	9.71(3)	-0.63 (2)	0.39 (2)	1	2	2	15	1
C2R (Central pixel)	68.58(3)	9.3(1)	-2.8(1)	0.54(1)	1	1	1	9	3
C2R (median pixel)	69.34 (2)	9.24(2)	-2.8(1)	0.56(2)	1	1	1	10	2
C2R (mean of pixels)	69.55 (1)	9.23(3)	-2.8(1)	0.57(3)	1	1	1	11	1
FUB/WeW (Central pixel)	107.01(1)	13.65 (1)	0.78(1)	0.43(1)	2	1	3	10	3
FUB/WeW (median pixel)	91.55(2)	11(3)	-0.16(3)	0.54(3)	1	1	1	14	2
FUB/WeW (mean of pixels)	82.87(3)	11.35(2)	-0.2(2)	0.52(2)	2	2	2	15	1
ALM (Central pixel)	51.8(1)	11.28(1)	-5.66(1)	0.4(1)	1	1	1	7	3
ALM (median pixel)	50.65(3)	11.28(1)	-5.61(3)	0.4(1)	1	1	1	11	1
ALM (mean of pixels)	51.18(2)	11.28(1)	-5.63(2)	0.4(1)	1	1	1	9	2
Hybrid ALM-ANN(Central pixel)	57.48(3)	9.76(2)	-2.9(1)	0.48(1)	1	1	2	11	2
Hybrid ALM-ANN(median pixel)	61.4(1)	9.78(1)	-2.81(2)	0.48(1)	1	1	3	10	3
Hybrid ALM-ANN(mean of pixels)	60.26(2)	9.44(3)	-2.81(2)	0.51(2)	2	2	1	14	1

جدول ۵-۳- نتایج آماری ارزیابی عملکرد پنج مدل معکوس برای مدل سازی کلروفیل-a سطحی به همراه نتایج امتیاز

دهی به معیارهای آماری و گرافیکی

	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS (mean of pixels)	9.71(3)	-0.63 (3)	0.39 (1)	1	1	1	10	4
C2R (mean of pixels)	9.23(5)	-2.8(2)	0.57(5)	3	2	2	19	2
FUB/WeW (mean of pixels)	11.35(1)	-0.2(4)	0.52(4)	2	3	3	17	3
ALM (median pixel)	11.28(2)	-5.61(1)	0.4(2)	4	4	4	17	3
Hybrid ALM-ANN(mean of pixels)	9.44(3)	-2.81(2)	0.51(3)	5	5	5	23	1

با توجه به نتایج رتبه بندی ارائه شده در جدول ۵-۳ به راحتی می توان قضاوت نمود که مدل معکوس

هیبرید ALM-ANN، بهترین مدل برای مدل سازی کلروفیل-a سطحی در دریای خزر با استفاده از

تصاویر MERIS-FR است، بعد از این مدل، مدل های C2R، ALM، FUB/WeW و MEGS در رده-

های بعدی بهترین مدل های معکوس برای مدل سازی کلروفیل-a سطحی قرار می گیرند.

## ۵-۵-۱-۱-۲- غلظت رنگدانه کل (Pigment) سطحی

مشابه ارزیابی عملکرد مدل‌های معکوس برای کلروفیل-a سطحی، عملکرد پنج مدل معکوس MEGS، C2R، FUB/WeW، ALM و هیبرید ALM-ANN، برای مدل‌سازی رنگدانه کل سطحی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آماری و گرافیکی این ارزیابی برای سه حالت پیکسلی مختلف در جدول ۴-۵ و شکل ۳-۵ نشان داده شده است.

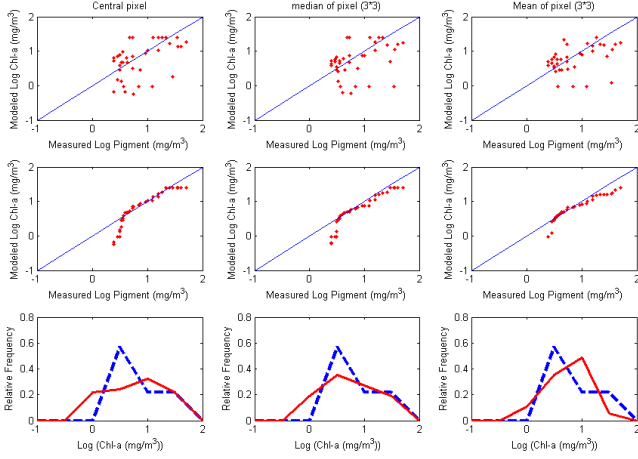
جدول ۴-۵- نتایج آماری ارزیابی دقت ۵ مدل معکوس مورد بررسی با کمک داده‌های غلظت رنگدانه کل سطحی برای سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3)

	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
MEGS (Central pixel)	81.79	53.05	11.18	0.49	-2	-0.13	0.49	0.48
MEGS (median pixel)	74.05	47.68	12.16	0.51	-3.08	-0.16	0.38	0.38
MEGS (mean of pixels)	63.97	39.29	11.45	0.44	-3.58	-0.11	0.46	0.39
C2R (Central pixel)	43.88	29.08	12.02	0.35	-5.75	-0.19	0.59	0.66
C2R (median pixel)	44.55	29.13	12.00	0.35	-5.74	-0.18	0.61	0.66
C2R (mean of pixels)	44.16	28.88	12.01	0.35	-5.75	-0.18	0.62	0.66
FUB/WeW (Central pixel)	80.65	57.98	14.44	0.49	-2.17	-0.27	0.44	0.71
FUB/WeW (median pixel)	74.59	59.67	12.1	0.52	-3.11	-0.31	0.55	0.71
FUB/WeW (mean of pixels)	69.68	54.45	12.47	0.46	-3.15	-0.29	0.53	0.75
ALM (Central pixel)	55.71	47.1	14.59	0.55	-8.61	-0.44	0.41	0.56
ALM (median pixel)	55.15	46.3	14.57	0.54	-8.56	-0.43	0.4	0.57
ALM (mean of pixels)	55.92	47.35	14.57	0.54	-8.58	-0.44	0.41	0.57
Hybrid ALM-ANN(Central pixel)	60.5	47.64	12.3	0.43	-5.85	-0.33	0.49	0.74
Hybrid ALM-ANN(median pixel)	60.24	46.85	12.3	0.44	-5.77	-0.32	0.48	0.72
Hybrid ALM-ANN(mean of pixels)	59.23	46.22	12.02	0.42	-5.76	-0.31	0.51	0.74

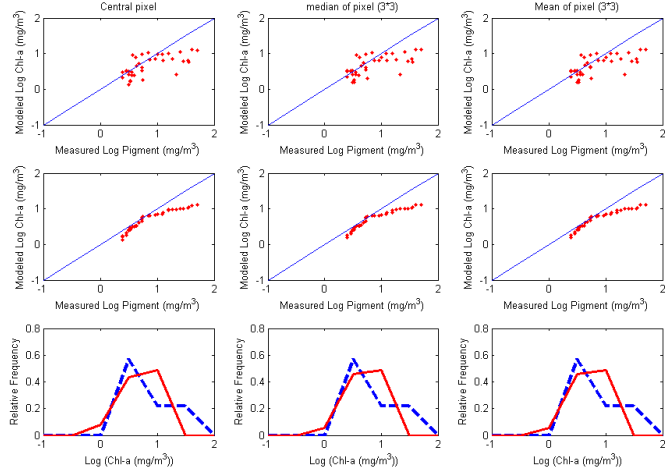
بر اساس نتایج گرافیکی ارائه شده، این بار نیز برخی از مدل‌ها به درستی قادر به مدل‌سازی صحیح غلظت‌های بالا (MEGS، C2R، ALM) و پایین (MEGS و FUB\WeW) Pigment سطحی نیستند. ولی در این میان نتایج گرافیکی مدل هیبرید ALM-ANN در کل دامنه غلظت Pigment بسیار مطلوب است. در جدول ۵-۵ نتایج بررسی حالت‌های مختلف پیکسلی بر دقت مدل‌سازی مدل‌های مختلف نشان داده شده است. این بار نیز در مورد مدل معکوس C2R، FUB\WeW و هیبرید ALM-ANN میانگین 3x3 پیکسلی، بهترین نتیجه مدل‌سازی را دارد، البته در مورد ALM و MEGS

بهترین نتیجه به ترتیب در پیکسل مرکزی و میانه جعبه پیکسلی 3x3 دیده می‌شود. نتایج رتبه بندی و انتخاب مدل‌های معکوس برتر به منظور استخراج رنگدانه کل در جدول ۵-۶ ارائه شده است.

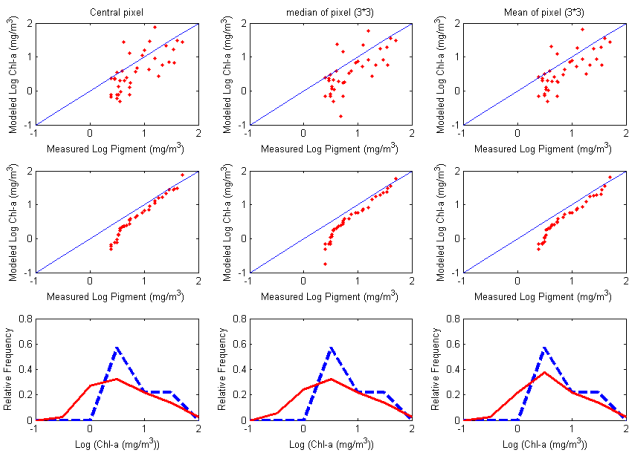
### MEGS



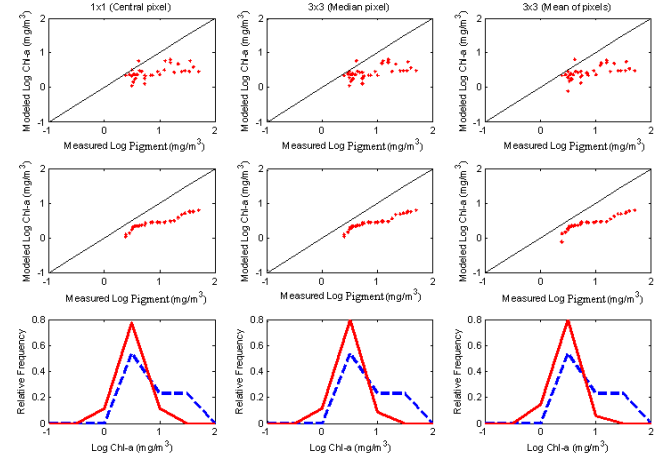
### C2R



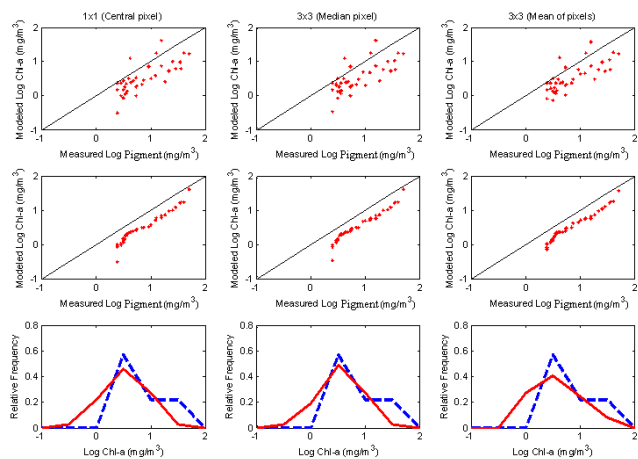
### FUB\WeW



### ALM



### Hybrid ALM-ANN



شکل ۵-۳- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی رنگدانه کل سطحی، الف) نمودار پراکندگی (سطر اول هر بخش) و ب) نمودار q-q (سطر دوم هر بخش)، داده‌های کلروفیل-a مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های رنگدانه کل سطحی، ج) نمودار فراوانی نسبی (سطر سوم هر بخش) مقادیر میدانی رنگدانه کل سطحی (خط چین) به همراه مقادیر کلروفیل-a مدل‌سازی شده (خط پر)



جدول ۵-۵- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۵ مدل معکوس برای مدل سازی رنگدانه کل سطحی در سه حالت

بیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی

	MAPE (Score)	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS (Central pixel)	81.79(1)	11.18(3)	-2(3)	0.49(3)	1	1	1	13	1
MEGS (median pixel)	74.05(2)	12.16(1)	-3.08(2)	0.38(1)	1	3	1	11	3
MEGS (mean of pixels)	63.97(3)	11.45(2)	-3.58(1)	0.46(2)	1	2	1	12	2
C2R (Central pixel)	43.88(3)	12.00(1)	-5.75(1)	0.59(1)	1	1	1	9	2
C2R (median pixel)	44.55(1)	12.00(1)	-5.74(1)	0.61(2)	1	1	1	8	3
C2R (mean of pixels)	44.16(2)	12.00(1)	-5.75(1)	0.62(3)	1	1	1	10	1
FUB/WeW (Central pixel)	80.65(1)	14.44(1)	-2.17(3)	0.44(1)	2	2	1	11	3
FUB/WeW (median pixel)	74.59(2)	12.1(3)	-3.11(2)	0.55(3)	1	1	1	13	2
FUB/WeW (mean of pixels)	69.68(3)	12.47(2)	-3.15(1)	0.53(2)	2	2	2	14	1
ALM (Central pixel)	55.71(2)	14.59(1)	-8.61(1)	0.41(2)	1	1	1	9	2
ALM (median pixel)	55.15(3)	14.59(1)	-8.56(3)	0.4(1)	1	1	1	11	1
ALM (mean of pixels)	55.92(1)	14.59(1)	-8.58(2)	0.41(2)	1	1	1	9	2
Hybrid ALM-ANN(Central pixel)	60.5(1)	12.3(1)	-5.85(1)	0.49(2)	1	1	1	8	3
Hybrid ALM-ANN(median pixel)	60.24(2)	12.3(1)	-5.77(2)	0.48(1)	1	1	2	10	2
Hybrid ALM-ANN(mean of pixels)	59.23(3)	12.02(2)	-5.77(2)	0.51(3)	2	2	1	15	1

جدول ۵-۶- نتایج آماری ارزیابی عملکرد پنج مدل معکوس برای مدل سازی رنگدانه کل سطحی به همراه نتایج امتیاز

دهی به معیارهای آماری و گرافیکی

	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS (Central pixel)	11.18(5)	-2(4)	0.49(2)	1	1	1	14	5
C2R (mean of pixels)	12.00(4)	-5.7(2)	0.62(5)	2	3	2	18	2
FUB/WeW (mean of pixels)	12.47(2)	-3.15(3)	0.53(4)	3	2	3	17	3
ALM (median pixel)	14.59(1)	-8.56(1)	0.4(1)	4	4	4	15	4
Hybrid ALM-ANN(mean of pixels)	12.02(3)	-5.7(2)	0.51(3)	5	5	5	23	1

مشابه بخش قبل با توجه به نتایج رتبه بندی ارائه شده در جدول ۵-۶ به راحتی می توان قضاوت نمود

که مدل معکوس هیبرید ALM-ANN بهترین مدل معکوس برای مدل سازی رنگدانه کل سطحی

می باشد و بعد از این مدل، مدل های معکوس C2R و FUB/WeW و سپس مدل های ALM و

MEGS به ترتیب در رده های بعد قرار دارند.

## ۵-۱-۱-۳- غلظت میانگین عمقی کلروفیل a-

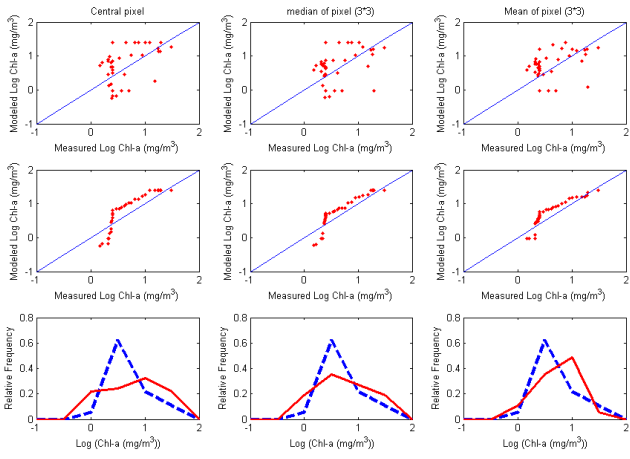
کلروفیل a- که از تصاویر سطح دو سنجنده MERIS استخراج می‌شود معادل میانگین عمقی کلروفیل a- میدانی است. در این بخش برخلاف دو حالت قبل که مقادیر سطحی غلظت کلروفیل a- و رنگدانه کل با این کلروفیل a- استخراجی (مدل شده) مورد قیاس قرار گرفته بود حالت استاندارد مقایسه و ارزیابی صورت خواهد گرفت. نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی عملکرد پنج مدل معکوس، در سه حالت پیکسلی مختلف، به منظور مدل‌سازی میانگین عمقی کلروفیل a- در جدول ۵-۷ و شکل ۵-۴ نشان داده شده است.

جدول ۵-۷- نتایج آماری ارزیابی دقت ۵ مدل معکوس مورد بررسی با کمک داده‌های غلظت میانگین عمقی کلروفیل a- برای سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3)

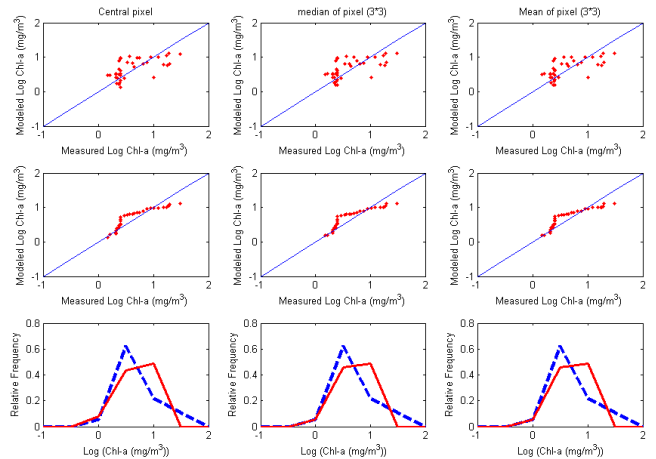
	MAPE	MAPElog	RMSE	RMSElog	MBE	MBElog	R	Rlog
MEGS (Central pixel)	142.91	92.48	8.39	0.47	3.07	0.1	0.5	0.49
MEGS (median pixel)	125.36	81.68	8.49	0.47	1.99	0.07	0.38	0.4
MEGS (mean of pixels)	110.1	73.87	6.92	0.42	1.5	0.12	0.45	0.4
C2R (Central pixel)	66.84	48.87	5.52	0.29	-0.68	0.04	0.59	0.62
C2R (median pixel)	66.54	49.02	5.44	0.29	-0.68	0.05	0.61	0.62
C2R (mean of pixels)	66.74	49.44	5.42	0.29	-0.68	0.05	0.62	0.62
FUB/WeW (Central pixel)	107.94	69.64	12.82	0.4	2.9	-0.04	0.5	0.72
FUB/WeW (median pixel)	89.36	66.15	10.07	0.43	1.96	-0.09	0.6	0.7
FUB/WeW (mean of pixels)	81.82	60.75	10.41	0.36	1.92	-0.06	0.59	0.76
ALM (Central pixel)	41.42	39.1	7.27	0.37	-3.54	-0.21	0.39	0.56
ALM (median pixel)	40.36	38.37	7.27	0.36	-3.5	-0.2	0.37	0.55
ALM (mean of pixels)	41.17	39.03	7.27	0.36	-3.5	-0.21	0.37	0.54
Hybrid ALM-ANN(Central pixel)	53.81	39.65	6.85	0.28	-0.78	-0.1	0.55	0.77
Hybrid ALM-ANN(median pixel)	56.55	40.99	6.89	0.29	-0.7	-0.09	0.54	0.74
Hybrid ALM-ANN(mean of pixels)	55.43	40.26	6.47	0.28	-0.68	-0.08	0.57	0.75

نتایج گرافیکی ارائه شده در شکل ۵-۴ بار دیگر بر ضعف این چند مدل معکوس در مدل‌سازی صحیح غلظت‌های بالا و پایین کلروفیل a- تاکید دارد. با این وجود می‌توان بهترین حالت مدل‌سازی را در مدل هیبرید ALM-ANN مشاهده کرد، جایی که رفتار خطی در نمودار q-q و انطباق دو شکل فراوانی نسبی کلروفیل a- میدانی و مدلی شده، به خوبی مشخص است. البته در درجات پایین‌تر این حالت در ALM و FUB\WeW نیز در بخش‌هایی از دامنه غلظت کلروفیل a- دیده می‌شود.

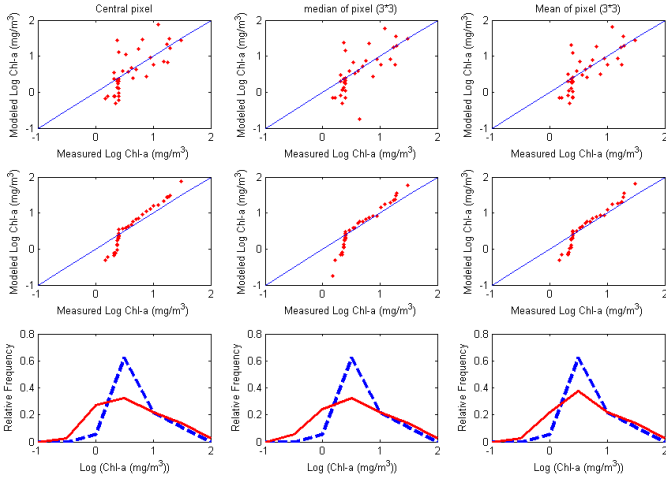
## MEGS



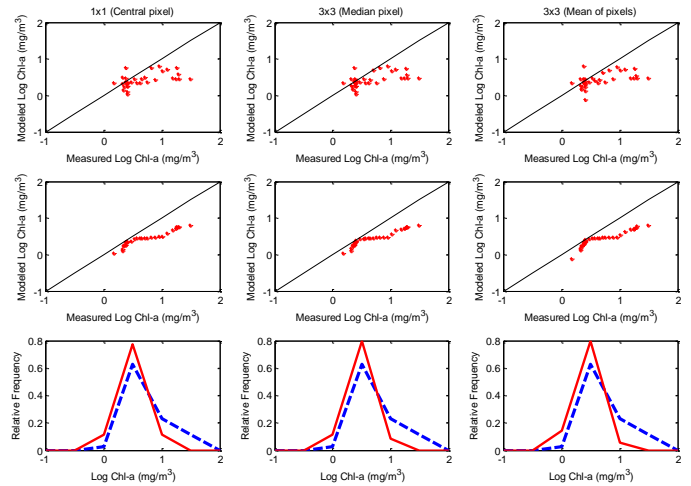
## C2R



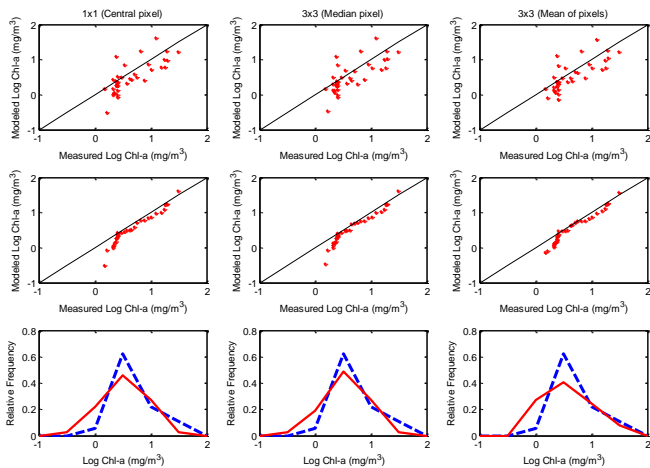
## FUB\Wew



## ALM



## Hybrid ALM-ANN



شکل ۴-۵ نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی میانگین عمقی کلروفیل-a، الف) نمودار پراکنندگی (سطر اول هر بخش) و ب) نمودار q-q (سطر دوم هر بخش)، داده‌های کلروفیل-a مدل-سازی شده در مقابل داده‌های میانگین عمقی کلروفیل-a (ج) نمودار فراوانی نسبی (سطر سوم هر بخش) مقادیر میدانی میانگین عمقی کلروفیل-a (خط چین) به همراه مقادیر کلروفیل-a مدل‌سازی شده (خط پر)

در جدول ۵-۸ نتایج بررسی حالت‌های مختلف پیکسلی بر دقت مدل‌سازی مدل‌های مختلف نشان داده شده است. این بار نیز در مورد مدل‌های معکوس C2R, MEGS, FUB\WeW و هیبرید ALM-ANN، میانگین 3x3 پیکسلی بهترین نتیجه مدل‌سازی را دارد. البته در مورد مدل ALM، به علت تشابه بسیار زیاد حالات پیکسلی، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که تقریباً تفاوت چندانی بین استفاده از پیکسل مرکزی و یا میانگین و میانه جعبه پیکسلی 3x3 وجود ندارد. این مطلب در مورد مدل معکوس C2R نیز تقریباً صادق است.

جدول ۵-۸- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۵ مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی کلروفیل-a در سه حالت پیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی

	MAPE (Score)	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS (Central pixel)	142.91(1)	8.39(2)	3.07(1)	0.5(3)	1	1	1	10	3
MEGS (median pixel)	125.36(2)	8.49(1)	1.99(2)	0.38(1)	1	1	3	11	2
MEGS (mean of pixels)	110.1(3)	6.92(3)	1.5(3)	0.45(2)	1	1	2	15	<b>1</b>
C2R (Central pixel)	66.84(1)	5.52(1)	-0.68(1)	0.59(1)	1	1	1	7	3
C2R (median pixel)	66.54(3)	5.44(2)	-0.68(1)	0.61(2)	1	1	1	11	2
C2R (mean of pixels)	66.74(2)	5.42(3)	-0.68(1)	0.62(3)	1	1	1	12	<b>1</b>
FUB/WeW (Central pixel)	107.94(1)	12.82(1)	2.9(1)	0.5(1)	2	2	1	9	3
FUB/WeW (median pixel)	89.36(2)	10.07(3)	1.96(2)	0.6(3)	1	1	1	13	2
FUB/WeW (mean of pixels)	81.82(3)	10.41(2)	1.92(3)	0.59(2)	2	2	2	16	<b>1</b>
ALM (Central pixel)	41.42(1)	7.27(1)	-3.54(1)	0.39(2)	1	1	1	8	3
ALM (median pixel)	40.36(3)	7.27(1)	-3.5(2)	0.37(1)	1	1	1	10	<b>1</b>
ALM (mean of pixels)	41.17(2)	7.27(1)	-3.5(2)	0.37(1)	1	1	1	9	2
Hybrid ALM-ANN(Central pixel)	53.81(3)	6.85(2)	-0.78(1)	0.55(2)	1	1	2	12	2
Hybrid ALM-ANN(median pixel)	56.55(1)	6.89(1)	-0.7(2)	0.54(1)	1	1	2	9	3
Hybrid ALM-ANN(mean of pixels)	55.43(2)	6.47(3)	-0.68(3)	0.57(3)	2	2	1	16	<b>1</b>

در جدول ۵-۹ نتایج رتبه بندی و انتخاب بهترین مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی کلروفیل-a نشان داده شده است. همان طور که از نتایج رتبه بندی ارائه شده در این جدول مشخص است مدل هیبرید ALM-ANN، بهترین مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی کلروفیل-a است، بعد از این مدل، مدل معکوس C2R و سپس ALM و FUB\WeW و در رتبه آخر مدل معکوس MEGS قرار دارند.

جدول ۵-۹- نتایج آماری ارزیابی عملکرد پنج مدل معکوس برای مدل سازی میانگین عمقی کلروفیل-a به همراه نتایج امتیاز دهی به معیارهای آماری و گرافیکی

	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS (mean of pixels)	6.92(3)	1.5(3)	0.45(2)	1	1	1	11	4
C2R (mean of pixels)	5.42(5)	-0.68(4)	0.62(5)	2	2	2	20	2
FUB/WeW (mean of pixels)	10.41(1)	1.92(2)	0.59(4)	3	3	3	16	3
ALM (median pixel)	7.27(2)	-3.5(1)	0.37(1)	4	4	4	16	3
Hybrid ALM-ANN(mean of pixels)	6.47(3)	-0.68(4)	0.57(3)	5	5	5	25	1

### ۵-۵-۱-۱-۴- غلظت میانگین عمقی رنگدانه کل

مشابه ارزیابی عملکرد مدل های معکوس در بخش های پیشین، در این قسمت نیز عملکرد و دقت مدل های معکوس به منظور مدل سازی میانگین عمقی رنگدانه کل، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آماری و گرافیکی این ارزیابی در جدول ۵-۱۰ و شکل ۵-۵ نشان داده شده است.

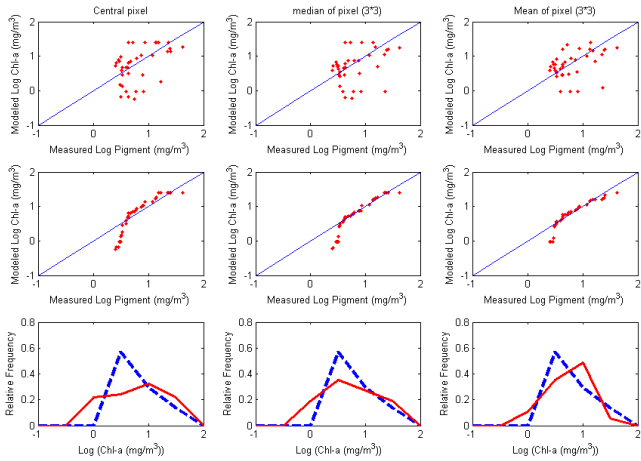
جدول ۵-۱۰- نتایج آماری ارزیابی دقت ۵ مدل معکوس مورد بررسی با کمک داده های غلظت میانگین عمقی رنگدانه کل، برای سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3)

	MAPE	MAPElog	RMSE	RMSElog	MBE	MBElog	R	Rlog
ESA (Central pixel)	89.15	54.41	8.63	0.47	0.54	-0.07	0.5	0.47
ESA (median pixel)	77.34	46.96	9.09	0.47	-0.54	-0.1	0.4	0.38
ESA (mean of pixels)	64.12	38.22	7.83	0.4	-1.04	-0.05	0.5	0.39
C2R (Central pixel)	41.11	27.31	7.72	0.29	-3.21	-0.13	0.63	0.66
C2R (median pixel)	40.55	26.75	7.65	0.28	-3.21	-0.13	0.65	0.66
C2R (mean of pixels)	39.75	26.32	7.65	0.28	-3.21	-0.13	0.65	0.67
FUB/WeW (Central pixel)	85.02	59.19	12.65	0.46	0.37	-0.22	0.49	0.73
FUB/WeW (median pixel)	74.33	58.88	10.03	0.49	-0.57	-0.26	0.59	0.72
FUB/WeW (mean of pixels)	69.6	53.98	10.41	0.42	-0.61	-0.23	0.58	0.77
ALM (Central pixel)	53.36	45.79	10.2	0.47	-6.07	-0.39	0.37	0.55
ALM (median pixel)	52.21	44.53	10.2	0.47	-6.02	-0.38	0.36	0.55
ALM (mean of pixels)	53.05	45.55	10.2	0.47	-6.02	-0.38	0.38	0.55
Hybrid ALM-ANN(Central pixel)	58.83	46.39	8.52	0.38	-3.31	-0.27	0.53	0.76
Hybrid ALM-ANN(median pixel)	59.22	46.12	8.52	0.38	-3.22	-0.27	0.53	0.74
Hybrid ALM-ANN(mean of pixels)	57.77	45.22	8.19	0.37	-3.22	-0.26	0.55	0.76

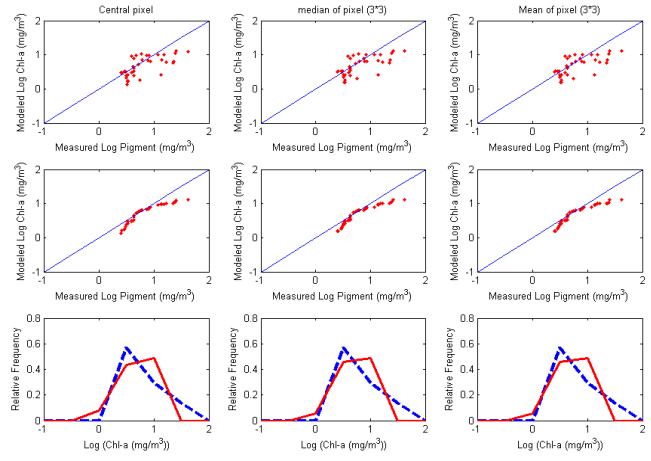
نتایج گرافیکی بدست آمده (شکل ۵-۵)، تقریباً مشابه موارد پیشین است. در اینجا نیز هر پنج مدل به درستی قادر به مدل سازی مقادیر خیلی پایین و یا خیلی بالای غلظت های رنگدانه کل نیستند، هر

چند رفتار آنها عمدتاً برای غلظت‌های میانی معقول است. بار دیگر مدل هیبرید ALM-ANN نسبت به مدل‌های دیگر رفتار بسیار مطلوب‌تری را برای مدل‌سازی میانگین عمقی رنگدانه کل نشان می‌دهد.

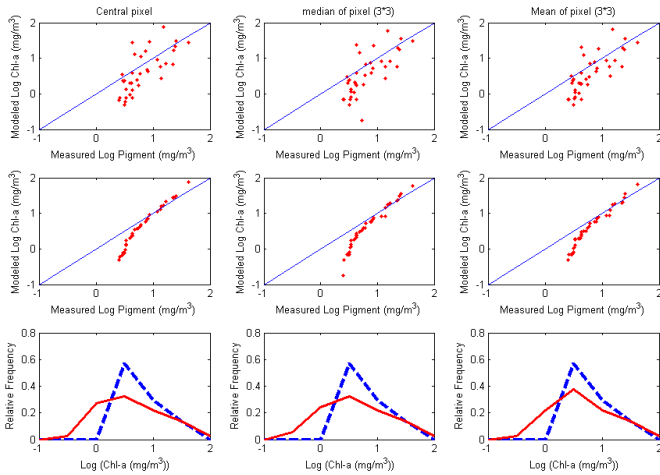
### MEGS



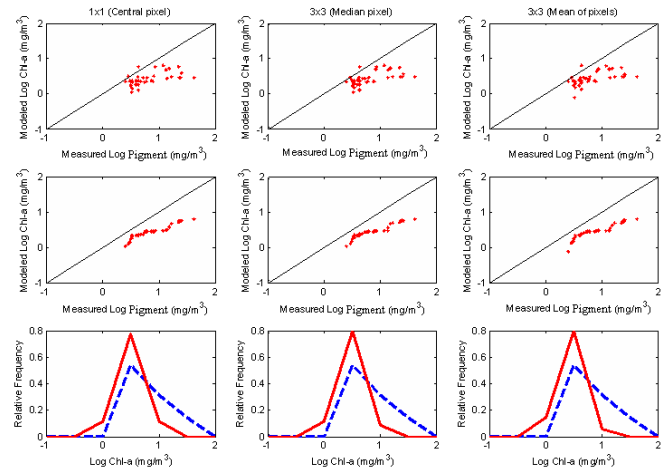
### C2R



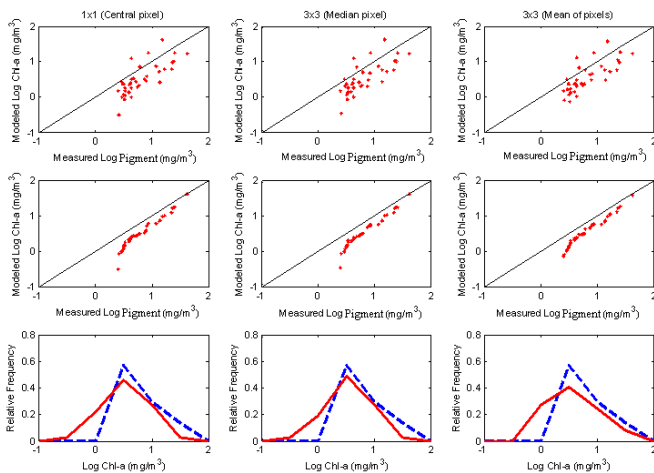
### FUB\WeW



### ALM



### Hybrid ALM-ANN



شکل ۵-۵- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی میانگین عمقی رنگدانه کل، الف) نمودار پراکندگی (سطر اول هر بخش) و ب) نمودار q-q (سطر دوم هر بخش)، داده‌های کلروفیل-a مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های میانگین عمقی رنگدانه کل، ج) نمودار فراوانی نسبی (سطر سوم هر بخش) مقادیر میانگین عمقی رنگدانه کل (خط چین) به همراه مقادیر کلروفیل-a مدل‌سازی شده (خط پر)

در جدول ۵-۱۱ نتایج بررسی حالت‌های مختلف پیکسلی بر دقت مدل‌سازی مدل‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اکثراً میانگین  $3 \times 3$  پیکسلی بهترین نتیجه مدل‌سازی را دارد. البته در مورد مدل معکوس FUB\WeW حالت میان‌جعبه پیکسلی  $3 \times 3$  نتایج بهتری را نشان می‌دهد. نتایج رتبه‌بندی و انتخاب بهترین مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی کلروفیل-a در جدول ۵-۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۱- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۵ مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی رنگدانه کل در سه حالت پیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیازدهی برای معیارهای آماری و گرافیکی

	MAPE (Score)	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS (Central pixel)	89.15(1)	8.63(2)	0.54(2)	0.5(2)	1	1	1	10	3
MEGS (median pixel)	77.34(2)	9.09(1)	-0.54(2)	0.4(1)	1	2	3	12	2
MEGS (mean of pixels)	64.12(3)	7.83(3)	-1.04(1)	0.5(2)	1	2	2	14	1
C2R (Central pixel)	41.11(1)	7.72(1)	-3.21(1)	0.63(1)	1	1	1	7	3
C2R (median pixel)	40.55(2)	7.65(2)	-3.2(1)	0.65(2)	1	1	1	10	2
C2R (mean of pixels)	39.75(3)	7.65(2)	-3.21(1)	0.65(2)	1	1	1	11	1
FUB/WeW (Central pixel)	85.02(1)	12.65(1)	0.37(3)	0.49(1)	1	1	1	9	3
FUB/WeW (median pixel)	74.33(2)	10.03(3)	-0.57(2)	0.59(3)	1	1	1	13	1
FUB/WeW (mean of pixels)	69.6(3)	10.41(2)	-0.61(1)	0.58(2)	1	1	1	11	2
ALM (Central pixel)	53.36(1)	10.2(1)	-6.07(1)	0.37(2)	1	1	1	8	3
ALM (median pixel)	52.21(3)	10.2(1)	-6.02(2)	0.36(1)	1	1	1	10	2
ALM (mean of pixels)	53.05(2)	10.2(1)	-6.02(2)	0.38(3)	1	1	1	11	1
Hybrid ALM-ANN(Central pixel)	58.83(2)	8.52(1)	-3.31(1)	0.53(1)	1	1	2	9	2
Hybrid ALM-ANN(median pixel)	59.22(1)	8.52(1)	-3.22(2)	0.53(1)	1	1	2	9	2
Hybrid ALM-ANN(mean of pixels)	57.77(3)	8.19(2)	-3.22(2)	0.55(2)	2	2	1	14	1

جدول ۵-۱۲- نتایج آماری ارزیابی عملکرد پنج مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی رنگدانه کل به همراه نتایج امتیازدهی به معیارهای آماری و گرافیکی

	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS (mean of pixels)	7.83(4)	-1.04(3)	0.5(2)	1	1	3	14	4
C2R (mean of pixels)	7.65(5)	-3.2(2)	0.65(5)	3	3	2	20	2
FUB/WeW (median pixel)	10.03(2)	-0.57(4)	0.59(4)	2	2	1	15	3
ALM (mean of pixels)	10.2(1)	-6.02(1)	0.38(1)	4	4	4	15	3
Hybrid ALM-ANN (mean of pixels)	8.19(3)	-3.2(2)	0.55(3)	5	5	5	23	1

همان طور که نتایج رتبه بندی در جدول ۵-۱۲ نشان می‌دهد مدل معکوس هیبرید ALM-ANN همانند موارد قبل، بهتر از مدل‌های دیگر توانسته است غلظت رنگدانه کل موجود در دریای خزر را از داده‌های MERIS استخراج نماید. مدل C2R بعد از این مدل، بهترین رتبه مدل‌سازی را دارا است و بعد از آن ALM و FUB\WeW و MEGS به ترتیب در رده‌های بعد قرار دارند.

### ۵-۱-۱-۵-۵ ارزیابی نهایی مدل‌سازی کلروفیل-a و رنگدانه کل (Pigment)

در این قسمت، مدل‌سازی حالت‌های سطحی و میانگین عمقی کلروفیل-a و رنگدانه کل که در پنج بخش قبل (از ۵-۱-۱ تا ۵-۱-۴) مورد ارزیابی قرار گرفت به طور اجمالی بررسی می‌شود، تا مشخص شود که کدام پارامتر (Chl-a یا Pigment) و چه حالتی (مقادیر سطحی یا میانگین عمقی) بهترین حالت ممکن برای مدل‌سازی معکوس کلروفیل-a به عنوان نماینده زیست توده جلبکی در دریای خزر است. برای این کار بهترین مدل معکوس هر بخش انتخاب و مدل‌ها مشابه قبل با هم قیاس شدند. نتایج این بررسی در جدول ۵-۱۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج این جدول به راحتی می‌توان دریافت بهترین پارامتر (کلروفیل-a یا رنگدانه کل) برای مدل‌سازی بایومس جلبک‌ها در دریای خزر با مدل معکوس هیبرید ALM-ANN، میانگین عمقی کلروفیل-a است. البته به طور کلی می‌توان گفت که مدل هیبرید ALM-ANN، برای تخمین کلروفیل-a بهتر از تخمین رنگدانه کل عمل می‌کند.

جدول ۵-۱۳- نتایج امتیاز دهی به بهترین مدل معکوس انتخاب شده برای مدل‌سازی غلظت کلروفیل-a و رنگدانه کل

در دو حالت سطحی و میانگین عمقی

	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
Hybrid ALM-ANN (Surface Chl-a)	9.44(2)	-2.81(3)	0.51(1)	1	1	1	9	3
Hybrid ALM-ANN (Surface Pigment)	12.02(1)	-5.7(1)	0.51(1)	1	1	1	6	4
Hybrid ALM-ANN (Mixed Chl-a)	6.47(4)	-0.68(4)	0.57(3)	1	1	1	14	1
Hybrid ALM-ANN (Mixed Pigment)	8.19(3)	-3.2(2)	0.55(2)	1	1	1	10	2



## ۵-۵-۱-۲-ارزیابی CDOM

در مورد مدل‌سازی CDOM توسط چهار مدل معکوس MEGS، C2R، FUB\WeW و ALM نیز مشابه قبل این پارامتر در دو حالت سطحی و میانگین عمقی مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۵-۵-۱-۲-۱-CDOM سطحی

نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی دقت مدل‌های معکوس در سه حالت پیکسلی مختلف، به منظور استخراج مقادیر سطحی CDOM در جدول ۵-۱۴ و شکل ۵-۶ ارائه شده است.

جدول ۵-۱۴- نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ مدل معکوس مورد بررسی با کمک داده‌های CDOM سطحی برای سه

حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3)

	MAPE	MAPElog	RMSE	RMSElog	MBE	MBElog	R	Rlog
MEGS (Central pixel)	246.8	251.27	1.73	0.8	0.7	-0.14	0.22	0.22
MEGS (median pixel)	242.84	231.44	1.70	0.71	0.7	-0.07	0.22	0.22
MEGS (mean of pixels)	232.36	219.74	1.61	0.66	0.7	0.02	0.22	0.18
<hr/>								
C2R (Central pixel)	70.74	206.79	0.33	0.64	-0.27	-0.57	0.48	0.55
C2R (median pixel)	70.69	204.75	0.33	0.63	-0.27	-0.57	0.49	0.57
C2R (mean of pixels)	69.91	203.51	0.33	0.63	-0.27	-0.57	0.52	0.57
<hr/>								
FUB/WeW (Central pixel)	56.05	138	0.28	0.52	-0.18	-0.38	0.5	0.48
FUB/WeW (median pixel)	55.26	137.33	0.28	0.51	-0.19	-0.38	0.52	0.47
FUB/WeW (mean of pixels)	54.65	136.93	0.28	0.51	-0.19	-0.39	0.52	0.48
<hr/>								
ALM (Central pixel)	74	275.04	0.37	0.65	-0.33	-0.62	0.48	0.49
ALM (median pixel)	74.14	276.06	0.37	0.65	-0.33	-0.62	0.52	0.52
ALM (mean of pixels)	74	275.05	0.37	0.64	-0.33	-0.62	0.52	0.54

به طور کلی با توجه به نتایج آماری و گرافیکی بدست آمده، تمام مدل‌ها به غیر از مدل معکوس MEGS تمایل به برآورد کمتر مقادیر CDOM سطحی دارند (اریبی منفی). نتایج گرافیکی نیز نشان دهنده آن است که مدل MEGS در نمودار q-q رفتاری کاملاً غیر خطی از خود نشان می‌دهد. این وضعیت از اختلاف شدید شکل فراوانی نسبی داده‌های CDOM مدل شده توسط این مدل با شکل فراوانی نسبی داده‌های CDOM میدانی کاملاً مشخص است. در مورد سه مدل دیگر شرایط کمی متفاوت است. نمودار q-q این سه مدل بیانگر آن است که مدل معکوس ALM رفتاری خطی‌تری نسبت به دو مدل C2R و FUB\WeW نشان می‌دهد، بر عکس نمودار فراوانی نسبی دو مدل C2R و

FUB\WeW نسبت به نمودار فراوانی نسبی ALM به نظر بهتر می‌رسند. اما به طور کلی روند داده-

های پلات شده در نمودار پراکندگی و q-q این مدل‌ها تقریباً در راستای خط ۱:۱ با مقداری جابجایی

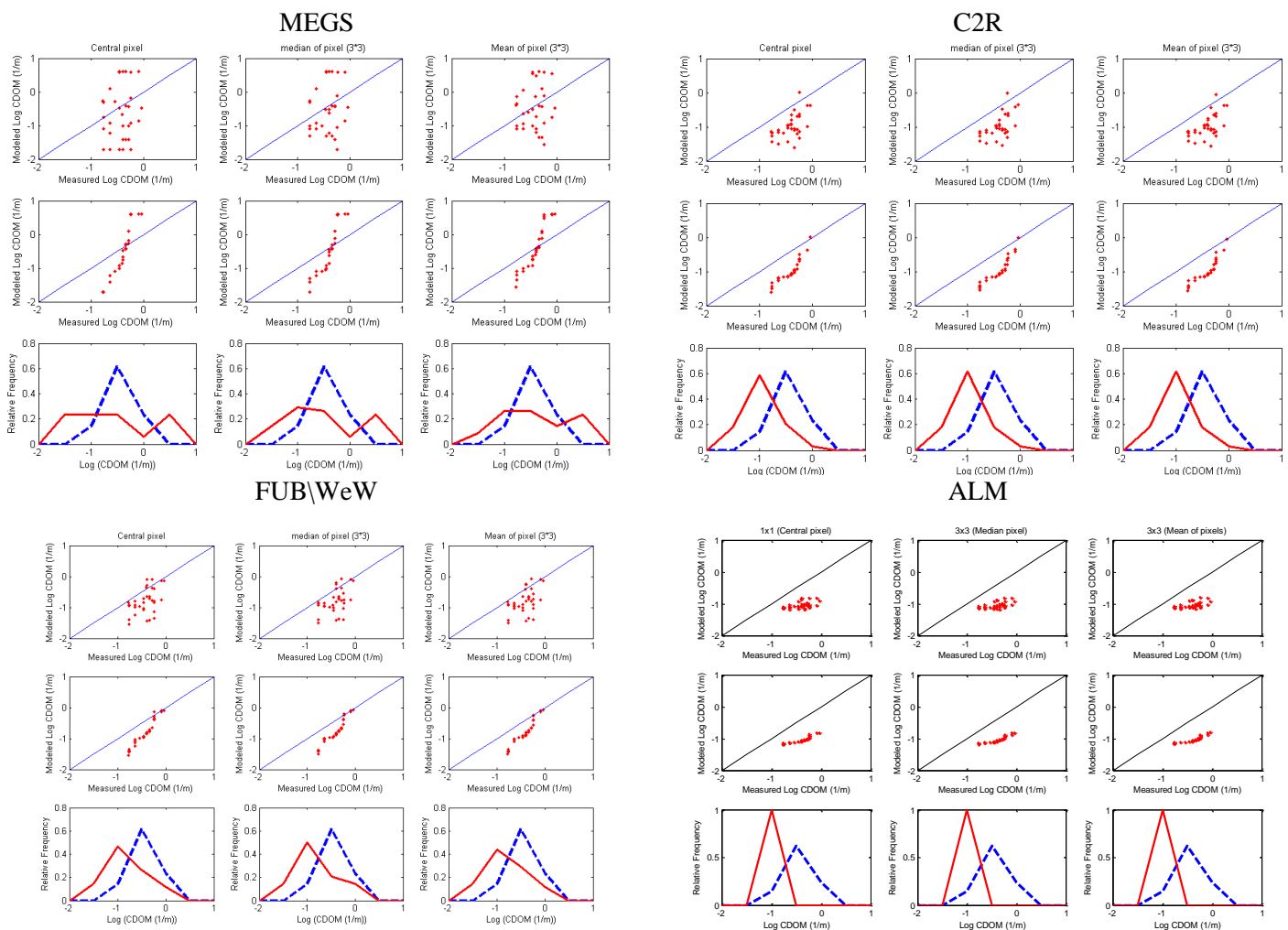
به سمت پایین است که نشان دهنده منفی بودن مقدار آریبی است. این وضعیت به روشنی از مقایسه

شکل کلی فراوانی نسبی CDOM مدل شده با شکل فراوانی نسبی CDOM میدانی قابل فهم است.

در این حالت یک Shifting (افزایش یا کاهش یک مقدار ثابت به داده‌ها مدل) در داده‌های مدل

شده، امکان بهبود نتایج مدل‌سازی را فراهم می‌کند. در جدول ۵-۱۵ نتایج بررسی حالت‌های مختلف

پیکسلی بر دقت مدل‌سازی نشان داده شده است



شکل ۵-۶- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی CDOM سطحی، الف) نمودار پراکندگی (سطر اول هر بخش) و ب) نمودار q-q (سطر دوم هر بخش)، داده‌های CDOM مدل شده در مقابل داده‌های CDOM سطحی، ج) نمودار فراوانی نسبی (سطر سوم هر بخش) مقادیر میدانی CDOM سطحی (خط چین) به همراه مقادیر CDOM مدل‌سازی

جدول ۵-۱۵- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ مدل معکوس برای مدل سازی CDOM سطحی در سه حالت

پیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی

	MAPE (Score)	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS (Central pixel)	246.8(1)	1.73(1)	0.7(1)	0.22(1)	1	1	1	7	3
MEGS (median pixel)	242.84(2)	1.7(2)	0.7(1)	0.22(1)	1	1	1	9	2
MEGS (mean of pixels)	232.36(3)	1.61(3)	0.7(1)	0.22(1)	1	1	1	11	1
C2R (Central pixel)	70.74(1)	0.33(1)	-0.27(1)	0.48(1)	1	1	1	7	3
C2R (median pixel)	70.69(2)	0.33(1)	-0.27(1)	0.49(2)	1	1	1	9	2
C2R (mean of pixels)	69.91(3)	0.33(1)	-0.27(1)	0.52(3)	1	1	1	11	1
FUB/WeW (Central pixel)	56.05(1)	0.28(1)	-0.18(1)	0.5(1)	1	1	1	7	3
FUB/WeW (median pixel)	55.26(2)	0.28(1)	-0.19(1)	0.52(2)	1	1	1	9	2
FUB/WeW (mean of pixels)	54.65(3)	0.28(1)	-0.19(1)	0.52(2)	1	1	1	10	1
ALM (Central pixel)	74(2)	0.37(1)	-0.33(1)	0.48(1)	1	1	1	8	2
ALM (median pixel)	74.14(1)	0.37(1)	-0.33(1)	0.52(2)	1	1	1	8	2
ALM (mean of pixels)	73.91(3)	0.37(1)	-0.33(1)	0.52(2)	1	1	1	10	1

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵-۱۵، با وجود این که در اکثر مدل ها بین پارامترهای آماری و گرافیکی در سه حالت پیکسلی مختلف، تفاوت چندانی وجود ندارد، با این وجود نتایج کلی رتبه بندی نشان دهنده بهتر بودن میانگین جعبه پیکسلی 3x3 نسبت به حالات دیگر پیکسلی برای مقایسه داده های مدل سازی با داده های میدانی CDOM است. نتایج رتبه بندی مدل های معکوس برای مدل سازی CDOM سطحی در جدول ۵-۱۶ نشان داده شده است. بر اساس نتایج این جدول اختلاف چندانی بین عملکرد سه مدل FUB\WeW، C2R و ALM در مدل سازی مقادیر CDOM سطحی در دریای خزر دیده نمی شود. هر سه مدل قطعاً عملکرد بهتری نسبت به مدل MEGS در مدل سازی CDOM سطحی دارند. اما به طور کلی عملکرد و دقت مدل C2R نسبت به بقیه مدل ها بهتر است. بر اساس نتایج گرافیکی می توان ALM را در رتبه بعد و FUB\WeW را در رتبه سوم قرار داد.

جدول ۵-۱۶- نتایج آماری ارزیابی عملکرد چهار مدل معکوس برای مدل سازی CDOM سطحی به همراه نتایج امتیاز

دهی به معیارهای آماری و گرافیکی

	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS (mean of pixels)	1.61(1)	0.7(1)	0.22(1)	1	1	1	6	3
C2R (mean of pixels)	0.33(3)	-0.27(3)	0.52(2)	3	4	3	18	1
FUB/WeW (mean of pixels)	0.28(4)	-0.19(4)	0.52(2)	2	3	2	17	2
ALM (mean of pixels)	0.37(2)	-0.33(2)	0.52(2)	4	2	4	16	2

## ۵-۵-۱-۲-۲-۲- میانگین عمقی CDOM

نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی دقت مدل‌های معکوس در سه حالت پیکسلی مختلف، به منظور

استخراج مقادیر میانگین عمقی CDOM در جدول ۱۷-۵ و شکل ۷-۵ ارائه شده است.

جدول ۱۷-۵- نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ پردازشگر مورد بررسی با کمک داده‌های میانگین عمقی CDOM برای سه

حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3)

	MAPE	MAPElog	RMSE	RMSElog	MBE	MBElog	R	Rlog
MEGS (Central pixel)	257.24	178.07	1.75	0.78	0.73	-0.12	0.2	0.27
MEGS (median pixel)	255.22	167.41	1.71	0.71	0.73	-0.05	0.19	0.23
MEGS (mean of pixels)	248.86	156.57	1.63	0.66	0.73	0.04	0.2	0.16
C2R (Central pixel)	69.7	148.66	0.29	0.62	-0.24	-0.55	0.47	0.52
C2R (median pixel)	69.7	147.74	0.29	0.62	-0.24	-0.55	0.48	0.53
C2R (mean of pixels)	68.79	146.28	0.29	0.62	-0.24	-0.55	0.5	0.54
FUB/WeW (Central pixel)	57.83	112.94	0.26	0.51	-0.16	-0.36	0.39	0.4
FUB/WeW (median pixel)	57.94	113.42	0.26	0.5	-0.16	-0.36	0.39	0.38
FUB/WeW (mean of pixels)	57.15	112.82	0.26	0.5	-0.16	-0.37	0.39	0.39
ALM (Central pixel)	73.42	174.02	0.32	0.62	-0.29	-0.6	0.44	0.44
ALM (median pixel)	73.56	174.21	0.32	0.62	-0.29	-0.6	0.49	0.46
ALM (mean of pixels)	73.34	173.32	0.32	0.62	-0.29	-0.6	0.48	0.47

نتایج آماری و گرافیکی (جدول ۱۷-۵ و شکل ۷-۵) تقریباً مشابه حالت قبل (CDOM سطحی) است.

البته این بار ALM رفتار گرافیکی بسیار بهتری هم در نمودار q-q و هم در نمودار فراوانی نسبی

نسبت به دو مدل C2R و FUB\WeW نشان می‌دهد. این بار نیز بدترین حالت مدل‌سازی مربوط به

مدل معکوس MEGS می‌باشد. در جدول ۱۸-۵ نتایج بررسی حالت‌های مختلف پیکسلی بر دقت

مدل‌سازی مدل‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج رتبه بندی در این جدول نشان

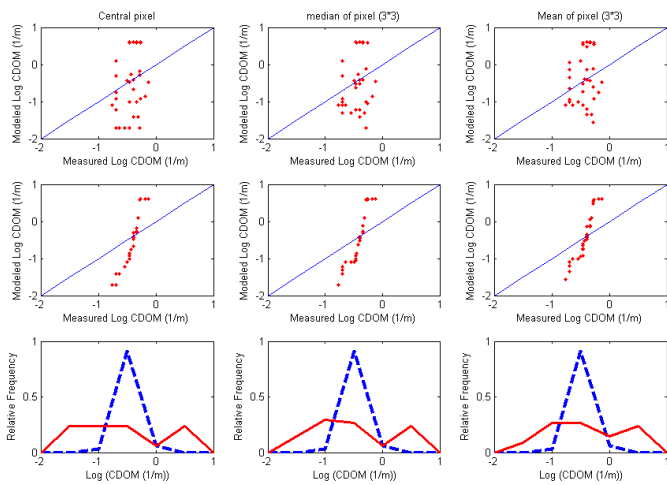
می‌دهد بار دیگر علیرغم تشابه زیاد پارامترهای آماری و گرافیکی برای سه حالت پیکسلی مختلف، به

طور کلی میانگین جعبه پیکسلی 3x3 به عنوان بهترین حالت پیکسلی برای مقایسه مقادیر مدل‌سازی

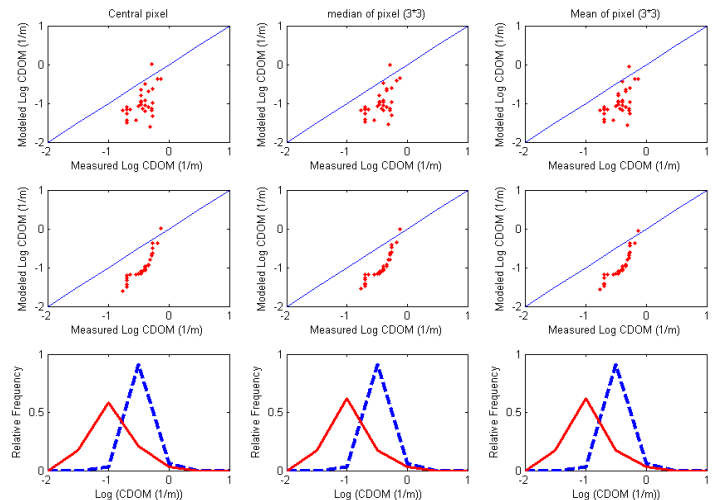
شده و مقادیر CDOM میدانی انتخاب می‌شود. نتایج رتبه بندی و انتخاب بهترین مدل معکوس برای

مدل‌سازی میانگین عمقی CDOM در جدول ۱۹-۵ نشان داده شده است.

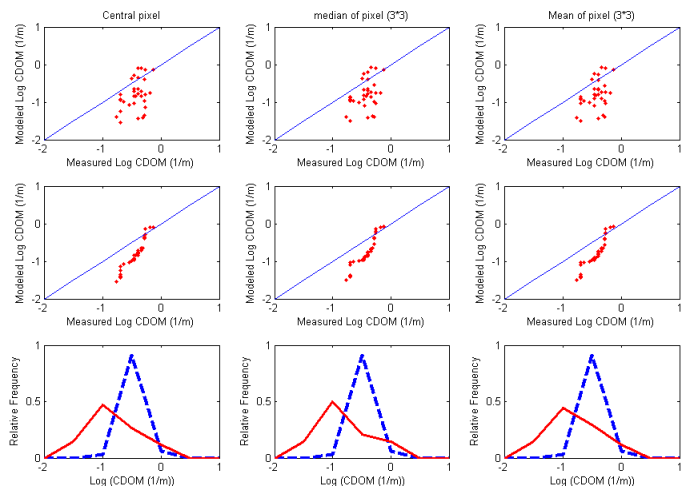
### MEGS



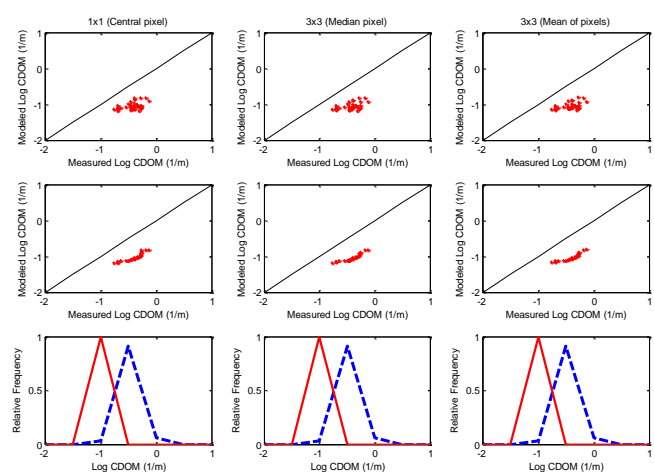
### C2R



### FUB\WeW



### ALM



شکل ۵-۷- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس به کمک داده میدانی میانگین عمقی CDOM، الف) نمودار پراکندگی (سطر اول هر بخش) و ب) نمودار q-q (سطر دوم هر بخش)، داده‌های CDOM مدل‌شده در مقابل داده‌های میانگین عمقی CDOM، ج) نمودار فراوانی نسبی (سطر سوم هر بخش) مقادیر میدانی میانگین عمقی CDOM (خط چین) به همراه مقادیر مدل‌سازی

با توجه به نتایج نهایی نشان داده شده در جدول ۵-۱۹ می‌توان مشاهده کرد که مشابه بخش قبل سه مدل ALM، C2R و FUB\WeW عملکرد بسیار مطلوب‌تری نسبت به مدل MEGS در مدل‌سازی میانگین عمقی CDOM دارند. از بین دو مدل ALM و C2R که دارای امتیاز مشابهی در مدل‌سازی هستند می‌توان مدل ALM را به علت درک بهتر رفتار داده‌های میدانی CDOM (نمودارهای گرافیکی) در رتبه نخست و C2R را در رتبه دوم و همچنین FUB\WeW را نیز در رتبه سوم بهترین مدل‌های معکوس به منظور مدل‌سازی میانگین عمقی CDOM در دریای خزر قرار داد.

جدول ۵-۱۸- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ مدل معکوس برای مدل سازی میانگین عمقی CDOM در سه حالت بیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی

	MAPE (Score)	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS (Central pixel)	257.24(1)	1.75(1)	0.73(1)	0.2(2)	1	1	1	8	3
MEGS (median pixel)	255.22(2)	1.71(2)	0.73(1)	0.19(1)	1	1	1	9	2
MEGS (mean of pixels)	248.86(3)	1.63(3)	0.73(1)	0.2(2)	1	1	1	12	1
C2R (Central pixel)	69.7(1)	0.29(1)	-0.24(1)	0.47(1)	1	1	1	7	3
C2R (median pixel)	69.7(1)	0.29(1)	-0.24(1)	0.48(2)	1	1	1	8	2
C2R (mean of pixels)	68.79(2)	0.29(1)	-0.24(1)	0.5(3)	1	1	1	10	1
FUB/WeW (Central pixel)	57.83(2)	0.26(1)	-0.16(1)	0.39(1)	1	1	1	8	2
FUB/WeW (median pixel)	57.94(1)	0.26(1)	-0.16(1)	0.39(1)	1	1	1	7	3
FUB/WeW (mean of pixels)	57.15(3)	0.26(1)	-0.16(1)	0.39(1)	1	1	1	9	1
ALM (Central pixel)	73.42(2)	0.32(1)	-0.29(1)	0.44(1)	1	1	1	8	3
ALM (median pixel)	73.56(1)	0.32(1)	-0.29(1)	0.49(3)	1	1	1	9	2
ALM (mean of pixels)	73.34(3)	0.32(1)	-0.29(1)	0.48(2)	1	1	1	10	1

جدول ۵-۱۹- نتایج آماری ارزیابی عملکرد چهار مدل معکوس برای مدل سازی میانگین عمقی CDOM به همراه نتایج امتیاز دهی به معیارهای آماری و گرافیکی

	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS (mean of pixels)	1.63(1)	0.73(1)	0.2(1)	1	1	1	6	3
C2R (mean of pixels)	0.29(3)	-0.24(3)	0.5(4)	3	3	3	19	1
FUB/WeW (mean of pixels)	0.26(4)	-0.16(4)	0.39(2)	2	2	2	16	2
ALM (mean of pixels)	0.32(2)	-0.29(2)	0.48(3)	4	4	4	19	1

### ۵-۱-۲-۳- ارزیابی نهایی مدل سازی CDOM سطحی و میانگین عمقی

به منظور تعیین بهترین حالت مدل سازی CDOM میدانی، نتایج مدل سازی دو مدل ALM و C2R که در دو بخش قبل (۵-۱-۲-۱ و ۵-۱-۲-۲) به عنوان بهترین مدل های معکوس برای مدل سازی مقادیر سطحی و میانگین عمقی CDOM انتخاب شده بودند در اینجا با هم قیاس شدند تا مشخص شود این مدل ها کدام حالت میدانی CDOM را بهتر مدل سازی می نمایند. نتایج این ارزیابی در جدول ۵-۲۰ نشان داده شده است. براساس نتایج این جدول، در مورد مدل C2R، به طور کلی تفاوت چندانی بین حالت سطحی و میانگین عمقی CDOM برای مدل سازی وجود ندارد. این وضعیت

در مورد ALM نیز تا حدود زیادی صادق است اما به طور کلی ALM رفتار مقادیر میانگین عمقی CDOM را بهتر از مقادیر CDOM سطحی مدل سازی می نماید.

جدول ۵-۲۰- نتایج امتیاز دهی به بهترین مدل های معکوس انتخاب شده برای مدل سازی مقادیر سطحی و میانگین

عمقی CDOM

	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
C2R (Surface CDOM)	0.33(1)	-0.27(1)	0.52(2)	1	2	1	8	1
C2R (Mixed CDOM)	0.29(2)	-0.24(2)	0.5(1)	1	1	1	8	1
ALM (Surface CDOM)	0.37(1)	-0.33(1)	0.52(2)	1	1	1	7	2
ALM (Mixed CDOM)	0.32(2)	-0.29(2)	0.48(1)	1	2	1	9	1

### ۵-۵-۱-۳- ارزیابی میانگین عمقی SPM

نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی عملکرد چهار مدل معکوس MEGS, FUB\WeW, C2R و ALM در

سه حالت پیکسلی مختلف، با استفاده از مقادیر میانگین عمقی SPM در دریای خزر در جدول ۵-۲۱

و شکل ۵-۸ نشان داده شده است.

جدول ۵-۲۱- نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ پردازشگر مورد بررسی با کمک داده های میانگین عمقی SPM برای سه

حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی، میانه و میانگین یک جعبه پیکسلی 3x3)

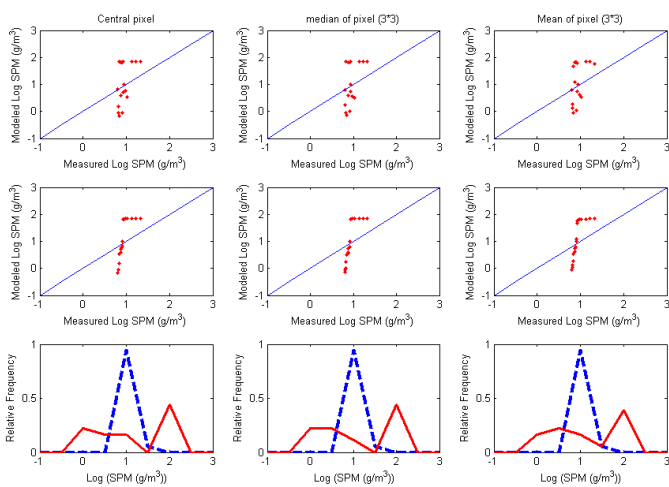
	MAPE	MAPElog	RMSE	RMSElog	MBE	MBElog	R	Rlog
ESA (Central pixel)	306.26	68.89	39.18	0.72	23.26	0.13	0.45	0.46
ESA (median pixel)	304.66	68.64	38.81	0.71	23.26	0.13	0.45	0.45
ESA (mean of pixels)	274.49	63.29	35.36	0.66	21.29	0.14	0.45	0.44
C2R (Central pixel)	63.22	53.51	7.8	0.59	-6.01	-0.5	-0.14	-0.08
C2R (median pixel)	63.77	54.32	7.84	0.6	-6.01	-0.51	-0.15	-0.11
C2R (mean of pixels)	62.73	53.62	7.8	0.6	-6.01	-0.5	-0.17	-0.12
FUB/WeW (Central pixel)	69.42	72.71	8.06	0.87	-5.89	-0.65	-0.08	0.08
FUB/WeW (median pixel)	69.63	65.51	8.11	0.71	-6.1	-0.59	-0.1	0.01
FUB/WeW (mean of pixels)	68.85	65.02	8.1	0.71	-6.1	-0.59	-0.11	0
ALM (Central pixel)	73.52	68.11	7.8	0.62	-7.11	-0.64	0.27	0.32
ALM (median pixel)	72.63	66.80	7.8	0.6	-7.06	-0.63	0.21	0.24
ALM (mean of pixels)	71.75	65.66	7.8	0.61	-6.98	-0.62	0.22	0.26

همان طور که نتایج آماری و گرافیکی این چهار مدل معکوس نشان می دهد به جز مدل MEGS بقیه

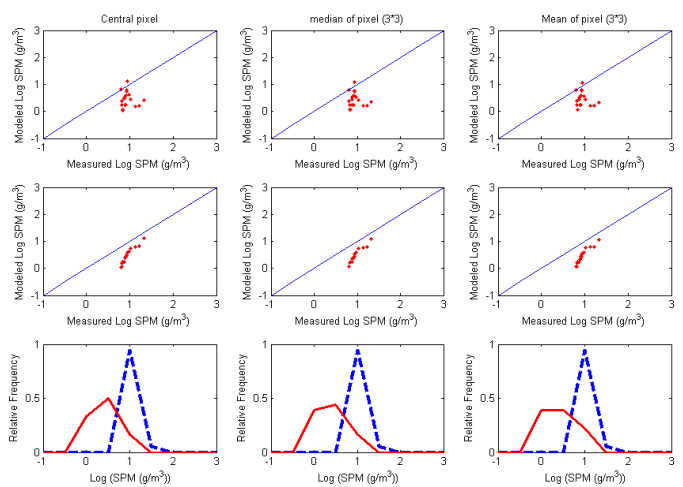
مدل ها تمایل به برآورد کمتر مقادیر میانگین عمقی SPM در دریای خزر دارند. نتایج گرافیکی نیز

بیانگر این مطلب است که در میان این چهار مدل، بهترین مدل سازی مربوط به ALM می باشد. این نتیجه گیری به راحتی از مقایسه نمودار q-q و مخصوصاً نمودار فراوانی نسبی این مدل ها با هم قابل استنتاج است. بدترین حالت مدل سازی نیز با توجه به پارامترهای گرافیکی به مدل MEGS بر می گردد که رفتار بسیار نامعقولی را هم در نمودار q-q و هم در نمودار فراوانی نسبی از خود به نمایش می گذارد. در جدول ۵-۲۲ نتایج بررسی حالت های مختلف پیکسلی بر دقت مدل سازی مدل های مختلف نشان داده شده است.

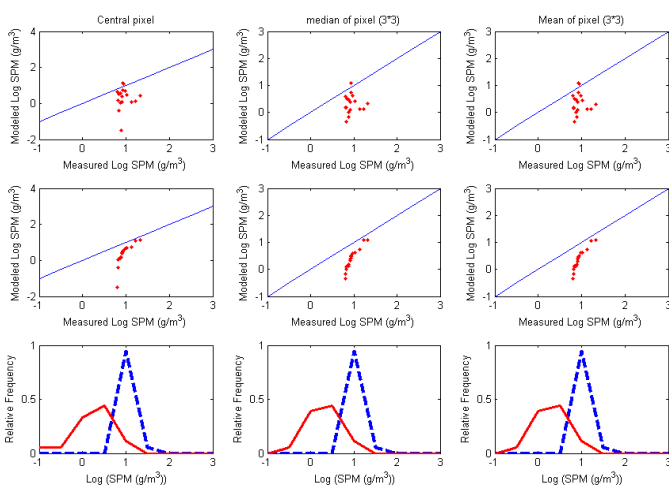
### MEGS



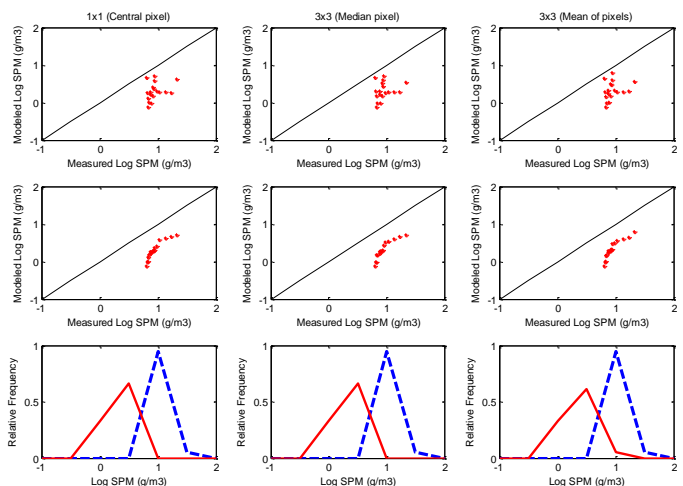
### C2R



### FUB\WeW



### ALM



شکل ۵-۸- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل های معکوس به کمک داده میدانی میانگین عمقی SPM، الف) نمودار پراکندگی (سطر اول هر بخش) و ب) نمودار q-q (سطر دوم هر بخش)، داده های SPM مدل شده در مقابل داده های میانگین عمقی SPM، ج) نمودار فراوانی نسبی (سطر سوم هر بخش) مقادیر میدانی میانگین عمقی SPM (خط چین) به همراه مقادیر SPM مدل سازی



جدول ۵-۲۲- خلاصه نتایج آماری ارزیابی دقت ۴ مدل معکوس برای مدل سازی میانگین عمقی SPM در سه حالت

پیکسلی مختلف، به همراه نتایج روش امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی

	MAPE (Score)	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
ESA (Central pixel)	306.26(1)	39.18(1)	23.68(1)	0.45(1)	1	1	1	7	3
ESA (median pixel)	304.66(2)	38.81(2)	23.26(2)	0.45(1)	1	1	1	10	2
ESA (mean of pixels)	274.49(3)	35.36(3)	21.29(3)	0.45(1)	1	1	1	13	1
C2R (Central pixel)	63.22(2)	7.8(1)	-6.01(1)	-0.14(1)	1	1	3	9	2
C2R (median pixel)	63.77(1)	7.8(1)	-6.01(1)	-0.15(2)	1	1	2	9	2
C2R (mean of pixels)	62.73(3)	7.8(1)	-6.01(1)	-0.17(3)	1	1	1	11	1
FUB/WeW (Central pixel)	69.42(2)	8.1(1)	-5.89(2)	-0.08(1)	1	1	1	9	3
FUB/WeW (median pixel)	69.63(1)	8.1(1)	-6.1(1)	-0.1(2)	2	2	2	11	2
FUB/WeW (mean of pixels)	68.85(3)	8.1(1)	-6.1(1)	-0.1(2)	2	2	2	13	1
ALM (Central pixel)	73.52(1)	7.8(1)	-7.11(1)	0.27(3)	1	1	1	9	2
ALM (median pixel)	72.63(2)	7.8(1)	-7.06(2)	0.21(1)	1	1	1	9	2
ALM (mean of pixels)	71.75(3)	7.8(1)	-6.98(3)	0.22(2)	1	1	1	12	1

همان طور که نتایج رتبه بندی در جدول ۵-۲۲ نشان می دهد میانگین جعبه پیکسلی 3x3 به عنوان

بهترین حالت پیکسلی برای مقایسه مقادیر مدل سازی شده و میدانی SPM انتخاب می شود. نتایج

رتبه بندی و انتخاب بهترین مدل معکوس برای مدل سازی میانگین عمقی SPM در جدول ۵-۲۳

نشان داده شده است. با توجه به نتایج رتبه بندی ارائه شده در این جدول، ALM به عنوان بهترین

مدل معکوس برای مدل سازی SPM در دریای خزر انتخاب می شود و دو مدل C2R و FUB\WeW

نیز بهتر از MEGS به نظر می رسند

جدول ۵-۲۳- نتایج آماری ارزیابی عملکرد چهار مدل معکوس برای مدل سازی میانگین عمقی SPM به همراه نتایج

امتیاز دهی به معیارهای آماری و گرافیکی

	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
ESA (mean of pixels)	35.36(1)	21.29(1)	0.45(4)	1	1	1	9	4
C2R (mean of pixels)	7.8(3)	-6.01(4)	-0.17(2)	3	3	2	17	2
FUB/WeW (mean of pixels)	8.1(2)	-6.1(3)	-0.1(1)	2	2	3	13	3
ALM (mean of pixels)	7.8(3)	-6.98(2)	0.22(3)	4	4	4	20	1

## ۵-۲-۵-۲-ارزیابی دقت مدل‌های معکوس با پیش پردازش ICOL

از آنجایی که قسمت عمده‌ای از نمونه برداری‌های میدانی انجام شده در دریای خزر، در شعاع کمتر از ۱۰ کیلومتری ساحل انجام شده است. این مناطق عمدتاً در تصاویر ماهواره‌ای تحت تاثیر تشعشعات مزاحم انعکاسی از خشکی‌های مجاور (سواحل) قرار می‌گیرند. این امر می‌تواند باعث ایجاد خطا در فرآیند مدل‌سازی معکوس و به دنبال آن کاهش دقت مدل‌سازی پارامترهای کیفی توسط مدل‌های معکوس گردد. در تصاویر MERIS برای تصحیح اثرات این تشعشعات مزاحم از پردازشگر ICOL استفاده می‌شود. در این بخش ابتدا اثرات مجاورتی در تصاویر سطح یک با استفاده از پردازشگر ICOL تصحیح و سپس پارامترهای کیفی توسط مدل‌های معکوس (پردازشگرها) FUB\WeW, C2R, ALM و هیبرید ALM-ANN از تصاویر تصحیح شده سطح یک (Level 1c) استخراج شد. هدف اصلی این قسمت بررسی میزان تاثیر پیش پردازش ICOL بر بهبود دقت مدل‌سازی چهار مدل معکوس فوق الذکر در دریای خزر است. برای این کار معیارهای آماری و گرافیکی، پارامترهای کیفی استخراجی از چهار مدل معکوس فوق الذکر، در دو حالت بدون پیش پردازش و با پیش پردازش ICOL با هم قیاس شده و نتیجه قیاس، وضعیت پیش پردازش ICOL را بر دقت مدل‌سازی مدل‌ها مشخص خواهد کرد. برای این قسمت تنها ارزیابی بر اساس پیکسل مرکزی انجام می‌شود.

## ۵-۲-۵-۱-ارزیابی کلروفیل a-سطحی

نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی عملکرد چهار مدل معکوس FUB\WeW, C2R, ALM و هیبرید ALM-ANN به منظور استخراج کلروفیل a-سطحی از تصاویر سطح یک، با و بدون پیش پردازش ICOL در جدول ۲۴-۵ و شکل ۹-۵ نشان داده شده است.

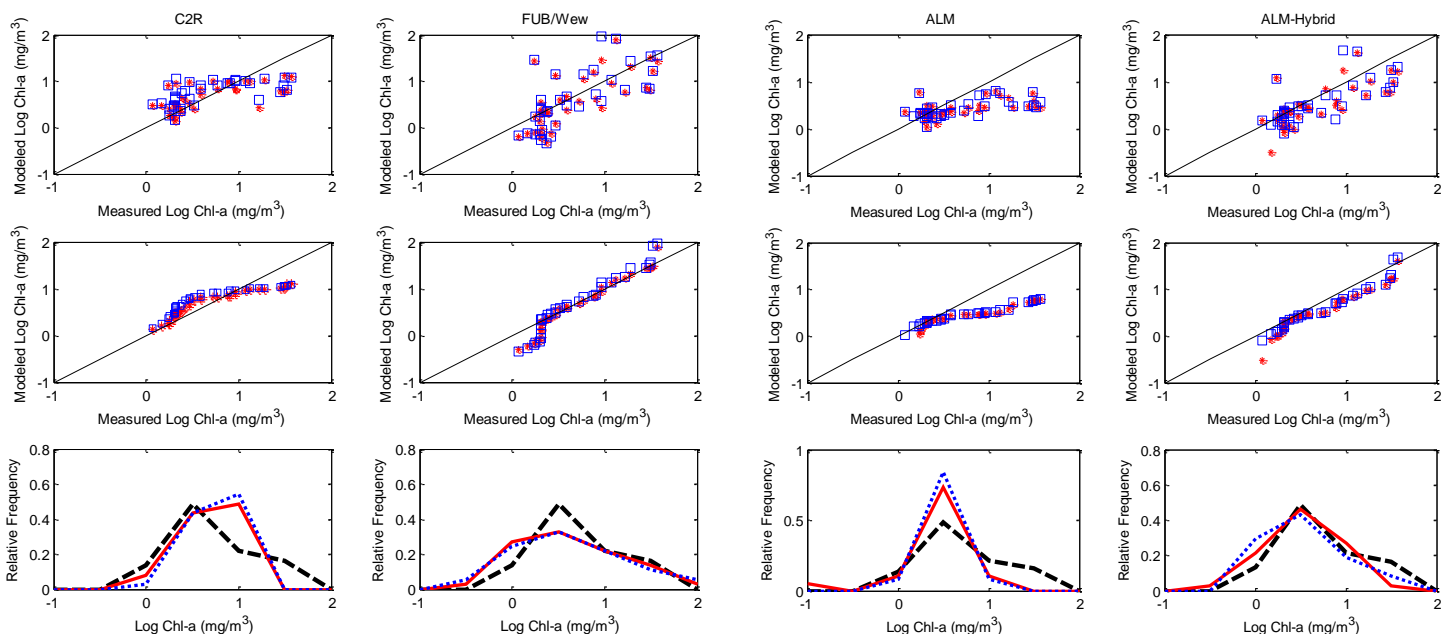
در مورد مدل‌های معکوس C2R و FUB\WeW نتایج گرافیکی تغییر چندانی را بین استفاده از مقادیر مدل شده کلروفیل a- با پیش پردازش ICOL و بدون پیش پردازش ICOL نشان نمی‌دهد. البته نتایج آماری ارائه شده در جدول ۲۴-۵ نشان دهنده آن است که پیش پردازش ICOL باعث افزایش خطای

مدل‌سازی کلروفیل-a در هر دو مدل معکوس C2R و FUB\WeW شده است. در مدل ALM و هیبرید ALM-ANN با وجود اینکه مقادیر کلروفیل-a مدل شده با پیش پردازش ICOL در نمودار q-q برای کران پایین غلظت کلروفیل-a رفتار بهتری نشان می‌دهند ولی به طور کلی تفاوت چندانی در نمودارهای گرافیکی این دو حالت دیده نمی‌شود. در نتایج آماری ارزیابی این دو مدل نیز، در مورد مدل هیبرید ALM-ANN می‌توان گفت پیش پردازش ICOL کلاً تأثیری بر دقت مدل‌سازی نداشته است البته این شرایط در مورد مدل ALM کمی متفاوت است تمام پارامترهای آماری بیانگر کاهش خطای مدل‌سازی کلروفیل-a با استفاده از تصاویر سطح یک با پیش پردازش ICOL است.

جدول ۵-۲۴- نتایج آماری ارزیابی مدل‌های معکوس به منظور استخراج کلروفیل-a سطحی با استفاده از تصاویر

Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL

Parameter	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
C2R (Chl-a without ICOL)	68.58	63.36	9.30	0.35	-2.80	0.00	0.54	0.63
C2R (Chl-a with ICOL)	86.05	74.02	9.35	0.36	-2.06	0.07	0.48	0.61
FUB/WeW (Chl-a without ICOL)	107.01	76.28	13.65	0.41	0.78	-0.09	0.43	0.72
FUB/WeW (Chl-a with ICOL)	130.34	80.67	19.34	0.44	3.30	-0.06	0.36	0.71
ALM (Chl-a without ICOL)	51.80	56.42	11.29	0.45	-5.66	-0.25	0.41	0.56
ALM (Chl-a with ICOL)	48.90	53.01	11.25	0.45	-5.65	-0.25	0.43	0.59
Hybrid ALM-ANN (Chl-a without ICOL)	57.48	46.49	9.76	0.34	-2.90	-0.14	0.48	0.75
Hybrid ALM-ANN (Chl-a with ICOL)	63.92	46.43	11.28	0.35	-1.88	-0.13	0.41	0.73



شکل ۵-۹- نتایج گرافیکی ارزیابی چهار مدل معکوس C2R (ستون اول - چپ)، مدل معکوس FUB\WeW (ستون دوم)، مدل معکوس ALM (ستون سوم) و مدل معکوس هیبرید ALM-ANN (ستون چهارم) با استفاده از مقادیر کلروفیل-a سطحی؛ الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و ب) نمودار q-q (سطر دوم) مقادیر کلروفیل-a سطحی در مقابل مقادیر مدل شده کلروفیل-a با پیش پردازش ICOL (مربع) و بدون پیش پردازش ICOL (ستاره)؛ ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر میدانی کلروفیل-a سطحی (خط چین) به همراه مقادیر کلروفیل-a مدل‌سازی با (نقطه چین) و بدون (خط پر) پیش پردازش ICOL

## ۵-۲-۲-۲- ارزیابی رنگدانه کل سطحی

نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی عملکرد چهار مدل معکوس C2R، FUB\WeW، ALM و هیبرید ALM-ANN، به منظور استخراج رنگدانه کل سطحی از تصاویر سطح یک، با و بدون پیش پردازش ICOL در جدول ۵-۲۵ و شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است. دقیقاً مشابه قبل، تفاوت چندانی بین دو نوع کلروفیل-a مدل سازی شده با و بدون پیش پردازش ICOL در پارامترهای گرافیکی دو مدل معکوس C2R و FUB\WeW دیده نمی‌شود. اما نتایج آماری ارائه شده در جدول ۵-۲۵ نشان می‌دهد که پیش پردازش ICOL در اکثر پارامترهای آماری باعث کاهش خطای مدل سازی C2R شده است. این شرایط در مورد مدل FUB\WeW کاملاً بر عکس می‌باشد، استفاده از تصاویر دارای پیش پردازش ICOL باعث افزایش خطای مدل سازی شده است.

جدول ۵-۲۵- نتایج آماری ارزیابی مدل‌های معکوس به منظور استخراج رنگدانه کل سطحی با استفاده از تصاویر

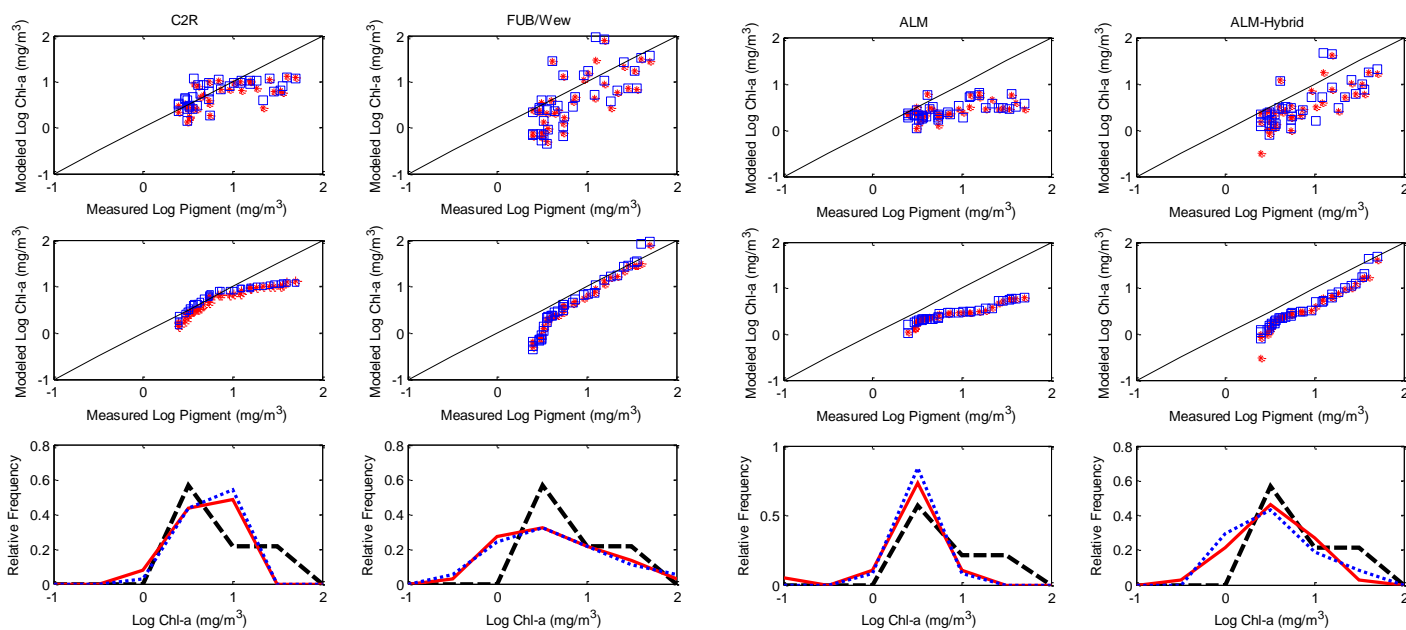
Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL

Parameter	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
C2R (Chl-a without ICOL)	43.88	29.08	12.07	0.35	-5.75	-0.19	0.59	0.66
C2R (Chl-a with ICOL)	46.8	28.12	11.94	0.33	-5.01	-0.12	0.58	0.63
FUB/WeW( Chl-a without ICOL)	80.65	57.98	14.44	0.49	-2.17	-0.27	0.44	0.71
FUB/WeW (Chl-a with ICOL)	95	59.32	19.33	0.51	0.34	-0.24	0.37	0.7
ALM (Chl-a without ICOL)	55.71	47.10	14.59	0.55	-8.61	-0.44	0.41	0.56
ALM (Chl-a with ICOL)	56.45	47.76	14.54	0.54	-8.60	-0.44	0.44	0.60
Hybrid ALM-ANN (Chl-a without ICOL)	60.50	47.64	12.30	0.43	-5.85	-0.33	0.49	0.74
Hybrid ALM-ANN (Chl-a with ICOL)	66.86	48.80	13.18	0.44	-4.83	-0.31	0.42	0.73

در مورد مدل ALM و هیبرید ALM-ANN نیز تقریباً مشابه قبل پارامترهای گرافیکی دو نوع کلروفیل-a با و بدون پیش پردازش ICOL کاملاً مشابه است. البته این بار نیز در نمودار q-q مدل هیبرید ALM-ANN، استفاده از تصاویر دارای پیش پردازش ICOL باعث بهبود دقت مدل، در کران پایین داده‌های غلظت رنگدانه کل سطحی شده است. نتایج ارزیابی آماری این دو مدل نیز تقریباً مشابه قبل است، دوباره استفاده از تصاویر دارای پیش پردازش ICOL باعث بهبود دقت مدل سازی ALM شده است، این وضع در مورد مدل هیبرید ALM-ANN، خیلی قابل ملاحظه نیست کاهش خطای در یک پارامتر با افزایش خطا در پارامتر آماری دیگر همراه بوده است به طوری که روی هم

رفته می‌توان گفت پیش پردازش ICOL تاثیر چندانی بر دقت مدل‌سازی رنگدانه کل توسط مدل

هیبرید ALM-ANN نداشته است.



شکل ۵-۱۰- نتایج گرافیکی ارزیابی چهار مدل معکوس C2R (ستون اول-چپ)، مدل معکوس FUB\WeW (ستون دوم)، مدل معکوس ALM (ستون سوم) و مدل معکوس هیبرید ALM-ANN با استفاده از مقادیر رنگدانه کل سطحی؛ الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و ب) نمودار q-q (سطر دوم) مقادیر رنگدانه کل سطحی در مقابل مقادیر مدل شده کلروفیل-a با پیش پردازش ICOL (مربع) و بدون پیش پردازش ICOL (ستاره)؛ ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر میدانی رنگدانه کل سطحی (خط چین) به همراه مقادیر کلروفیل-a مدل‌سازی با (نقطه چین) و بدون (خط پر) پیش پردازش ICOL

### ۵-۲-۳- ارزیابی میانگین عمقی کلروفیل-a

نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی عملکرد چهار مدل معکوس C2R, FUB\WeW, ALM و هیبرید

ALM-ANN, به منظور استخراج میانگین عمقی کلروفیل-a از تصاویر سطح یک، با و بدون پیش

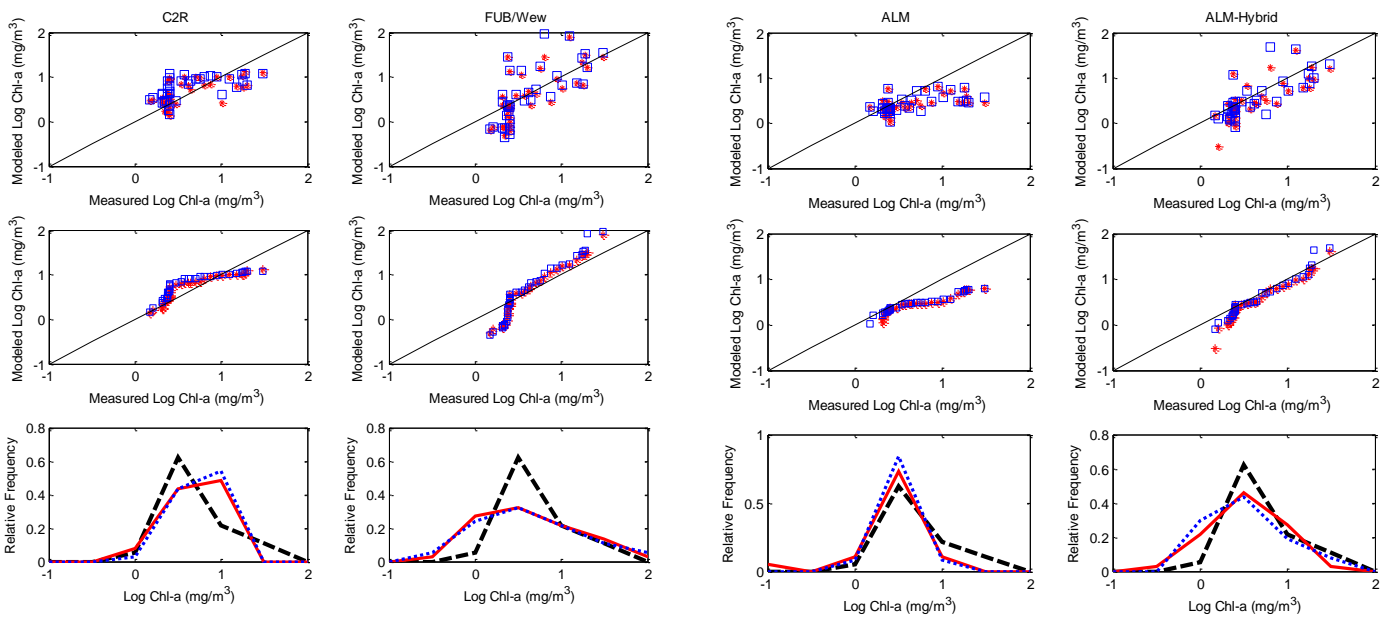
پردازش ICOL در جدول ۵-۲۶ و شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۵-۲۶- نتایج آماری ارزیابی مدل‌های معکوس به منظور استخراج مقادیر میانگین عمقی کلروفیل-a با استفاده

از تصاویر Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL

Parameter	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
C2R (Chl-a without ICOL)	66.84	48.87	5.52	0.29	-0.68	0.04	0.59	0.62
C2R (Chl-a with ICOL)	84.76	57.83	5.75	0.31	0.06	0.11	0.53	0.59
FUB/WeW (Chl-a without ICOL)	107.94	69.64	12.82	0.4	2.9	-0.04	0.5	0.72
FUB/WeW (Chl-a with ICOL)	141.36	74.27	19.18	0.45	5.42	-0.01	0.42	0.71
ALM (Chl-a without ICOL)	41.42	39.10	7.28	0.37	-3.54	-0.21	0.39	0.56
ALM (Chl-a with ICOL)	40.29	37.97	7.22	0.36	-3.53	-0.21	0.42	0.58
Hybrid ALM-ANN (Chl-a without ICOL)	53.81	39.65	6.85	0.28	-0.78	-0.10	0.55	0.77
Hybrid ALM-ANN (Chl-a with ICOL)	62.82	39.11	9.31	0.30	0.24	-0.09	0.46	0.75

نتایج گرافیکی دقیقاً مشابه بخش قبل می‌باشد. پیش پردازش ICOL تنها باعث بهبود جزئی رفتار مدل ALM و هیبرید ALM-ANN در کران پایین غلظت کلروفیل-a در نمودارهای q-q شده است. نتایج آماری نیز بیانگر آن است که تنها در مدل ALM به طور یقین استفاده از تصاویر سطح یک با پیش پردازش ICOL باعث کاهش خطای مدل‌سازی می‌شود. این وضعیت در مدل‌های دیگر کاملاً عکس می‌باشد و شاهد افزایش خطای مدل‌سازی با پیش پردازش ICOL هستیم.



شکل ۵-۱۱- نتایج گرافیکی ارزیابی چهار مدل معکوس C2R (ستون اول- چپ)، مدل معکوس FUB\WeW (ستون دوم)، مدل معکوس ALM (ستون سوم) و مدل معکوس هیبرید ALM-ANN با استفاده از مقادیر میانگین عمقی کلروفیل-a؛ الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و ب) نمودار q-q (سطر دوم) مقادیر میانگین عمقی کلروفیل-a در مقابل مقادیر مدل شده کلروفیل-a با پیش پردازش ICOL (مربع) و بدون پیش پردازش ICOL (ستاره؛ ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر میدانی میانگین عمقی کلروفیل-a (خط چین) به همراه مقادیر کلروفیل-a مدل‌سازی با (نقطه چین) و بدون (خط پر) پیش پردازش ICOL

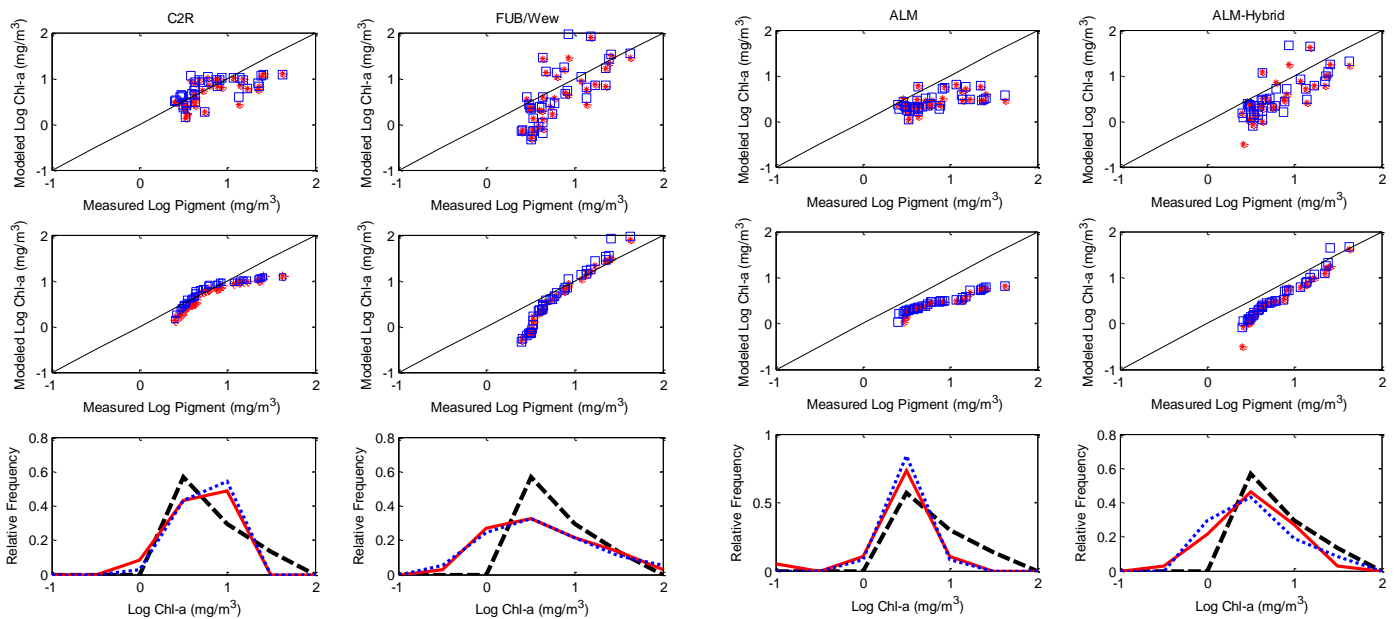
## ۵-۲-۴- ارزیابی میانگین عمقی رنگدانه کل

نتایج آماری و گرافیکی عملکرد چهار مدل معکوس C2R، FUB\WeW، ALM و هیبرید ALM-ANN، به منظور استخراج میانگین عمقی رنگدانه کل از تصاویر سطح یک، با و بدون پیش پردازش ICOL در جدول ۵-۲۷ و شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۵-۲۷- نتایج آماری ارزیابی مدل‌های معکوس به منظور استخراج مقادیر میانگین عمقی رنگدانه کل با استفاده

از تصاویر Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL

Parameter	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
C2R (Chl-a without ICOL)	41.11	27.31	7.72	0.29	-3.21	-0.13	0.63	0.66
C2R (Chl-a with ICOL)	45.11	27.05	7.7	0.27	-2.47	-0.06	0.57	0.63
FUB/WeW( Chl-a without ICOL)	85.02	59.19	12.65	0.46	0.37	-0.22	0.49	0.73
FUB/WeW( Chl-a with ICOL)	106.48	61.02	18.61	0.49	2.88	-0.19	0.41	0.72
ALM (Chl-a without ICOL)	53.36	45.79	10.24	0.47	-6.07	-0.39	0.37	0.55
ALM (Chl-a with ICOL)	53.27	45.60	10.17	0.47	-6.06	-0.38	0.41	0.59
Hybrid ALM-ANN (Chl-a without ICOL)	58.83	46.39	8.52	0.38	-3.31	-0.27	0.53	0.76
Hybrid ALM-ANN (Chl-a with ICOL)	67.56	47.43	10.24	0.39	-2.29	-0.26	0.45	0.75



شکل ۵-۱۲- نتایج گرافیکی ارزیابی چهار مدل معکوس C2R (ستون اول-چپ)، مدل معکوس FUB\WeW (ستون دوم)، مدل معکوس ALM (ستون سوم) و مدل معکوس هیبرید ALM-ANN با استفاده از مقادیر میانگین عمقی رنگدانه کل؛ الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و ب) نمودار q-q (سطر دوم) مقادیر میانگین عمقی رنگدانه کل در مقابل مقادیر مدل شده کلروفیل-a با پیش پردازش ICOL (مربع) و بدون پیش پردازش ICOL (ستاره); ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر میدانی میانگین عمقی رنگدانه کل (خط چین) به همراه مقادیر کلروفیل-a مدل سازی با (نقطه چین) و بدون (خط پر) پیش پردازش ICOL

با توجه به نتایج آماری و گرافیکی بدست آمده می‌توان نتیجه گیری‌های نمود که در دو مدل هیبرید ALM-ANN و C2R، به طور کلی پیش پردازش ICOL تاثیری بر دقت مدل سازی نداشته است در مدل معکوس ALM، مشابه قبل پیش پردازش باعث بهبود دقت مدل و در مدل FUB\WeW باعث افزایش خطا و کاهش دقت مدل سازی شده است. در اینجا به طور کلی در مورد مدل سازی کلروفیل-a و رنگدانه کل (در هر دو حالت سطحی و میانگین عمقی) توسط این چهار مدل معکوس می‌توان به

طور خلاصه نتیجه گیری نمود که پیش پردازش ICOL تنها در مدل معکوس ALM باعث بهبود نتایج مدل سازی و افزایش دقت مدل شده است و در بقیه مدل ها یا باعث افزایش خطا و کاهش دقت مدل سازی و یا تاثیری بر دقت مدل سازی نداشته است.

### ۵-۲-۵-۵- ارزیابی CDOM سطحی

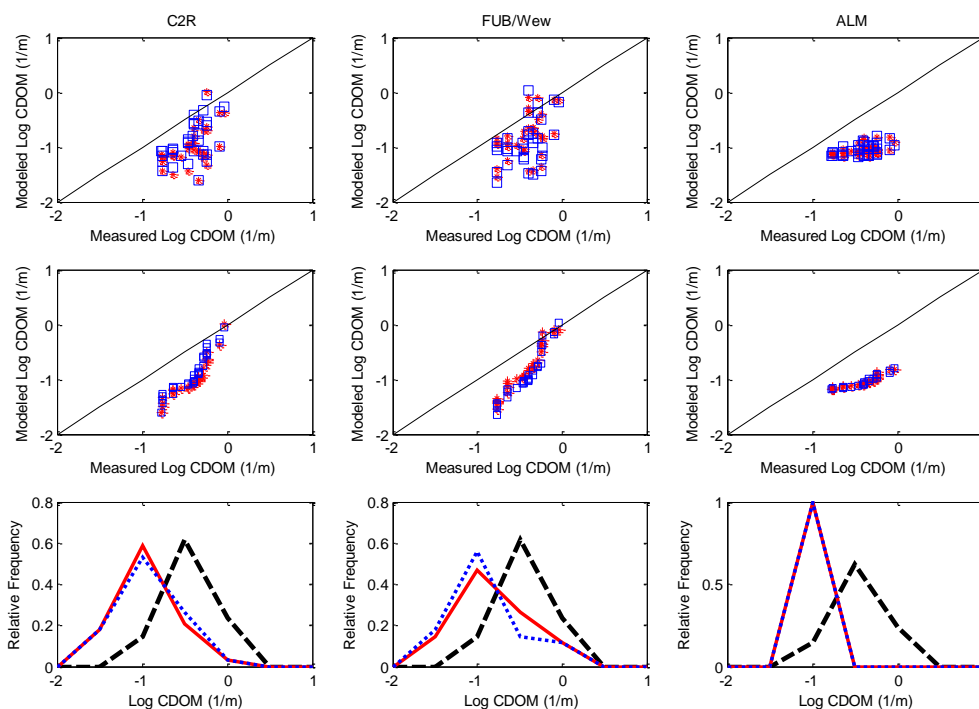
مشابه کلروفیل-a و رنگدانه کل، دقت مدل سازی CDOM سطحی توسط سه مدل معکوس C2R، FUB\WeW و ALM در دو حالت استفاده از تصاویر سطح یک، با و بدون پیش پردازش ICOL مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آماری و گرافیکی این ارزیابی در جدول ۵-۲۸ و شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. در بخش نتایج گرافیکی، در مورد ALM و C2R تفاوت چندانی بین معیارهای گرافیکی دو نوع CDOM مدل شده (با و بدون پیش پردازش ICOL) دیده نمی شود در مورد مدل FUB\WeW به نظر می رسد مقادیر CDOM مدل شده با استفاده از تصاویر دارای پیش پردازش ICOL از ارزیابی بیشتر نسبت به مقادیر CDOM مدل شده بدون پیش پردازش ICOL برخوردار هستند. همچنین شکل فراوانی نسبی مقادیر CDOM مدل شده با پیش پردازش ICOL نسبت به شکل فراوانی نسبی مقادیر CDOM بدون پیش پردازش ICOL (با توجه به شکل فراوانی نسبی CDOM میدانی) کمی بدتر شده است. در بخش نتایج آماری، همان طور که به روشنی قابل مشاهده می باشد در بین این سه مدل، پیش پردازش ICOL تنها باعث بهبود دقت مدل سازی CDOM توسط مدل معکوس C2R شده است در مورد ALM به طور کلی تاثیر قابل ملاحظه ای بین استفاده از تصاویر سطح یک با و بدون پیش پردازش ICOL بر دقت مدل سازی دیده نمی شود. بر عکس در مدل معکوس FUB\WeW پیش پردازش ICOL بدون استثنا در تمام پارامترهای آماری باعث افزایش میزان خطای مدل سازی شده است.



جدول ۵-۲۸- نتایج آماری ارزیابی مدل‌های معکوس به منظور استخراج مقادیر سطحی CDOM با استفاده از تصاویر

Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL

Parameter	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
C2R (CDOM without ICOL)	70.73	206.87	0.33	0.64	-0.27	-0.57	0.48	0.55
C2R (CDOM with ICOL)	61.69	173.65	0.30	0.57	-0.24	-0.48	0.53	0.56
FUB/WeW (CDOM without ICOL)	56.63	139.24	0.28	0.52	-0.19	-0.38	0.49	0.48
FUB/WeW (CDOM with ICOL)	64.65	169.64	0.32	0.61	-0.22	-0.49	0.44	0.46
ALM (CDOM without ICOL)	74.00	275.54	0.37	0.65	-0.33	-0.62	0.48	0.49
ALM (CDOM with ICOL)	74.49	280.77	0.37	0.65	-0.33	-0.63	0.49	0.51



شکل ۵-۱۳- نتایج گرافیکی ارزیابی سه مدل معکوس C2R (ستون اول)، FUB\WeW (ستون دوم) و ALM (ستون سوم) با استفاده از مقادیر سطحی CDOM (الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و (ب) نمودار q-q (سطر دوم)، مقادیر سطحی CDOM در مقابل مقادیر مدل شده CDOM با پیش پردازش ICOL (مربع) و بدون پیش پردازش ICOL (ستاره)؛ (ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر سطحی CDOM (خط چین) به همراه مقادیر CDOM مدل سازی با (نقطه چین) و بدون (خط پر) پیش پردازش ICOL

### ۵-۲-۶- ارزیابی میانگین عمقی CDOM

نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی عملکرد سه مدل معکوس C2R، FUB\WeW و ALM به منظور

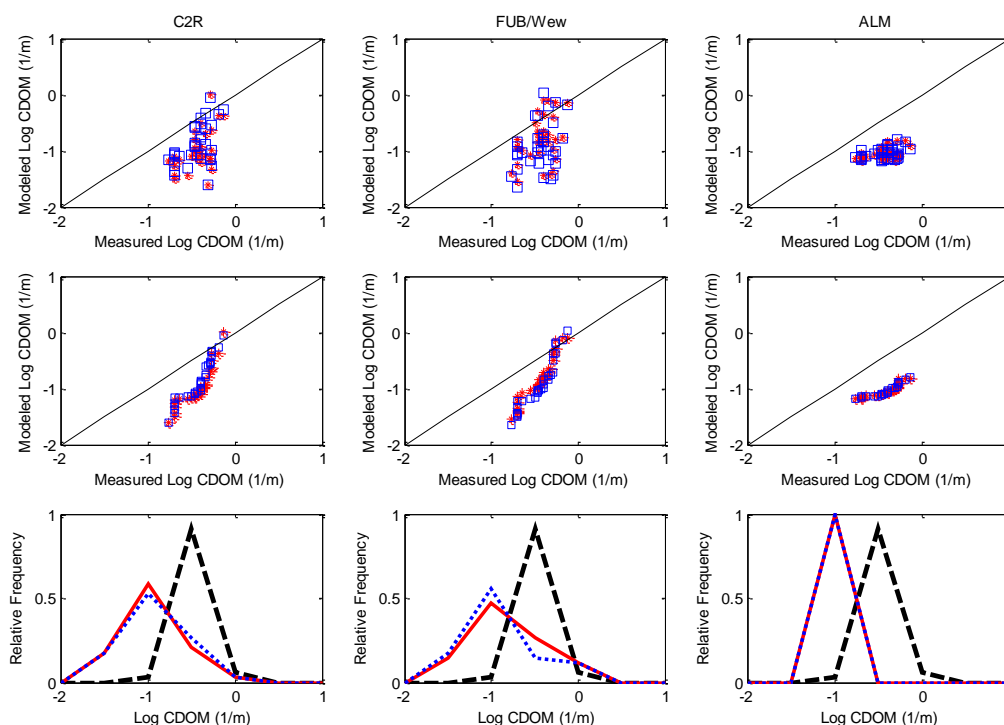
استخراج میانگین عمقی CDOM از تصاویر سطح یک، با و بدون پیش پردازش ICOL در جدول ۵-۵

۲۹ و شکل ۵-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۵-۲۹- نتایج آماری ارزیابی مدل‌های معکوس به منظور استخراج مقادیر میانگین عمقی CDOM با استفاده از

تصاویر Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL

Parameter	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
C2R (CDOM without ICOL)	69.70	148.68	0.29	0.62	-0.24	-0.55	0.47	0.52
C2R (CDOM with ICOL)	60.08	124.07	0.26	0.56	-0.21	-0.46	0.52	0.53
FUB/WeW (CDOM without ICOL)	56.89	112.22	0.26	0.51	-0.15	-0.36	0.40	0.40
FUB/WeW (CDOM with ICOL)	66.32	139.61	0.30	0.61	-0.19	-0.47	0.33	0.36
ALM (CDOM without ICOL)	73.42	174.02	0.32	0.62	-0.30	-0.60	0.44	0.44
ALM CDOM with ICOL	73.89	176.15	0.32	0.62	-0.30	-0.61	0.47	0.45



شکل ۵-۱۴- نتایج گرافیکی ارزیابی سه مدل معکوس C2R (ستون اول)، FUB\WeW (ستون دوم) و ALM (ستون سوم) با استفاده از مقادیر میانگین عمقی CDOM (الف؛ نمودار پراکندگی (سطر اول) و ب) نمودار q-q (سطر دوم)، مقادیر میانگین عمقی CDOM در مقابل مقادیر مدل شده CDOM با پیش پردازش ICOL (مربع) و بدون پیش پردازش ICOL (ستاره؛ ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر میانگین عمقی CDOM (خط چین) به همراه مقادیر CDOM مدل سازی با نقطه چین) و بدون (خط پر) پیش پردازش ICOL

بر اساس نتایج آماری و گرافیکی بدست آمده بار دیگر می توان بر نتایج بخش قبل (CDOM سطحی) تاکید کرد که در این سه مدل تنها پیش پردازش ICOL باعث بهبود دقت مدل سازی مدل C2R شده است. در مورد مدل ALM نیز به طور کلی تغییر قابل ملاحظه‌ای بین استفاده از تصاویر با و بدون پیش پردازش ICOL در مدل سازی CDOM دیده نمی شود. در مدل FUB\WeW مشابه قبل پیش پردازش ICOL باعث کاهش دقت مدل سازی و افزایش خطای مدل سازی CDOM شده است.

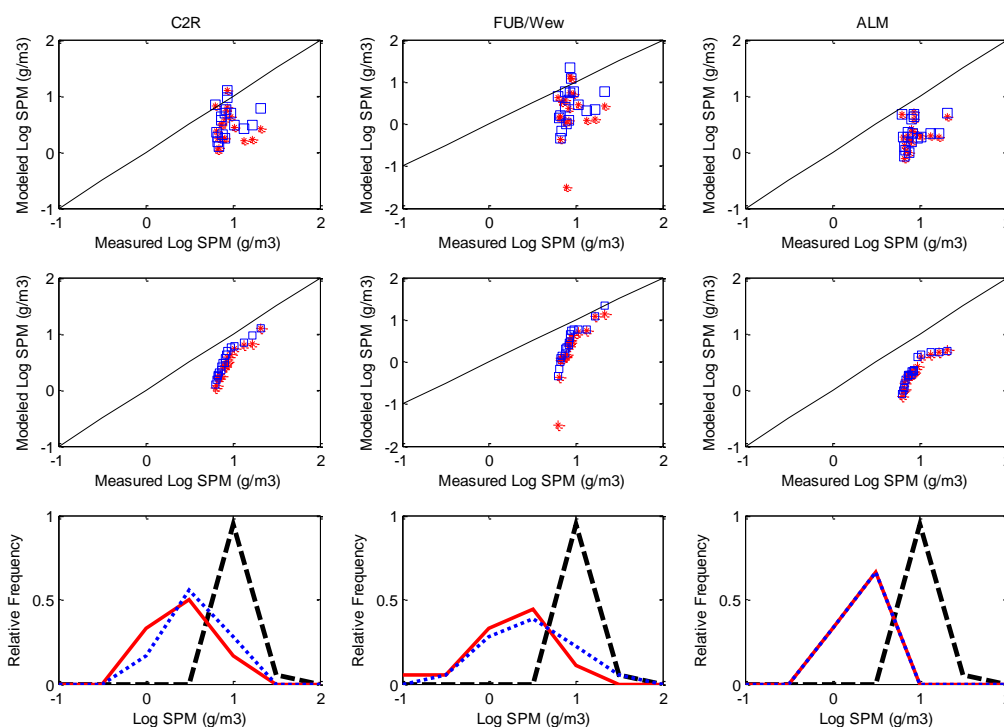
## ۵-۲-۷- ارزیابی میانگین عمقی SPM

نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی عملکرد سه مدل معکوس C2R، FUB\WeW و ALM به منظور استخراج میانگین عمقی SPM از تصاویر سطح یک، با و بدون پیش پردازش ICOL به ترتیب در جدول ۳۰-۵ و شکل ۱۵-۵ نشان داده شده است.

جدول ۳۰-۵- نتایج آماری ارزیابی مدل‌های معکوس به منظور استخراج مقادیر میانگین عمقی SPM با استفاده از

تصاویر Level 1 با و بدون پیش پردازش ICOL

Parameter	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
C2R (SPM without ICOL)	63.22	53.51	7.75	0.59	-5.89	-0.50	-0.14	-0.08
C2R (SPM with ICOL)	57.74	45.24	6.92	0.49	-5.13	-0.40	0.08	0.22
FUB/WeW (SPM without ICOL)	69.42	72.71	8.06	0.87	-5.89	-0.65	-0.08	0.08
FUB/WeW (SPM with ICOL)	69.98	59.58	7.88	0.64	-4.96	-0.50	0.04	0.25
ALM (SPM without ICOL)	73.52	68.11	8.02	0.68	-7.11	-0.64	0.27	0.32
ALM (SPM with ICOL)	72.53	66.40	7.86	0.66	-6.99	-0.62	0.36	0.37

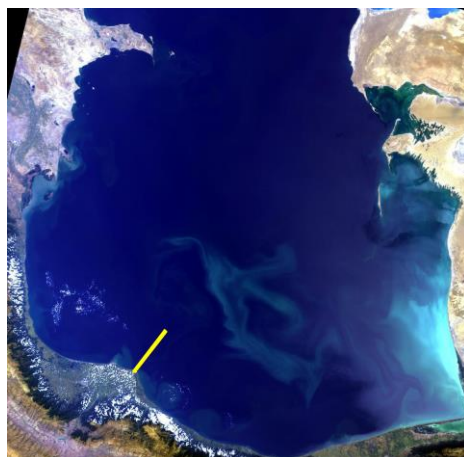


شکل ۱۵-۵- نتایج گرافیکی ارزیابی سه مدل معکوس C2R (ستون اول)، FUB\WeW (ستون دوم) و ALM (ستون سوم) با استفاده از مقادیر میانگین عمقی SPM؛ الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و ب) نمودار q-q (سطر دوم)، مقادیر میانگین عمقی SPM در مقابل مقادیر مدل شده SPM با پیش پردازش ICOL (مربع) و بدون پیش پردازش ICOL (ستاره)؛ ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر میانگین عمقی SPM (خط چین) به همراه مقادیر SPM مدل سازی با (نقطه چین) و بدون (خط پر) پیش پردازش ICOL

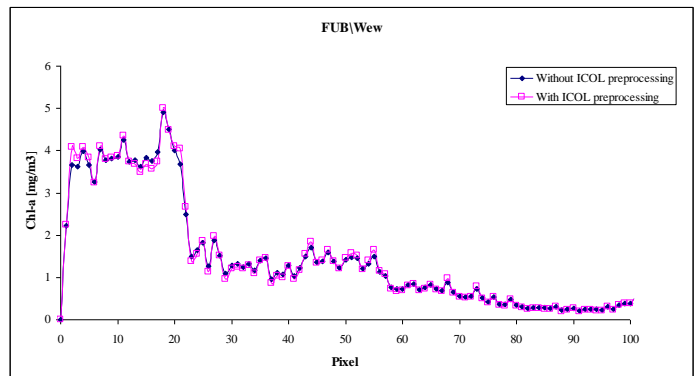
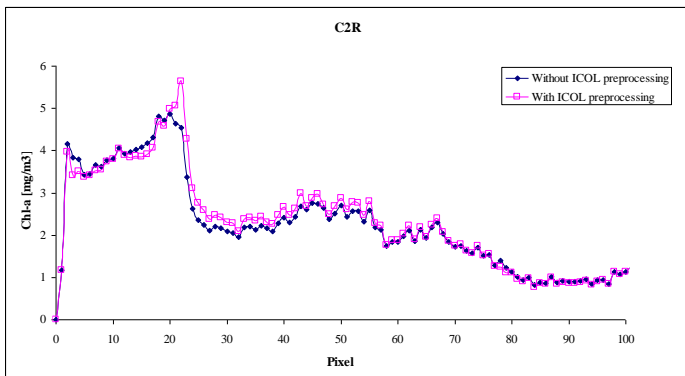
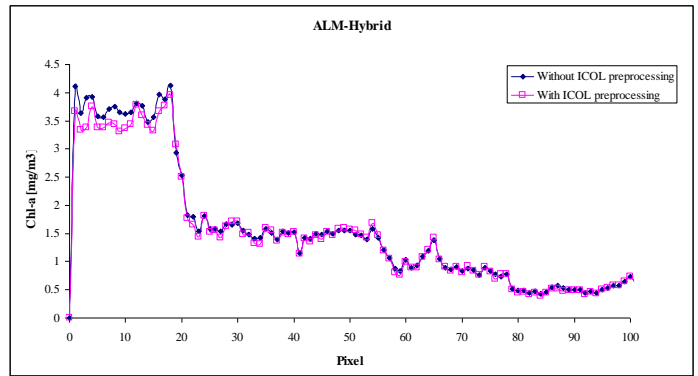
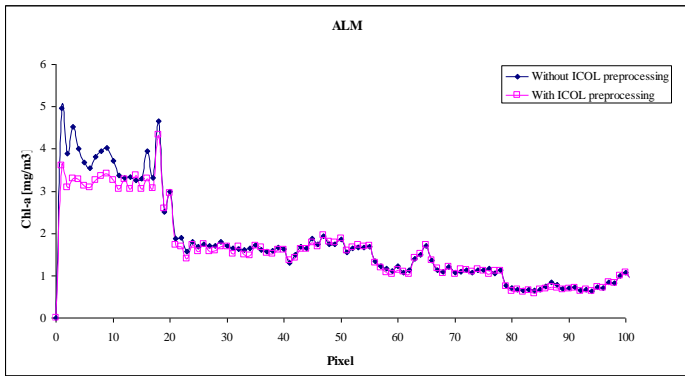
در مدل معکوس C2R، نتایج گرافیکی و آماری نشان دهنده آن است که استفاده از تصاویر دارای پیش پردازش ICOL باعث بهبود دقت و عملکرد این مدل شده است. این نتیجه گیری در مورد مدل معکوس FUB\WeW نیز صادق است. در این مدل، نتایج گرافیکی نشان دهنده آن است که پیش پردازش ICOL باعث افزایش دقت مدل سازی در دو کران بالا و پایین غلظت SPM شده است. در بخش نتایج ارزیابی آماری این مدل نیز کاهش میزان خطا کاملاً مشخص است. در مورد مدل معکوس ALM، پارامترهای گرافیکی دو حالت، کاملاً مشابه به نظر می‌رسند. و تنها در پارامترهای آماری شاهد بهبود جزئی نتایج مدل سازی با استفاده از تصاویر دارای پیش پردازش ICOL هستیم.

#### ۵-۲-۸- اثرات پردازشگر ICOL در مناطق ساحلی

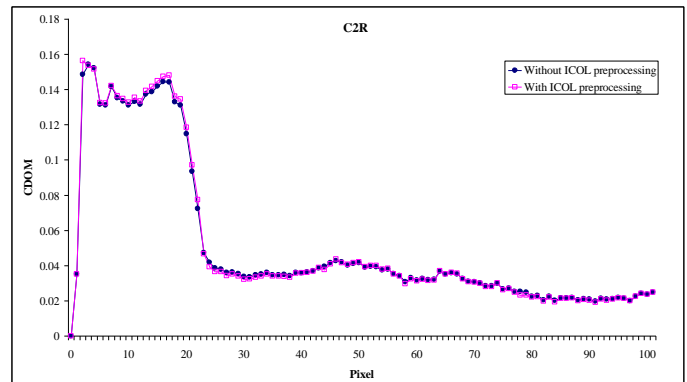
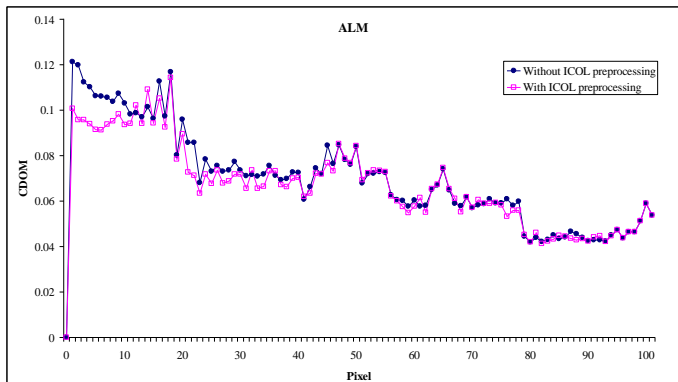
برای درک چگونگی رفتار و دامنه تاثیر این پردازشگر بر بازیابی پارامترهای کیفی در مناطق ساحلی، عملکرد چهار مدل معکوس C2R، FUB\WeW، ALM و هیبرید ALM-ANN در راستای یک مقطع عرضی عمود بر ساحل، با استفاده از دو تصویر سطح یک، دارای پیش پردازش ICOL و فاقد پیش پردازش مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۵-۱۶ تصویر MERIS FR-L1b مربوط به ۱۶ آگوست ۲۰۰۵ به همراه یک مقطع عرضی نشان داده شده است. تغییرات غلظت پارامترهای کیفی Chl-a، SPM و CDOM استخراجی از چهار مدل معکوس مذکور در دو حالت با و بدون پیش پردازش ICOL در راستای این مقطع عرضی در شکل های ۵-۱۷ تا ۵-۱۹ نشان داده شده است.

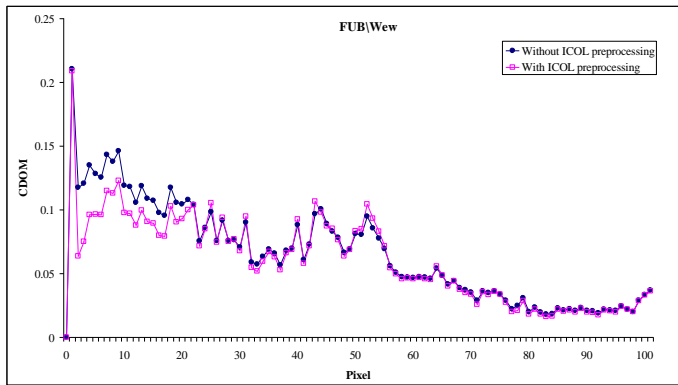


شکل ۵-۱۶ تصویر ترکیب رنگی MERIS FR-L1b مربوط به ۱۶ آگوست ۲۰۰۵ به همراه موقعیت مقطع عرضی

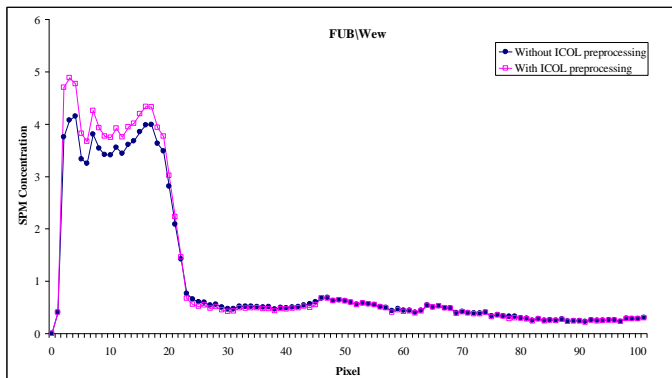
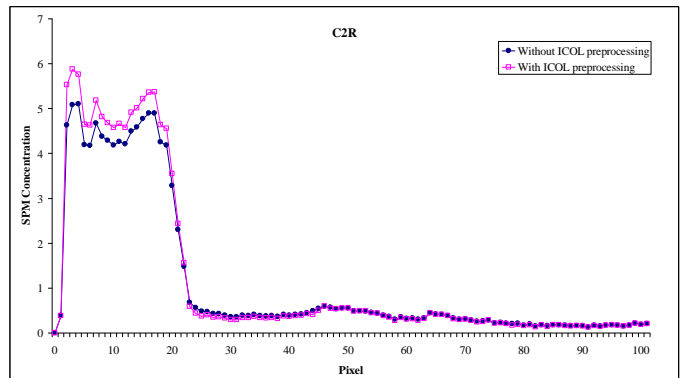
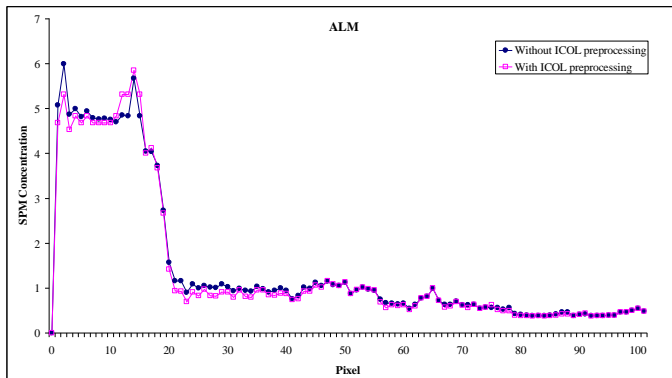


شکل ۵-۱۷- استخراج غلظت کلروفیل-a در راستای مقطع عرضی (شکل ۵-۱۶)، از تصاویر پردازش شده با چهار مدل معکوس مورد مطالعه، در دو حالت استفاده از تصاویر سطح یک با و بدون پیش پردازش ICOL (۱۶ آگوست ۲۰۰۵)





شکل ۵-۱۸- استخراج CDOM در راستای مقطع عرضی (شکل ۵-۱۶)، از تصاویر پردازش شده با سه مدل معکوس مورد مطالعه، در دو حالت استفاده از تصاویر سطح یک با و بدون پیش پردازش ICOL (۱۶-اگوست ۲۰۰۵)



شکل ۵-۱۹- استخراج غلظت SPM در راستای مقطع عرضی (شکل ۵-۱۶)، از تصاویر پردازش شده با سه مدل معکوس مورد مطالعه در دو حالت استفاده از تصاویر سطح یک با و بدون پیش پردازش ICOL (۱۶-اگوست ۲۰۰۵)

در شکل ۵-۱۷ مشاهده می‌شود که پیش پردازش ICOL در هر سه مدل معکوس، در نزدیکی ساحل (تا حدود پیکسل ۲۵ ام یا تقریباً ۷/۵ تا ۸ کیلومتر دور از ساحل) باعث کاهش غلظت کلروفیل-a- مدل شده در مقایسه با حالت بدون پیش پردازش ICOL شده است. البته این وضعیت در مدل FUB\Wew خیلی بارز نمی‌باشد. از این قسمت به بعد تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین غلظت کلروفیل-a- مدل شده با پیش پردازش ICOL در مقایسه با حالت بدون پیش پردازش ICOL حداقل در سه مدل ALM، هیبرید ALM-ANN و FUB\Wew دیده نمی‌شود. در مورد CDOM (شکل ۵-۱۸) نیز مشابه حالت قبل استفاده از پیش پردازش ICOL باعث کاهش CDOM در نزدیکی ساحل شده است.

البته این وضعیت کاهش می‌دهد در مدل C2R دیده نمی‌شود. از پیکسل ۲۵ م به بعد نیز تاثیر قابل ملاحظه‌ای در میزان CDOM دو حالت، با و بدون پیش پردازش ICOL مشاهده نمی‌شود. در مورد SPM رفتار مدل‌ها کمی متفاوت است در مدل ALM پیش پردازش ICOL در نزدیکی ساحل باعث کاهش جزئی غلظت SPM نسبت به حالت بدون پیش پردازش ICOL شده است. در صورتی که در دو مدل FUB\WeW و C2R پیش پردازش باعث افزایش غلظت SPM در مناطق نزدیک به ساحل نسبت به حالت بدون پیش پردازش ICOL شده است. با این وجود برای بررسی دقیق‌تر عملکرد پردازشگر ICOL باید مطالعات جامع و وسیع‌تری صورت گیرد. نکته خیلی جالبی که در اینجا می‌توان به آن اشاره کرد تشابه رفتاری این سه مدل در راستای این مقطع عرضی است. همچنین از این مقاطع عرضی می‌توان تا حدود زیادی مرز بین آب‌های ساحلی و آب‌های آزاد (open Sea) را مشخص کرد. بر اساس این سه شکل (۵-۱۷ تا ۵-۱۹) تا حدود پیکسل ۲۵ (حدود ۷/۵ تا ۸ کیلومتر) را که تغییرات و نوسانات غلظت شدید است می‌توان جزء آب‌های ساحلی و از این محدوده به بعد را که تغییرات جزئی و آرامی در میزان غلظت پارامترهای کیفی دیده می‌شود جزء آب‌های آزاد قرار داد.

## ۵-۶- اعتبار سنجی مدل‌های معکوس و نتایج آن

همان طور که در فصل سوم اشاره شد دو مدل معکوس شبکه عصبی C2R و MEGS از یک سری روابط بایو اپتیکال تجربی (Bio-optical relationship) برای تبدیل ضریب جذب رنگدانه (a<sub>442</sub>) و ضریب پراکندگی مواد (b<sub>b(442)</sub>)، که خروجی اصلی شبکه عصبی این مدل‌ها است به غلظت کلروفیل-a و غلظت SPM استفاده می‌کنند (Doerffer & Schiller, 2006; Delwart, 2002). از آن جایی که این روابط تجربی بایو اپتیکال، بین خصوصیات نوری ذاتی و غلظت پارامترهای کیفی، با تغییر موقعیت جغرافیایی تغییر می‌کنند (Doerffer & Schiller 2006)، لذا در اینجا سعی خواهد شد که روابط بایو اپتیکال مرجع بین خصوصیات نوری ذاتی و غلظت کلروفیل-a (جدول ۵-۳۱)، مربوط به دو مدل C2R و MEGS، برای دریای خزر مورد اعتبار سنجی قرار گیرد و روابط بایو اپتیکال مناسب برای

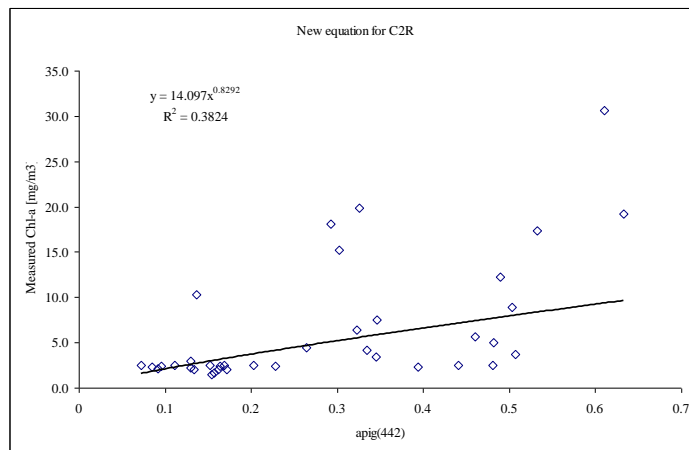
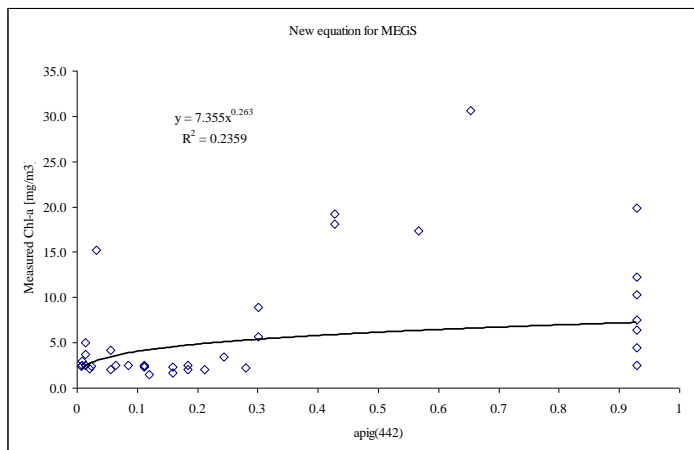
دریای خزر استخراج شود. همچنین اثر این روابط جدید روی نتایج دو مدل C2R و MEGS مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

جدول ۵-۳۱- روابط بایو اپتیکال استفاده شده برای تبدیل ضریب جذب رنگدانه ( $a_{pig(442)}$ ) به غلظت Chl-a در دو مدل معکوس C2R و MEGS (Sorenson and Hokedal, 2006)

concentration	C2R	MEGS
Chl-a [mg/m3]	$21 * a_{pig(442)}^{1.04}$	$26.216 * a_{pig(442)}^{0.77135}$

برای انجام این کار ابتدا با معکوس سازی این دو رابطه‌ی تبدیل (جدول ۵-۳۱)، مقادیر  $a_{pig(442)}$  از غلظت کلروفیل-a مدل شده با این دو مدل معکوس، بدست آمد. سپس دو رابطه مشابه جدید، بین غلظت‌های میدانی کلروفیل-a و  $a_{pig(442)}$  استخراج شد (شکل ۵-۲۰). در نهایت از این دو رابطه بایو اپتیکال جدید (جدول ۵-۳۲)، در این دو مدل معکوس برای تبدیل  $a_{pig(442)}$  به غلظت کلروفیل-a در دریای خزر استفاده شد. از آن جایی که روابط بایو اپتیکال مرجع، در این دو مدل معکوس تنها برای مدل سازی میانگین عمقی کلروفیل-a استفاده می‌شود در اینجا نیز تنها برای حالت میانگین عمقی کلروفیل-a مدل‌های بایو اپتیکال توسعه داده شد. همچنین برای بررسی دقیق‌تر رفتار این دو مدل، قبل و بعد از اعتبار سنجی، نمودارهای فراوانی نسبی آن برای دسته‌جات کوچک‌تر داده‌ها ترسیم گشت. نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی عملکرد دو مدل معکوس C2R و MEGS به منظور استخراج کلروفیل-a با استفاده از این دو رابطه بایو اپتیکال جدید (اعتبار سنجی شده) در جدول ۵-۳۳ و شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است. برای مقایسه بیشتر، نتایج گرافیکی و آماری ارزیابی این دو مدل با استفاده از روابط بایو اپتیکال مرجع (جدول ۵-۳۱) نیز نشان داده شده است.





شکل ۵-۲۰- رابطه بین  $a_{pig(442)}$  و غلظت کلروفیل-a میدانی در دریای خزر برای دو مدل معکوس C2R و MEGS

جدول ۵-۳۲- روابط بایو اپتیکال جدید توسعه یافته برای تبدیل ضریب جذب رنگدانه  $(a_{pig(442)})$  به غلظت Chl-a در دو

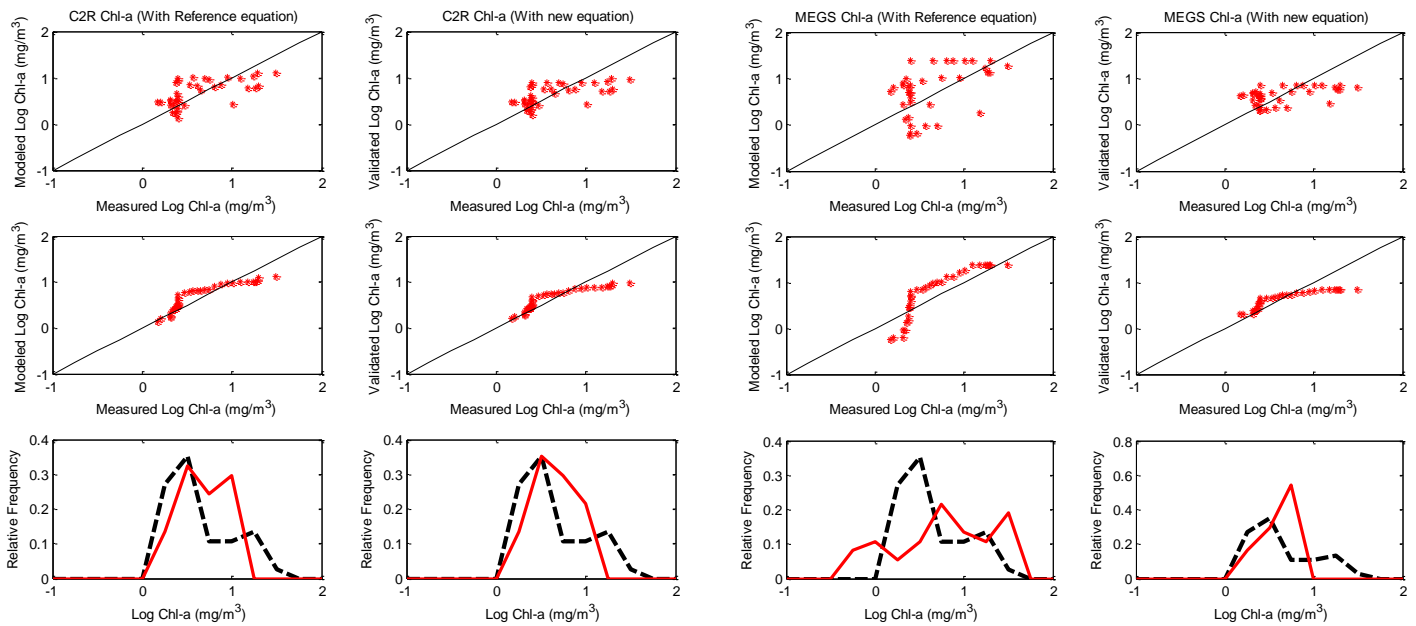
مدل معکوس C2R و MEGS برای دریای خزر

concentration	C2R	MEGS
Chl-a [mg/m <sup>3</sup> ]	$14.097 * a_{pig(442)}^{0.8292}$	$7.355 * a_{pig(442)}^{0.263}$

جدول ۵-۳۳- نتایج آماری ارزیابی استخراج کلروفیل-a با دو مدل معکوس C2R و MEGS با استفاده از رابطه‌ی

تبدیل مرجع و رابطه‌ی اعتبار سنجی شده

	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
C2R Chl-a (with reference equation)	66.84	48.87	5.52	0.29	-0.68	0.04	0.59	0.62
C2R Chl-a (with new equation)	55.86	44.11	5.51	0.28	-1.56	0	0.58	0.62
MEGS Chl-a (with reference equation)	142.91	92.48	8.39	0.47	3.07	0.1	0.5	0.49
MEGS Chl-a (with new equation)	64.39	54.47	6.35	0.32	-1.79	0	0.49	0.49

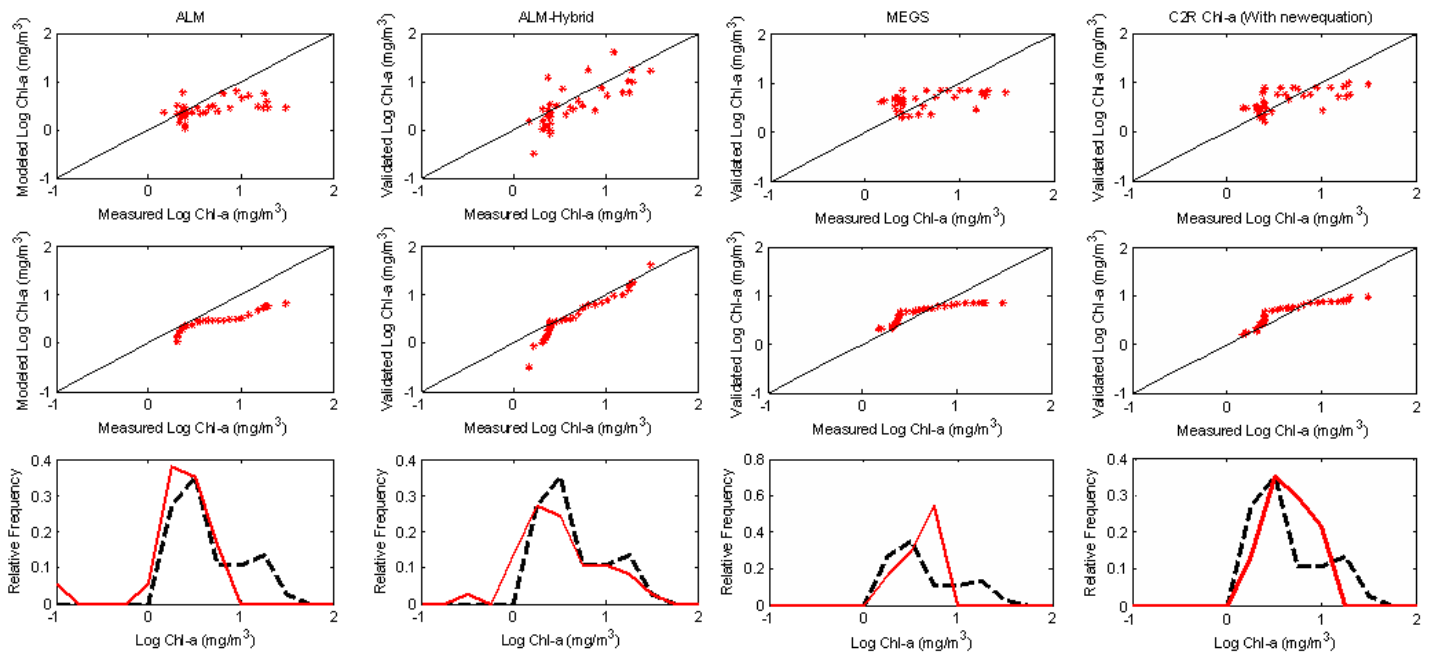


شکل ۵-۲۱- نتایج گرافیکی ارزیابی دو مدل معکوس C2R و MEGS با رابطه مرجع (ستون اول (C2R) و سوم (MEGS)) و با رابطه اعتبار سنجی شده جدید (ستون دوم (C2R) و چهارم (MEGS)) با استفاده از مقادیر میانگین عمقی کلروفیل-a؛ (الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و (ب) نمودار q-q (سطر دوم)، مقادیر میانگین عمقی کلروفیل-a در مقابل مقادیر کلروفیل-a اعتبار سنجی شده و کلروفیل-a بدون اعتبار سنجی؛ (ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر میدانی میانگین عمقی کلروفیل-a (خط چین) به همراه مقادیر کلروفیل-a اعتبار سنجی شده و بدون اعتبار سنجی (خط پر)

نتایج آماری و گرافیکی ارائه شده در جدول ۵-۳۳ و شکل ۵-۲۱ نشان دهنده بهبود قابل ملاحظه عملکرد و دقت مدل معکوس MEGS، بعد از اعمال این رابطه تبدیل جدید است. در این مورد به عنوان مثال می توان به کاهش پراکندگی داده های کلروفیل-a در نمودار پراکندگی، رفتار خطی بهتر در نمودار q-q و سازگاری بهتر شکل فراوانی نسبی غلظت های کلروفیل-a اعتبار سنجی شده با شکل فراوانی نسبی غلظت های کلروفیل-a میدانی، بعلاوه کاهش خطاهای مدل سازی در حالت آماری اشاره کرد. این در حالی است که عملکرد مدل معکوس C2R بعد از اعمال این رابطه تبدیل جدید، بهبود قابل ملاحظه را نشان نمی دهد. در مورد این مدل معکوس، در نتایج گرافیکی تنها شاهد بهبود شکل فراوانی نسبی داده های کلروفیل-a اعتبار سنجی شده در مقایسه با شکل فراوانی نسبی کلروفیل-a میدانی هستیم و در نتایج آماری نیز به جز بهبود میزان خطای MAPE تاثیر مطلوب دیگری مشاهده نمی شود.

دوباره به منظور انتخاب بهترین مدل معکوس، نتایج گرافیکی و آماری بدست آمده از این دو مدل بعد از فرآیند اعتبار سنجی، با مدل های معکوس کلروفیل-a (ALM) و هیبرید (ALM-ANN) قیاس شد تا

مشخص شود آیا نتایج اعتبار سنجی تغییری در رتبه مدل‌ها ایجاد کرده است یا خیر. در شکل ۵-۲۲ و جدول ۵-۳۴ نتایج گرافیکی و آماری ارزیابی این مدل‌ها به منظور استخراج کلروفیل-a در دریای خزر با هم مقایسه شده و نتایج رتبه بندی مدل‌ها نیز نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۲- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس ALM (ستون اول)، ALM هیبریدی (ستون دوم)، MEGS (نتایج اعتبار سنجی) (ستون سوم) و C2R (نتایج اعتبار سنجی) (ستون چهارم)، با استفاده از مقادیر میانگین عمقی کلروفیل-a (الف؛ نمودار پراکندگی (سطر اول) و ب) نمودار q-q (سطر دوم)، مقادیر میانگین عمقی کلروفیل-a در مقابل مقادیر کلروفیل-a مدل شده؛ ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر میدانی میانگین عمقی کلروفیل-a (خط چین) به همراه مقادیر کلروفیل-a مدل شده (خط پر)

جدول ۵-۳۴- نتایج آماری ارزیابی عملکرد چهار مدل معکوس برای مدل‌سازی میانگین عمقی کلروفیل-a به همراه نتایج امتیاز دهی به معیارهای آماری و گرافیکی

	RMSE (Score)	MBE (Score)	R (Score)	Scatter plot Score	Relative Distribution Plot Score	q-q plot Score	Summation of Score	Rank
MEGS	6.35(3)	-1.79(2)	0.49(2)	1	1	1	10	3
C2R	5.92(4)	-1.56(3)	0.58(4)	1	1	2	15	2
ALM	7.48(1)	-3.70(1)	0.37(1)	2	2	3	10	3
Hybrid ALM-ANN	6.86(2)	-0.84(4)	0.55(3)	3	3	4	19	1

بار دیگر مدل هیبرید ALM-ANN به عنوان بهترین مدل در میان این مدل‌های معکوس انتخاب می‌شود. نکته جالب در اینجا رفتار گرافیکی بهتر ALM نسبت به دو مدل معکوس C2R و MEGS می‌باشد. با این وجود، از آن جایی که رتبه بندی تماماً بر اساس معیارهای گرافیکی و آماری انجام می‌شود و ALM دارای معیارهای خطای بزرگ‌تری است به طور کلی بر اساس این شیوه امتیاز دهی در رده سوم و هم تراز با MEGS قرار می‌گیرد که اصلاً از رفتار مدل‌سازی خوبی برخوردار نیست.

## ۵-۷- بررسی تاثیر Shifting بر بهبود نتایج مدل‌ها

نتایج گرافیکی ارائه شده در شکل‌های ۵-۶ و ۵-۷ (نتایج مدل‌سازی CDOM)، به خصوص نمودارهای q-q و فراوانی نسبی، گویای نوعی جابجایی مکانی بین مقادیر میدانی CDOM (مقادیر سطحی و میانگین عمقی) و مقادیر متناظر مدل شده توسط سه مدل معکوس C2R، FUB\WeW و ALM است. به عبارتی دیگر می‌توان گفت رفتار داده‌ها در نمودار q-q تقریباً خطی است و روند آن (داده‌های پلات شده) نیز به طور موازی در راستای خط ۱:۱ با یک جابجایی مختصر در زیر آن قرار دارد که نشان دهنده منفی بودن مقدار اریبی می‌باشد. این حالت در نمودار فراوانی نسبی بهتر مشخص می‌شود، جایی که شکل کلی فراوانی نسبی مقادیر میدانی و مدل شده CDOM تقریباً مشابه است، البته در این میان یک جابجایی، از انطباق این دو نمودار فراوانی جلوگیری می‌کند. در این حالت می‌توان با کاهش یا افزایش یک مقدار ثابت به داده‌های مدل شده یا داده‌های متناظر میدانی آن، به نتایج مدل‌سازی مطلوب‌تری دست یافت. عموماً این مقدار ثابت متناسب با مقدار اریبی (MBE) در مدل‌سازی تعیین می‌شود. در اینجا با افزایش یک مقدار ثابت بهینه به مقادیر مدل شده CDOM، اثرات حذف Shifting روی بهبود نتایج مدل‌سازی سه مدل C2R، FUB\WeW و ALM در دو حالت سطحی و میانگین عمقی CDOM بررسی شد. و نتایج آن با قبل از اعمال Shifting قیاس شد.

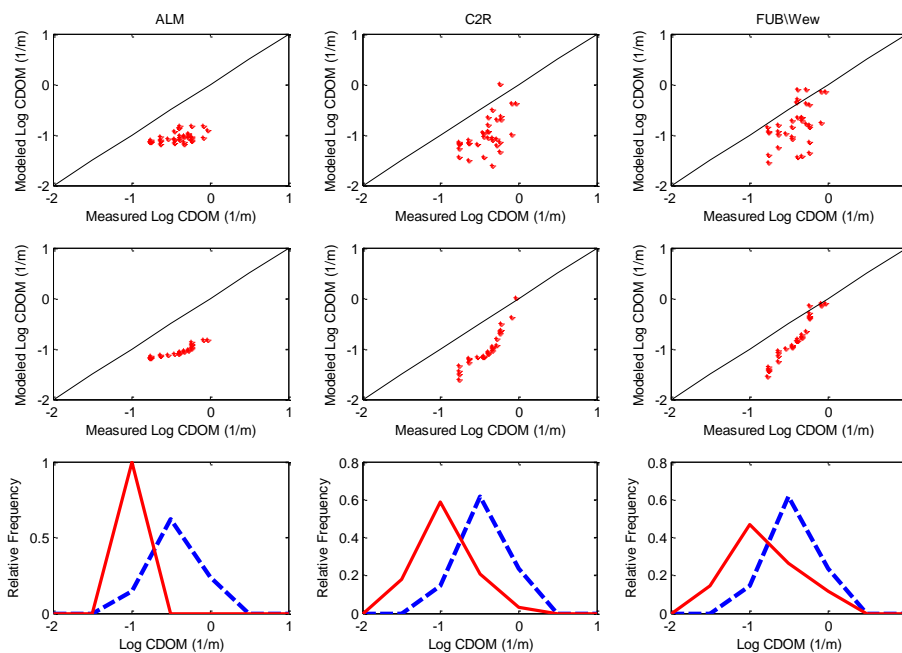
در مورد مقادیر سطحی CDOM، نتایج گرافیکی و آماری ارزیابی سه مدل معکوس ALM، C2R و FUB\WeW، قبل از اعمال Shifting در شکل ۵-۲۳ و جدول ۵-۳۵ نشان داده شده است. به منظور

حذف Shifting، با توجه به مقادیر اریبی ارائه شده در جدول ۵-۳۵، به ترتیب مقادیر ثابت ۰/۳۳، ۰/۲۷ و ۰/۱۸ به داده‌های CDOM مدل شده سه مدل ALM، C2R و FUB\WeW افزوده شد. نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی این سه مدل معکوس بعد از اعمال Shifting در شکل ۵-۲۴ و جدول ۵-۳۵ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود تمام پارامترهای آماری خطا (MAPE، RMSE و MBE) بعد از اعمال Shifting کاهش محسوسی را نشان می‌دهند. همچنین رفتار داده‌ها در نمودارهای گرافیکی بهبود یافته است. با توجه به این نتایج جدید می‌توان رتبه بندی جدیدی نیز در مورد بهترین مدل معکوس به منظور استخراج CDOM سطحی در دریای خزر ارائه نمود. بر این اساس، نتایج گرافیکی و آماری بیانگر آن است که رفتار و عملکرد مدل معکوس FUB\WeW بهتر از دو مدل C2R و ALM می‌باشد. همچنین C2R نیز در اینجا بهتر از ALM به نظر می‌رسد.

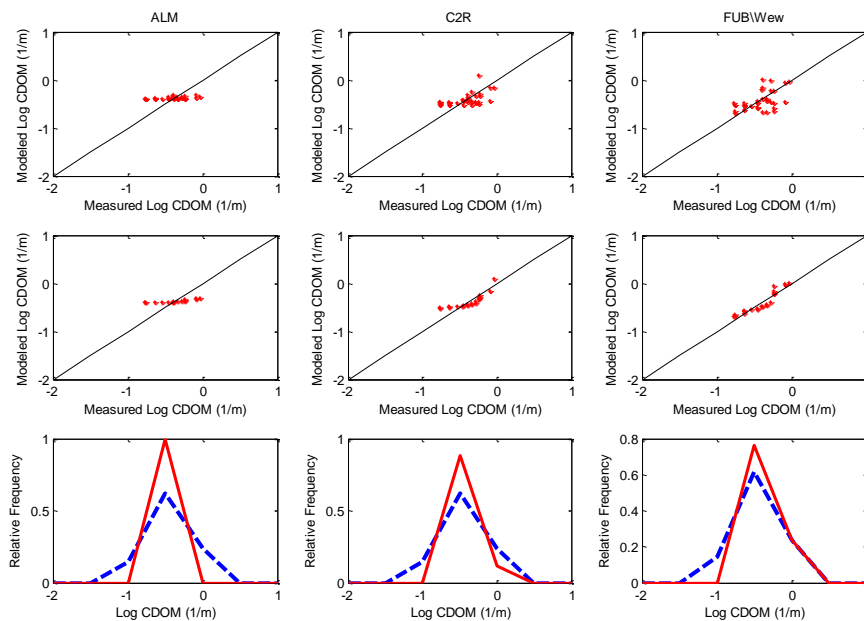
در مورد مدل سازی میانگین عمقی CDOM، نتایج گرافیکی و آماری ارزیابی سه مدل معکوس ALM، C2R و FUB\WeW، قبل از اعمال Shifting در شکل ۵-۲۵ و جدول ۵-۳۶ نشان داده شده است. مطابق روند حذف Shifting در CDOM سطحی، ابتدا بر اساس مقادیر اریبی ارائه شده در جدول ۵-۳۶، به ترتیب مقادیر ثابت ۰/۳، ۰/۲۴ و ۰/۱۵ به داده‌های CDOM مدل سازی شده توسط سه مدل ALM، C2R و FUB\WeW افزوده شد. در شکل ۵-۲۶ و جدول ۵-۳۶، نتایج حذف Shifting و اثرات آن بر بهبود نتایج مدل سازی نشان داده شده است. این بار نیز اثرات حذف Shifting بر پارامترهایی آماری و گرافیکی محسوس و قابل ملاحظه است. بر اساس نتایج آماری و گرافیکی جدید (شکل ۵-۲۶ و جدول ۵-۳۶) می‌توان مدل معکوس C2R را به عنوان بهترین مدل معکوس به منظور استخراج میانگین عمق CDOM انتخاب کرد. همچنین بر اساس این نتایج، مدل ALM بهتر از مدل FUB\WeW به نظر می‌رسد.

در مورد مدل سازی SPM توسط سه مدل ALM، C2R و FUB\WeW، نیز نتایج ارزیابی گرافیکی (شکل ۵-۲۷) مشابه مدل سازی CDOM، نشان دهنده وجود Shifting بین مقادیر مدل شده و مقادیر متناظر میدانی SPM است، این حالت مخصوصاً در نمودار گرافیکی ارزیابی ALM (شکل ۵-۲۷) ستون

یک) به روشنی قابل مشاهده است. برای حذف این Shifting، براساس میزان اریبی (جدول ۵-۳۷) مقادیر ثابت ۷/۱، ۵/۹ و ۵/۹ به ترتیب به داده‌های مدل شده ALM، C2R و FUB\WeW افزوده شد. نتایج حذف Shifting و اثرات آن بر بهبود نتایج مدل سازی در شکل ۵-۲۸ و جدول ۵-۳۷ نشان داده شده است.



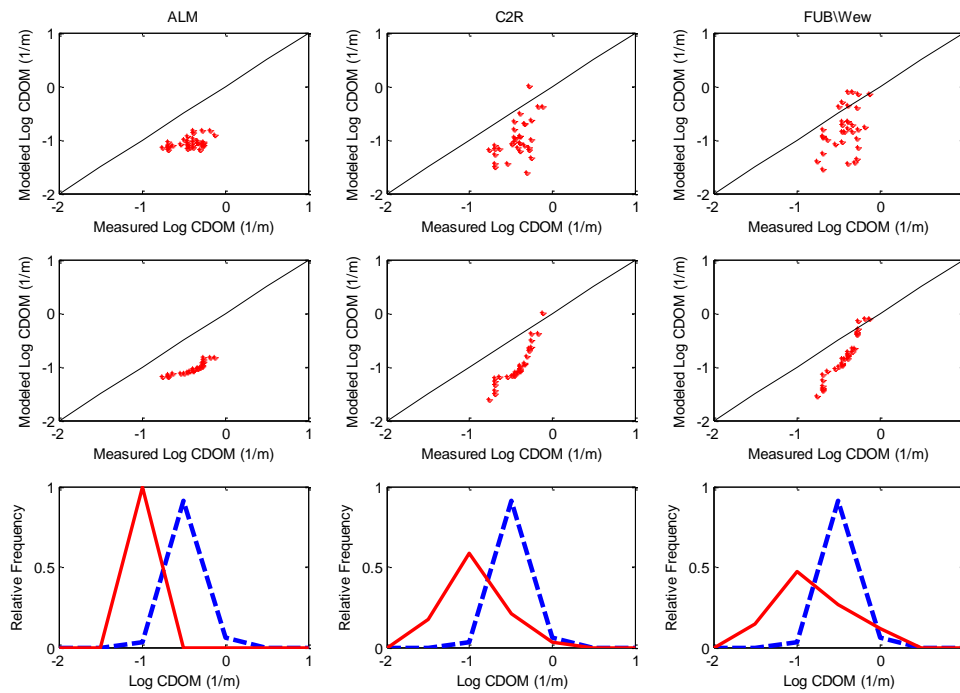
شکل ۵-۲۳- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل معکوس ALM (ستون اول)، مدل معکوس C2R (ستون دوم) و مدل معکوس FUB\WeW (ستون سوم) قبل از اعمال Shifting با استفاده از مقادیر سطحی CDOM (الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و (ب) نمودار q-q (سطر دوم)، مقادیر سطحی CDOM در مقابل مقادیر مدل سازی شده؛ (ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر سطحی CDOM (خط چین) به همراه مقادیر مدل سازی شده (خط پر)



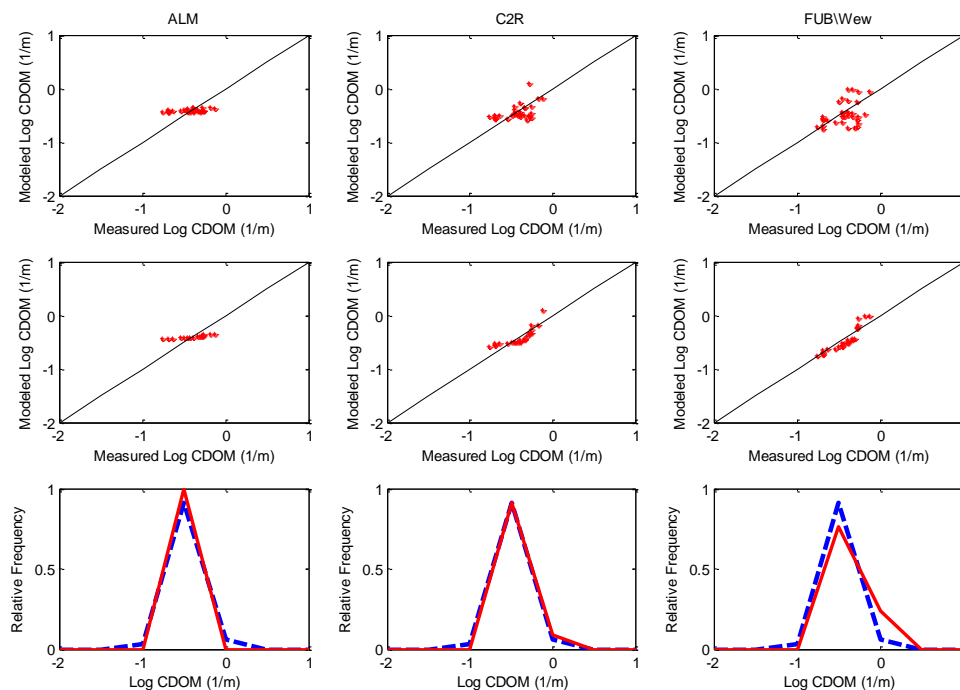
شکل ۵-۲۴- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل معکوس ALM (ستون اول)، مدل معکوس C2R (ستون دوم) و مدل معکوس FUB\WeW (ستون سوم) بعد از اعمال Shifting با استفاده از مقادیر سطحی CDOM (الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و (ب) نمودار q-q (سطر دوم)، مقادیر سطحی CDOM در مقابل مقادیر مدل سازی شده؛ (ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر سطحی CDOM (خط چین) به همراه مقادیر CDOM مدل سازی شده (خط پر)

جدول ۵-۳۵- نتایج آماری ارزیابی مدل های معکوس قبل و بعد از اعمال Shifting، به منظور مدل سازی مقادیر سطحی CDOM

Step	Parameter	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
Before Shifting	ALM (Central pixel)	74.00	275.54	0.37	0.65	-0.33	-0.62	0.48	0.49
	C2R (Central pixel)	70.74	206.79	0.33	0.64	-0.27	-0.57	0.48	0.55
	FUB\WeW (Central pixel)	56.05	138.00	0.28	0.52	-0.18	-0.38	0.50	0.48
After Shifting	ALM (Central pixel)	44.78	69.14	0.18	0.20	0.00	0.05	0.48	0.48
	C2R (Central pixel)	36.81	54.44	0.19	0.18	0.00	0.02	0.48	0.53
	FUB\WeW (Central pixel)	37.74	53.79	0.21	0.20	0.00	-0.01	0.50	0.50



شکل ۵-۲۵- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل معکوس ALM (ستون اول)، مدل معکوس C2R (ستون دوم) و مدل معکوس FUB\Wew (ستون سوم) قبل از اعمال Shifting با استفاده از مقادیر میانگین عمقی CDOM (الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و (ب) نمودار q-q (سطر دوم)، مقادیر میانگین عمقی CDOM در مقابل مقادیر CDOM مدل سازی شده؛ (ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر میانگین عمقی CDOM (خط چین) به همراه مقادیر CDOM مدل سازی شده (خط پر)

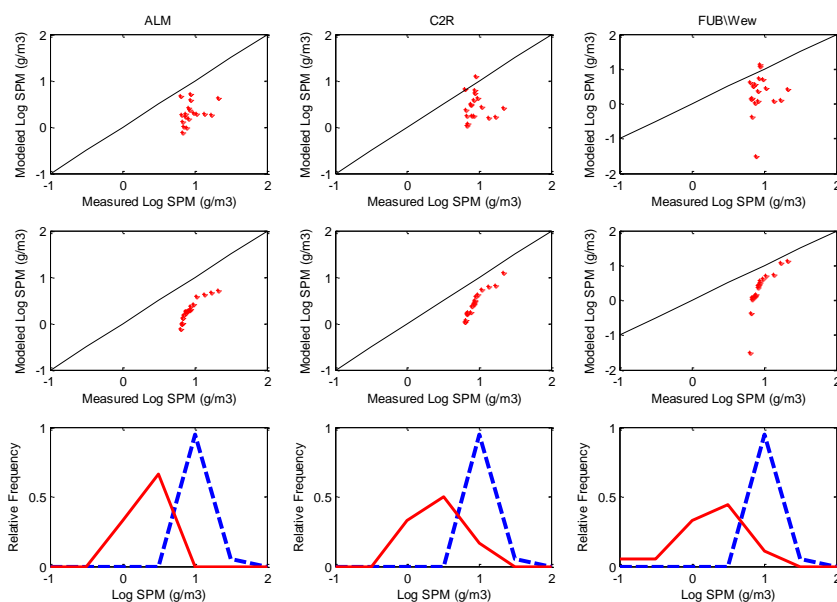


شکل ۵-۲۶- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل معکوس ALM (ستون اول)، مدل معکوس C2R (ستون دوم) و مدل معکوس FUB\Wew (ستون سوم) بعد از اعمال Shifting با استفاده از مقادیر میانگین عمقی CDOM (الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و (ب) نمودار q-q (سطر دوم)، مقادیر میانگین عمقی CDOM در مقابل مقادیر CDOM مدل سازی شده؛ (ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر میانگین عمقی CDOM (خط چین) به همراه مقادیر CDOM مدل سازی شده (خط پر)

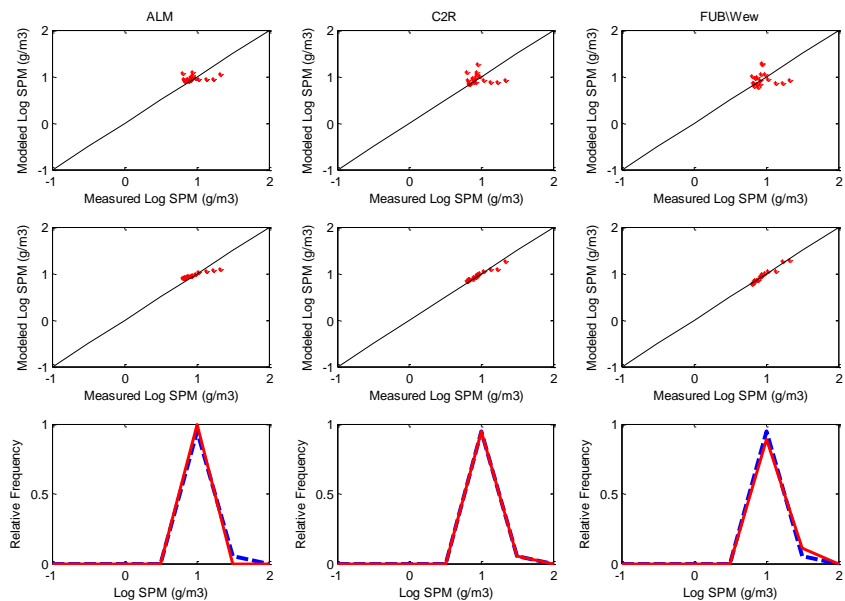


جدول ۵-۳۶- نتایج آماری ارزیابی مدل‌های معکوس قبل و بعد از اعمال Shifting، به منظور مدل‌سازی مقادیر میان عمقی CDOM

Step	Parameter	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
Before Shifting	ALM (Central pixel)	73.42	174.02	0.32	0.62	-0.30	-0.60	0.44	0.44
	C2R (Central pixel)	69.70	148.66	0.29	0.62	-0.24	-0.55	0.47	0.52
	FUB\WeW (Central pixel)	57.83	112.94	0.26	0.51	-0.15	-0.36	0.39	0.40
After Shifting	ALM (Central pixel)	34.40	33.26	0.13	0.16	0.00	0.03	0.44	0.43
	C2R (Central pixel)	29.68	31.93	0.17	0.15	0.00	0.00	0.47	0.50
	FUB\WeW (Central pixel)	38.65	50.48	0.22	0.21	0.00	-0.03	0.39	0.41



شکل ۵-۲۷- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل معکوس ALM (ستون اول)، مدل معکوس C2R (ستون دوم) و مدل معکوس FUB\WeW (ستون سوم) قبل از اعمال Shifting با استفاده از مقادیر میانگین عمقی SPM؛ الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و ب) نمودار q-q (سطر دوم)، مقادیر میانگین عمقی SPM در مقابل مقادیر SPM مدل‌سازی شده؛ ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر میانگین عمقی SPM (خط چین) به همراه مقادیر SPM مدل‌سازی شده (خط پر)



شکل ۵-۲۸- نتایج گرافیکی ارزیابی مدل معکوس ALM (ستون اول)، مدل معکوس C2R (ستون دوم) و مدل معکوس FUB\WeW (ستون سوم) بعد از اعمال Shifting با استفاده از مقادیر میانگین عمقی SPM (الف) نمودار پراکندگی (سطر اول) و (ب) نمودار q-q (سطر دوم)، مقادیر میانگین عمقی SPM در مقابل مقادیر SPM مدل‌سازی شده؛ (ج) نمودار فراوانی نسبی مقادیر میانگین عمقی SPM (خط چین) به همراه مقادیر SPM مدل‌سازی شده (خط پر)

جدول ۵-۳۷- نتایج آماری ارزیابی مدل‌های معکوس قبل و بعد از اعمال Shifting، به منظور مدل‌سازی مقادیر میان عمقی SPM

Step	Parameter	MAPE	MAPE <sub>log</sub>	RMSE	RMSE <sub>log</sub>	MBE	MBE <sub>log</sub>	R	R <sub>log</sub>
Before Shifting	ALM (Central pixel)	73.52	68.11	8.02	0.68	-7.11	-0.64	0.27	0.32
	C2R (Central pixel)	63.22	53.51	7.75	0.59	-5.89	-0.50	-0.14	-0.08
	FUB\WeW (Central pixel)	69.42	72.71	8.06	0.87	-5.89	-0.65	-0.08	0.08
After Shifting	ALM (Central pixel)	26.38	11.56	3.72	0.14	-0.01	0.02	0.27	0.27
	C2R (Central pixel)	32.56	13.78	5.04	0.19	0.01	0.01	-0.14	-0.11
	FUB\WeW (Central pixel)	36.67	15.30	5.50	0.20	0.01	0.00	-0.08	-0.02

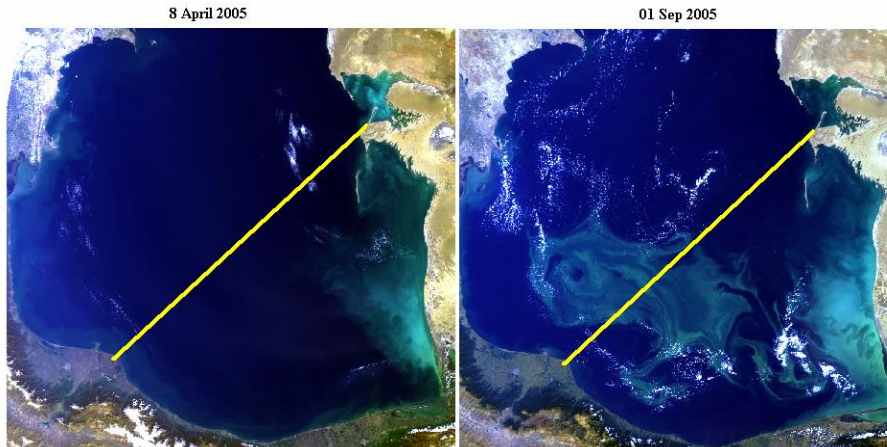
این نتایج آماری و گرافیکی به روشنی بیانگر بهبود قابل ملاحظه دقت و عملکرد این سه مدل معکوس بعد از حذف Shifting است. بر اساس نتایج آماری و گرافیکی جدید می‌توان مدل معکوس ALM را به طور کلی به عنوان بهترین مدل معکوس جهت استخراج SPM انتخاب کرد. همچنین با وجود رفتار گرافیکی بسیار مشابه بین دو مدل‌های C2R و FUB\WeW، نتایج آماری (جدول ۵-۳۷) نشان دهنده آن است که دقت C2R بهتر از FUB\WeW به نظر می‌رسد.

## ۵-۸- بررسی رفتار مدل‌های معکوس

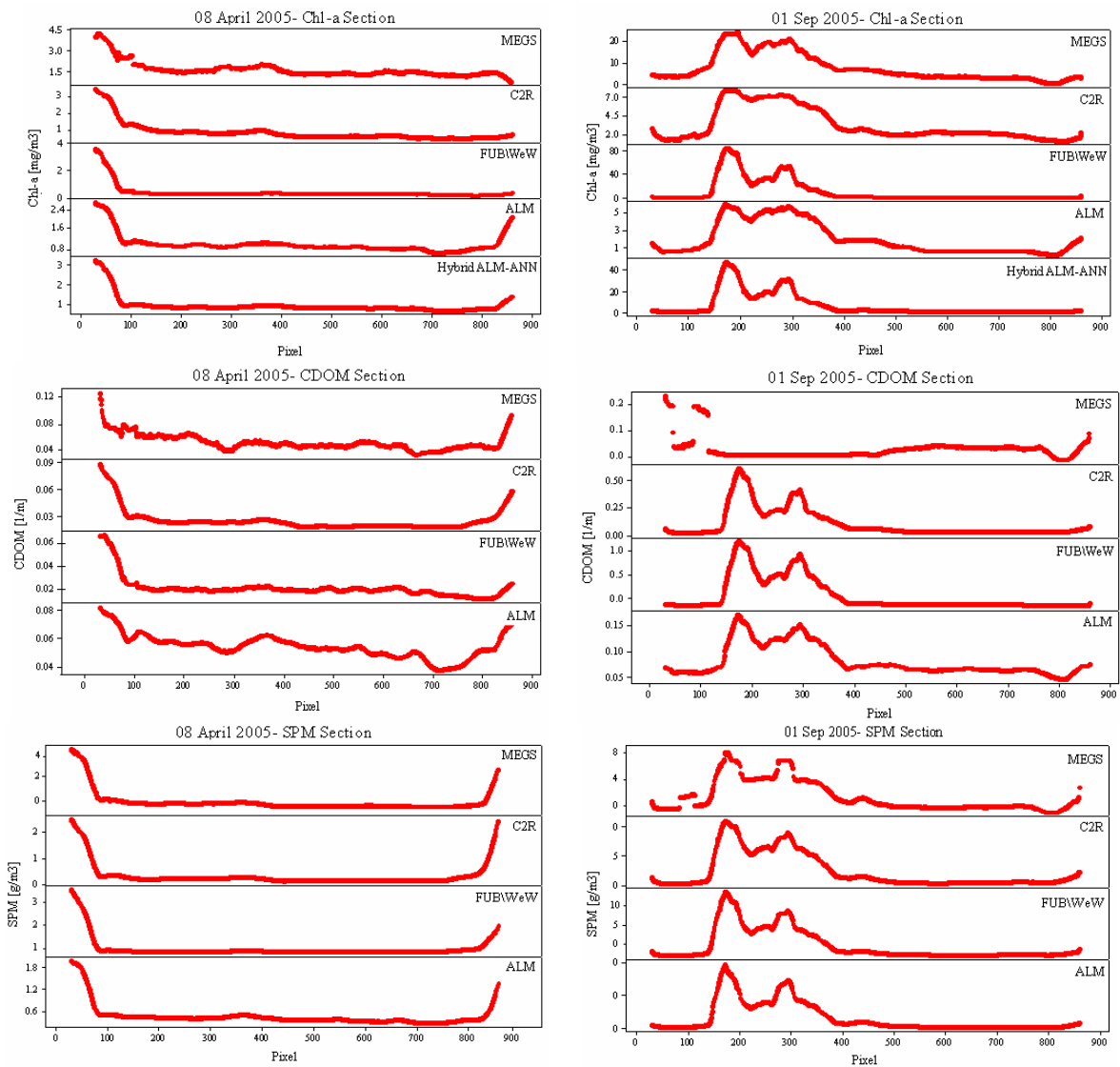
یکی از مهمترین ویژگی‌های یک مدل معکوس مناسب، واکنش صحیح این مدل، به تغییرات غلظت پارامترهای کیفی در کل پهنه آبی است. این تغییرات غلظت، اصولاً به طور فصلی در اقیانوس‌ها و دریاچه‌ها دیده می‌شود. واکنش صحیح مدل‌های معکوس به چنین تغییراتی بسیار مهم می‌باشد، زیرا می‌تواند اطلاعات مهم و با ارزش زیادی، در مورد فرآیندهای بیولوژیکی که در آب اتفاق می‌افتد در اختیار محققین قرار دهد. در این قسمت رفتار پنج مدل معکوس FUB\WeW, C2R, MEGS, ALM و هیبرید ALM-ANN در دو روز مختلف (۱ سپتامبر ۲۰۰۵ و ۸ آوریل ۲۰۰۵) که شرایط زیست محیطی دریا کاملاً با هم متفاوت است در راستای یک مقطع عرضی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در شکل ۵-۲۹ تصویر MERIS-FR مربوط به این دو روز، به همراه موقعیت مقطع عرضی مذکور نشان داده شده است. آن چنان که در شکل ۵-۲۹ مشخص است، وضعیت ظاهری دریا در تصویر ۸ آوریل ۲۰۰۵ (تصویر سمت چپ) کاملاً آرام می‌باشد. این در حالی است که در تصویر ۱ سپتامبر ۲۰۰۵ (تصویر سمت راست) شاهد پدیده شکوفایی<sup>۴</sup> (رشد زیاد و غیر منتظره فیتوپلانکتون در واکنش به شرایط محیطی) در مقیاس وسیع در دریای خزر هستیم. به منظور درک چگونگی واکنش این پنج مدل معکوس به تغییر شرایط محیطی در این دو روز، مقادیر غلظت Chl-a, SPM و جذب CDOM استخراج شده از تصاویر سطح دو این مدل‌های معکوس، در راستای مقطع عرضی مذکور، با هم قیاس شد. نتایج این بررسی در شکل ۵-۳۰ نشان داده شده است. همان طور که به صراحت در شکل ۵-۳۰ قابل مشاهده است مدل‌های معکوس به خوبی به تغییرات غلظت پارامترهای کیفی در این دو روز واکنش نشان داده‌اند. نکته جالب توجه هماهنگی و تشابه رفتاری این پنج مدل معکوس در این دو روز است. البته در برخی موارد (مثل CDOM و SPM) در قسمتی از مقطع شاهد رفتارهای ناهماهنگی از مدل MEGS هستیم. با این وجود به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که این پنج مدل معکوس به خوبی به تغییرات شرایط محیطی در آب دریای خزر پاسخ می‌دهند.

---

<sup>۴</sup> Blooming



شکل ۵-۲۹- تصاویر MERIS-FR مربوط به ۸ آوریل (سمت چپ) و ۱ سپتامبر ۲۰۰۵ (سمت راست) به همراه موقعیت مقطع عرضی در آن (پدیده شکوفایی به صورت یک گرداب بزرگ در وسط دریا دیده می‌شود)



شکل ۵-۳۰- مقادیر غلظت کلروفیل-a (سطر اول)، جذب CDOM (سطر دوم) و SPM (سطر سوم) استخراج شده از مدل-های معکوس در راستای مقطع عرضی نشان داده شده در شکل ۵-۲۹

## ۹-۵- تولید سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای

در ضمیمه پ، سری زمانی نقشه‌های توزیع مکانی غلظت Chl-a، SPM و CDOM در دریای خزر که توسط پنج مدل معکوس MEGS، C2R، FUB\WeW، ALM، و هیبرید ALM-ANN با استفاده از تصاویر سطح یک MERIS تولید شده است ارائه شده است.

## ۱۰-۵- خلاصه و نتیجه گیری

در این فصل، عملکرد و دقت پنج مدل معکوس MEGS، C2R، FUB\WeW، ALM و هیبرید ALM-ANN در دریای خزر، با استفاده از داده‌های میدانی اندازه گیری شده، هم‌زمان با گذر سنجنده MERIS مورد ارزیابی و اعتبار سنجی قرار گرفت. در فرآیند ارزیابی مدل‌های معکوس، عملکرد و دقت این مدل‌ها به منظور استخراج مقادیر سطحی و میانگین عمقی غلظت پارامترهای کیفی چون Chl-a، CDOM و SPM از تصاویر MERIS مورد بررسی قرار گرفت. در این قسمت سعی شد به منظور بررسی اثر اختلاف زمانی بین تصویر برداری MERIS و نمونه برداری میدانی، پارامترهای کیفی در سه حالت پیکسلی مختلف (پیکسل مرکزی (مطابق با مختصات جغرافیایی نمونه میدانی) میانگین و میانه یک جعبه پیکسلی 3x3 در اطراف این پیکسل مرکزی) از تصاویر سطح ۲ سنجنده MERIS استخراج شود و با مقادیر پارامتر کیفی متناظر میدانی مقایسه شود. نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی مدل‌های معکوس در دریای خزر نشان داده که

۱- برای استخراج مقادیر سطحی و میانگین عمقی کلروفیل-a و رنگدانه کل، بهترین مدل‌های معکوس به ترتیب شامل هیبرید ALM-ANN، C2R، FUB\WeW، ALM و MEGS می‌باشند. همچنین نتایج ارزیابی حالت‌های پیکسلی مختلف نشان داد که در اکثر مدل‌ها، استفاده از میانگین جعبه پیکسلی 3x3 باعث بهبود دقت مدل‌سازی شده است. البته این وضعیت در مورد ALM صادق نمی‌باشد در این مدل می‌توان گفت تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین نتایج آماری و گرافیکی سه حالت پیکسلی مختلف دیده نمی‌شود.

۲- برای استخراج مقادیر سطحی CDOM، بهترین مدل‌های معکوس به ترتیب شامل C2R، ALM، FUB\WeW و MEGS است. در مورد استخراج مقادیر میانگین عمقی CDOM نیز بهترین مدل‌های معکوس شامل C2R، FUB\WeW، MEGS می‌باشند. در این قسمت نیز بهترین حالت پیکسلی برای ارزیابی پارامترهای کیفی، میانگین جعبه پیکسلی 3x3 است.

۳- برای استخراج مقادیر میانگین عمقی SPM بهترین مدل‌های معکوس به ترتیب شامل ALM، C2R، FUB\WeW و MEGS است. در این مورد نیز نتایج ارزیابی پارامترهای گرافیکی و آماری بیانگر این مطلب این که استفاده از میانگین جعبه پیکسلی 3x3 باعث بهبود نتایج مدل‌سازی شده است.

همچنین در این فصل میزان تاثیر پیش پردازش ICOL بر بهبود دقت مدل‌سازی، مدل‌های معکوس نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارزیابی مدل‌های معکوس در این قسمت نیز شامل :

۱- در مورد استخراج کلروفیل-a، پیش پردازش ICOL تنها باعث بهبود دقت مدل‌سازی مدل معکوس ALM شده است این در حالی است که نتایج مدل‌سازی دیگر مدل‌ها چون C2R و FUB\WeW نشان دهنده آن است که پیش پردازش ICOL باعث افزایش خطا و کاهش دقت مدل‌سازی این دو مدل شده است.

۲- در مورد استخراج CDOM، پیش پردازش ICOL باعث افزایش دقت مدل‌سازی C2R شده است این وضعیت در مورد مدل معکوس FUB\WeW کاملاً عکس بوده و پیش پردازش باعث افزایش خطای مدل‌سازی شده است در مدل ALM نیز تاثیر قابل ملاحظه‌ای بین استفاده از تصاویر با و بدون پیش پردازش ICOL دیده نمی‌شود.

۳- در مورد استخراج SPM، پیش پردازش ICOL در تمام سه مدل مورد بررسی باعث افزایش دقت مدل‌سازی پارامترهای کیفی شده است.

همچنین نتایج اعمال پیش پردازش ICOL در راستای یک مقطع عرضی، عمود بر ساحل جنوبی دریای خزر نیز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مطالعه پارامترهای کیفی در راستای این مقطع عرضی نشان داد که استفاده از تصاویر دارای پیش پردازش ICOL در نزدیکی ساحل (تا حدود پیکسل ۲۵م، تقریباً حدود ۸ کیلومتری) باعث کاهش غلظت کلروفیل-a و CDOM در مقایسه با تصاویر فاقد پیش پردازش ICOL شده است. این حالت تقریباً در تمام مدل‌ها معکوس دیده می‌شود. اما در مورد SPM، نتایج مطالعه تغییرات پارامترهای کیفی در راستای این مقطع عرضی نشان دهنده آن است که استفاده از تصاویر دارای پیش پردازش ICOL در دو مدل معکوس C2R و FUB\WeW باعث افزایش غلظت SPM در مقایسه با استفاده از تصاویر فاقد پیش پردازش ICOL شده است. این حالت در مدل ALM دیده نمی‌شود، در این مدل مطابق روال قبل (دو پارامتر کیفی قبلی) استفاده از پیش پردازش ICOL باعث کاهش غلظت SPM شده است.

بخش دیگری از مطالعات انجام شده در این فصل مربوط اعتبار سنجی روابط بایوآپتیکال در دو مدل معکوس C2R و MEGS در دریای خزر است. در این زمینه روابط بایو آپتیکال جدیدی به منظور تبدیل ضریب جذب رنگدانه ( $a_{pig(442)}$ ) به غلظت کلروفیل-a برای این دو مدل معکوس در دریای خزر توسعه یافت. نتایج ارزیابی این دو مدل با روابط بایو آپتیکال جدید نشان داد که در مدل MEGS استفاده از رابطه بایو آپتیکال جدید باعث بهبود دقت مدل‌سازی کلروفیل-a شده است. اما در مدل C2R استفاده از این رابطه بایو آپتیکال جدید به جز چند بهبود جزئی در پارامترهای کیفی و آماری، تاثیر قابل ملاحظه‌ای را بر افزایش دقت مدل‌سازی کلروفیل-a نشان نمی‌دهد. قیاس عملکرد و دقت دو مدل اعتبار سنجی شده C2R و MEGS با بهترین مدل معکوس کلروفیل-a در دریای خزر (ALM هیبریدی)، بار دیگر نشان داد که مدل ALM هیبرید از عملکرد بهتری نسبت به این دو مدل اعتبار سنجی شده برخوردار است.

بررسی تاثیر حذف Shifting بر افزایش دقت مدل‌سازی مدل‌های معکوس نیز در این فصل مورد بررسی قرار گرفت. که نتایج آن نشان دهنده آن است که با حذف Shifting می‌توان به نتایج مدل-

سازی مطلوب تری در مورد CDOM و SPM دست یافت. این تکنیک در هر سه مدل معکوس به خوبی باعث کاهش خطای مدل سازی شده است. در ادامه رفتار مدل های معکوس در دو روز مختلف (۸ آوریل و ۱ سپتامبر ۲۰۰۵) که شرایط زیست محیطی دریا کاملاً با هم متفاوت بود، در راستای یک مقطع عرضی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این بخش نیز نشان داد که هر پنج مدل معکوس مورد مطالعه در این تحقیق واکنش مطلوبی به تغییر شرایط محیطی یا تغییر غلظت پارامترهای کیفی در دریای خزر نشان می دهند.



## فصل ششم

### مدل سازی تجربی عمق سکی (شفافیت)

#### ۶-۱- مقدمه

عمق سکی<sup>۱</sup> (SDD) یکی از ویژگی‌های مهم نوری آب اقیانوس‌ها و دریاها می‌باشد که با کیفیت آب در ارتباط است و در حال حاضر به طور وسیع به عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری شفافیت و کدورت آب با سنجش از دور مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاریخ استفاده از دیسک سکی (SD) برای اولین به اختر فیزیکدان ایتالیایی Fr. Pietro Angelo Secchi بر می‌گردد. که برای تخمین کدورت (turbidity) یا شفافیت (transparency) آب در دریای مدیترانه در آوریل ۱۸۶۵ از یک دیسک سفید استفاده کرد. از آن به بعد استفاده از این وسیله به علت مکانیسم ساده آن 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 می‌باشد. شفافیت نشان دهنده آن است که نور تا چه عمقی در آب توانایی نفوذ دارد. حداکثر عمق سکی معادل ژرف‌ترین عمقی است که نور در آب نفوذ می‌کند. قطر استاندارد دیسک سکی برای کاربرد های اقیانوس‌شناسی ۲۰ سانتیمتر است اگر چه قطر آن ممکن است از ۲۰ تا ۳۰ سانتیمتر متفاوت باشد. در سال ۱۸۹۹، Whipple برای بهبود مغایرت<sup>۲</sup> این دیسک در آب، از دیسکی با دو ربع متقابل سیاه و سفید استفاده کرد که از آن به بعد به دیسک‌های Whipple شهرت یافت.

---

<sup>۱</sup> Secchi Disk Depth (SDD)

<sup>۲</sup> Contrast

اما توسعه یک الگوریتم که توانایی تخمین عمق سکی یا عمق شفافیت را از تصاویر ماهواره‌ای دارا باشد از جنبه تاریخی جالب است، زیرا ارتباط بین روش نسبتاً جدید ماهواره‌ای و یکی از قدیمی‌ترین اندازه‌گیری‌های استفاده شده در اقیانوس شناسی فراهم می‌گردد (Kratzer et al., 2003). تلاش‌های زیادی به منظور نقشه‌برداری این متغیر از تصاویر ماهواره‌ای توسط محققین مختلف صورت گرفته است برای مثال Lindell et al. (1999) از تصاویر لندست جهت استخراج این پارامتر در دریاچه‌های اروپا استفاده کرد هر چند نتایج استخراجی با اندازه‌گیرهای میدانی خیلی سازگار نبود. خوشبختانه در چند دهه اخیر با ساخت و پرتاب سنجنده‌های نوری پیشرفته رنگ آب همچون MODIS، SeaWiFS و MERIS که دارای قدرت تفکیک مکانی، طیفی و زمانی بالایی هستند (Ruddick et al., 2002)، امکان توسعه الگوریتم‌های تجربی عمق سکی با دقت معقول فراهم شده است.

Prasad et al. (1998) رابطه بین انعکاسات خروجی از آب ( $L_{wn}$ ) و عمق سکی را در آبهای کدر<sup>۳</sup> جنوب کالیفرنیا مورد مطالعه قرار دادند و الگوریتمی بر مبنای نسبت بانندی  $L_{wn}(490)/L_{wn}(555)$  برای تخمین عمق سکی از تصاویر سنجنده SeaWiFS توسعه دادند. این الگوریتم (رابطه ۶-۱) قادر بود تقریباً ۹۰٪ تغییرات در عمق سکی را در این منطقه بر اساس این نسبت بانندی توصیف کند.

$$SD = 10^{(0.908 + 0.943 \log(L_{wn}(490)/L_{wn}(555)))} \quad (1-6)$$

Kratzer et al. (2003) رابطه بین ضریب کاهیدگی پخش<sup>۴</sup> در ۴۹۰ نانومتر،  $K_d(490)$  (نرخ کاهش نمایی تشعشع 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 SeaWiFS در دریای بالتیک بررسی کردند و دو الگوریتم (رابطه ۶-۲ و ۶-۳) جهت تخمین عمق سکی از تصاویر SeaWiFS توسعه دادند.

$$SD^{-1} = (0.55 \pm 0.05) * K_d(490) - (0.04 \pm 0.02) \quad (2-6)$$

$$SD^{-1} = (0.54 \pm 0.06) * K_d(490) - (0.08 \pm 0.04) \quad (3-6)$$

<sup>3</sup> Turbid water

<sup>4</sup> Diffuse attenuation coefficient

Suresh et al. (2006) در آب‌های شمال غرب اقیانوس هند (Arabian Sea) ارتباط بین عمق سکی و خصوصیات نوری ذاتی آب را مورد بررسی قرار دادند و الگوریتمی (رابطه ۴-۶) جهت تخمین عمق سکی از تصاویر سنجنده IRS-P4 OCM توسعه دادند.

$$Z_{SD} = 2.2721 + 7.239(Rrs(490) / Rrs(555)) \quad (4-6)$$

در اینجا  $Rrs(490)$  و  $Rrs(555)$  مقادیر انعکاس سنجش از دوری در طول موج ۴۹۰ و ۵۵۵ نانومتر است.

Chen et al. (2007) تغییرات زمانی - مکانی عمق سکی را در خلیج تامپا (فلوریدا) با استفاده از تصاویر سنجنده SeaWiFS بررسی کردند. در این مطالعه برای استخراج عمق سکی از تصاویر سنجنده SeaWiFS از یک فرآیند دو مرحله‌ای استفاده شد. ابتدا ضریب کاهیدگی پخش در ۴۹۰ نانومتر،  $K_d(490)$  با استفاده از یک الگوریتم نیمه تحلیلی از تصاویر SeaWiFS استخراج شد. سپس مقادیر عمق سکی با استفاده از یک رابطه تجربی (رابطه ۵-۶) از ضریب کاهیدگی پخش برآورد شد.

$$SD = 1.04K_d(490) - 0.82 \quad (0.9 < SD < 8m \quad R^2 = 0.67 \quad N = 80) \quad (5-6)$$

Kratzer et al. (2007) رابطه بین عمق سکی و نسبت‌های انعکاسی خروجی از آب را در دریای بالتیک بررسی کردند. آنان برای بدست آوردن الگوریتم عمق سکی از آنالیز رگرسیون بین داده‌های عمق سکی و نسبت‌های انعکاسی مختلف استفاده کردند. در این تحقیق آنها رابطه‌ی با بهترین ضریب تعیین ( $R^2$ ) را که ناشی از برازش یک روند خطی بین داده‌های لگاریتم نسبت‌های انعکاسی و لگاریتم عمق سکی بود برای توسعه این الگوریتم انتخاب کردند. الگوریتم مذکور سپس برای استخراج عمق سکی به تصاویر MERIS اعمال شد. نتایج نشان دهنده آن بود که عمق سکی بدست آمده از تصاویر سنجنده MERIS با استفاده از این الگوریتم (رابطه ۶-۶) در مقایسه با داده‌های عمق سکی اندازه‌گیری شده، نتایج خوبی را هم در مناطق ساحلی و هم در دریای آزاد بالتیک نشان می‌دهد.

$$\ln(SD^{-1}) = -1.44\ln(Rrs(490) / Rrs(620)) - 1.27 \quad (R^2 = 0.79) \quad (6-6)$$

## ۲-۶- هدف تحقیق

عمق سکی (شفافیت) ساده‌ترین و مهم‌ترین پارامتر نور سنجی در مطالعات اکوسیستم های آبی است. که اطلاعات مفیدی در مورد کدورت و میزان نفوذ نور در آب، در اختیار محققین علوم دریایی قرار می‌دهد. از آنجایی که این پارامتر جزء محصولات استاندارد سطح ۲ سنجنده MERIS قرار ندارد و از طرفی تاکنون، هیچ گونه تحقیقی برای استخراج عمق سکی از تصاویر ماهواره‌ای بر روی دریای خزر صورت نگرفته است در این تحقیق سعی شده است الگوریتم‌های تجربی مختلفی به منظور استخراج عمق شفافیت از تصاویر سطح یک (R1STOA) و تصاویر سطح دو (R1SBOA) سنجنده MERIS 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 شود.

## ۳-۶- اطلاعات استفاده شده

### ۱-۳-۶- اندازه گیری‌های میدانی عمق سکی (شفافیت)

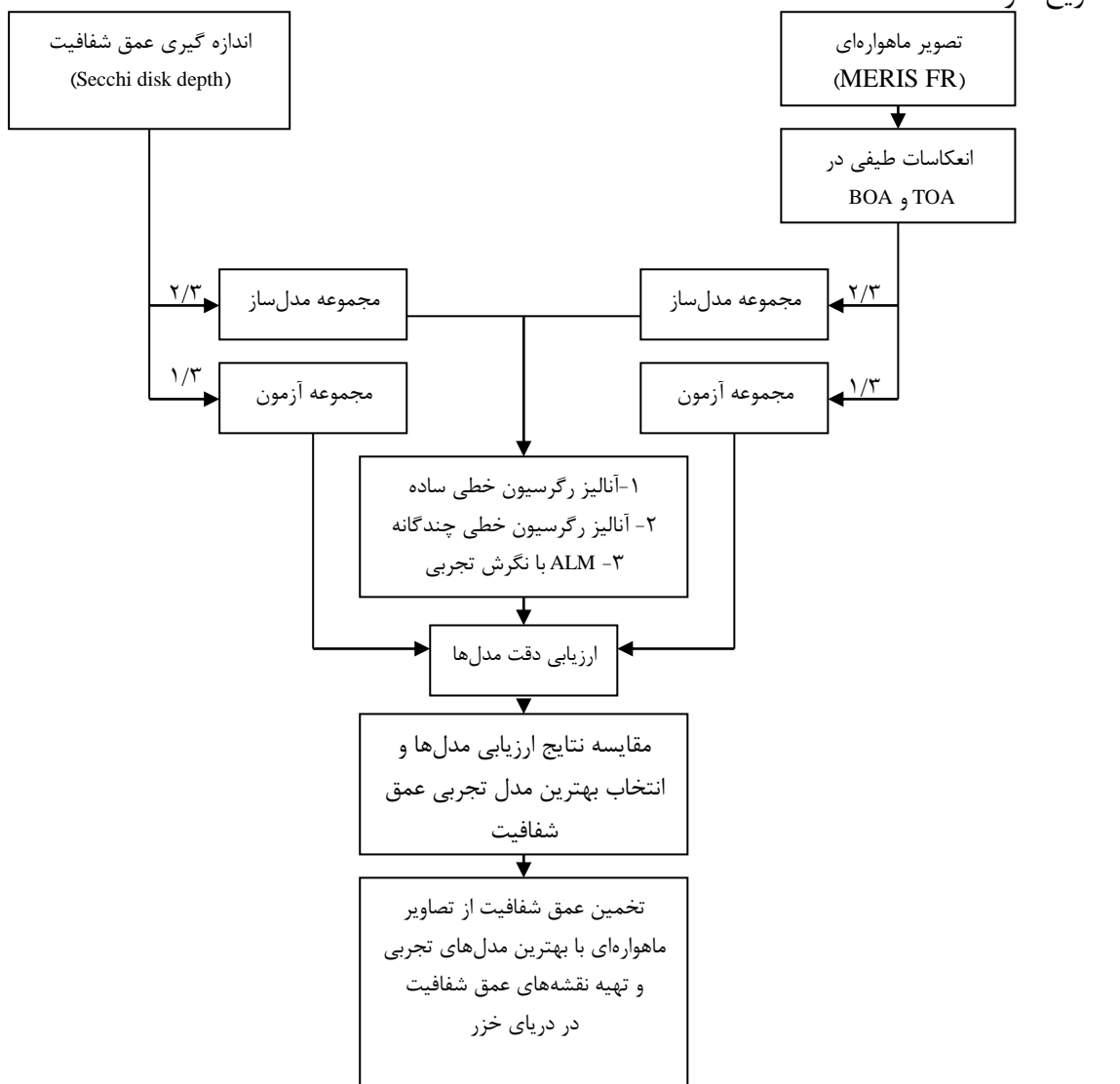
داده‌های عمق سکی که در این تحقیق برای توسعه الگوریتم‌های تجربی استفاده شده است ۳۷ نمونه میدانی می‌باشد که به همراه سه پارامتر کیفی غلظت کلروفیل-a، غلظت کل مواد معلق و ضریب جذب مواد آلی زرد رنگ، همزمان با عبور سنجنده MERIS از روی دریای خزر در بازه زمانی تیر تا آبان ماه ۱۳۸۴ اندازه گیری شده است. در شکل ۴-۲ موقعیت میدانی نقاط اندازه گیری عمق سکی نشان داده شده است.

## ۶-۳-۲- داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های رنگ آب استفاده شده در این تحقیق شامل ۱۳ تصویر سطح یک (RSTOA) و ۱۳ تصویر سطح دو (RrsBOA) از سنجنده MERIS FR مربوط به روزهای نمونه برداری میدانی است. تصاویر سطح دو سنجنده MERIS با استفاده از پردازشگر C2R پردازش شده است.

## ۶-۴- روش تحقیق

خلاصه روش تحقیق استفاده شده در این بخش در شکل ۶-۱ نمایش داده شده است. که در ادامه تشریح خواهد شد.



شکل ۶-۱- فلوچارت روش تحقیق

## ۶-۴-۱- جمع آوری و آماده سازی داده‌ها (تولید پایگاه داده)

در این بخش اندازه گیری‌های میدانی عمق سکی و تصاویر ماهواره سطح یک MERIS همزمان با آن، جمع آوری و تصحیحات لازم (حذف داده‌های درخشش خورشیدی) بر روی آنها صورت گرفت. از آنجایی که مدل‌سازی بر اساس مقادیر انعکاسی در بالا (R1STOA) و پایین اتمسفر (R1SBOA) انجام خواهد شد این داده‌ها در این بخش از تصاویر سطح یک سنجنده MERIS تولید شدند. برای تولید داده‌های انعکاس طیفی در TOA، تصاویر سطح یک (Level-1b) سنجنده MERIS، که شامل داده‌های تشعشع طیفی رو به بالا در TOA هستند با استفاده از داده‌های تشعشع خورشیدی رو به پایین در TOA تبدیل به انعکاسات طیفی در TOA شدند. برای تولید داده‌های انعکاس طیفی در BOA، تصاویر سطح یک اولیه MERIS با استفاده از پردازشگر C2R پردازش و تبدیل به مقادیر انعکاس طیفی در BOA شدند (یعنی تصاویر سطح یک به تصاویر سطح دو تبدیل شد). در جدول ۶-۱ و ۶-۲ به ترتیب توصیف آماری از اندازه گیری‌های عمق سکی و باندهای استفاده شده از MERIS در این مدل‌سازی ارائه شده است.

جدول ۶-۱- توصیف آماری از اندازه گیری‌های عمق سکی استفاده شده در مدل‌سازی تجربی

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

جدول ۶-۲- باندهای استفاده شده از MERIS در مدل‌سازی تجربی

باند	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14
طول موج (λ)	412	442	490	510	560	620	665	681	709	754	779	865	885

## ۶-۴-۲- استخراج مقادیر انعکاسی از تصاویر MERIS

در این بخش مقادیر انعکاس طیفی در TOA و BOA، در طول و عرض جغرافیایی متناظر با مقادیر میدانی عمق سکی به ترتیب از تصاویر سطح یک و سطح دو سنجنده MERIS استخراج شدند.

### ۶-۴-۳- تقسیم داده‌ها

در ابتدای این مرحله دو پایگاه داده‌ای مستقل برای مدل‌سازی وجود دارد. پایگاه اول حاوی ۳۷ داده است و هر داده شامل مقادیر همزمان عمق سکی و انعکاسات سنجش از دوری متناظر با آن در TOA، در طول موج‌های مختلف (جدول ۶-۲) می‌باشد. به طور مشابه پایگاه دوم نیز حاوی ۳۷ داده عمق سکی و انعکاسات سنجش از دوری متناظر با آن در BOA در طول موج‌های مختلف (البته بدون طول موج ۸۸۵ نانومتر) می‌باشد. 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 اعتبار سنجی مدل‌های توسعه یافته استفاده خواهد شد.

### ۶-۴-۴- مدل‌سازی (ساخت الگو)

به طور کلی مدل‌سازی تجربی عمق سکی، با استفاده از داده‌های مجموعه مدل‌ساز، در سه بخش انجام خواهد شد. در این سه بخش به ترتیب از آنالیز رگرسیون خطی ساده، آنالیز رگرسیون خطی چندگانه و مدل ALM تجربی به منظور مدل‌سازی رابطه‌ی بین عمق سکی و مقادیر انعکاسی در TOA و BOA استفاده خواهد شد. در این مرحله از مدل‌سازی، از مقادیر انعکاس طیفی در TOA و BOA به عنوان متغیرهای برآورد کننده (X) و از عمق سکی به عنوان متغیرهای برآورد (پاسخ یا Y) در مدل‌سازی استفاده می‌شود. اصولاً ساختار مدل‌های رگرسیونی که غالباً در مطالعات رنگ آب به منظور برقراری ارتباط بین پارامترهای کیفی آب و انعکاسات طیفی استفاده شده است به صورت زیر است (Su et al., 2008).

$$Y = C_0 + \sum_{i=1}^k C_i R_i$$

$$\text{Log}Y = C_0 + \sum_{i=1}^k C_i R_i$$

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

که در آن  $Y$  یک کمیت فیزیکی آب است که باید تخمین زده شود (مثل عمق سکی)،  $R_i$  مقادیر انعکاس طیفی در کانال طیفی  $i$  ام و یا نسبت انعکاسی کانال‌های طیفی مختلف و ضرایب  $C_0$  و  $C_i$  ضرایب رگرسیون هستند که از طریق برازش بین مقادیر انعکاسی و کمیت فیزیکی مربوطه بدست می‌آیند.

#### ۶-۴-۱- معیارهای گزینش بهترین مقادیر انعکاسی برای مدل‌سازی

در مدل‌سازی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده (بخش اول مدل‌سازی)، مطابق Kratzer et al. (2007) برای انتخاب بهترین مقادیر یا نسبت‌های انعکاسی برای مدل‌سازی، از ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده خواهد شد. بر این اساس با برقراری ارتباط ساده رگرسیونی بین مقادیر (یا نسبت‌های) انعکاسی مختلف در TOA و BOA، و مقادیر عمق سکی، ماتریس ضرایب تعیین ایجاد خواهد شد. سپس بهترین مقدار یا نسبت انعکاسی که دارای بیشترین ضریب تعیین است برای مدل‌سازی عمق سکی انتخاب می‌شود.

رابطه ضریب تعیین ( $R^2$ ) (رابطه ۶-۷) عبارت است از :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=N} (X_{i,Mod} - \bar{X}_{Mod})(X_{i,Act} - \bar{X}_{Act})}{(N-1)\sigma_{X_{Mod}}\sigma_{X_{Act}}} \quad (7-6)$$

که در آن  $R^2$ ،  $X_{Mod}$ ،  $X_{Act}$ ،  $\sigma_{X_{Mod}}$ ،  $\sigma_{X_{Act}}$  و  $N$  به ترتیب ضریب تعیین، مقادیر مشاهده شده (اندازه گیری شده) عمق سکی، مقادیر برآورد شده عمق سکی، انحراف استاندارد مقادیر عمق سکی میدانی، انحراف استاندارد مقادیر عمق سکی برآورد شده و تعداد نمونه‌ها (مشاهدات) می‌باشند.

در بخش دوم مدل‌سازی یا مدل‌سازی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی چندگانه، مطابق رضایی و سلطانی (۱۳۷۷)، برای انتخاب بهترین زیر مجموعه از مقادیر (متغیرهای) انعکاسی برای مدل‌سازی، از ضریب تعیین اصلاح شده  $(\bar{R}^2)$  <sup>۵</sup>، میانگین مربعات خطا <sup>۶</sup> (MSD) و آماره  $C_p$  مالوز <sup>۷</sup> استفاده

<sup>5</sup> Adjusted  $R^2$

<sup>6</sup> Mean Square error

<sup>7</sup> Mallows's  $C_p$



خواهد شد. بر این اساس ابتدا با استفاده از دو آماره  $\bar{R}^2$  و MSD، زیر مجموعه‌های یکسان از نظر تعداد متغیر (زیر مجموعه‌های یک، دو، سه، ...، n متغیره) به منظور مدل‌سازی عمق سکی مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در این میان بهترین زیر مجموعه‌ها در مجموعه‌های n متغیره، زیر مجموعه‌هایی هستند که دارای  $\bar{R}^2$  بیشتر و MSD کمتر می‌باشند. این زیر مجموعه‌ها (بهترین زیر مجموعه‌های انتخاب شده) از نظر تعداد متغیر یکسان نیستند. بنابراین از آماره  $C_p$  مالوز به منظور انتخاب بهترین زیر مجموعه (از میان این زیر مجموعه‌ها) استفاده خواهد شد. بر این اساس بهترین زیر مجموعه از مقادیر انعکاسی برای مدل‌سازی عمق سکی، زیر مجموعه‌ای است که مقدار محاسبه شده  $C_p$  مالوز آن به تعداد متغیرهای انعکاسی استفاده شده در زیر مجموعه (البته به علاوه یک ثابت) نزدیک‌تر است.

رابطه ضریب تعیین اصلاح شده  $\bar{R}^2$  (رابطه ۶-۸)، میانگین مربعات خطا (MSE) (رابطه ۶-۹)، و  $C_p$  مالوز (رابطه ۶-۱۰) عبارت است:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{N-1}{N-P}(1-R^2) \quad (۸-۶)$$

که در آن  $N$ ،  $P$  و  $R^2$  به ترتیب تعداد نمونه‌ها، تعداد متغیرهای برآورد کننده در مدل (مقادیر انعکاسی) و ضریب تعیین معمولی است.

(۶-۹)

$$MSD = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{Act} - Y_i^{Mod})^2}{N-P} \quad (۱۰-۶)$$

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{Act} - Y_i^{Mod})^2}{S^2} + (2P + N)$$

که در آن  $S^2$  واریانس مانده‌ها و  $P$  تعداد متغیرهای برآورد کننده در مدل رگرسیون چندگانه و  $C_p$  آماره مالوز است (رضایی و سلطانی، ۱۳۷۷).

در بخش سوم مدل سازی یا مدل سازی با استفاده از روش ALM تجربی (طاهری شهرآئینی، ۱۳۸۶)، ابتدا ALM با استفاده از اندازه گیری های میدانی عمق سکی و مقادیر (یا نسبت های) انعکاسی مختلف متناظر با آن در TOA و BOA، برای داده های مجموعه مدل ساز آموزش داده می شود. سپس فقط مقادیر (یا نسبت های) انعکاسی مختلف در مجموعه آزمون به عنوان ورودی به آن معرفی شده، ALM بر اساس دانشی که از رابطه بین عمق سکی و مقادیر (یا نسبت های) انعکاسی متناظر با آن از مجموعه مدل ساز کسب کرده است مقادیر عمق سکی را بر اساس مقادیر انعکاسی ورودی برآورد می کند. بر این اساس مقدار یا نسبت انعکاسی که ALM بر اساس آن بهترین برآورد را از مقادیر عمق سکی بخش آزمون دارد به عنوان بهترین مقدار یا نسبت انعکاسی برای مدل سازی عمق سکی با ALM انتخاب می شود.

#### ۶-۴-۵- معیارهای ارزیابی مدل های تجربی

برای ارزیابی دقت مدل های تجربی هم در قسمت مدل سازی و هم در قسمت اعتبار سنجی مدل ها (با مجموعه داده های بخش آزمون)، از معیارهای آماری و گرافیکی متعددی چون ضریب تعیین ( $R^2$ )، ضریب همبستگی ( $R$ )، میانگین مطلق درصد خطا (MAPE)، مجذور میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین اریبی (MBE) و نمودارهای پراکندگی و Q-Q استفاده خواهد شد (توصیف ریاضی این آماره ها در فصل پنجم ارائه شده است).

#### ۶-۴-۶- روش انتخاب مدل تجربی برتر

به منظور انتخاب بهترین مدل تجربی از بین سه مدل تجربی توسعه یافته برای عمق سکی، از روش امتیاز دهی اشاره شده در بخش ۵-۴ استفاده خواهد شد.

## ۶-۵- نتایج و بحث

### ۶-۵-۱- مدل سازی عمق سکی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده

در این قسمت مدل سازی عمق سکی در دو بخش انجام می شود در بخش اول، مدل سازی عمق سکی براساس مقادیر (یا نسبت های) انعکاسی در TOA (پایگاه اول) و در بخش دوم مدل سازی بر اساس مقادیر انعکاسی در BOA (پایگاه دوم) انجام می شود.

### ۶-۵-۱-۱- مدل سازی عمق شفافیت با استفاده از انعکاسات طیفی در TOA (پایگاه اول)

به منظور تعیین اینکه کدام یک از متغیرهای انعکاسی در TOA (باندها) بیشترین اهمیت را در مدل سازی و استخراج عمق سکی دارند از ماتریس ضرایب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شد. بر این اساس رابطه و میزان همبستگی مقادیر انعکاسی در TOA به صورت تک باند و نسبت بانندی در مقابل عمق سکی بررسی شد. نتایج این بررسی ها در جدول ۶-۳ و ۶-۴ ارائه شده است. اهمیت هر متغیر یا نسبت انعکاسی 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 نتایج ارائه شده در جدول ۶-۳ و ۶-۴ نشان می دهد، بیشترین ضرایب تعیین مربوط به رابطه بین عمق سکی و نسبت های بانندی می باشد. بر اساس نتایج جدول ۶-۴ بهترین نسبت بانندی برای مدل سازی عمق سکی نسبت بانندی  $Rrs(510)/Rrs(560)$  می باشد بنابراین مدل سازی عمق سکی در این قسمت با استفاده از این نسبت بانندی انجام شد. نتایج آماری و گرافیکی این مدل سازی به ترتیب در جدول ۶-۵ و شکل های ۶-۲، ۶-۳ و ۶-۴ نشان داده شده است.

جدول ۶-۳- الف) ماتریس ضرایب تعیین ( $R^2$ ) بین مقادیر انعکاسی ( $R_{rsTOA}$ ) و عمق سکی ( $N=25$ )

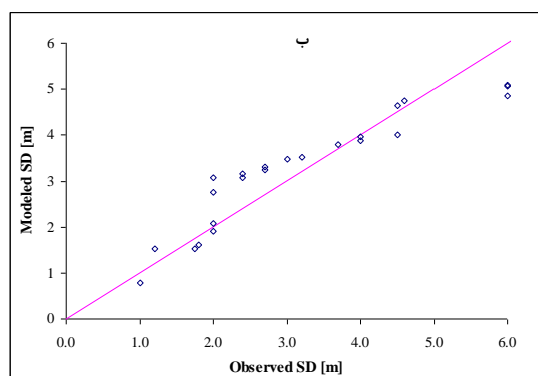
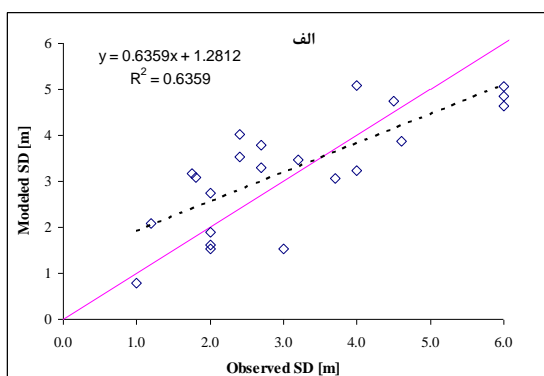
	SD	1/SD	Log(SD)
Rrs(412)	0.07	0.09	0.08
Log Rrs(412)	0.07	0.08	0.08
Rrs(442)	0.09	0.12	0.11
Log Rrs(442)	0.09	0.11	0.1
Rrs(490)	0.16	0.18	0.18
Log Rrs(490)	0.16	0.17	0.17
Rrs(510)	0.23	0.25	0.25
Log Rrs(510)	0.24	0.25	0.25
Rrs(560)	0.41	<b>0.46</b>	<b>0.46</b>
Log Rrs(560)	0.45	<b>0.45</b>	<b>0.47</b>
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 ۶-۴) ماتریس ضرایب تعیین ( $R^2$ ) بین نسبت‌های انعکاسی و عمق سکی ( $N=25$ ) (در اینجا نسبت‌هایی با بیشترین ضریب تعیین گزارش شده است)

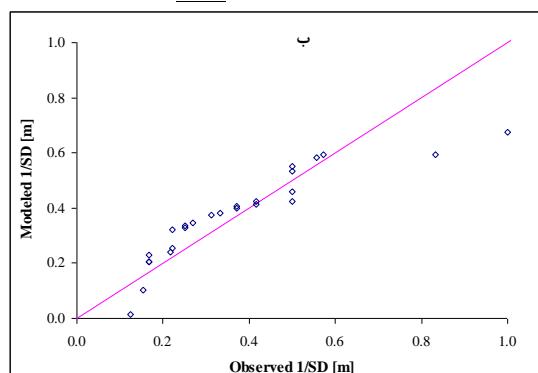
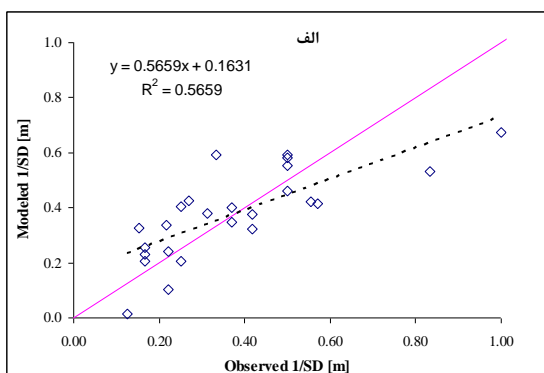
	SD	1/SD	Log(SD)
Rrs(560)/Rrs(412)	0.44	0.44	0.47
Log(Rrs(560)/Rrs(412))	0.47	0.43	0.47
Rrs(560)/Rrs(442)	0.50	0.48	0.52
Log(Rrs(560)/Rrs(442))	0.52	0.47	0.53
Rrs(560)/Rrs(490)	0.59	0.57	0.62
Log(Rrs(560)/Rrs(490))	0.60	0.55	0.62
Rrs(490)/Rrs(560)	0.62	0.54	0.62
Log(Rrs(490)/Rrs(560))	0.60	0.55	0.62
Rrs(510)/Rrs(560)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

جدول ۶-۵- نتایج آماری مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از بهترین نسبت باندی (N=۲۵)

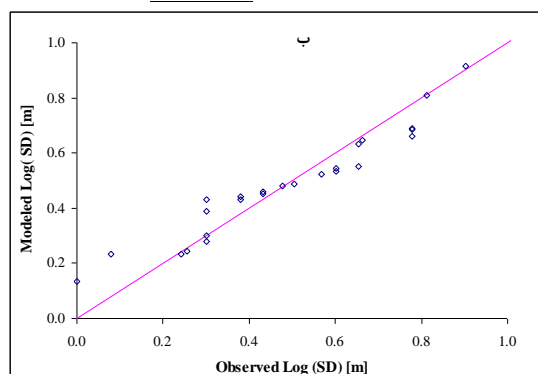
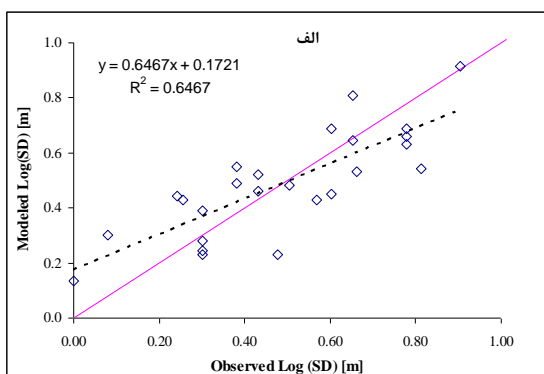
Algorithm(A)	Model Fitted	RMSE	MBE	R <sup>2</sup>
Rrs(510)/Rrs(560)	$SD = -20.3 + 19.7 * A$	1.09	0.00042	0.64
	$1/SD = 2.97 - 2.14 * A$	0.14	0.00002	0.57
	$\text{Log}(SD) = -2.57 + 2.53 * A$	0.14	0.00003	0.65



شکل ۶-۲- نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های عمق سکی مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز)



شکل ۶-۳- نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز)

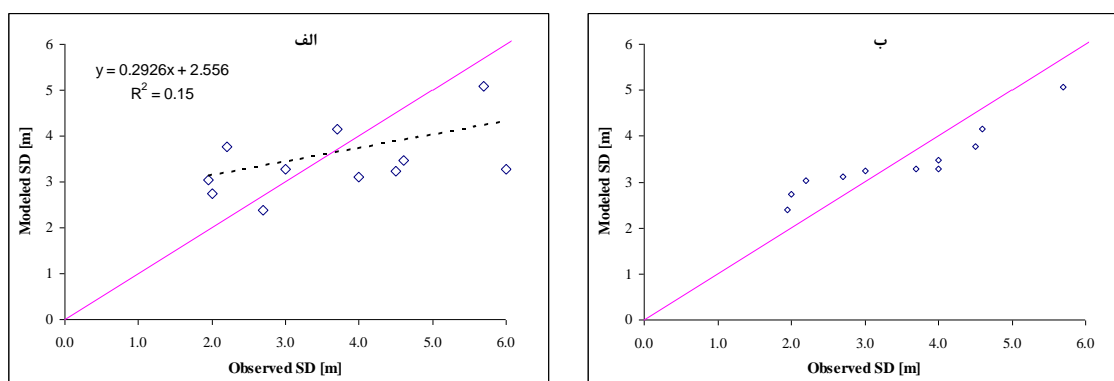


شکل ۶-۴- نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های لگاریتم عمق سکی مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز)

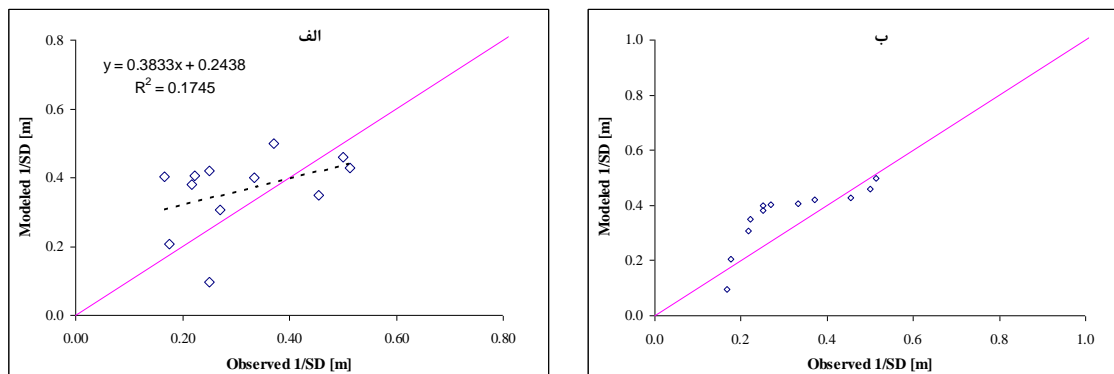
نتایج ارزیابی این سه مدل نسبت بانندی با داده‌های مجموعه آزمون در جدول ۶-۶ و شکل‌های ۶-۵، ۶-۶ و ۶-۷ نشان داده شده است.

جدول ۶-۶- نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی توسعه یافته عمق سکی با استفاده از داده‌های بخش آزمون (N=۱۲)

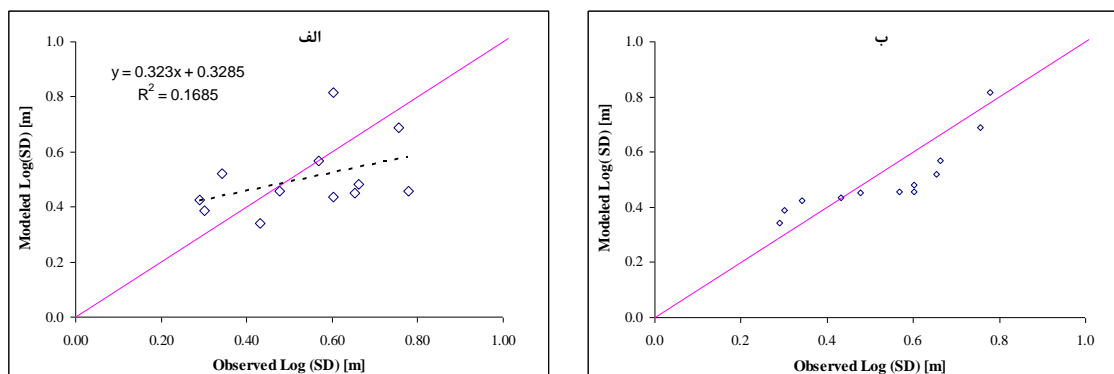
Model	MAPE	RMSE	MBE	R
$SD = - 20.3 + 19.7 Rrs(510)/Rrs(560)$	31.72	1.30	-0.06	0.39
$1/SD = 2.97 - 2.14 R510/R560$	46.81	0.13	0.05	0.42
$\text{Log}(SD) = - 2.57 + 2.53 R510/R560$	27.01	0.16	-0.04	0.41



شکل ۶-۵- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های عمق سکی مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون)



شکل ۶-۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون)



شکل ۶-۷- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های لگاریتم عمق سکی مدل‌سازی شده در مقابل داده‌های لگاریتم عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون)

با توجه به نتایج ضعیف (همبستگی پایین) و رفتار کاملاً غیر خطی (نمودار Q-Q داده‌های بخش آزمون) این سه مدل تجربی توسعه یافته عمق سکی، به صراحت می‌توان نتیجه‌گیری نمود که این سه مدل تجربی به درستی قادر به مدل‌سازی رفتار مقادیر عمق سکی در مجموعه آزمون نیستند.

#### ۶-۵-۱-۲- مدل‌سازی عمق شفافیت با استفاده از انعکاسات طیفی در BOA

مشابه حالت قبل برای تعیین بهترین مقادیر یا نسبت‌های انعکاسی در BOA برای مدل‌سازی عمق سکی، ابتدا رابطه و میزان همبستگی بین مقادیر و نسبت‌های انعکاسی مختلف در BOA، و عمق سکی (به علاوه معکوس و لگاریتم آن) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی در جدول ۶-۷ و ۶-۸ نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۶-۷ می‌توان مشاهده نمود که تمام مقادیر انعکاسی (باندها) در بخش قرمز و مادون قرمز سنجنده MERIS (۸۶۵-۶۲۰ نانومتر) همبستگی بسیار خوب و بالایی با عکس عمق سکی نشان می‌دهند. در اینجا برخلاف حالت قبل، بیشترین ضرایب تعیین بین مقادیر انعکاسی به صورت تک باند و معکوس عمق سکی مشاهده می‌شود. در ضمن ضرایب تعیین بدست آمده از مقادیر انعکاسی در BOA بالاتر از ضرایب تعیین بدست آمده از مقادیر و نسبت‌های بانندی در TOA است (جدول ۶-۵ و ۶-۶). در جداول ۶-۷ و ۶-۸ بیشترین ضرایب تعیین در حالت تک باند بین  $Rrs(620)$  و  $Rrs(779)$  و در حالت نسبت بانندی بین  $Rrs(681)/Rrs(560)$  و معکوس عمق سکی وجود دارد. بنابراین مدل‌سازی معکوس عمق سکی در این بخش بر اساس مقادیر انعکاسی در باندهای  $Rrs(620)$  و  $Rrs(779)$  و نسبت انعکاسی

Rrs(681)/Rrs(560) انجام شد. نتایج آماری و گرافیکی این مدل سازی به ترتیب در جدول ۶-۹ و

شکل های ۶-۸، ۶-۹ و ۶-۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۶-۷- الف) ماتریس ضرایب تعیین ( $R^2$ ) بین مقادیر انعکاسی ( $Rrs_{BOA}$ ) و عمق سکی ( $N=25$ )

	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	<b>0.73</b>	0.57
Log Rrs(620)	0.66	0.65	0.7
Rrs(665)	0.37	<b>0.71</b>	0.54
Log Rrs(665)	0.65	0.66	0.7
Rrs(681)	0.38	<b>0.71</b>	0.54
Log Rrs(681)	0.66	0.66	0.7
Rrs(709)	0.36	<b>0.71</b>	0.53
Log Rrs(709)	0.66	0.67	0.71
Rrs(754)	0.37	<b>0.72</b>	0.54
Log Rrs(754)	0.67	0.68	0.71
Rrs(779)	0.37	<b>0.73</b>	0.55
Log Rrs(779)	0.67	0.68	0.71
Rrs(865)	0.38	<b>0.72</b>	0.55
Log Rrs(865)	0.67	0.67	0.71

جدول ۶-۸- ماتریس ضرایب تعیین ( $R^2$ ) بین نسبت های انعکاسی مختلف در BOA و عمق سکی ( $N=25$ ) (در اینجا

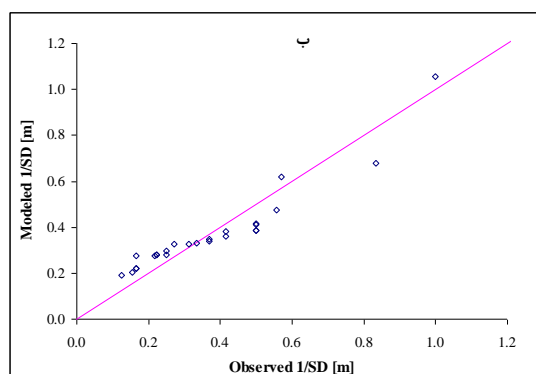
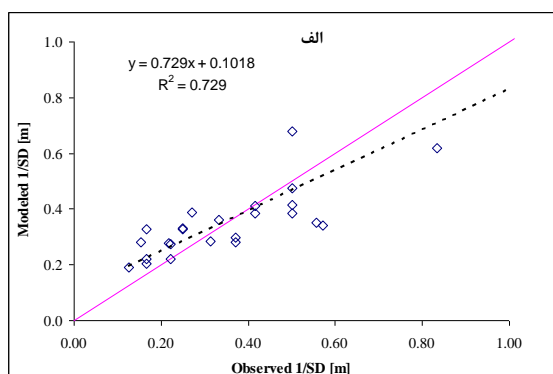
نسبت هایی با بیشترین ضریب تعیین گزارش شده است)

	SD	1/SD	Log(SD)
Rrs(681)/Rrs(412)	0.37	<b>0.66</b>	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	<b>0.68</b>	0.55

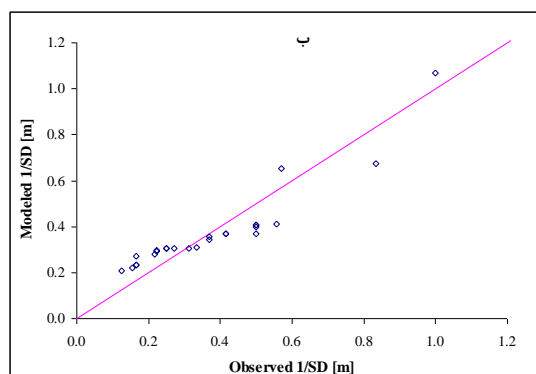
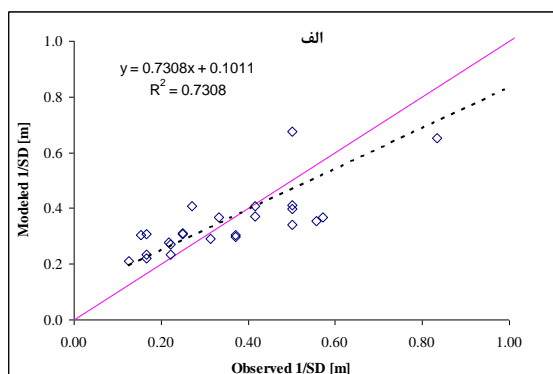


جدول ۶-۹- نتایج آماری مدل‌سازی معکوس عمق سکی با استفاده از بهترین نسبت بانندی در BOA (N=۲۵)

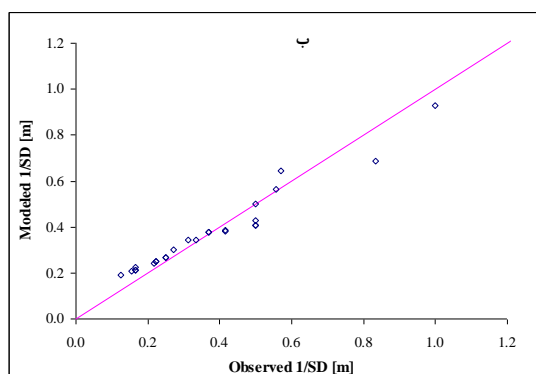
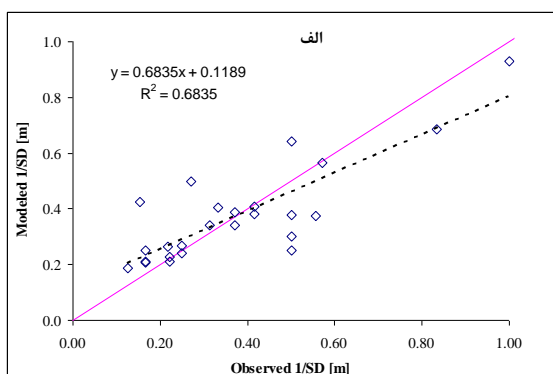
Algorithm(A)	Model Fitted	RMSE	MBE	R2
Rrs(620)	$1/SD = 0.161 + 70.7 * A$	0.11	-0.00003	0.73
Rrs(779)	$1/SD = 0.190 + 515 * A$	0.11	0.00001	0.73
Rrs(681)/Rrs(560)	$1/SD = -0.138 + 2.08 * A$	0.12	0.00003	0.68



شکل ۶-۸- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از Rrs(620) در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز)



شکل ۶-۹- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از Rrs(779) در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز)

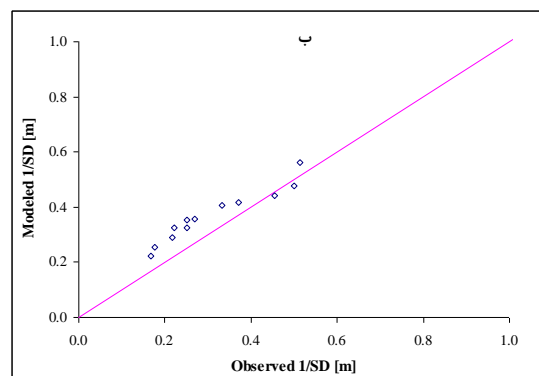
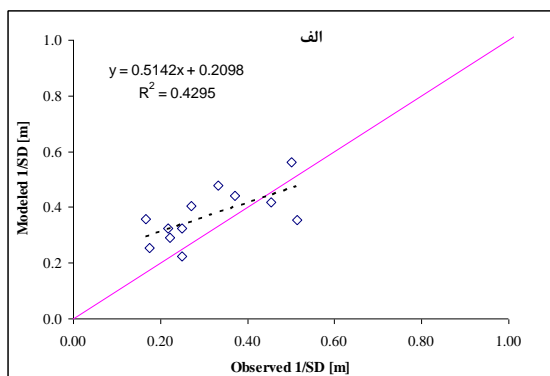


شکل ۶-۱۰- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از Rrs(681)/Rrs(560) در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز)

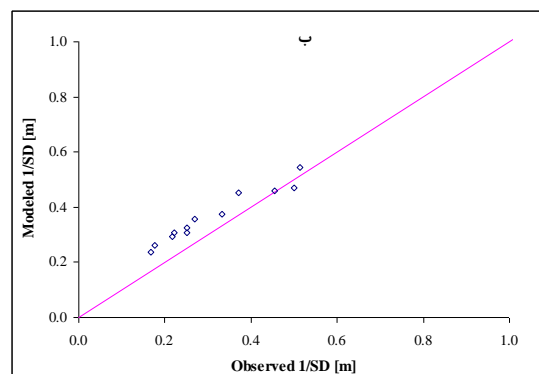
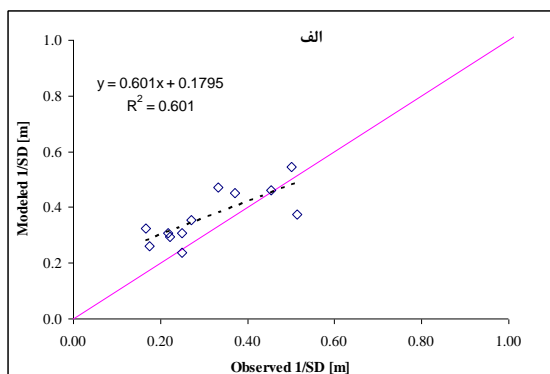
به منظور ارزیابی این سه مدل تجربی، عملکرد و دقت آن‌ها با استفاده از داده‌های مجموعه آزمون مورد سنجش قرار گرفت. نتایج آماری و گرافیکی این ارزیابی در جدول ۶-۱۰ و شکل‌های ۶-۱۱، ۶-۱۲ و ۶-۱۳ نشان داده شده است.

جدول ۶-۱۰- نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی توسعه یافته معکوس عمق سکی با استفاده از داده‌های انعکاس BOA بخش آزمون (N=۱۲)

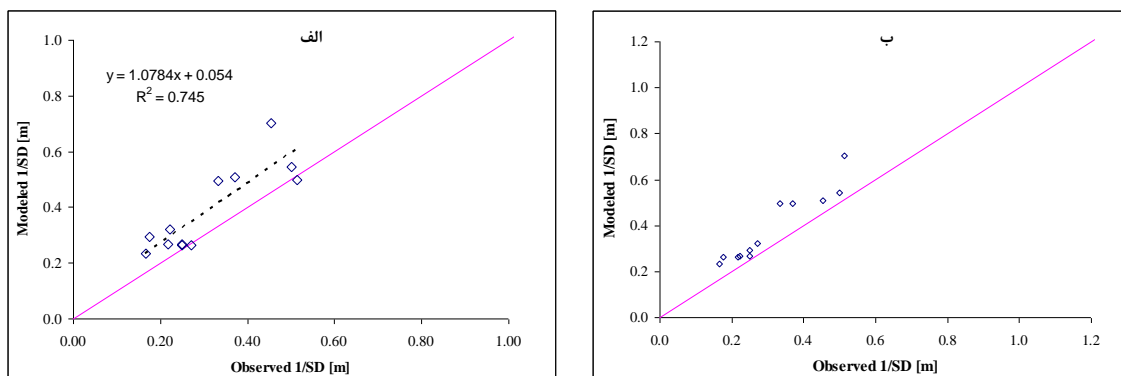
Model	MAPE	RMSE	MBE	R
$1/SD = 0.161 + 70.7 *Rrs(620)$	36.94	0.11	0.06	0.65
$1/SD = 0.190 + 515 *Rrs(779)$	31.51	0.09	0.06	0.78
$1/SD = - 0.138 + 2.08 *(Rrs(681)/Rrs(560))$	28.57	0.11	0.08	0.86



شکل ۶-۱۱- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل سازی شده با استفاده از Rrs(620) در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه گیری شده (داده‌های بخش آزمون)



شکل ۶-۱۲- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل سازی شده با استفاده از Rrs(779) در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه گیری شده (داده‌های بخش آزمون)



شکل ۶-۱۳- الف) نمودار پراکنش و ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از Rrs(681)/Rrs(560) در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون)

نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی این سه مدل تجربی با استفاده از داده‌های بخش آزمون نشان دهنده آن است که دقت و رفتار این سه مدل تجربی برای استخراج معکوس عمق سکی نسبتاً مطلوب است. خطای برآورد پایین، همبستگی بالا و رفتار نسبتاً خطی ارائه شده از این سه مدل تجربی برای داده‌های بخش آزمون دلایل این نتیجه‌گیری می‌باشد. در میان این سه مدل تجربی بر اساس نتایج آماری و گرافیکی بدست آمده (جدول ۶-۱۰ و شکل‌های ۶-۱۱، ۶-۱۲ و ۶-۱۳) می‌توان مدل‌های تجربی توسعه یافته بر اساس Rrs(779) و نسبت بانندی Rrs(681)/Rrs(560) را به علت ارائه ضریب همبستگی بالاتر و رفتار بهتر در مدل‌سازی به عنوان مدل‌های برتر جهت استخراج معکوس عمق سکی تعیین نمود.

#### ۶-۵-۲- مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی چند متغیره

توده آب در دریا مخلوطی از آب دریا، جامدات معلق، مواد آلی محلول، فیتوپلانکتون و اجزای دیگر می‌باشد. در این شرایط، انعکاس سطح آب در یک طول موج خاص، همزمان تحت تاثیر کلیه اجزای آب قرار دارد. از طرفی دیگر، اثرات هر یک از اجزای آب روی انعکاس سطح آب در طول موج‌های مختلف نیز متفاوت است. بنابراین در توسعه مدل‌های تخمین کیفیت آب باید چنین مواردی مد نظر قرار گیرد. در این زمینه استفاده از مدل‌های رگرسیونی چند متغیره که به طور همزمان از چندین باند انعکاسی برای تخمین یک پارامترهای کیفی استفاده می‌کنند متداول می‌باشد (Su et al., 2008).

این بخش مدل سازی عمق سکی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی چند متغیره انجام می شود. همان طور که قبلاً اشاره شد در اینجا برای انتخاب بهترین زیر مجموعه از مقادیر انعکاسی (باندها) برای مدل سازی عمق سکی، ابتدا کل زیر مجموعه های ممکن از مقادیر انعکاسی مورد ارزیابی قرار گرفت (بر اساس ضریب تعیین اصلاح شده و میانگین مربعات خطا). سپس از میان زیر مجموعه های برتر، زیر مجموعه ای با آماره  $C_p$  مالوز بهتر (مقدار این آماره بهتر است به تعداد متغیرهای استفاده شده در مدل به علاوه یک ثابت نزدیک تر باشد). برای مدل سازی عمق سکی (همچنین معکوس و لگاریتم آن) انتخاب می شود. مدل رگرسیون چند متغیره که در این بخش برای ارزیابی مقادیر عمق سکی استفاده خواهد شد می تواند به صورت رابطه ۶-۱۱ بیان شود.

$$Y = C_0 + \sum_{i=1}^k C_i R_i \quad (11-6)$$

مشابه مدل سازی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده، در اینجا نیز ابتدا مدل سازی عمق سکی بر اساس مقادیر انعکاسی در TOA و سپس بر اساس مقادیر انعکاسی در BOA انجام خواهد شد.

## ۶-۵-۲-۱- مدل سازی عمق سکی به صورت رگرسیون چند متغیره با استفاده از مقادیر

### انعکاسی در TOA

از طریق آنالیز رگرسیون به روش بهترین زیر مجموعه، ابتدا ارتباط بین عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی، و زیر مجموعه های  $n$  متغیره مختلف از مقادیر انعکاسی در TOA مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی که در آن بهترین زیر مجموعه ها با تعداد متغیرهای مختلف انتخاب شده است در جداول ۶-۱۱ (مدل سازی عمق سکی)، ۶-۱۲ (مدل سازی معکوس عمق سکی) و ۶-۱۳ نشان داده شده است. همچنین در این جداول مقدار آماره  $C_p$  مالوز هر زیر مجموعه نیز محاسبه و نشان داده شده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد انتخاب بهترین زیر مجموعه، می توان بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۶-۱۱، در مورد مدل سازی عمق سکی، زیر مجموعه ای با سه متغیر انعکاسی شامل مقادیر انعکاسی در باندهای ۵۱۰، ۵۶۰ و ۸۸۵ نانومتر را به واسطه مقدار  $C_p$  مالوز بهتر نسبت به بقیه زیر

مجموعه‌ها به عنوان زیر مجموعه بهتر شناسایی کرد. در مورد مدل‌سازی معکوس و لگاریتم عمق سکی (جدول ۶-۱۲ و ۶-۱۳) بر همین اساس می‌توان زیر مجموعه‌هایی با پنج متغیر انعکاسی را به عنوان بهترین زیر مجموعه‌ها انتخاب کرد، که این زیر مجموعه‌ها در مورد معکوس عمق سکی شامل مقادیر انعکاسی در باندهای ۴۱۲، ۵۱۰، ۵۶۰، ۶۸۱، ۷۷۹ نانومتر و در مورد لگاریتم عمق سکی شامل مقادیر انعکاسی در باندهای ۴۴۲، ۴۹۰، ۵۶۰، ۶۸۱ و ۷۷۹ نانومتر هستند.

در جدول ۶-۱۴ و شکل‌های ۶-۱۴، ۶-۱۵ و ۶-۱۶ به ترتیب نتایج آماری و گرافیکی مدل‌سازی عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی با استفاده از بهترین زیر مجموعه‌های شناسایی شده انجام شده است

جدول ۶-۱۱- مقادیر محاسبه شده  $R^2$  (adj)،  $R^2$ ، MSE و آماره  $C_p$  برای بهترین مدل‌های رگرسیونی عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در TOA

V ars	$R^2$	$R^2$ (adj)	Mallows $C_p$	MSD	Rrs(412)	Rrs(442)	Rrs(490)	Rrs(510)	Rrs(560)	Rrs(620)	Rrs(665)	Rrs(681)	Rrs(709)	Rrs(754)	Rrs(779)	Rrs(865)	Rrs(885)
1	42	39	16.5	<b>2.09</b>					X								
1	30	27	23.8	<b>2.5</b>						X							
2	60	57	6.4	<b>1.48</b>				X	X								
2	59	55	7.2	<b>1.53</b>			X		X								
3	69	64	3.1	<b>1.23</b>	X		X		X								
<b>3</b>	<b>68</b>	<b>63</b>	<b>3.7</b>	<b>1.27</b>				X	X								X
4	72	67	2.7	<b>1.13</b>		X	X		X				X				
4	72	67	2.8	<b>1.14</b>		X	X		X						X		
5	76	70	2.2	<b>1.03</b>		X	X		X		X	X					
5	76	69	2.7	<b>1.06</b>	X		X		X		X	X					
6	78	71	2.9	<b>0.99</b>		X	X		X		X	X					X
6	78	71	3	<b>1</b>		X	X		X		X	X				X	
7	80	72	3.7	<b>0.96</b>		X	X		X		X	X		X		X	
7	80	72	3.9	<b>0.97</b>		X		X	X		X	X		X		X	
8	82	73	4.7	<b>0.94</b>		X	X		X	X	X	X		X		X	
8	81	72	4.9	<b>0.95</b>		X		X	X	X	X	X		X		X	
9	83	72	6.2	<b>0.96</b>		X		X	X	X	X	X	X	X		X	
9	82	72	6.3	<b>0.97</b>	X			X	X	X	X	X	X	X		X	
10	83	70	8.1	<b>1.02</b>		X		X	X	X	X	X	X	X		X	X
10	83	70	8.2	<b>1.03</b>		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
11	83	68	10.1	<b>1.1</b>		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
11	83	68	10.1	<b>1.1</b>	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	
12	83	66	12.1	<b>1.18</b>	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
12	83	65	12.1	<b>1.18</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
13	83	63	14	<b>1.28</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

جدول ۶-۱۲- مقادیر محاسبه شده  $R^2$ ،  $R^2$  (adj)، MSE و آماره  $C_p$  برای بهترین مدل‌های رگرسیونی معکوس عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در TOA (در اینجا زیر مجموعه‌های بهتر نمایش داده شده است)

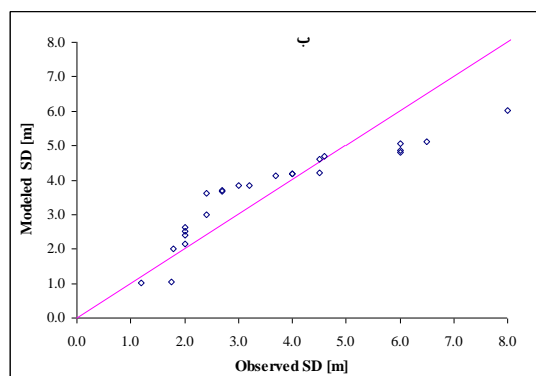
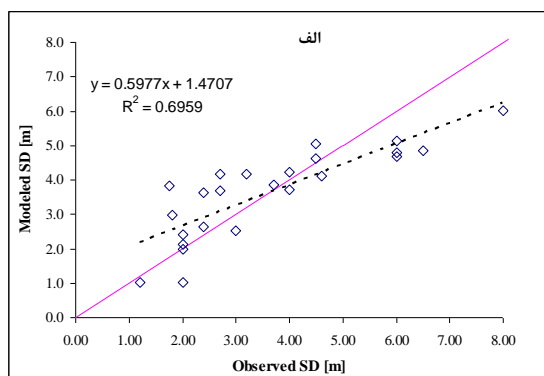
Vars	$R^2$	$R^2$ (adj)	Mallows $C_p$	MSD	Rrs(412)	Rrs(442)	Rrs(490)	Rrs(510)	Rrs(560)	Rrs(620)	Rrs(665)	Rrs(681)	Rrs(709)	Rrs(754)	Rrs(779)	Rrs(865)	Rrs(885)
5	94	92	5	0		X		X	X			X					X
<b>5</b>	<b>94</b>	<b>92</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>X</b>			<b>X</b>	<b>X</b>			<b>X</b>			<b>X</b>		
6	95	93	4	0		X		X	X		X	X					X
6	95	93	4.1	0	X			X	X		X	X					X
7	95	93	4.5	0		X		X	X		X	X	X				X
7	95	93	4.9	0		X		X	X		X	X	X			X	
8	96	93	5.7	0	X			X	X		X	X	X	X	X		
8	95	93	5.9	0		X	X	X	X		X	X	X				X
9	96	93	7.2	0	X		X	X	X	X	X	X	X				X
9	96	93	7.3	0	X			X	X		X	X	X	X	X		X
10	96	93	8.9	0	X		X	X	X		X	X	X	X	X		X
10	96	93	9	0	X		X	X	X	X	X	X	X		X		X
11	96	93	11	0	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
11	96	92	11	0	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
12	96	92	12	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
12	96	92	12	0	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X

جدول ۶-۱۳- مقادیر محاسبه شده  $R^2$ ،  $R^2$  (adj)، MSE و آماره  $C_p$  برای بهترین مدل‌های رگرسیونی لگاریتم عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در TOA (در اینجا زیر مجموعه‌های بهتر نمایش داده شده است)

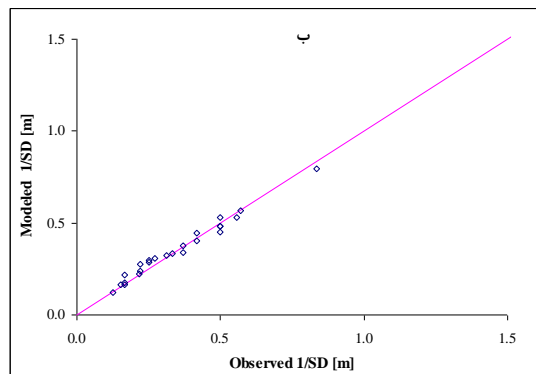
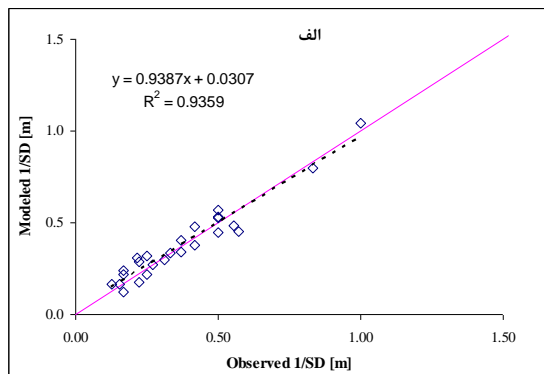
Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows $C_p$	MSE	Rrs(412)	Rrs(442)	Rrs(490)	Rrs(510)	Rrs(560)	Rrs(620)	Rrs(665)	Rrs(681)	Rrs(709)	Rrs(754)	Rrs(779)	Rrs(865)	Rrs(885)
4	85	81	4.9	0		X	X		X								X
4	84	81	5.1	0		X	X		X							X	
5	85	81	5.9	0		X	X		X			X					X
<b>5</b>	<b>85</b>	<b>81</b>	<b>6</b>	<b>0</b>		<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>			<b>X</b>			<b>X</b>		
6	89	86	2.8	0		X		X	X		X	X					X
6	89	86	2.8	0	X			X	X		X	X					X
7	90	86	3.4	0		X		X	X		X	X		X		X	
7	90	86	3.6	0	X			X	X		X	X		X		X	
8	91	86	4.9	0		X		X	X	X	X	X		X		X	
8	91	86	5	0		X		X	X	X	X	X	X				X
9	91	86	6.1	0		X		X	X	X	X	X	X	X		X	
9	91	86	6.2	0	X			X	X	X	X	X	X	X		X	
10	91	85	8	0	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	
10	91	85	8.1	0		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
11	91	84	10	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
11	91	84	10	0	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
12	91	83	12	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
12	91	83	12	0	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
13	91	81	14	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

جدول ۶-۱۴- نتایج آماری مدل سازی عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی با استفاده از بهترین زیر مجموعه های شناسایی شده در TOA (N=۲۵)

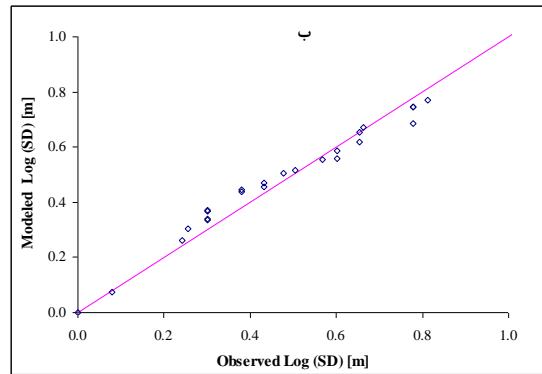
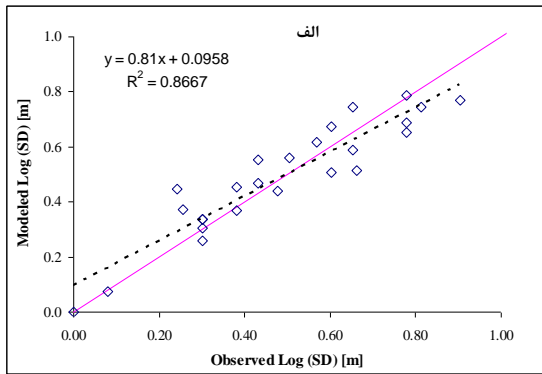
Model Fitted	RMSE	Bias	R2
$SD = 7.27 + 157 Rrs(510) - 257 Rrs(560) + 76.9 Rrs(885)$	1.03	-0.05	0.63
$1/SD = - 0.087 + 10.1 Rrs(412) - 48.2 Rrs(510) + 38.1 Rrs(560) + 24.8 Rrs(681) - 23.6 Rrs(779)$	0.05	0.01	0.92
$\text{Log}(SD) = 1.04 - 29.4 Rrs(442) + 62.2 Rrs(490) - 39.4 Rrs(560) - 8.89 Rrs(681) + 14.6 Rrs(779)$	0.09	0.003	0.83



شکل ۶-۱۴- نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده های عمق سکی مدل سازی شده با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۵۱۰، ۵۶۰ و ۸۸۵ نانومتر در مقابل داده های عمق سکی اندازه گیری شده (داده های بخش مدل ساز)



شکل ۶-۱۵- نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده های معکوس عمق سکی مدل سازی شده با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۴۱۲، ۵۱۰، ۵۶۰، ۶۸۱ و ۷۷۹ نانومتر در مقابل داده های معکوس عمق سکی اندازه گیری شده (داده های بخش مدل ساز)

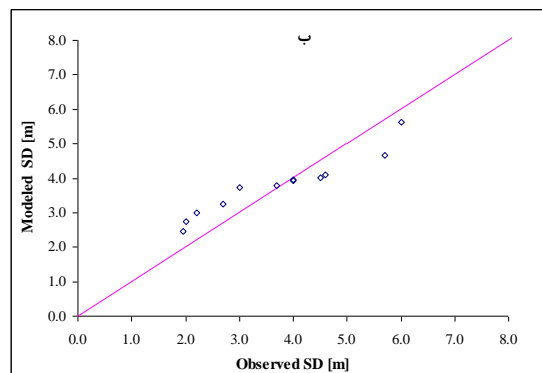
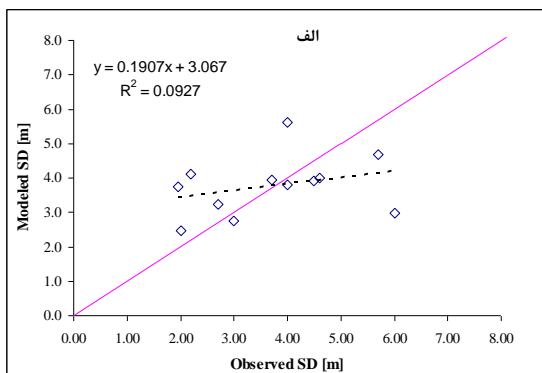


شکل ۶-۱۶- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های لگاریتم عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۴۴۲، ۴۹۰، ۵۶۰، ۶۸۱ و ۷۷۹ نانومتر در مقابل داده‌های لگاریتم عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز)

مشابه قبل به منظور ارزیابی عملکرد و دقت این سه مدل تجربی، از داده‌های مجموعه آزمون استفاده شد. نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی این سه مدل رگرسیونی با استفاده از داده‌های مجموعه آزمون به ترتیب در جدول ۶-۱۵ و شکل‌های ۶-۱۷، ۶-۱۸ و ۶-۱۹ نشان داده شده است.

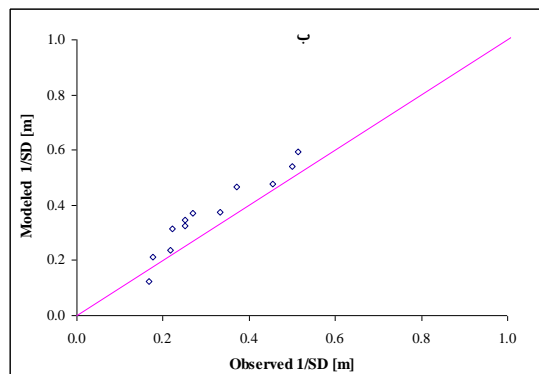
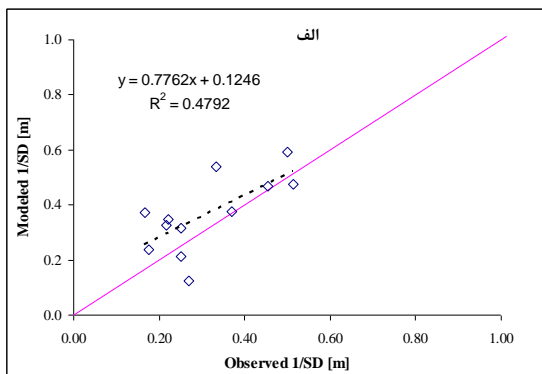
جدول ۶-۱۵- نتایج آماری ارزیابی سه مدل رگرسیونی عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی با استفاده از داده‌های بخش آزمون (N=۱۲)

Model	MAPE	RMSE	Bias	R
$SD = 7.27 + 157 Rrs(510) - 257 Rrs(560) + 76.9 Rrs(885)$	30.52	1.32	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	0.11	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	0.15	-0.03	0.50

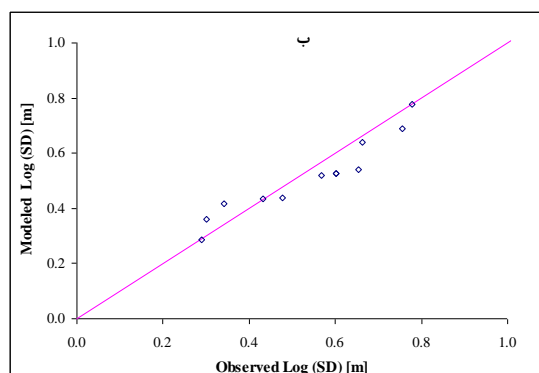
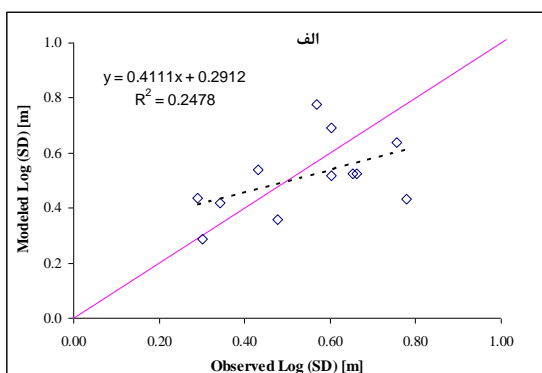


شکل ۶-۱۷- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مدل توسعه یافته بر مبنای مقادیر انعکاسی در باندهای ۵۱۰، ۵۶۰، ۸۸۵ نانومتر در مقابل داده‌های عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون)





شکل ۶-۱۸- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۴۱۲، ۵۱۰، ۵۶۰، ۶۸۱ و ۷۷۹ نانومتر در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز)



شکل ۶-۱۹- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های لگاریتم عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۴۴۲، ۴۹۰، ۵۶۰، ۶۸۱ و ۷۷۹ نانومتر در مقابل داده‌های لگاریتم عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌ساز)

با توجه به نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی این سه مدل رگرسیونی (جدول ۶-۱۵ و شکل‌های ۶-۱۷ تا ۶-۱۹) و مقایسه آن با نتایج ارزیابی سه مدل رگرسیونی عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی که در بخش ۶-۵-۱-۱ (جدول ۶-۶ و شکل‌های ۶-۵ تا ۶-۷) توسعه یافته بود می‌توان نتیجه‌گیری نمود که دقت مدل‌سازی این سه مدل رگرسیونی جدید بهبود یافته است. با این وجود هنوز دقت این سه مدل رگرسیونی برای پایش عملیاتی عمق سکی در دریای خزر کافی نیست.

## ۶-۵-۲-۲-مدل سازی عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در BOA

در بخش ۶-۵-۱-۲ (مدل سازی عمق سکی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده توسط مقادیر انعکاسی در BOA) بیشترین ضریب تعیین بین معکوس عمق سکی و مقادیر انعکاسی به صورت تک باند مشاهده شد (جدول ۶-۷) و مدل سازی معکوس عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی با بیشترین ضریب تعیین انجام شد. در این بخش به منظور افزایش دقت مدل سازی معکوس عمق سکی، به طور همزمان از چندین باند انعکاسی در BOA برای مدل سازی آن استفاده می شود. فرآیند انتخاب بهترین زیر مجموعه دقیقاً مشابه بخش قبل (۶-۵-۲-۱) است. نتایج بررسی و انتخاب بهترین زیر مجموعه از مقادیر انعکاسی در BOA برای مدل سازی معکوس عمق سکی در جدول ۶-۱۶ ارائه شده است. همان طور که از نتایج ارائه شده در این جدول مشخص است بهترین زیر مجموعه برای مدل-سازی معکوس عمق سکی، زیر مجموعه ای با دو متغیر انعکاسی، شامل مقادیر انعکاسی در باندهای ۷۵۴ و ۷۷۹ نانومتر است که دارای بهترین آماره  $C_p$  می باشد (مقدار  $C_p$  این زیر مجموعه ۳ می باشد که با تعداد متغیرهای مستقل استفاده شده در زیر مجموعه به علاوه یک متغیر ثابت هم خوانی دارد). در جدول ۶-۱۷ و شکل ۶-۲۰ نتایج آماری و گرافیکی مدل سازی معکوس عمق سکی با استفاده از این زیر مجموعه انتخابی نشان داده شده است.

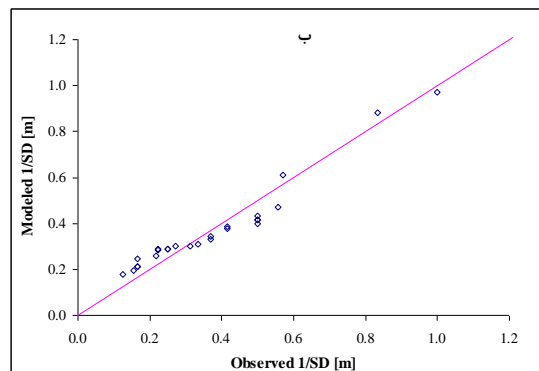
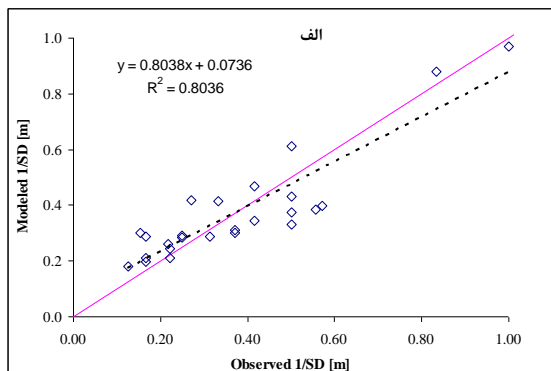
جدول ۶-۱۶- مقادیر محاسبه شده  $R^2$ ،  $R^2$  (adj)، MSE و آماره  $C_p$  برای بهترین مدل های رگرسیونی معکوس عمق

سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در BOA

Vars	$R^2$	$R^2$ (adj)	$C_p$ Mallows	MSE	Rrs(442)	Rrs(490)	Rrs(510)	Rrs(560)	Rrs(681)	Rrs(709)	Rrs(754)	Rrs(779)	Rrs(865)
2	80	79	3	0							X	X	
2	77	75	8	0						X		X	
3	83	80	3	0						X	X	X	
3	82	79	4	0					X		X	X	
4	84	81	4	0	X					X	X	X	
4	84	80	4	0		X				X	X	X	
5	85	81	5	0	X	X				X	X	X	
5	84	80	5	0	X		X			X	X	X	
6	85	80	6	0		X	X	X		X	X		X
6	85	80	6	0	X		X	X		X	X		X
7	87	82	6	0	X		X	X		X	X	X	X
7	87	81	7	0	X	X		X		X	X	X	X
8	87	81	8	0	X	X	X	X		X	X	X	X
8	87	81	8	0	X		X	X	X	X	X	X	X
9	87	80	10	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X

جدول ۶-۱۷- نتایج آماری مدل‌سازی معکوس عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۷۵۴ و ۷۷۹ نانومتر (N=۲۵)

Model Fitted	RMSE	Bias	R2
$1/SD = 0.164 - 5506 Rrs(754) + 7102 Rrs(779)$	0.09	-0.0001	0.79



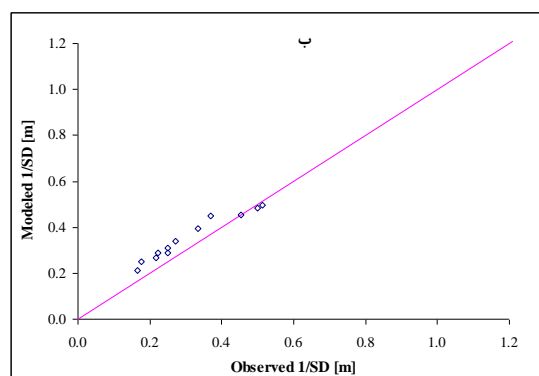
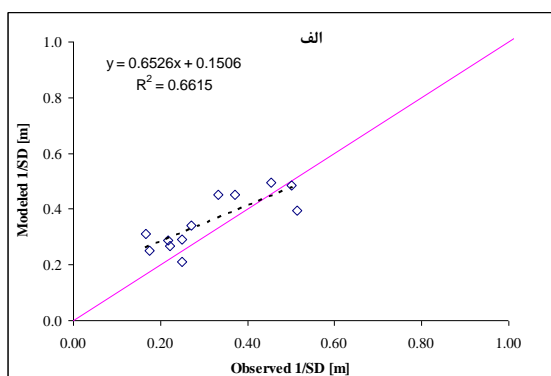
شکل ۶-۲۰- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مقادیر انعکاسی در باندهای ۷۵۴ و ۷۷۹ نانومتر در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش مدل‌سازی)

عملکرد این مدل دو متغیره نیز با استفاده از داده‌های مجموعه آزمون مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج

این ارزیابی در جدول ۶-۱۸ و شکل ۶-۲۱ نشان داده شده است.

جدول ۶-۱۸- نتایج آماری ارزیابی مدل دو متغیره معکوس عمق سکی با استفاده از داده‌های مجموعه آزمون

Model	MAPE	RMSE	MBE	R
$1/SD = 0.164 - 5506 * Rrs(754) + 7102 * Rrs(779)$	27.75	0.08	0.04	0.81



شکل ۶-۲۱- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با استفاده از مدل دو متغیره در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون)

مقایسه نتایج آماری و گرافیکی ارائه شده در جدول ۶-۱۸ و شکل ۶-۲۱ با نتایج آماری و گرافیکی

ارائه شده در جدول ۶-۱۱ و شکل‌های ۶-۱۱، ۶-۱۲ و ۶-۱۳ نشان دهنده آن است که مدل دو متغیره

جدید معکوس عمق سکی باعث افزایش دقت و کاهش خطای مدل‌سازی شده است. این مطلب به راحتی از مقایسه مقادیر MAPE, RMSE, MBE و نمودار Q-Q ارزیابی این مدل دو متغیره جدید با نتایج ارزیابی آماری و گرافیکی سه مدل، معکوس عمق سکی که در بخش ۶-۱-۵-۲ توسعه یافته است قابل نتیجه گیری می‌باشد.

### ۶-۵-۳- مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از مدل ALM تجربی

ساختار مدل ALM تجربی مشابه ساختار ALM مدل محور (فصل دوم) می‌باشد. در این بخش مقادیر و نسبت‌های انعکاسی مختلف (در TOA و BOA) به عنوان ورودی به ALM به منظور استخراج عمق سکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابتدا مدل ALM تجربی توسط اندازه گیری عمق سکی و مقادیر انعکاس طیفی متناظر با آن در مجموعه مدل‌ساز آموزش داده می‌شود و سپس دقت مدل ALM مذکور، برای برآورد عمق سکی با استفاده از داده‌های بخش آزمون مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این بخش نیز ابتدا مدل‌سازی با استفاده از مقادیر و نسبت انعکاسی در TOA و سپس براساس مقادیر و نسبت انعکاسی در BOA انجام خواهد شد.

### ۳-۵-۳-۱- مدل‌سازی عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در TOA

مدل ALM تجربی با استفاده از مقادیر عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی، و مقادیر و نسبت‌های بانندی مختلف متناظر با آن در مجموعه مدل‌ساز آموزش داده شد. نتایج آزمایش مدل ALM برای استخراج عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی با استفاده از مقادیر و نسبت‌های انعکاسی مختلف در مجموعه آزمون نشان داد که، چنانچه نسبت‌های انعکاسی در طول موج‌های مختلف به عنوان ورودی به مدل ALM در نظر گرفت شود دقت مدل‌سازی افزایش خواهد یافت. بر این اساس بهترین نتایج مدل‌سازی ALM برای عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی با استفاده از نسبت بانندی  $\frac{Rrs(\lambda)}{Rrs(560)}$  به ترتیب با چهار قانون فازی، هشت قانون فازی و هشت قانون فازی بدست می‌آید. در اینجا  $Rrs(\lambda)$  مقادیر انعکاسی در طول موج‌های مختلف (جدول

۲-۶) است که بر مقادیر انعکاسی در طول موج ۵۶۰  $Rrs(560)$  نانومتر تقسیم شده است. نتایج آماری و گرافیکی آزمایش مدل تجربی ALM با تعداد قوانین فازی مختلف، به منظور استخراج عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی با استفاده از این نسبت باندی، به ترتیب در جداول ۱۹-۶، ۲۰-۶ و ۲۱-۶ و شکل‌های ۲۲-۶، ۲۳-۶ و ۲۴-۶ نشان داده شده است. در مدل‌سازی ALM دو گروه از متغیرها نقش دارند گروه اول متغیرهایی هستند که از آنها به منظور تقسیم فضای متغیرها استفاده می‌شود و گروه دوم متغیرهایی هستند که در توابع تک متغیره ضمنی<sup>۸</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از دیاگرام‌های HPD<sup>۹</sup> (دیاگرام تقسیم بندی سلسله مراتبی)، می‌توان به آسانی متغیرهای تقسیم شده و توابع تک متغیره موجود در هر مرحله از مدل‌سازی را تعیین نمود بنابراین رتبه بندی و نقش متغیرها در مدل‌سازی به آسانی مشخص می‌شود. این یکی از توانمندی‌های مدل ALM می‌باشد که در دیگر روش‌های مدل‌سازی حتی مدل‌های شبکه عصبی نیز وجود ندارد. شکل-های ۲۵-۶، ۲۶-۶ و ۲۷-۶، به ترتیب HPD های مدل‌های ALM تجربی با چهار قانون فازی به منظور استخراج عمق سکی، با هشت قانون فازی به منظور استخراج معکوس عمق سکی و هشت قانون فازی به منظور استخراج لگاریتم عمق سکی را نشان می‌دهد. رتبه بندی متغیرهای مختلف با استفاده از HPD ها به آسانی قابل انجام است. فرض کنید معیار رتبه بندی متغیرها، تعداد دفعاتی باشد که یک متغیر در مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین صورت می‌توان متغیرهای استفاده شده در مدل‌سازی عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی را به ترتیب به صورت جداول ۲۲-۶، ۲۳-۶ و ۲۴-۶ رتبه بندی نمود. نتایج بدست آمده از رتبه بندی متغیرهای استفاده شده در مدل‌های تجربی ALM بسیار جالب هستند. در تمامی سه مدل تجربی عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی، نسبت  $\frac{Rrs(510)}{Rrs(560)}$  به عنوان بهترین متغیر، در توابع تک متغیره ضمنی انتخاب شده است (جدول ۲۲-۶ تا ۲۴-۶ را ببینید). با توجه به جدول ۵-۶ که نتایج ضرایب

<sup>8</sup> Implicit one-variable functions

<sup>9</sup> Hierarchical Partitioning Diagram

تعیین بین عمق سکی و نسبت‌های باندی مختلف را نشان می‌دهد به راحتی می‌توان دریافت که بهترین نسبت باندی برای مدل‌سازی عمق سکی (همچنین معکوس و لگاریتم آن) نسبت باندی  $\frac{Rrs(510)}{Rrs(560)}$  می‌باشد که به طور مطلوب توسط ALM شناسایی و در مدل‌سازی آن استفاده شده است.

جدول ۶-۱۹- نتایج بخش آزمون (ارزیابی) مدل ALM تجربی توسط داده‌های عمق سکی میدانی (N=۱۲)

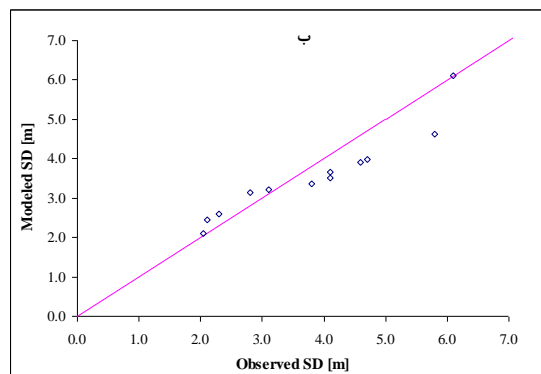
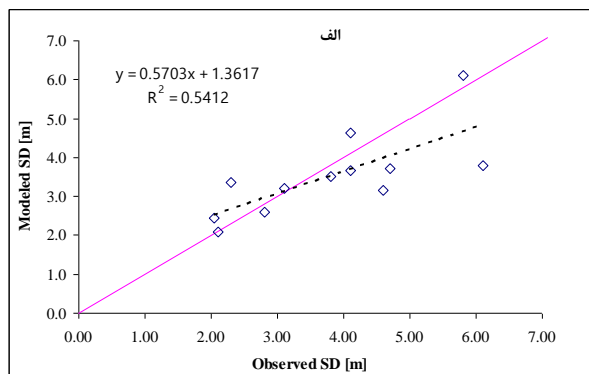
Rule	MAPE	RMSE	MBE	R
2	27.28	1.32	0.59	0.53
<b>4</b>	<b>17.52</b>	<b>0.93</b>	<b>0.27</b>	<b>0.73</b>
8	21.81	1.05	0.43	0.70
16	30.37	1.25	0.35	0.55
32	28.54	1.19	-0.20	0.56
64	29.98	1.24	-0.23	0.53
128	35.66	1.40	-0.41	0.46

جدول ۶-۲۰- نتایج بخش آزمون (ارزیابی) مدل ALM تجربی توسط داده‌های معکوس عمق سکی میدانی (N=۱۲)

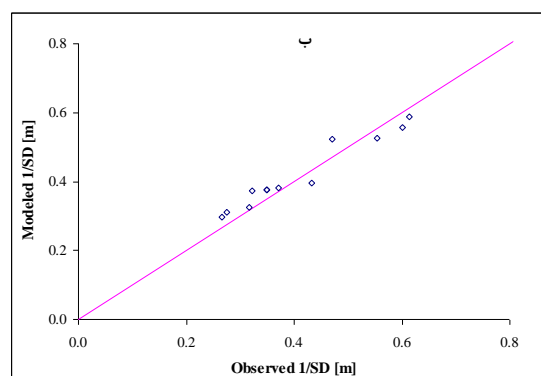
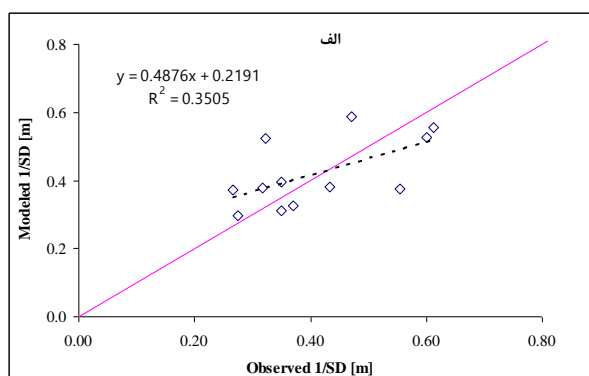
Rule	MAPE	RMSE	MBE	R
2	39.15	0.11	-0.06	0.60
4	38.58	0.12	-0.04	0.51
<b>8</b>	<b>29.64</b>	<b>0.10</b>	<b>-0.01</b>	<b>0.59</b>
16	38.95	0.13	-0.01	0.32
32	47.10	0.17	-0.03	0.27
64	44.47	0.14	0.01	0.14
128	38.23	0.13	-0.01	0.24

جدول ۶-۲۱- نتایج بخش آزمون (ارزیابی) مدل ALM تجربی توسط داده‌های لگاریتم عمق سکی میدانی (N=۱۲)

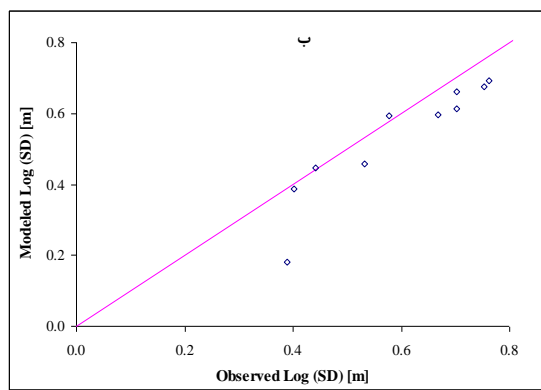
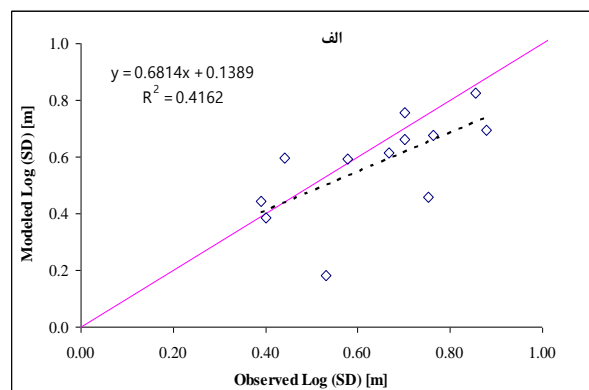
Rule	MAPE	RMSE	MBE	R
2	27.58	0.18	0.09	0.51
4	22.78	0.16	0.07	0.62
<b>8</b>	<b>22.01</b>	<b>0.14</b>	<b>0.06</b>	<b>0.65</b>
16	25.57	0.17	0.07	0.58
32	29.50	0.18	0.04	0.50
64	26.59	0.17	0.01	0.60
128	26.60	0.18	0.04	0.50



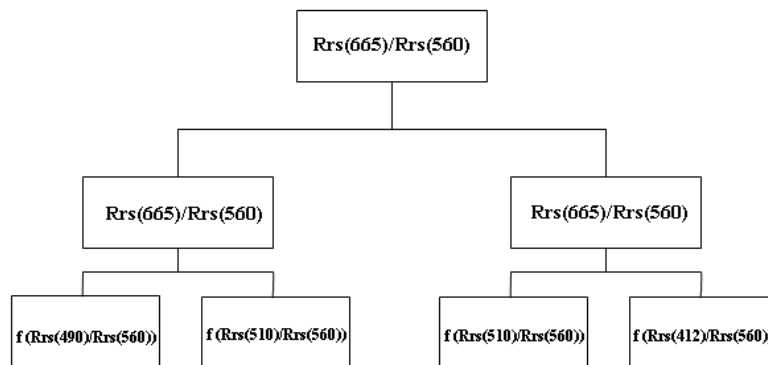
شکل ۶-۲۲- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های عمق سکی مدل‌سازی شده با چهار قانون فازی در مقابل داده‌های عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون)



شکل ۶-۲۳- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با هشت قانون فازی در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون)



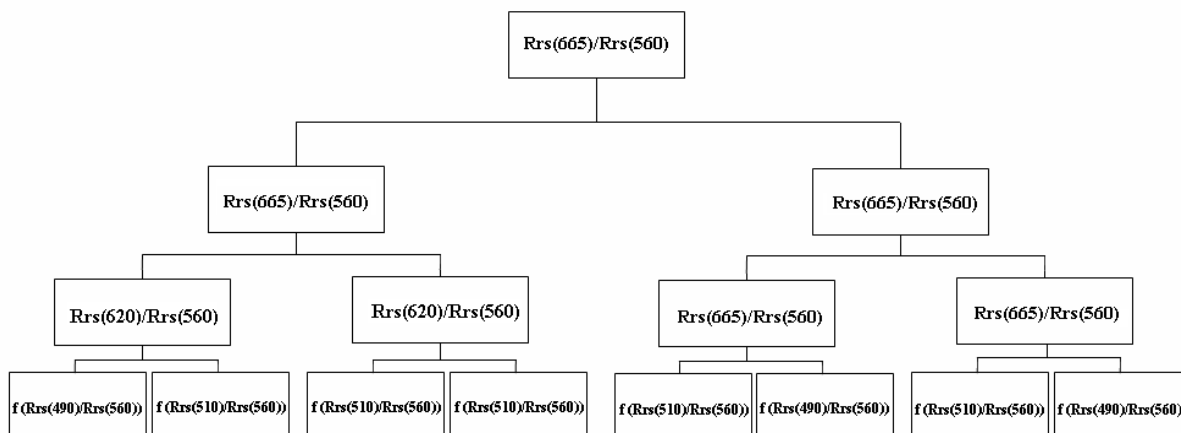
شکل ۶-۲۴- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های لگاریتم عمق سکی مدل‌سازی شده با هشت قانون فازی در مقابل داده‌های لگاریتم عمق سکی اندازه‌گیری شده (داده‌های بخش آزمون)



شکل ۶-۲۵- دیاگرام تقسیم بندی سلسله مراتبی (HPD) مدل تجربی ALM با چهار قانون فازی به منظور استخراج عمق سکی

جدول ۶-۲۲- نتایج رتبه بندی متغیرها استفاده شده با توجه به نقش آن‌ها در فضای تقسیم و توابع تک متغیره (دیاگرام HPD شکل ۶-۲۵)

Rank	variable used for dividing	Number of times	variable used in variable function	Number of times
1	Rrs(665)/Rrs(560)	3	Rrs(510)/Rrs(560)	2
2			Rrs(490)/Rrs(560)	1
3			Rrs(412)/Rrs(560)	1

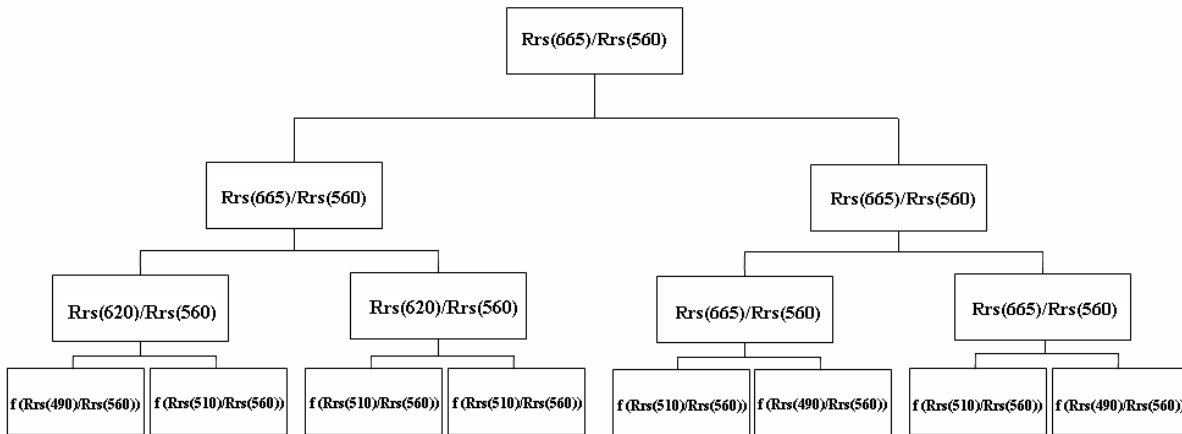


شکل ۶-۲۶- دیاگرام تقسیم بندی سلسله مراتبی (HPD) مدل تجربی ALM با هشت قانون فازی به منظور استخراج معکوس عمق سکی

جدول ۶-۲۳- نتایج رتبه بندی متغیرها استفاده شده با توجه به نقش آن‌ها در فضای تقسیم و توابع تک متغیره (دیاگرام HPD شکل ۶-۲۶)

Rank	variable used for dividing	Number of times	variable used in variable function	Number of times
1	Rrs(665)/Rrs(560)	5	Rrs(510)/Rrs(560)	5
2	Rrs(620)/Rrs(560)	2	Rrs(490)/Rrs(560)	3





شکل ۶-۲۷- دیاگرام تقسیم بندی سلسله مراتبی (HPD) مدل تجربی ALM با هشت قانون فازی به منظور استخراج لگاریتم عمق سکی

جدول ۶-۲۴- نتایج رتبه بندی متغیرها استفاده شده با توجه به نقش آن‌ها در فضای تقسیم و توابع تک متغیره (دیاگرام HPD شکل ۶-۲۷)

Rank	variable used for dividing	Number of times	variable used in variable function	Number of times
1	Rrs(665)/Rrs(560)	5	Rrs(510)/Rrs(560)	5
2	Rrs(620)/Rrs(560)	2	Rrs(490)/Rrs(560)	3

با توجه به نتایج آماری و گرافیکی بدست آمده از مدل سازی ALM (جدول ۶-۱۹ تا ۶-۲۱ و شکل-های ۶-۲۲ تا ۶-۲۴ را ببینید) می توان نتیجه گیری نمود که این مدل به خوبی توانسته است رفتار داده های را در مجموعه آزمون با همبستگی نسبتاً بالا مدل سازی نماید. البته در مدل سازی لگاریتم عمق سکی یک نمونه با انحراف زیاد از خط ۱:۱ مشاهده می شود که به خوبی برآورد نشده است.

### ۳-۵-۲- مدل سازی عمق سکی با استفاده از مقادیر انعکاسی در BOA

مشابه بخش قبل البته این بار ALM تجربی تنها با استفاده از معکوس عمق سکی، و مقادیر و نسبت-های باندی مختلف متناظر با آن در مجموعه مدل ساز آموزش داده شد. نتایج آزمایش مدل ALM مذکور برای استخراج معکوس عمق سکی با استفاده از مقادیر و نسبت های انعکاسی مختلف در مجموعه آزمون نشان داد که بهترین ورودی به ALM برای مدل سازی معکوس عمق سکی نسبت

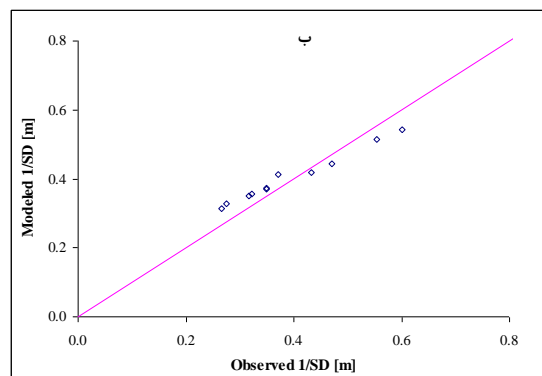
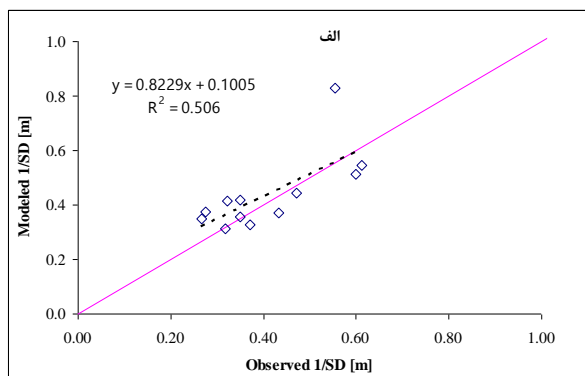
باندی  $\frac{Rrs(\lambda)}{Rrs(442)}$  با ۱۶ قانون فازی می باشد. نتایج آماری و گرافیکی آزمایش مدل تجربی ALM با

تعداد قوانین فازی مختلف به منظور استخراج معکوس عمق سکی با استفاده از این نسبت باندی در

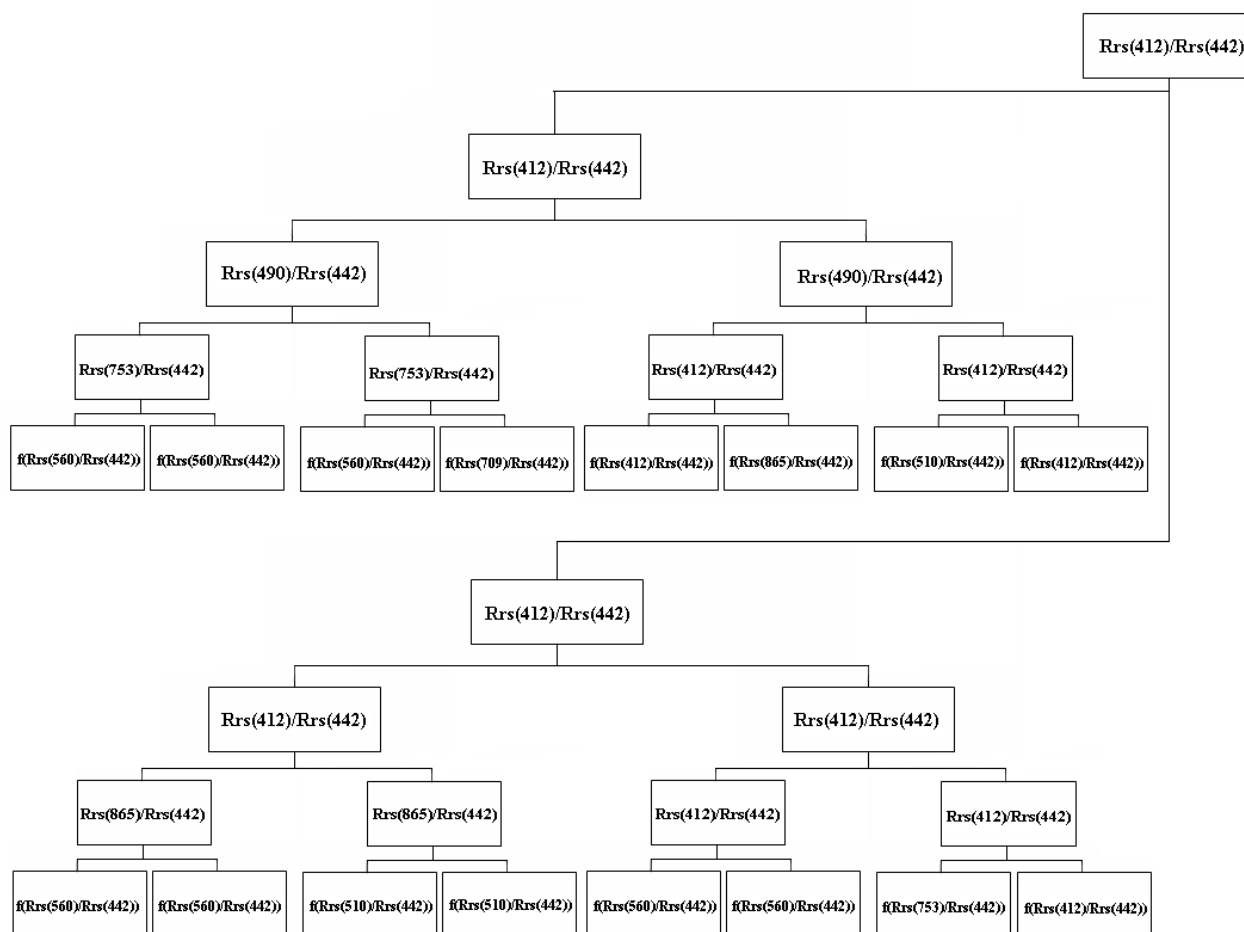
جدول‌های ۶-۲۵ و شکل ۶-۲۸ نشان داده شده است. همچنین دیاگرام HPD این مدل‌سازی به همراه رتبه بندی متغیرهای استفاده شده در آن به ترتیب در شکل ۶-۲۹ و جدول ۶-۲۶ ارائه شده است.

جدول ۶-۲۵- نتایج بخش آزمون (ارزیابی) مدل ALM تجربی توسط داده‌های معکوس عمق سکی میدانی (N=۱۲)

Rule	MAPE	RMSE	MBE	R
2	36.4	0.15	-0.049	0.52
4	32.56	0.14	-0.04	0.53
8	28.64	0.13	-0.042	0.66
<b>16</b>	<b>19.15</b>	<b>0.07</b>	<b>0.001</b>	<b>0.71</b>
32	24.06	0.09	0.005	0.65
64	27.93	0.13	-0.036	0.66
128	25.18	0.11	-0.017	0.68



شکل ۶-۲۸- (الف) نمودار پراکنش و (ب) نمودار Q-Q داده‌های معکوس عمق سکی مدل‌سازی شده با شصت دو قانون فازی در مقابل داده‌های معکوس عمق سکی اندازه گیری شده (داده‌های بخش آزمون)



شکل ۶-۲۹- دیاگرام تقسیم بندی سلسله مراتبی (HPD) مدل تجربی ALM با شانزده قانون فازی به منظور استخراج معکوس عمق

جدول ۶-۲۶- نتایج رتبه بندی متغیرها استفاده شده با توجه به نقش آن‌ها در فضای تقسیم و توابع تک متغیره (دیاگرام HPD) (شکل ۶-۲۹)

Rank	variable used for dividing	Number of times	variable used in variable function	Number of times
1	$Rrs(412)/Rrs(442)$	9	$Rrs(560)/Rrs(442)$	8
2	$Rrs(490)/Rrs(442)$	2	$Rrs(510)/Rrs(442)$	3
3	$Rrs(753)/Rrs(442)$	2	$Rrs(412)/Rrs(442)$	2
4	$Rrs(865)/Rrs(442)$	2	$Rrs(753)/Rrs(442)$	1
5			$Rrs(865)/Rrs(442)$	1
6			$Rrs(709)/Rrs(442)$	1

## ۶-۶-۶-رتبه بندی و انتخاب مدل تجربی برتر

در این بخش نتایج آماری و گرافیکی ارزیابی مدل‌های تجربی توسعه یافته با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده، آنالیز رگرسیون خطی چندگانه و مدل ALM تجربی با هم قیاس شده و بهترین مدل برای استخراج عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی از تصاویر MERIS در دریای خزر انتخاب می‌شود. در ابتدا مدل‌های تجربی توسعه یافته براساس مقادیر انعکاسی در TOA و سپس مدل‌های تجربی توسعه یافته براساس مقادیر انعکاسی در BOA با هم قیاس می‌شوند.

## ۶-۶-۱-رتبه بندی مدل‌های تجربی توسعه یافته براساس مقادیر انعکاسی در TOA و

### انتخاب مدل تجربی برتر

همان طور که قبلاً در بخش روش انتخاب مدل تجربی برتر (بخش ۶-۴-۶) توضیح داده شد به منظور مقایسه مدل‌ها و انتخاب مدل تجربی برتر از روش امتیاز دهی بخش ۵-۴ استفاده خواهد شد. بدین صورت که ابتدا تک تک معیارهای آماری و گرافیکی بخش ارزیابی مدل‌ها با داده‌های بخش آزمون با هم قیاس شده و بر اساس مطلوبیت معیار مورد نظر امتیازی از ۱ تا ۳ به معیارهای آماری و گرافیکی هر مدل تعلق می‌گیرد. در این میان معیار آماری بهتر امتیاز ۳ و معیار آماری ضعیف‌تر امتیاز ۱ یا ۲ می‌گیرند. جمع امتیازات همه معیارهای آماری و گرافیکی رتبه مدل را مشخص خواهد کرد. مدلی با امتیاز بیشتر به عنوان مدل بهتر شناخته شده و برای تولید تصاویر سری زمانی عمق سکی (یا معکوس و لگاریتم آن) در دریای خزر استفاده می‌شود. خلاصه‌ای از نتایج آماری ارزیابی مدل‌های تجربی عمق سکی (همچنین معکوس و لگاریتم آن) به همراه روش و نتایج امتیاز دهی مذکور در جدول‌های ۶-۲۷، ۶-۲۸ و ۶-۲۹ ارائه شده است.

همان طور که در این جدول‌ها نشان داده شده است مدل ALM بهتر از دو روش دیگر توانسته است با استفاده از مقادیر (نسبت‌های) انعکاسی در TOA، عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق سکی موجود در داده‌های بخش آزمون را مدل‌سازی و برآورد نماید. در نتیجه مدل ALM به عنوان

مدل برتر در این بخش برای استخراج عمق سکی (و یا معکوس و لگاریتم آن) از تصاویر سطح یک سنجنده MERIS در دریای خزر انتخاب می‌شود.

جدول ۶-۲۷- خلاصه نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی عمق سکی (رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی چندگانه و ALM) به همراه نتایج امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی

Model	MAPE	RMSE	MBE	R	Q-Q plot	Scatter plot	Summation
$SD = -20.3 + 19.7 Rrs(510)/Rrs(560)$	31.72(1)	1.3(2)	-0.06(2)	0.39(2)	(1)	(1)	9
$SD = 7.27 + 157 Rrs(510) - 257 Rrs(560) + 76.9 Rrs(885)$	30.52(2)	1.32(1)	0.03(3)	0.3(1)	(2)	(2)	11
<b>ALM (4 rule)</b>	<b>17.5198(3)</b>	<b>0.93(3)</b>	<b>0.27(1)</b>	<b>0.73(3)</b>	<b>(3)</b>	<b>(3)</b>	<b>16</b>

جدول ۶-۲۸- خلاصه نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی معکوس عمق سکی (رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی چندگانه و ALM) به همراه نتایج امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی

Model	MAPE	RMSE	MBE	R	Q-Q plot	Scatter plot	Summation
$1/SD = 2.97 - 2.14 R510/R560$	46.81(1)	0.13(1)	0.05(1)	0.42(1)	(1)	(1)	6
$1/SD = -0.087 + 10.1 Rrs(412) - 48.2 Rrs(510) + 38.1 Rrs(560) + 24.8 Rrs(681) - 23.6 Rrs(779)$	37.66(2)	0.11(2)	0.04(2)	0.69(3)	(2)	(2)	13
<b>ALM (8 rule)</b>	<b>29.64(3)</b>	<b>0.099(3)</b>	<b>-0.01(3)</b>	<b>0.59(2)</b>	<b>(3)</b>	<b>(3)</b>	<b>17</b>

جدول ۶-۲۹- خلاصه نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی لگاریتم عمق سکی (رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی چندگانه و ALM) به همراه نتایج امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی

Model	MAPE	RMSE	MBE	R	Q-Q plot	Scatter plot	Summation
$\text{Log}(SD) = -2.57 + 2.53 R510/R560$	27.01(1)	0.16(1)	-0.04(2)	0.41(1)	(1)	(1)	7
$\text{Log}(SD) = 1.04 - 29.4 Rrs(442) + 62.2 Rrs(490) - 39.4 Rrs(560) - 8.89 Rrs(681) + 14.6 Rrs(779)$	24.31(2)	0.15(2)	-0.03(3)	0.5(2)	(2)	(2)	13
<b>ALM (8 rule)</b>	<b>22(3)</b>	<b>0.14(3)</b>	<b>0.06(1)</b>	<b>0.64(3)</b>	<b>(3)</b>	<b>(3)</b>	<b>16</b>

## ۶-۶-۲-رتبه بندی مدل های تجربی توسعه یافته براساس مقادیر انعکاسی در BOA و

### انتخاب مدل تجربی برتر

معکوس عمق سکی با استفاده از سه روش مدل سازی مختلف در بخش های پیشین بر اساس مقادیر (نسبت های) انعکاسی در BOA مدل سازی شد. در این بخش نتایج آزمون این سه مدل معکوس عمق سکی با هم قیاس شده و بر اساس روش امتیاز دهی اشاره شده، روش مدل سازی برتر تعیین می شود. خلاصه ای از نتایج آماری ارزیابی سه مدل ها معکوس عمق سکی به همراه نتایج امتیاز دهی و انتخاب مدل برتر در جدول ۶-۳۰ ارائه شده است.

جدول ۶-۳۰- خلاصه نتایج آماری ارزیابی سه مدل تجربی معکوس عمق سکی (رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی چندگانه و ALM) به همراه نتایج امتیاز دهی برای معیارهای آماری و گرافیکی

Model	MAPE	RMSE	MBE	R	Q-Q plot	Scatter plot	Summation
$1/SD = -0.138 + 2.08 * (Rrs(681)/Rrs(560))$	28.57(1)	0.11(1)	0.08(1)	0.86(3)	(1)	(1)	8
$1/SD = 0.164 - 5506 * Rrs(754) + 7102 * Rrs(779)$	27.75(2)	0.08(2)	0.04(2)	0.81(1)	(3)	(3)	13
<b>ALM (16 rule)</b>	<b>19.14(3)</b>	<b>0.07(3)</b>	<b>0.01(3)</b>	<b>0.71(1)</b>	(2)	(2)	<b>14</b>

مشابه قبل این بار نیز به طور کلی مدل ALM بهترین روش مدل سازی معکوس عمق سکی تعیین شد. همچنین مقایسه نتایج آماری مدل ALM در دو جدول ۶-۲۸ و ۶-۳۰ نشان می دهد که استفاده از مقادیر انعکاسی در BOA باعث افزایش دقت و کاهش خطا مدل سازی معکوس عمق سکی توسط مدل ALM شده است.

## ۷-۶- تولید تصاویر سری زمانی تغییرات عمق سکی در دریای خزر از تصاویر

### MERIS

در ضمیمه ت، سری زمانی نقشه‌های توزیع مکانی عمق سکی در دریای خزر که توسط مدل معکوس ALM تجربی توسعه یافته در این فصل، با استفاده از تصاویر سطح یک MERIS تولید شده است ارائه شده است

### ۷-۶- نتیجه گیری

در این فصل سعی شد با استفاده از مقادیر (نسبت‌های) انعکاسی در TOA و BOA مدل‌های تجربی مختلفی به منظور استخراج عمق سکی از تصاویر MERIS در دریای خزر توسعه یابد. برای توسعه این مدل‌ها از سه روش مدل‌سازی مختلف شامل روش رگرسیون خطی ساده، روش رگرسیون خطی چندگانه و روش مدل‌سازی ALM تجربی استفاده شد. مقایسه نتایج مدل‌سازی مدل‌های مختلف عمق سکی، معکوس عمق سکی و لگاریتم عمق نشان داد که بهترین روش‌های مدل‌سازی تجربی عمق سکی (همچنین معکوس و لگاریتم آن) در دریای خزر با استفاده از مقادیر انعکاسی در TOA (تصاویر سطح یک) و BOA (تصاویر سطح)، روش مدل‌سازی ALM می‌باشد. همچنین نتایج مدل‌سازی نشان داد که استفاده از داده‌های BOA می‌تواند تاثیر زیادی بر بهبود دقت مدل‌سازی عمق سکی داشته باشد.

## فصل هفتم

### نتایج کلی و زمینه‌هایی برای ادامه تحقیقات

#### ۱-۷- نتایج کلی

در این پایان نامه عملکرد چهار مدل معکوس مختلف سنجنده MERIS در دریای خزر مورد ارزیابی و اعتبار سنجی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که چهار مدل معکوس C2R, FUB\WeW, ALM و هیبرید ALM-ANN نتایج معقولی را به منظور استخراج پارامترهای کیفی در دریای خزر ارائه می‌نمایند. در بین این چهار مدل معکوس، می‌توان مدل‌های معکوس هیبرید ALM-ANN و ALM را به عنوان بهترین مدل معکوس در دریای خزر معرفی نمود. همچنین نتایج مطالعات در مورد استفاده از پردازشگر ICOL در مدل‌سازی پارامترهای کیفی نشان داد که این پردازشگر در برخی موارد مثلاً مدل‌سازی کلروفیل-a توسط مدل معکوس ALM یا مدل‌سازی CDOM توسط مدل معکوس C2R می‌تواند باعث بهبود دقت مدل‌سازی شود. با این وجود استفاده از آن نیاز به مطالعات جامع‌تری دارد. نتایج ارزیابی مدل‌های معکوس مختلف در سه حالت پیکسلی مختلف نیز نشان داد میانگین جعبه پیکسلی 3x3 بهترین روش برای استخراج داده‌های کیفی از تصاویر ماهواره‌ای در مدل-سازی Chl-a, SPM و CDOM در دریای خزر است. در بخش مدل‌سازی تجربی عمق سکی مشخص شد که روش ALM تجربی عملکرد بهتری از دیگر روش‌های مدل‌سازی تجربی در دریای خزر دارد و داده‌های دارای تصحیح اتمسفری (RTSBOA) نسبت به داده‌های تشعشع طیفی در بالای اتمسفر از پتانسیل بهتری برای مدل‌سازی عمق سکی برخوردار هستند.



## ۲-۷- پیشنهادات

سنجش از دور کیفی آب در دریای خزر به تحقیقات بیشتری نیازمند است. جهت انجام مطالعات تکمیلی پیشنهادات زیر ارائه می‌گردد:

- ۱- ارزیابی دیگر سنجنده‌های رنگ آب مانند SeaWiFS و MODIS در این منطقه.
- ۲- مطالعه دقیق خواص اپتیکی اجزا و ترکیبات کیفی آب دریای خزر.
- ۳- استفاده از طیف سنج‌های میدانی به منظور ارزیابی عملکرد پردازشگر ICOL.
- ۴- تولید یک پایگاه داده‌ای بزرگ و دقیق از غلظت پارامترهای کیفی مختلف و انعکاس طیفی خروجی از آب متناظر با آن و همچنین تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های مختلف رنگ آب به منظور توسعه مدل‌های تجربی با ثبات.

## مراجع

- ۱- رضایی ع، سلطانی ا، (۱۳۷۷)، "مقدمه ای بر تحلیل رگرسیون کاربردی". جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ص ۱۱۵.
- ۲- طاهری شهرآئینی ح، (۱۳۸۶)، رساله دکتری: "استخراج پارامترهای کیفی آب به کمک تصاویر ماهواره ای و مدل سازی معکوس معادله انتقال تشعشع به روش یادگیری فعال"، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- 3- Abbass H. A., Sarker R. A., Newton C. S., (2002), "**Data mining: A heuristic approach**", Idea Group Publishing (IGI Global), pp. 310.
- 4- Alikas K., Reinart, A., (2008), "Validation of the MERIS products on large European lakes: Peipsi, Vänern and Vättern", **Hydrobiologia**, Vol. 599: 161-168.
- 5- Antoine D., Morel A., Hooker S. B., (2002), "Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) Validation: Early Results at the Boussole Site (Mediterranean Sea)". In Proceedings of the ENVISAT Validation workshop., SP-531 (ESA Special Publication).
- 6- Babin M., (2000) "Coastal surveillance through observation of ocean color (COASTLOOC)", Final Report, pp 233, Laboratoire de Physique et Chimie Marines, Villefranche-sur-mer, France.
- 7- Babin M., Morel A., Fournier-Sicre V., Fell F. and Stramski D., (2003), "Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration". **Limnology & Oceanography**, Vol. 48: 843-859.
- 8- Bagheri Shouraki S., Honda N., (1997), "A new method for establishing and saving fuzzy membership functions", In 13th Fuzzy Symposium, 4-6 June 1997, Toyama, Japan, pp 91-94.
- 9- Bagheri Shouraki S., Honda N., (1999), "Recursive fuzzy modeling based on fuzzy interpolation", **Journal of Advanced Computational Intelligence**, Vol. 3: 114-125.
- 10- Barale V., Schlittenhardt P.M., (1993), "**Ocean color: theory and applications in a decade of CZCS experience**", Kluwer, Dordrecht, pp 367.
- 11- Bézy J.L., Delwart S., Rast M., (2000), "MERIS: A new generation of Ocean Color Sensor onboard ENVISAT". ESA Bulletin, No 103, pp 48-56.
- 12- Carder K. L., Chen F. R., Lee Z. P., Hawes S. K., Kamykowski D., (1999), "Semi analytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate- depletion temperatures", **Journal of Geophysical Research**, Vol. 104 : 5403-5421.
- 13- CEP (Caspian Sea Environmental Program)., (2002), "**Transboundary Diagnostic Analysis for the Caspian Sea**". Baku, Azerbaijan, pp 36.
- 14- Chambers J. M., Cleveland W. S., Kleiner B., Tukey P. A., (1983), "**Graphical methods for data analysis**, Wadworth, Belmont", California, pp 395.
- 15- Chen Z., Muller-Karger f., Hu, C., (2007), "Remote sensing of water clarity in Tampa Bay", **Remote Sensing of Environment**, Vol. 109 : 249-259.
- 16- Cipollini P., Barale V., Davidov A., Melin F., (1999), "Updated MOS bio optical algorithms in the Northwestern Black Sea", In 3rd International Workshop on MOS-IRS and Ocean Colour, Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin, pp 93-100.

- 17- Dekker A. G., Malthus T. J., Seyhan E., (1991), "Quantitative modeling of inland water quality for high-resolution MSS systems", IEEE Transactions on **Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 29 : 89–95.
- 18- Delwart S., (2002), "Reference model for MERIS level 2 processing". European Space Agency Doc. No. PO-TN-MELGS-0026.
- 19- Doerffer R., (2002), "Protocols for the validation of MERIS water products", European Space Agency Doc. No. PO-TN-MEL-GS-0043.
- 20- Doerffer R., Fischer J., (1994), "Concentrations of chlorophyll, suspended matter, and gelbstoff in case II waters derived from satellite coastal zone color scanner data with inverse modeling methods", **Journal of Geophysical Research**, Vol. 99 : 7457–7466.
- 21- Doerffer R., Schiller H., (1997), "Pigment index, sediment and Gelbstoff retrieval from directional water leaving radiance reflectance using inverse modeling technique", MERIS Expert Support Laboratories, ATBD 2-12, Doc. No. PO-TN-MEL-GS-0005, Issue 4, pp 83.
- 22- Doerffer R., Schiller, H., Peters, M., (2006). "The MERIS Case2 Regional processor, version 1.1", published 8 November 2006 on <http://www.brockmann-consult.de/beam/plugins.html>.
- 23- Doerffer R., Schiller H., (2006), "MERIS Advanced Water Algorithm" Version 1.1, GKSS.
- 24- Durand D., Bijaoui J., Cauneau F. (2000), "Optical remote sensing of shallow-water environmental parameters: A feasibility study", **Remote Sensing of Environment**, Vol. 73: 152–161.
- 25- European Space Agency., (2002), "ENVISAT Post-Launch Products MERIS", PO-MO-ESA-GS-1005, 5-MERIS.
- 26- Falkowski P. G. (1994), "The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles", **Photosynthesis Research**, Vol. 39: 235–258.
- 27- Fausett, L. (1994), "**Fundamentals of neural networks: Architectures, algorithms and applications**", Prentice Hall, pp 461.
- 28- Fell F., Fischer J., (2001), "Numerical simulation of the light field in the atmosphere–ocean system using the Matrix–Operator method", **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, Vol. 69: 351–388.
- 29- Fischer J., Doerffer R., Grassl H., (1991), Remote sensing of water substances in rivers, estuarine and coastal waters, pp 25-55, In: "**Biochemistry of Major World Rivers**", edited by E. T. Degens, S. Kempe and J. E. Richey, Wiley ,New York.
- 30- Gege P., Plattner S., (2003), "MERIS validation activities at Lake Constance", MERIS user workshop, Frascati, Italy, November 10-13, 2003. [http://envisat.esa.int/pub/ESA\\_DOC/meris\\_workshop\\_2003/papers/20\\_gege.pdf](http://envisat.esa.int/pub/ESA_DOC/meris_workshop_2003/papers/20_gege.pdf).
- 31- George D. G., (1997), "The airborne remote sensing of phytoplankton chlorophyll in the lakes and tarns of the English Lake District", **International Journal of Remote Sensing**, Vol. 18: 1961–1975.
- 32- Ginzburg A. I., Sheremet N. A., Kostianoy, A. G., (2005), Sea Surface Temperature Variability in the Caspian Sea, pp. 59-81, In: "**The Caspian Sea Environment (Handbook of Environmental Chemistry)**", Springer, pp. 271.
- 33- Gitelson A., (1992), "The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration", **International Journal of Remote Sensing**, Vol. 13: 3367–3373.
- 34- Gordon H. R., Brown O. B., (1973), "Irradiance reflectivity of a flat ocean as a function of its optical

properties”, **Applied Optics**, Vol.12: 1549–1551.

35- Gordon H. R., Du T., Zhang T., (1997), “Remote sensing of ocean color and aerosol properties: resolving the issue of aerosol absorption”, **Applied Optics**, Vol. 36: 8670–8684.

36- Gordon H. R., Morel A., (1983), “**Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review**, In **Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies**”, Bowman, M. (ed.), Springer–Verlag, Berlin, pp. 114.

37- Harma P., Vepsalainen J., Hannonen T., Pyhalahti T., Kamari J., Kallio K., Eloheimo K., Koponen S., (2001), “Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland”, **The Science of the Total Environment**, Vol. 268: 107–121.

38- Hoge F. E., and Swift R. N., (1986), “Chlorophyll pigment concentration using spectral curvature algorithms: an evaluation of present and proposed satellite ocean color sensor bands”, **Applied Optics**, Vol. 25: 3677–3682.

39- Hughes D. C., Holyer R. J., Lee Z. P. (2001), “Remote sensing algorithms by numerical inversion of radiative transfer models: neural network and optimization methods compared”, In International Conference on Current Problems in Optics of Natural Waters, D. S. Rozhdestvensky Optical Society, St. Petersburg, Russia, 25– 29 September.

40- IOCCG (2000), “**Remote sensing of ocean color in coastal, and other optically complex waters**”, Sathyendranath, S. (ed.), Report of the International Ocean-Color Coordinating Group, No. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada, pp. 140.

41- Kallio K., Kutser T., Hannonen T., Koponen S., Pulliainen J., Vapsalainen J., Pyhalahti T., (2001), “Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons”, **The Science of the Total Environment**, Vol. 268:59–77.

42- Keiner L. E., Brown C. W., (1999), “Estimating oceanic chlorophyll concentrations with neural networks”, **International Journal of Remote Sensing**, Vol. 20: 189-194.

43- Korshenko A. N., GUL A.G., (2005), Pollution of the Caspian Sea, pp. 109-142, In: “**The Caspian Sea Environment (Handbook of Environmental Chemistry)**”, Springer, pp. 271.

44- Kosarev A.N., (2005), Physico-Geographical Conditions of the Caspian Sea, pp. 5-31 In: “**The Caspian Sea Environment (Handbook of Environmental Chemistry)**”, Springer, pp. 271.

45- Kosarev A.N., Yablonskaya, E.A., (1994), “**The Caspian Sea**”, The Hague, SPB Academic Publishing, pp. 274.

46- 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**, Vol. 112 :2284–2300.

47- Kratzer S., Hakansson B., Sahlin, C., (2003), “Assessing Secchi and photic zone depth in the Baltic Sea from satellite data”, **Journal of the Human-Environment system**, Vol. 32:577–585 .

48- Krawczyk H., Neumann A., Hetscher M., (1999), “Mathematical and physical background of principal component inversion”, In 3rd International Workshop on MOS-IRS and Ocean Color, Wissenschaft und Technik Verlag Berlin, pp 83–92.

49- Krawczyk, H., Neumann A., Walzel T., Zimmermann G., (1993), “Investigation of interpretation possibilities of spectral high dimensional measurements by means of principal component analysis- a concept for physical interpretation of those measurements”, In Proc. SPIE, pp. 401–411.

50- Krawczyk H., Ebert K., Neumann A., (2003), “Algae bloom detection in the 148 Baltic Sea with MERIS data”, In MERIS Workshop, European Space Agency.

51- Lee Z. P., Carder K. L., Peacock T. G., Davis C. O., Mueller, J. L., (1996), “Method to derive ocean

- absorption coefficients from remote-sensing reflectance”, **Applied Optics**, Vol. 35:453–462.
- 52- Lee Z., Carder K. L., Mobley C. D., Steward R. G., Patch J. S., (1999), “Hyper spectral remote sensing for shallow waters: Deriving bottom depths and water properties by optimization”, **Applied Optics**, Vol. 38: 3831–3843.
- 53- Lee Z.P., Carder K.L., Hawes S.H., Steward R.G., Peacock T.G., Davis C.O., (1994), "A model for interpretation of hyper spectral remote-sensing reflectance", **Applied Optics**, Vol. 33:5721-5732.
- 54- Li L. P., Fukushima H., Frouin R., Mitchell B. G., He M. X., Uno I., Takamura T., Ohta S., (2003), “Influence of sub-micron absorptive aerosol on SeaWiFS-derived marine reflectance during ACE-Asia”, **Journal of Geophysical Research**, Vol. 108: 4472-4485.
- 55- Liew S. C., Kwoh L. K., (2003), “Monitoring algal blooms from space: possibilities and limitations”, In Workshop on Red Tide Monitoring in Asian Coastal Waters, Tokyo, Japan, 10–12 March.
- 56- 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, pp 161.
- 57- Luoma S. N., (1989), "Can we determine the biological availability of sediment-bound trace elements? ", **Hydrobiology**, Vol. 177: 349-394.
- 58- Mamdani E. A., (1976), “Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers”, **International Journal of Man–Machine Studies**, Vol. 8: 669–678.
- 59- Martinez Vicente., Tilstone Gh., Blondeau-Patissier D., Menezes A., (2004), “Validation of MERIS geophysical products in open and Coastal waters in the Southern North Sea, Celtic Sea and Western England channel”, Proceedings of the MAVT meeting, 20.24 October 2003, Frascati, Italy. European Space Agency publication.
- 60- Milliman J.D., Syvitski J. P. M., (1992), “Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers”. **Journal of Geology**, Vol. 100: 325-344.
- 61- Mobley C., (1994), “**Light and water: Radiative Transfer in natural waters**”, San Diego, Academic Press, pp 592.
- 62- Mopper K., Zhou X. L., Kieber R. J., Kieber D. J., Sikorski R. J., Jones R.D., (1991), "Photochemical degradation of dissolved organic carbon and its impact on the oceanic carbon cycle", **Nature**, Vol. 353: 60-62.
- 63- Moran M.A., Zepp R.G., (1997), "Role of photo reactions in the formation of biologically labile compounds from dissolved organic matter", **Limnology & Oceanography**, Vol. 42: 1307-1316.
- 64- Morel A., (1980), “In-water and Remote measurements of ocean color”, **meteorology**, Vol. 18: 177–201.
- 65- Morel A., Gentili B., (1993), “diffuse reflectance of oceanic waters, II: Bidirectional aspects”, **Applied Optics**, Vol. 32: 6864–6879.
- 66- Morel A., Prieur L. (1977), “Analysis of variations in ocean color”, **Limnology and Oceanography**, Vol. 22: 709–722.
- 67- Nelder J. A., Mead R., (1965), “A simple method for function minimization”, **Computer Journal**, Vol. 7: 308–313.
- 68- Otsubo A., Hayashi K., (1996), “Fuzzy hybrid control method applying simplified indirect inference method”, In 5th IEEE Conference of Fuzzy Systems, September 1996, pp 283–289.

- 69- Park Y., Cauwer De V., Nechad B., Ruddick K., (2003), “Validation of MERIS water products for Belgian coastal waters:2002–2003”, In MERIS and AATSR Calibration and Geographical Validation Workshop, 20–24 October, Frascati, Italy, (Published on CDROM).
- 70- Pasterkamp R., Peters S. Van der Woerd H., (2002), “MERIS Validation of Geophysical Ocean Colour Products: Preliminary Results for the Netherlands”, In Proceedings of the ENVISAT Validation workshop, SP-531 (ESA Special Publication).
- 71- 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**, Vol. 4: 301–306.
- 72- Rast M., Bezy J. L., Bruzzi S., (1999), “The ESA medium resolution imaging spectrometer (MERIS) -a review of the instrument and its mission”, **International Journal of Remote Sensing**, Vol. 20: 1681-1702.
- 73- Rast M., (1987), “Feasibility study of a Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS)”, Technical specifications and work statement, European Space Agency, Paris.
- 74- Ritchie J. C., Schiebe F. R., (1998). “Water quality: remote sensing in hydrology and water management”, Verlay, Berlin, Germany, Springer, pp. 287-303.
- 75- Ruddick K., de Cauwer V., Park Y., Becu G., Blauwe J-P., (2002), “Preliminary validation of MERIS water products for Belgian coastal waters”, Proceedings of ENVISAT Validation workshop. ESA, SP-531.
- 76- Santer R., Zgolski F., (2008), “Improve Contrast between Ocean and Land”, ATBD v1.1.
- 77- Santer R., Schmechtig C., (2000), “Adjacency effects on water surfaces: Primary scattering approximation and sensitivity study”. **Applied Optics**, Vol. 39: 361-375.
- 78- Sathyendranath S., Platt T., Cota G., Stuart V., Borstad G., (1997), “Some Canadian experiments on modelling and interpreting ocean-colour data”, In 1st International Workshop on MOS-IRS and Ocean Colour, Berlin, April 28-30, Institute of Space Sensor Technology, DLR (ed.), Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin.
- 79- Sathyendranath S., Morel A., (1983), Light emerging from the sea interpretation and uses in remote sensing, pp 323–357, In: “**Remote Sensing Applications in Marine Science and Technology**”, Cracknell, A. P. (ed.), D. Redial Publishing Company.
- 80- Schalles J. F., Gitelson A. A., Yacobi Y. Z., Kroenke A. E., (1998), “Estimation of chlorophyll a from time series measurements of high spectral resolution reflectance in an eutrophic lake”, **Journal of Phycology**, Vol. 34: 383–390.
- 81- Schiller H. Doerffer R., (1994), “Fast computational scheme for inverse modeling of multispectral radiances: application for remote sensing of the ocean”, **Applied Optics**, Vol. 32: 3280-3285.
- 82- Schiller H., Doerffer R., (1999), “Neural network for emulation of an inverse model–operational derivation of Case II water properties from MERIS data”, **International Journal of Remote Sensing**, Vol. 20: 1735–1746.
- 83- Schroeder T., (2005), **Ph.D. thesis**, “Fernerkundung von Wasserinhaltsstoffen in Küstengewässern mit MERIS unter Anwendung expliziter und impliziter Atmosphärenkorrekturverfahren”, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany.
- 84- Schroeder T., Schaale M., (2005), “MERIS Case-2 Water Properties Processor”, Version 1.0.1. Institute for Space Sciences, Freie Universität Berlin (FUB), <http://www.brockmann-consult.de/beam/software/plugins/FUB-WeWWater-1.0.1.zip>.

- 85- Schroeder T., Schaale M. Fischer J., (2007), “Retrieval of atmospheric and oceanic properties from MERIS measurements: A new Case-2 water processor for BEAM”, **International Journal of Remote Sensing**, Vol 28: 5627-5632.
- 86- Schroeder T., Schaale M., Zhang T., Fischer J., Behnert I., Doerffer R., (2004), “Retrieval of water constituents in Case II waters from MERIS measurements: A comparison of direct and indirect schemes”, In Ocean Color Research Conference, Honolulu, Hawaii, USA, 15–20 February.
- 87- Siegel D.A., Wang M., Maritorena S., Robinson W., (2000), “Atmospheric correction of satellite ocean color imagery: the black pixel assumption”, **Applied Optics**, Vol. 39: 3582-3591.
- 88- Siegel D. A., Michaels A. F., (1996), “Quantification of non-algal light attenuation in the Sargasso Sea: implications for biogeochemistry and remote sensing”, **Deep Sea Res**, Vol. 43: 321-345.
- 89- Sorensen K., Hokedal J., Aas, E., Doerffer R. Dahl E., (2002), “Preliminary validation of MERIS water products for Belgian coastal waters”. In Proceedings of the ENVISAT Validation workshop., SP-531 (ESA Special Publication).
- 90- Sorensen K., Aas E., Hokedal J., Severinsen G., Doerffer R., Dahl E., (2004), “validation of MERIS water products in the Skagerrak”, ESA Workshop.
- 91- Sorensen K., Aas E., Hokedal J.,(2006), “validation of the MERIS products for chlorophyll-a, suspended material and yellow substance in the Skagerrak”. Proceedings, MAVT Validation Workshop, ESA publication SP-615.
- 92- 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** , Vol. 8: 6321-6339.
- 93- 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** Vol. 64: 66-75.
- 94- Taheri Shahraiyini H.,(2007), **PhD thesis**, “Extraction of water quality parameters using the satellite data and inverse modeling of Radiative transfer equation by Active Learning Method”, Sharif University of Technology, Tehran.
- 95- Takagi T., Sugeno M., (1985), “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control”, **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, Vol. 15: 116–132.
- 96- Tanaka K., Sano M., (1994), “A robust stabilization problem of fuzzy control system and its application to backing up control of a truck–trailer”, **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Vol. 2: 119–133.
- 97- Tuzhilkin V.S., Kosarev A.N., (2005), Thermohaline Structure and General Circulation of the Caspian Sea Waters, pp. 33-57, In “**The Caspian Sea Environment (Handbook of Environmental Chemistry)**”. Springer, pp 271.
- 98- Wang Z.G., Liu W.Q., Li H. B., (2006), “Analysis if CDOM spatial distribution variations in Chaohu Lake and its sources by three dimensional fluorescence excitation-emission matrix” , **Acta Sci.Cicum**, Vol. 26: 275-279.
- 99- Zadeh L. A., (1965), “Fuzzy sets”, **Information and Control**, Vol. 8: 338–35.
- 100- Zhang T., (2003), **PhD thesis**, “Retrieval of oceanic constituents with artificial neural network based on Radiative transfer simulation techniques”, Freie Universitat Berlin.
- 101- Zhang T., Fell F., Liu Z. S., Preusker R., Fischer J., He M. X., (2003), “Evaluating the performance of artificial neural network techniques for pigment retrieval from ocean color in Case I waters”, **Journal of Geophysical Research**, Vol. 108: 23-33.

102- Zibordi G., Mlin F., D'Alimonte D., Linde der van D., (2002), "MERIS Validation Activities at the AAOT Site". In Proceedings of the ENVISAT Validation workshop., SP-531 (ESA Special Publication).

103- Zonn I. S., (2005), Environmental Issues of the Caspian. pp. 223-242, In: "**The Caspian Sea Environment (Handbook of Environmental Chemistry)**". Springer, pp. 271.



## پیوست الف : معادله انتقال تشعشع

قسمت اعظم این بخش از (Mobley 1994) استخراج شده است به همین خاطر خواننده محترم می-تواند برای جزئیات بیشتر به آن مراجعه کند.

فوتون‌های ساطع شده از خورشید با هوا، مرز بین هوا و آب و آب واکنش می‌دهد و به عبارت دیگر یک زنجیره از فرایندهای پراکندگی و جذب در اتمسفر و پهنه آب رخ می‌دهد. هدف اصلی این ضمیمه، توسعه معادله پایه‌ای تغییر میزان تشعشع نور در هوا و پهنه آب می‌باشد که به معادله انتقال تشعشع<sup>۱</sup> (RTE) مشهور است. RTE پایه مدل‌های معکوس مختلف است. در مدل‌های معکوس کوشش می‌شود که مقادیر خواص اپتیکی ذاتی (IOP) به کمک مقادیر رادیومتریک اندازه‌گیری شده تعیین شود.

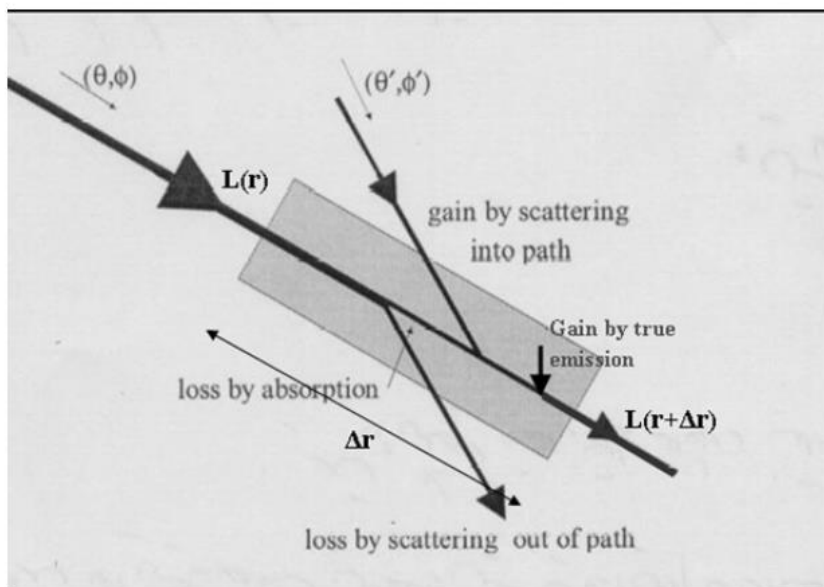
موقعی که فوتون با یک اتم یا مولکول اندرکنش می‌کند فوتون ممکن است توسط اتم یا مولکول جذب شود. با جذب این فوتون، اتم به یک وضعیت انرژی بالاتر انتقال می‌یابد. چنانچه اتم توسط تشعشع انرژی، به همان سطح انرژی اولیه برگردد و فوتونی با همان طول موج فوتون جذب شده تشعشع کند به این فرایند پراکندگی الاستیک گفته می‌شود. اما چنانچه اتم از وضعیت اولیه انرژی خود به سطح انرژی بالاتری دست یابد و سپس فوتونی با طول موج متفاوت با طول موج فوتون دریافتی از خود منتشر کند به این فرایند پراکندگی غیرالاستیک گفته می‌شود. همچنین ممکن است که فوتون جذب شده توسط اتم، به انرژی شیمیایی یا حرارتی تبدیل شود. تبدیل انرژی تشعشعی به غیر تشعشعی تحت عنوان جذب حقیقی شناخته می‌شود. عکس این فرایند نیز ممکن است اتفاق بیافتد مثلاً زمانی که انرژی شیمیایی به نور تبدیل می‌شود. فرایند تبدیل انرژی غیرتشعشعی به انرژی تشعشعی، انتشار حقیقی نامیده می‌شود.

به منظور فرمول بندی معادله انتقال تشعشع، متعارف است که فرض می‌شود که فوتون‌های نور در همه جهات مختلف حرکت می‌کنند و میزان این فوتون‌ها در جهات مختلف کاهش یا افزایش می‌-

---

<sup>۱</sup> Radiative transfer equation

یابد. باتوجه به توضیحات فوق، تعداد ۶ فرایند زیر برای نوشتن معادله موازنه انرژی برای یک مسیر پرتو نور لازم و کافی است. این فرایندها در شکل الف-۱ نمایش داده شده است.



شکل الف-۱- نمایش شماتیکی از اثر فرآیندهای مختلف روی یک پرتو نور

۱- حذف فوتون از پرتو نور توسط پراکندگی نور در جهات دیگر بدون تغییر طول موج (پراکندگی الاستیک).

۲- حذف فوتون از پرتو نور توسط پراکندگی نور با تغییر طول موج (پراکندگی غیرالاستیک).

۳- حذف فوتون از پرتو نور توسط تبدیل انرژی تشعشعی به غیرتشعشعی (جذب حقیقی).

۴- اضافه شدن فوتون به پرتو نور توسط پراکندگی نور در جهات دیگر بدون تغییر در طول موج (پراکندگی الاستیک).

۵- اضافه شدن فوتون به پرتو نور توسط پراکندگی نور با تغییر طول موج (پراکندگی غیرالاستیک).

۶- اضافه شدن فوتون به پرتو نور توسط تبدیل انرژی غیرتشعشعی به انرژی تشعشعی (انتشار حقیقی).

اکنون تلاش خواهد شد تا فرایندهای فوق به صورت مورد نیاز برای معادله انتقال تشعشع در آیند. در نظر بگیرید که یک پرتو نور با میزان تشعشع زاویه‌ای طیفی  $L(r)$  از نقطه  $r$  به نقطه  $r + \Delta r$  حرکت می‌کند (شکل الف-۱). میزان تشعشع زاویه‌ای طیفی در طول مسیر تغییر کرده و در نقطه  $r + \Delta r$

به  $L(r + \Delta r)$  تبدیل می‌شود. بخشی از فوتون‌ها از طریق جذب حقیقی از پرتو نور حذف می‌شوند (فرایند سوم)، بخشی از فوتون‌ها دچار تغییر طول موج شده و طول موج آنها به طول موج‌های دیگر تغییر تبدیل می‌شود (پراکندگی غیرالاستیک، فرایند دوم) و بخش دیگری از فوتون‌ها در جهات دیگر پراکنده می‌شود (پراکندگی الاستیک، فرایند اول). همچنین توسط فرایندهای ۴، ۵ و ۶ میزان فوتون-ها در جهت پرتو نور افزایش می‌یابد. میزان افزایش و کاهش تشعشع زاویه‌ای طیفی زمانی که از نقطه  $r$  به  $r + \Delta r$  می‌رود به میزان تشعشع طیفی زاویه‌ای و فاصله وابسته است. بنابراین برای مقادیر کوچک  $\Delta r$ ، تشعشع زاویه‌ای طیفی  $L(r + \Delta r)$  توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$L(r + \Delta r, \lambda) = L(r, \lambda) [a^e(r, \lambda) + a^i(r, \lambda) + b(r, \lambda)] \Delta r + \Delta r [L^E(r, \lambda) + L^I(r, \lambda) + L^S(r, \lambda)] \quad (1-f)$$

که  $a^e$ ،  $a^i$  و  $b$  به ترتیب ضرایب جذب حقیقی، پراکندگی غیرالاستیک و پراکندگی الاستیک بر حسب  $1/m$  می‌باشند.  $L^E$ ،  $L^I$  و  $L^S$  به ترتیب نشان دهنده فرایندهای چهارم، پنجم و ششم می‌باشند. که واحد آن‌ها  $mw/m^3 \cdot sr \cdot nm$  است.  $r$  طول مسیر بر حسب  $m$ ،  $\lambda$  طول موج بر حسب  $nm$  و  $L$  تشعشع زاویه‌ای بر حسب  $mw/m^3 \cdot sr \cdot nm$  است.

مقدار کل ضریب جذب پرتو نور (C) را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$c(r, \lambda) = [a^e(r, \lambda) + a^i(r, \lambda) + b(r, \lambda)] \quad (2-f)$$

متداول است که میزان پراکندگی غیرالاستیک و انتشار حقیقی با هم ترکیب شده و به صورت ترم تابع منبع موثر (S) نمایش داده شود.

$$S = L^I(r, \lambda) + L^S(r, \lambda) \quad (3-f)$$

همچنین معمولاً طول مسیر (r) با عمق هندسی در جهت Z سیستم مختصات جانشین می‌شود. زاویه بین r و Z تحت عنوان زاویه زنیت ( $\theta$ ) شناخته می‌شود بنابراین:

$$\Delta r = \Delta z / \mu \quad (4-f)$$

چنانچه روابط (۲-f)، (۴-f) جایگزین شود و آن را به شکل دیفرانسیلی بنویسیم، سپس می‌توان

معادله RTE را به صورت معادله (۵-f) نوشت:

$$\mu \frac{dl(z, \xi, \lambda)}{dz} = -cL(z, \xi, \lambda) + L^E(z, \xi, \lambda) + S(z, \xi, \lambda) \quad (5-f)$$

که  $\xi \equiv (\theta, \varphi)$  نشان دهنده جهت مسیر  $r$  است که توسط زاویه زینت ( $\theta$ ) و زاویه آزیموت ( $\varphi$ ) بیان می‌شود. اگر ما ترم  $L^E$  را بسط دهیم، می‌توان RTE را به صورت زیر بیان کرد:

$$\mu \frac{dL(z, \xi, \lambda)}{dz} = -cL(z, \xi, \lambda) + \int_{\underline{\Omega}} L(z, \xi', \lambda) \beta(z, \xi' \rightarrow \xi, \lambda) d\Omega(\xi') + S(z, \xi, \lambda) \quad (6-f)$$

که  $\xi'$  جهت دیگری است که بخشی از تشعشعات زاویه‌ای طیفی آن توسط پراکندگی الاستیک (فرآیند پنجم) تغییر جهت داده و وارد جهت  $\xi$  می‌شود.  $\beta$  تابع پراکندگی حجمی،  $\Omega$  زاویه فضایی و  $d\Omega(\xi')$  یک المان زاویه فضایی است که مرکز این المان جهت  $\xi'$  است. به مجموعه‌ای از جهت‌های  $\xi'$  که تمامی جهات فضا را پوشش می‌دهد واحد کره گفته شده و به صورت  $\Xi$  نمایش داده شده است.

با تقسیم معادله (5-f) به  $(d\tau = C(z)dz)C(z, \lambda)$  می‌توان به رابطه متناظری بر حسب ترم بدون بعد اپتیکی ( $\tau$ ) دست یافت. بعلاوه می‌توان تابع پراکندگی حجمی ( $\beta$ ) را با حاصل ضرب ضریب پراکندگی ( $b$ ) و تابع فاز ( $\tilde{\beta}$ ) ( $\beta, \tilde{\beta}, b$ ) جایگزین نمود. سرانجام با استفاده از تغییرات فوق و تعریف آلبیدوی تک پراش ( $\omega_0 = \frac{b}{c}$ )، معادله RTE (6-f) می‌تواند به صورت معادله (7-f) بیان شود.

$$\mu \frac{dL(z, \xi, \lambda)}{dz} = -L(z, \xi, \lambda) + \omega_0(\tau, \lambda) \int_{\underline{\Omega}} L(z, \xi', \lambda) \beta(z, \xi' \rightarrow \xi, \lambda) d\Omega(\xi') + \frac{1}{c(\tau, \lambda)} S(z, \xi, \lambda) \quad (7-f)$$

معادله (7-f) فرم استاندارد RTE است.

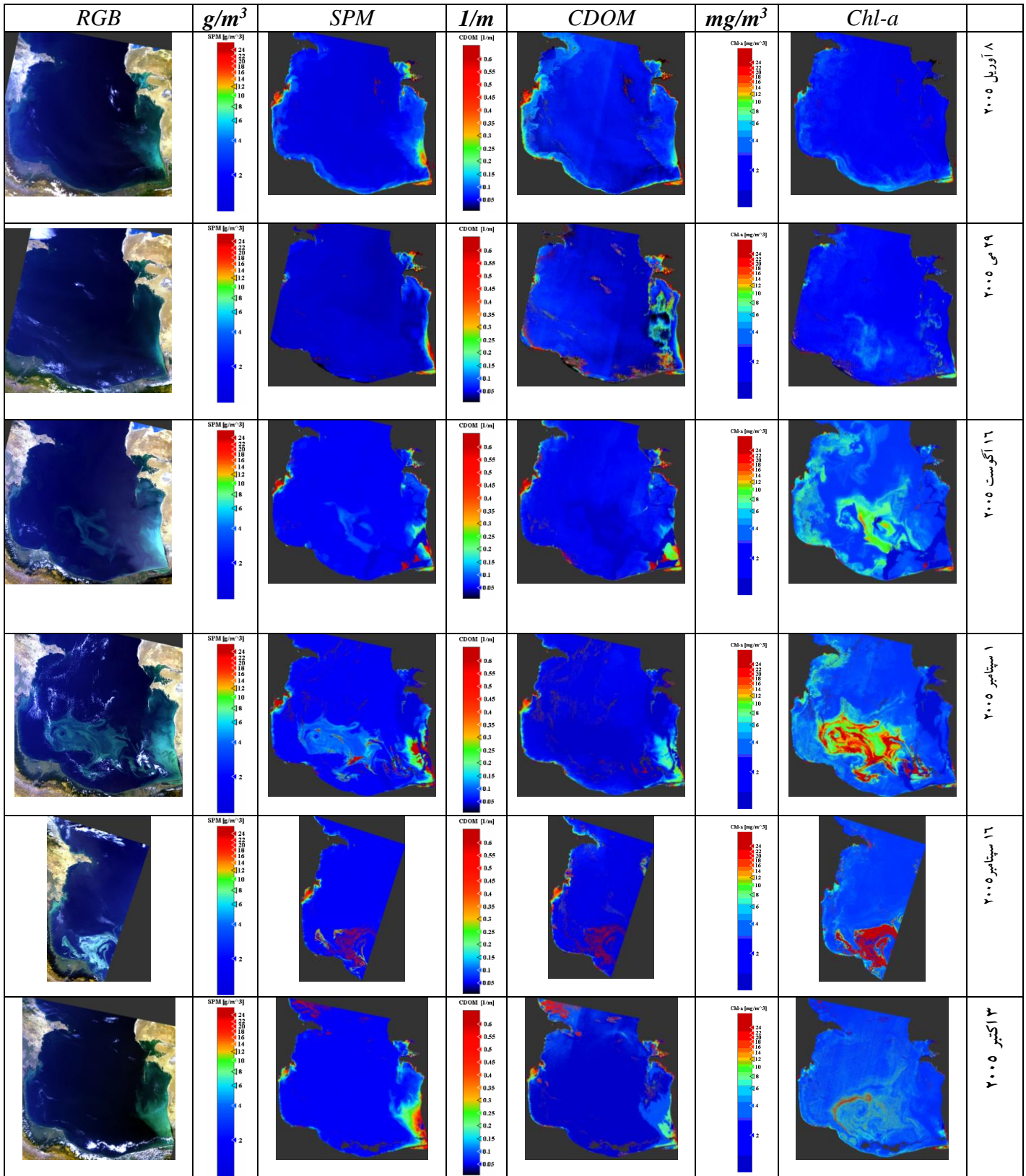
پیوست ب : اندازه گیری های میدانی در دریای خزر

جدول الف-۱ . اندازه گیری های میدانی در دریای خزر در سال ۲۰۰۵

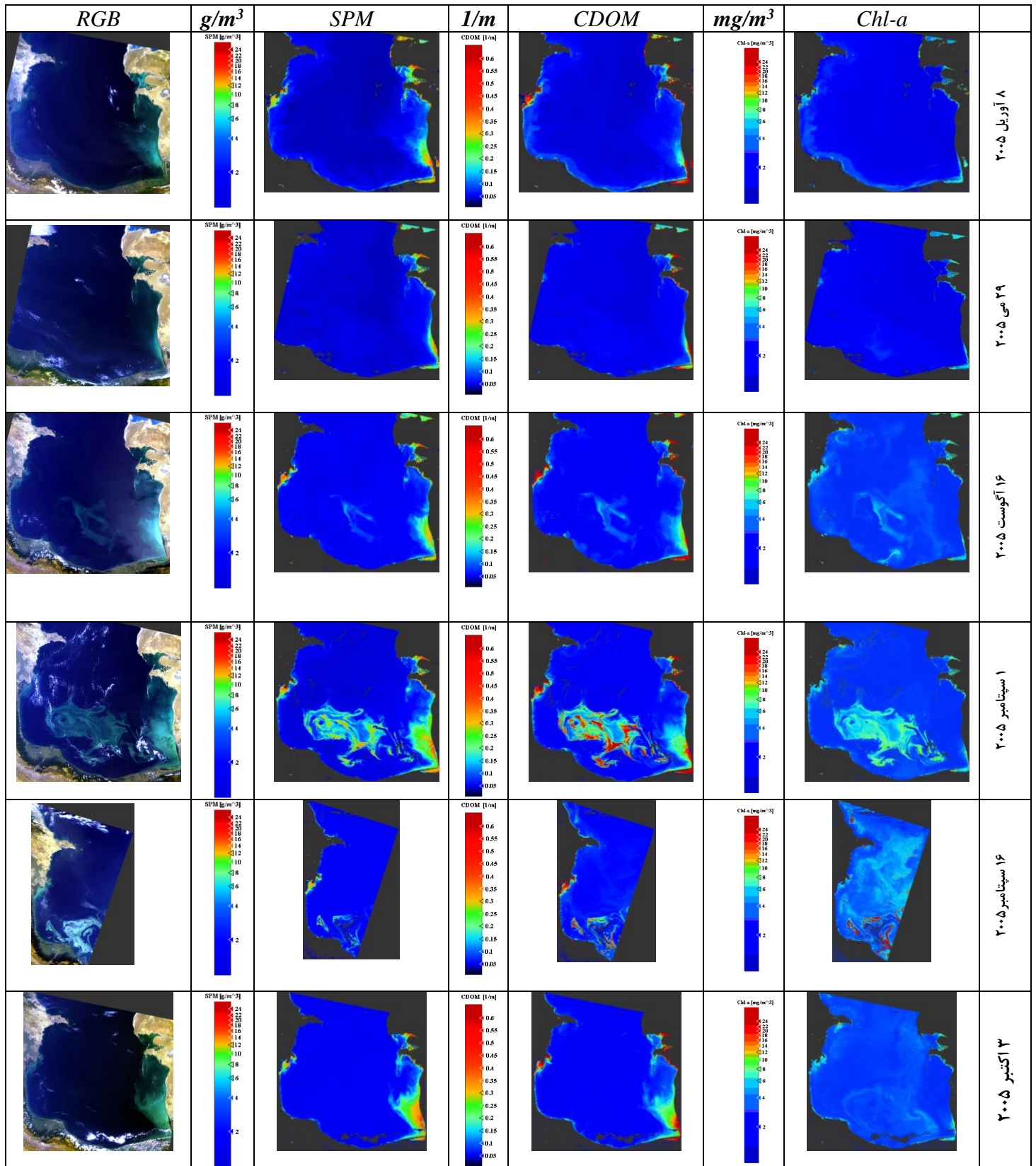
Date	Lat	Lon	chl-a ( $\mu\text{g/l}$ )	a-CDOM @ 443 nm (1/m)	SPM (mg/l)
22-Jul	37.49	49.47	19.9	0.55	
22-Jul	37.50	49.47	15.2	0.32	
22-Jul	37.52	49.47	2.4	0.20	
31-Jul	37.55	49.50	2.4	0.20	
31-Jul	37.49	49.47	18.1	0.40	
10-Aug	37.49	49.48	10.3	0.35	
10-Aug	37.51	49.49	2.4	0.29	
10-Aug	37.53	49.51	2.2	0.20	
13-Aug	37.50	49.45	3.0	0.37	
13-Aug	37.52	49.45	2.5	0.52	
16-Aug	37.52	49.48	2.1	0.40	
16-Aug	37.50	49.47	17.4	0.35	
16-Aug	37.49	49.46	30.7	0.46	
19-Aug	37.50	49.47	2.5	0.20	
19-Aug	37.52	49.49	2.4	0.20	
19-Aug	37.55	49.54	2.1	0.23	
1-Sep	37.50	49.45	19.2	0.75	
1-Sep	37.52	49.45	2.5	0.55	
1-Sep	37.56	49.46	2.5	0.49	
23-Sep	37.50	49.47	7.5	0.40	16.79
23-Sep	37.51	49.47	6.4	0.40	21.25
23-Sep	37.50	49.45	4.4	0.46	13.58
2-Oct	37.50	49.47	8.9	0.66	6.30
2-Oct	37.53	49.48	1.5	0.40	6.55
2-Oct	37.56	49.50	1.6	0.52	8.24
3-Oct	37.50	49.46	5.6	0.35	9.50
3-Oct	37.53	49.46	2.1	0.17	6.65
3-Oct	37.55	49.47	2.2	0.20	6.85
15-Oct	37.50	49.47	5.0	0.55	8.22
15-Oct	37.52	49.48	3.7	0.46	7.44
15-Oct	37.54	49.48	2.5	0.35	7.70
16-Oct	37.49	49.47	12.3		8.55
16-Oct	37.50	49.49	3.4		7.50
16-Oct	37.51	49.51	2.5		6.75
25-Oct	37.49	49.45	2.4	0.52	8.80
25-Oct	37.50	49.43	2.5	0.40	8.50
25-Oct	37.53	49.42	4.1	0.35	10.55

پیوست پ: سری زمانی تغییرات پارامترهای کیفی در آب دریای خزر

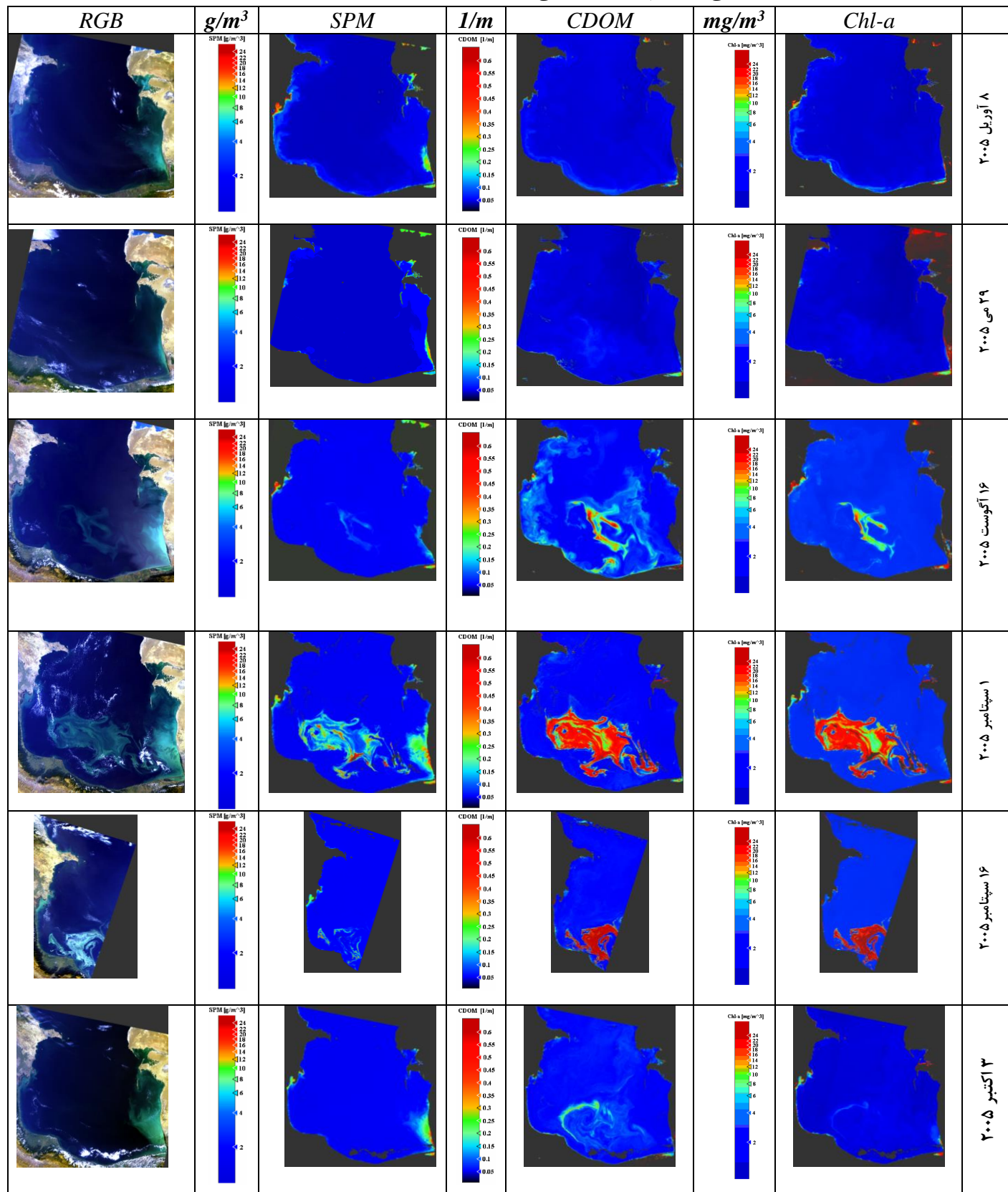
سری زمانی تصاویر پارامترهای کیفی در دریای خزر (مدل معکوس MEGS)



سری زمانی تصاویر پارامترهای کیفی در دریای خزر (مدل معکوس C2R)

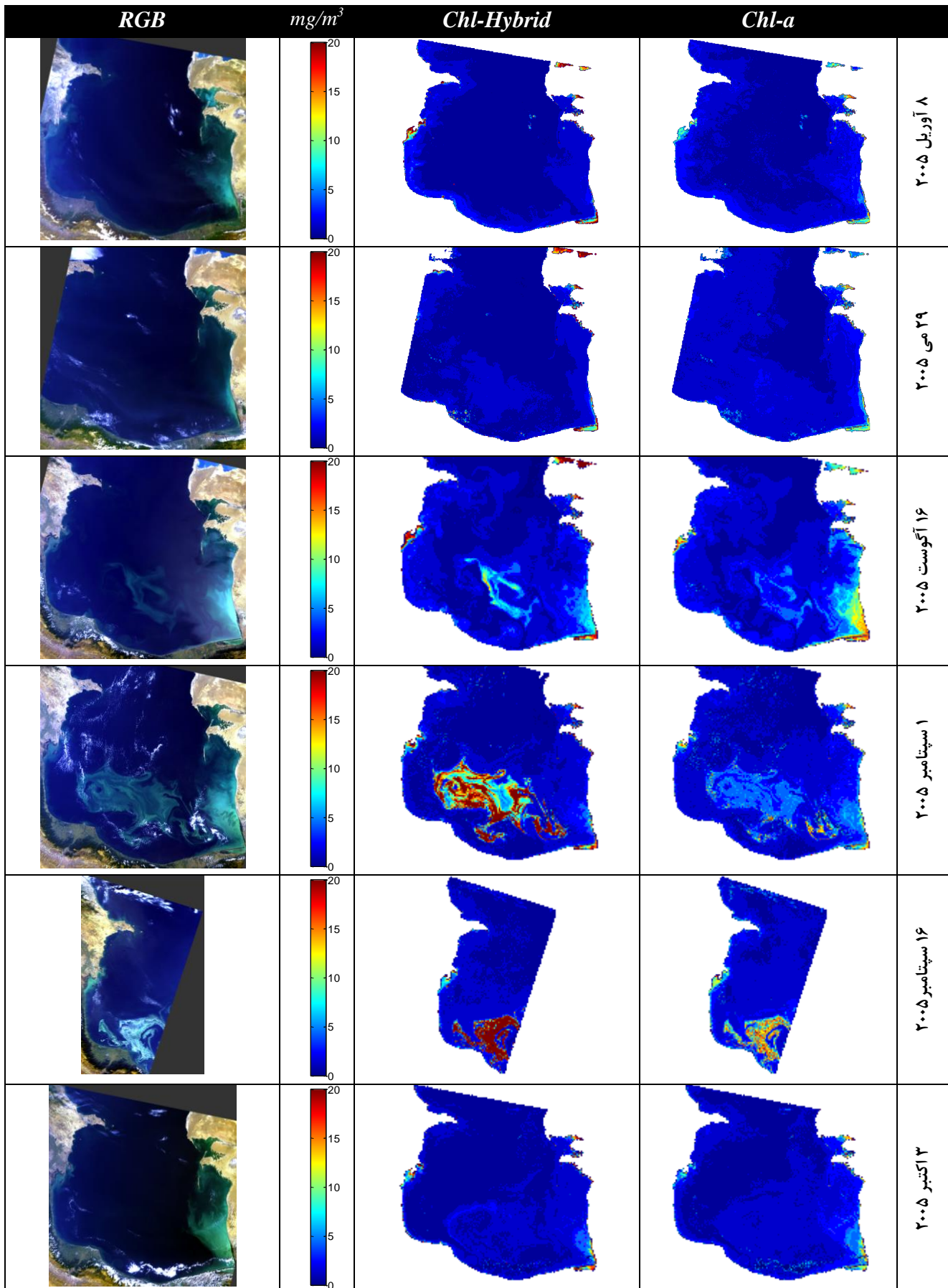


سری زمانی تصاویر پارامترهای کیفی در دریای خزر (مدل معکوس FUB\WeW)

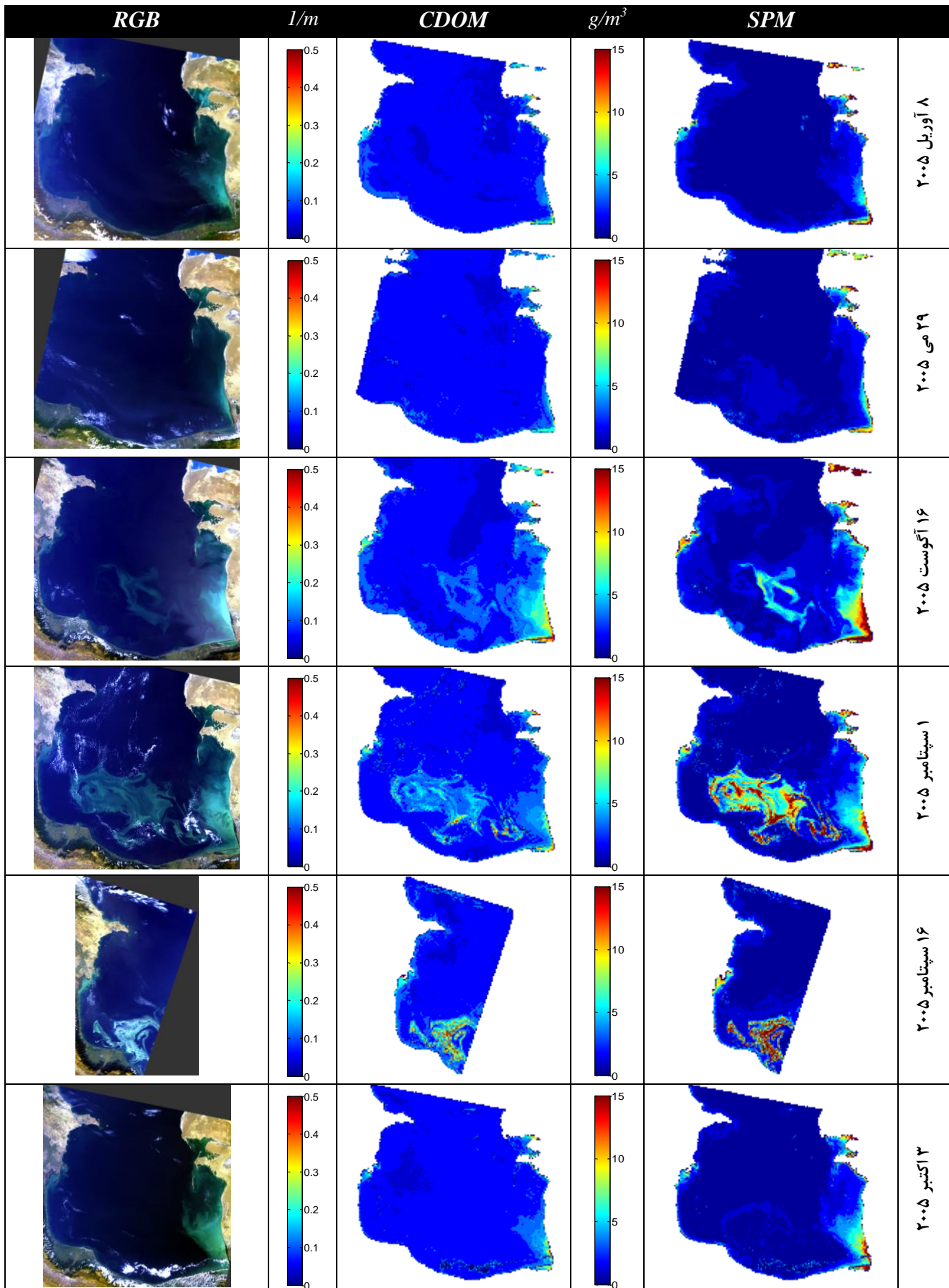




سری زمانی تصاویر Chl-a در دریای خزر (مدل معکوس ALM)

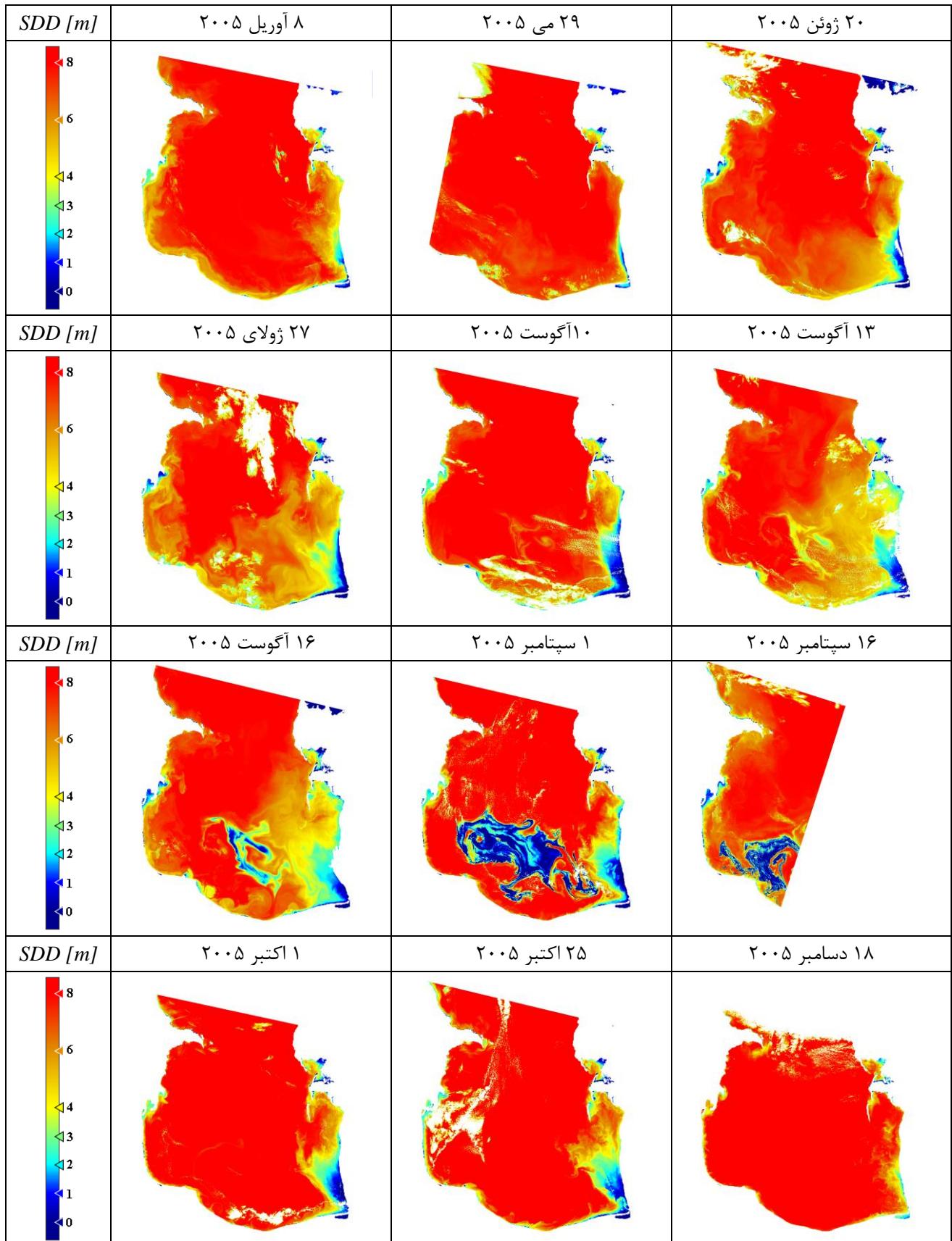


سری زمانی تصاویر SPM و CDOM در دریای خزر (مدل معکوس ALM)



## پیوست ت: سری زمانی تغییرات عمق سکی در دریای خزر

تصاویر سری زمانی عمق سکی در دریای خزر مه توسط مدل تجربی ALM با ۴ قانون فازی تولید شده است.



## **Abstract:**

Monitoring of water quality parameters (e.g. chlorophyll-a (Chl-a), suspended particulate matters (SPM), colored dissolved organic matters (CDOM)) in the water bodies is vital. But the monitoring of spatio-temporal distribution of water quality parameters using traditional in-situ measurements is not cost effective and it is very complicated and time consuming. In the last decades, remote sensing has been appeared as a useful tool for water quality studies. Now, some the water quality parameters are estimated using satellite images reasonably. But one of the most important challenges in this subject is the finding or development of the appropriate methods for estimation. In this study, the performance of five different inverse models of MERIS sensor (MEGS, C2R, FUB/Wew, ALM and Hybrid ALM-ANN) for the extraction of Chl-a, SPM and CDOM in the Caspian Sea using MERIS images were evaluated and validated. In addition the adjacency effects on the results of different inverse models are evaluated. The different empirical approaches (linear regression, multi-variate regression, ALM) were utilized for the extraction of Secchi disk depth in the Caspian sea using MERIS images.

For the coincidence of in-situ measurements and Satellite data, three different data extraction methods (central pixel, mean of 3\*3 pixels and median of 3\*3 pixels) of satellite images were performed. The results demonstrated that mean of 3\*3 pixels is the best method for data extraction of satellite images in the modeling of Chl-a, SPM and CDOM. Comparison between the inverse models for the Chl-a and pigment in the Caspian Sea showed that hybrid of ALM-ANN method is the best one and MEGS is the worst one. For the retrieval of the average CDOM in the water column, the models can be ranked as ALM, C2R, FUB/Wew and MEGS. For the SPM retrieval the ALM was the best model and MEGS was the worst one. Utilizing of ICOL processor for the correction of adjacency effects, improved the results of ALM for Chl-a and pigment retrieval and the other models did not present significant improvements. For the CDOM retrieval, ICOL improved the results of C2R model and deteriorate the FUB/Wew results. ALM results did not show any significant improvement. In the SPM modeling, ICOL improved the results of FUB/Wew and C2R models. In addition, the performance of different inverse models in a cross section in the Caspian sea was evaluated and using this cross section the boundary between coastal zone and open sea was determined (8 km). The MEGS and C2R inverse models were validated using the development of new bio-optical models for them for Chl-a retrieval in the Caspian Sea. The validation highly improved the results of MEGS method but it has no significant effect on the C2R results. The validated models were compared with hybrid ALM-ANN model and the results showed that hybrid ALM-ANN model is the best one for Chl-a retrieval. Validation using the shifting method was applied on the inverse models for CDOM and SPM retrieval according to their biasness. The results highly improved and the C2R and ALM were introduced as the best models for CDOM and SPM retrieval, respectively. Results of Secchi disk depth modeling using the reflectance data in the TOA (Top of Atmosphere) and BOA (Bottom of Atmosphere) showed that the linear regression can present an easy and reasonable model, but the results of ALM is better than the other methods and the results of models using BOA data is better than the using the TOA data. Finally, using different inverse models the time series of spatial distribution maps of different water quality parameters in the Caspian sea were generated using the time series of MERIS images.

**Key words:** water quality parameters, chlorophyll-a, suspended particulate matters, colored dissolved organic matters, Remote sensing, inverse models, MEGS, C2R, FUB/Wew, ALM, Hybrid ALM-ANN, MERIS, Secchi disk depth, ICOL, Caspian Sea.



Shahrood University of Technology

Faculty of Earth Science

**Thesis M.Sc.**

Subject

**Determination of appropriate inverse modeling  
method for the retrieval of water quality parameters in  
the Caspian Sea using satellite data**

By:

Hossein sharifi

Supervisor:

Dr. H. Taheri Shahraiyni

July 2010