

## ارزیابی و مقایسه روش‌های تحلیل و پیش‌بینی کشتند در نرم‌افزار مایک ۲۱

بهمن تاج فیروز<sup>۱</sup>، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>۲\*</sup>، مجتبی عظام<sup>۳</sup>، و کامران لاری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup>استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup>استادیار، گروه علوم دریایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

<sup>۴</sup>دانشیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۰)

### چکیده

در این تحقیق سعی شده است با استفاده از داده‌های کوتاه‌مدت و ابزارهای تحلیل و پیش‌بینی کشتند نرم‌افزار مایک ۲۱، کاربرد درست ابزارهای تحلیل و تولید داده‌های کشتند ارتفاعی برای استفاده در داده‌های مرز باز (open boundary) مدل‌های هیدرودینامیکی معرفی شود. مایک ۲۱ نرم‌افزاری قدرتمند در زمینه شبیه‌سازی پارامترهای اقیانوسی و دریایی است. از اطلاعات کشتندی برای تولید داده‌های مرز باز شبیه‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی مدل‌های هیدرودینامیکی استفاده می‌شود. دقت نتایج شبیه‌سازی جریان‌های کشتندی و کشتند ارتفاعی، موج، انتقال رسوب و سایر پارامترهای دریایی، وابستگی تام به دقت داده‌های مرز باز ورودی کشتند در مدل هیدرودینامیکی دارد. این تحقیق، بهترین روش تحلیل و تولید داده‌های کشتندی را با استفاده از ابزارهای تحلیل و پیش‌بینی کشتند در نرم‌افزار مایک معرفی می‌کند. در این مقاله با استفاده از ابزارهای تحلیل، مهم‌ترین اطلاعات ساعتی یک‌ساله کشتندی ایستگاه‌های دائمی بنادر چابهار، شهیدرجایی و بوشهر تجزیه و تحلیل می‌شوند. این تحلیل‌ها در دوره‌های بلندمدت یک‌ساله، سی‌روزه، پانزده‌روزه و ده‌روزه با استفاده از روش کانادایی گودین-فرمن (Godin-Forman) و روش آدیرالتی (Admiralty) انجام می‌شوند. سپس مؤلفه‌های حاصل از تحلیل کشتند با مقادیر متناظرشان از مدل کشتندی TMD مقایسه و ضرورت استفاده از تحلیل داده‌های کوتاه‌مدت برای اصلاح مقادیر مدل کشتندی در مناطق خاص بررسی می‌شود. در ادامه، با استفاده از ابزار کشتند موجود در نرم‌افزار، مثال‌هایی از داده‌های ساعتی یک‌ساله کشتندی ایستگاه‌های دائمی مطرح و درباره روش‌های تولید دقیق‌تر داده‌های کشتندی از مشاهدات بلندمدت و کوتاه‌مدت برای استفاده در شرایط مرز باز مدل‌های هیدرودینامیکی بحث خواهد شد. در نهایت، نتایج ارائه شده از لحاظ آماری، ارزیابی و ابزارهای مناسب انجام تحلیل و پیش‌بینی داده‌های کشتندی در دوره‌های مختلف معرفی خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل و پیش‌بینی، مدل کشتندی، مؤلفه هارمونیک، مدل هیدرودینامیکی، مایک ۲۱، دریای عمان و خلیج فارس

## ۱ مقدمه

پدیده کشند اقیانوس‌ها و دریاها در امور مهندسی و مطالعات دریایی نقش ویژه و پراهمیتی دارد. بنا به دلایلی همچون ساخت‌وساز بنادر، مهندسی سواحل، مسائل زیست محیطی، امور ناوبری و ده‌ها استفاده دیگر، حرکات قائم و متناوب آب دریا در نواحی ساحلی و کم‌عمق‌تر، نسبت به نواحی عمیق اقیانوس اهمیتی ویژه دارد.

پدیده کشند را به‌خوبی می‌توان با کمک مدل‌های ریاضی و نجومی توسعه‌یافته توسط دانشمندان این رشته مطالعه کرد. این پدیده بخش مهمی از تغییرات ارتفاعی سطح دریا (Sea Surface Height, SSH) و جریان‌های دریایی در مناطق ساحلی و نواحی کم‌عمق است. کشند نقش مهمی در مدل‌های اقیانوسی و ساحلی دارد (مارتین و همکاران، ۲۰۰۹)؛ لذا به‌صورت گسترده‌ای از مدل‌های هیدرودینامیکی برای شبیه‌سازی ارتفاع کشندی، جریان‌های کشندی، امواج، انتقال رسوب و سایر پارامترهای محیطی و بوم‌شناسی استفاده می‌شود. مدل‌های هیدرودینامیکی متنوعی که برای این منظور ارائه شده‌اند، با استفاده از الگوریتم‌های مناسب و شرایط مرزی و اولیه، قادر به شبیه‌سازی پارامترهایی نظیر ارتفاع کشندی، جریان کشندی، امواج، انتقال رسوب، آلودگی و ... برای دوره‌های مشخص هستند. این مدل‌ها به‌صورت منبع باز و تجاری در اختیار کاربران قرار دارند و کاربران می‌توانند با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد علمی و کاربردی هر مدل، از آنها استفاده کنند. وجه مشترک این مدل‌های اقیانوسی، استفاده از شرایط مرز باز در ناحیه دریایی و اقیانوسی است.

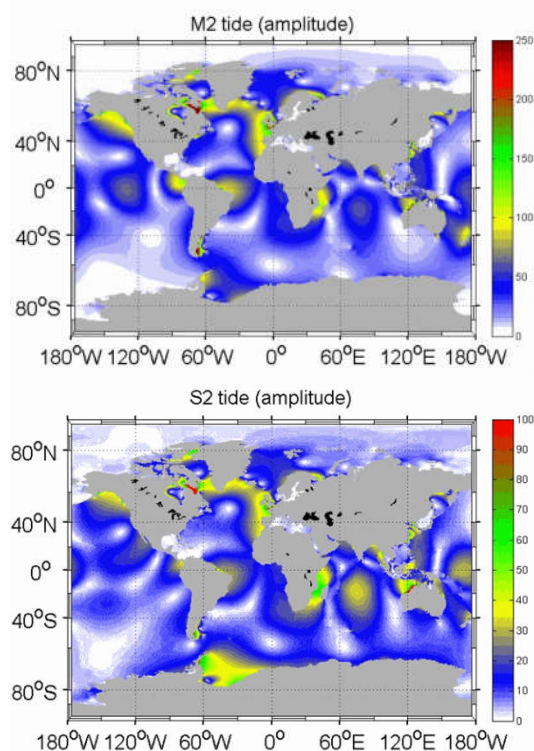
یکی از مهم‌ترین پارامترهای شرایط مرز باز اقیانوس، اطلاعات کشند طی دوره اجرای شبیه‌سازی است. اطلاعات کشندی مرز باز اغلب به‌صورت آماده، در بسته‌های نرم‌افزاری و مدل‌های کشندی ارائه شده‌اند. از این اطلاعات برای اجرای مدل‌های بزرگ‌مقیاس و

میان‌مقیاس (meso-scale) دریایی استفاده می‌شود. یکی از معروف‌ترین مدل‌های هیدرودینامیکی که به‌صورت وسیع در جامعه کاربران فعالیت‌های مهندسی دریایی استفاده می‌شود، مدل هیدرودینامیک مایک ۲۱ (MIKE 21) است. مایک، نرم‌افزاری کاملاً گرافیکی و تجاری است که مؤسسه هیدرولیک دانمارک، (Danish Hydraulic Institute)، آن را توسعه داده و به‌صورت تجاری در اختیار کاربران قرار گرفته است (دی‌اچ‌آی، ۲۰۱۴). این نرم‌افزار، یکی از پرکاربردترین مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی جریان، انتقال رسوب و آلودگی در محیط‌های دریایی است. به‌طورمثال، در اجرای مدل‌های جریان (Flow Model)، استفاده از داده‌های کشندی برای شبیه‌سازی جریان‌های کشندی ناگزیر است. داده‌های کشندی که می‌توانند در مرز باز استفاده شوند، معمولاً از روش‌های مختلفی تهیه می‌شوند. مشاهدات مستقیم کشند در نقاط مرزی شاید بهترین روش موجود باشد. برای مرزهای به‌نسبت کوتاه، اندازه‌گیری مستقیم کشند در دو طرف مرز باز و درون‌یابی، کفایت می‌کند.

در این تحقیق، به تعدادی از مدل‌های جهانی و منطقه‌ای کشندی اشاره شده است، اما این مدل‌های کشندی معمولاً برای اجرای شبیه‌سازی در بعضی از مناطق ساحلی کم‌عمق مانند خورها، شاخه‌های کشندی و بنادر چندان دقیق نیستند؛ لذا مشاهدات مستقیم کشندی نقش مهمی در این مسئله دارد. از طرف دیگر، محدودیت‌های فنی و مالی برای مشاهدات طولانی‌مدت کشند، مانع بزرگی برای این امر است.

در مرزهای طولانی و بزرگ‌مقیاس اقیانوسی، مشاهدات بسیار دشوار یا حتی ناممکن است. مشاهدات ماهواره‌ای ارتفاع‌سنجی با ترکیب داده‌های بویه‌های آب‌های آزاد، می‌توانند به این مسئله کمک کنند. به‌هرحال، در اکثر مواقع مشاهدات مستقیم می‌تواند به

از چهار سال اطلاعات اندازه‌گیری شده ماهواره راداری و دو سال اطلاعات مؤلفه‌های کشتندی اضافی برای پیش‌بینی بهتر کشتند آب‌های کم‌عمق تهیه شده است. این مدل قادر است ده مؤلفه کشتندی شامل مؤلفه‌های نیم‌روزانه M2، N2، K2، S2؛ مؤلفه‌های روزانه Q1، P1، O1، K1، S1 و مؤلفه آب کم‌عمق M4 را تولید کند (شکل ۱).



شکل ۱. مؤلفه‌های نیم‌روزانه مدل جهانی کشتند در نرم‌افزار مایک ۲۱.

نتایج بهتری برسد. البته هرچه مشاهدات کشتندی طولانی‌تر باشد، اعتبار نتایج و خروجی مدل‌های هیدرودینامیکی بهتر خواهد بود. متأسفانه، مشاهدات طولانی‌مدت همیشه در دسترس نیستند؛ محدودیت‌های فنی و اقتصادی، مانع مشاهدات طولانی‌مدت کشتند ارتفاعی در نقاط مرزی یک مدل هیدرودینامیکی هستند. ممکن است تلفیق نتایج مدل‌های کشتندی - که مؤسسات تحقیقاتی و اجرایی، آنها را معرفی کرده‌اند - با نتایج تحلیل مشاهدات کشتند در دوره‌های کوتاه‌مدت‌تر، به نتایج بهتری برسد.

در قسمت‌های بعدی، تعدادی از مدل‌های کشتندی در مقیاس جهانی (Global)، میان‌مقیاس و منطقه‌ای معرفی می‌شوند و در یک مقایسه نشان داده می‌شود که هارمونیک‌های استخراج شده از مدل کشتندی، با نتایج تحلیل اطلاعات مشاهده شده در سواحل باز تطابق مناسبی دارند، اما در نواحی خاص مانند کانال‌ها، تنگه‌ها و خورها دقت لازم را ندارند. سپس درباره نتایج تحلیل مشاهدات بلندمدت و کوتاه‌مدت داده‌های کشتندی در نرم‌افزار مایک بحث خواهد شد. در این مطالعه، بررسی آماری و مقایسه‌های لازم برای انتخاب دقیق‌ترین روش تحلیل کشتند انجام شده و چگونگی دستیابی به نتایج مطلوب‌تر از تحلیل مشاهدات کوتاه‌مدت کشتندی نشان داده شده است.

## ۲ مدل‌های جهانی کشتند

مدل‌های متعددی برای استخراج داده‌های کشتندی یا استخراج مؤلفه‌های هارمونیک در مقیاس جهانی و منطقه‌ای در دسترس هستند. در اینجا نگاهی به چند مدل مهم کشتندی خواهیم داشت:

### ۱-۲ مدل جهانی کشتند DHI

مدل جهانی کشتند (Global Tide Model) نرم‌افزار مایک ۲۱، مدل توسعه‌یافته با تفکیک ۰/۱۲۵ درجه برای پیش‌بینی کشتند در مقیاس جهانی است. این مدل با استفاده

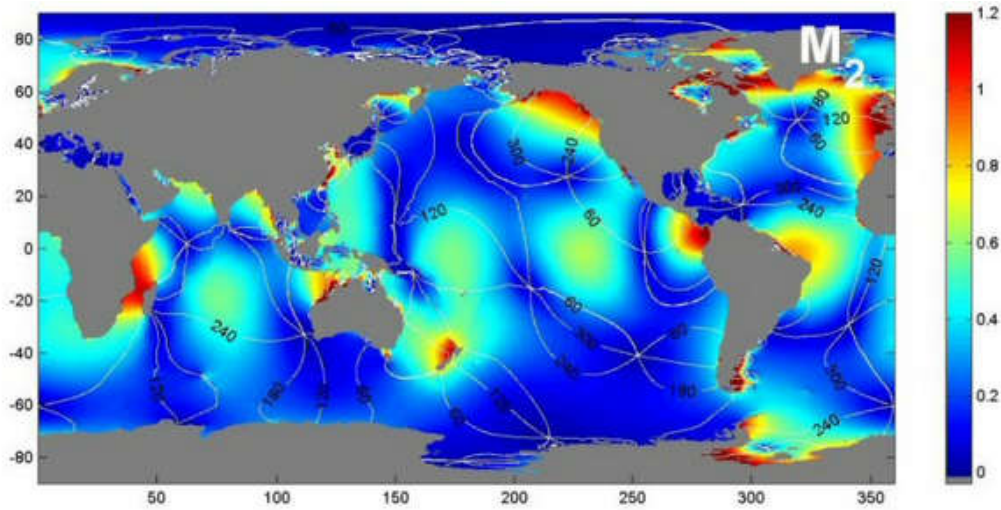
### ۲-۲ مدل TPXO

مدل‌های جهانی و میان‌مقیاس هیدرودینامیکی، معمولاً از نتایج و مدل‌های جهانی کشتندی‌ای استفاده می‌کنند که با ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی به صورت گوارد داده‌ها (Data Assimilation) تهیه می‌شوند (ماتسوموتو و همکاران، ۲۰۰۰). مدل TPXO که دانشگاه ایالتی اُریگان (Oregon State University, OSU) آن را توسعه داده است، مثال خوبی از استخراج داده‌های کشتندی و جریان کشتندی در مقیاس جهانی و میان‌مقیاسی

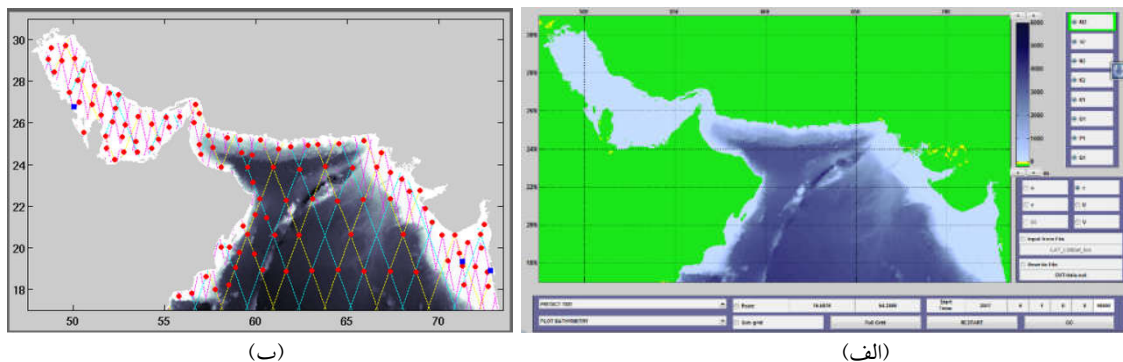
### ۲-۳ مدل TMD

در زمینه مدل‌های میان‌مقیاس و منطقه‌ای، دانشگاه ایالتی آرگان ابزار نرم‌افزاری Tidal Model Driver را در محیط برنامه‌نویسی متلب (MATLAB) معرفی کرده است. این مدل با تفکیک مکانی یک دقیقه شامل اقیانوس هند شمالی، دریای عمان و خلیج فارس است و توانایی پیش‌بینی کشتند ارتفاعی و جریان‌های دریایی را دارد. از این مدل می‌توان هشت مؤلفه کشتندی  $M_2$ ،  $S_2$ ،  $N_2$ ،  $K_2$ ،  $K_1$ ،  $O_1$ ،  $P_1$ ،  $Q_1$  و  $M_1$  را استخراج کرد.

است. این مدل، نسخه‌ای از مدل جهانی کشتند اقیانوسی است که باروش کمترین مربعات، معادلات کشتند لاپلاس را با داده‌های ماهواره‌ای TOPEX/Poseidon و Jason برآزش کرده است. این مدل قادر است هشت مؤلفه کشتندی اصلی شامل  $S_2$ ،  $N_2$ ،  $K_2$ ،  $K_1$ ،  $O_1$ ،  $P_1$ ،  $Q_1$ ،  $M_2$  و دو مؤلفه طولانی‌مدت  $M_f$ ،  $M_m$  و سه مؤلفه غیرخطی  $M_4$ ،  $MS_4$ ،  $MN_4$  را در مقیاس جهانی با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه تولید کند (شکل ۲).



شکل ۲. مؤلفه کشتندی  $M_2$  در مدل جهانی کشتند TPXO.



شکل ۳. (الف) نرم افزار TMD، (ب) مسیر داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاه ثبت خودکار کشتند.

پیش‌بینی کشتند در شرایط مرز باز مدل‌های هیدرودینامیکی استقبال می‌کنند، این مقاله سعی دارد نحوه کاربرد هریک از روش‌های IOS (Institute of Ocean Sciences) و آدمیرالتی را برای کشتندهای متنوع مناطق مختلف دریای عمان و خلیج فارس توضیح دهد.

در اینجا برای درک استفاده از نتایج تحلیل، دو روش تحلیل و پیش‌بینی کشتند IOS - که گودین (۱۹۷۲) و فورمن (۱۹۷۷) در مؤسسه اقیانوس‌شناسی کانادا آن را توسعه دادند - و روش آدمیرالتی - که اداره آبنگاری نیروی دریایی بریتانیا (United Kingdom Hydrographic Office, UKHO) ارائه کرده است - را در نرم افزار مایک معرفی می‌کنیم. محاسبات و تجزیه و تحلیل داده‌های کشتند به استخراج اطلاعات مؤلفه‌های هارمونیک منجر می‌شود. در این تحقیق، هر دو روش با ذکر سه نوع داده از مشاهدات کشتند ارزیابی خواهند شد. به این منظور، برای بررسی مزایا و معایب دو روش تحلیل و پیش‌بینی کشتند IOS و آدمیرالتی، از دوره‌های زمانی یک‌ساله (حداقل ۸۷۷۶ ساعت)، سی‌روزه، پانزده‌روزه و ده‌روزه استفاده شده است.

### ۳-۱ تحلیل هارمونیک به روش IOS

روش تحلیل IOS براساس روش هارمونیک فوریه و حل معادلات حوزه زمان است. به‌طور کلی، فرض اساسی برای کاربرد روش IOS این است که تغییرات ارتفاع کشتندی  $h(t)$  در هر ایستگاه کشتندی مشخص را می‌توان با تعداد محدودی از جملات هارمونیک،  $m$ ، به‌صورت زیر بیان کرد (شرمن، ۱۹۵۸):

$$h(t) = Z_0 + \sum_{j=1}^m f_j(t) A_j \cos \left( 2\pi \left( \frac{\sigma_j t + (V_j(t) + U_j(t)) - g_j}{T_j} \right) \right), \quad (1)$$

که  $Z_0$ ، میانگین تراز کشتند؛  $A_j$ ، دامنه و  $g_j$ ، فاز مؤلفه  $j$ -ام است.  $\sigma_j$ ، فرکانس؛  $f_j(t)$ ، ضریب نودال دامنه؛  $U_j(t)$ ،

این مدل از گوارد داده‌های ۵۳۱ دور ماهواره Topex Tandem، ۱۱۴ دور ماهواره ERS، ۲۰۰۹۵ پایگاه داده و ۲۵۰ داده نمونه (رنگ قرمز توپر در شکل ۳) به‌دست آمده است. برای صحت‌سنجی، از مؤلفه‌های هارمونیک استخراج شده از تحلیل داده‌های دو ایستگاه کشتندی (مربع آبی در شکل ۳) استفاده شده است (پدمن و اروفیوا، ۲۰۰۵).

### ۳ روش‌های تحلیل ارتفاعات کشتندی در نرم‌افزار مایک

تجزیه و تحلیل اطلاعات نوسان‌های آب دریا، این اجازه را به ما می‌دهد که رفتار کشتند در یک ناحیه دریایی را بهتر و با جزئیات بیشتر بررسی کنیم. روش‌های مختلفی برای تجزیه و تحلیل پیشنهاد شده‌اند. تحلیل هارمونیک به کمک سری‌های فوریه و روش کمترین مربعات (Least Squares Method)، می‌تواند منحنی‌های پیچیده کشتند را به منحنی‌های ساده‌تر هارمونیک (کسینوسی و سینوسی) تجزیه کند (دودسن و واربورگ، ۱۹۴۱). دامنه و فازهای استخراج شده از تجزیه و تحلیل، کمیت‌های نماینده این منحنی‌ها هستند. این مؤلفه‌ها برای هر منطقه دریایی ثابت و نسبت به زمان تقریباً غیرقابل تغییر هستند. در نرم‌افزار مایک، ابزارهای مختلف به‌صورت ماژول‌های جانبی در اختیار کاربران است که استفاده از آن را بسیار ساده و جذاب کرده است. یکی از این ابزارها، محاسبات تحلیل و پیش‌بینی کشتند ارتفاعی و جریان‌های کشتندی موسوم به جعبه‌ابزار کشتندی مایک صفر (Tidal-MIKE Zero Toolbox) است (دی. اچ. آی، ۲۰۱۷).

تنظیمات ورودی این ابزار، بسیار ساده و کاربردی است. کافیست که داده‌های کشتندی را به‌صورت یک سری زمانی که معمولاً بازه‌های زمانی یک‌ساعته دارد، به نرم‌افزار معرفی کنیم تا مؤلفه‌های موردنیاز استخراج شوند. براساس این مؤلفه‌ها، می‌توان پیش‌بینی‌های لازم را انجام داد. از آنجا که کاربران از ابزار کشتندی نرم‌افزار مایک برای تحلیل و

در یک دوره که کشند-مه کشند (Neap-Spring Cycle)، پانزده مؤلفه و برای یک دوره ده‌روزه، ده مؤلفه استخراج خواهد شد. پیش‌بینی کشند همانند روش تحلیل به صورت معکوس خواهد بود؛ یعنی ارتفاع کشند در زمان‌های درخواستی از رابطه (۱) و با استفاده از مؤلفه‌های استخراج شده از تحلیل کشند به دست می‌آید.

همان‌طور که می‌دانیم برای استخراج مؤلفه‌های اصلی  $M_2$ ،  $S_2$ ،  $K_1$  و  $O_1$  به یک حداقل دوره زمانی از اطلاعات کشندی نیاز است. از آنجایی که در این مقاله درباره روش‌های تحلیل ارتفاعات کشندی برای محاسبه مؤلفه‌های اصلی بحث خواهد شد، طول دوره زمانی مورد نیاز برای استخراج مؤلفه‌ها در جدول ۱ درج شده است. این طول دوره زمانی از معیار رایلی به دست آمده است (فرمن، ۱۹۷۹).

جدول ۱. حداقل دوره زمانی مورد نیاز برای استخراج مؤلفه کشندی در تحلیل با روش IOS.

مؤلفه	$M_2$	$S_2$	$K_1$	$O_1$
دوره زمانی (ساعت)	۱۳	۳۵۵	۲۴	۳۲۸

### ۲-۳ روش آدمیرالتی

روش آدمیرالتی از یک الگوریتم تجربی برای اجرای تحلیل پارامتریک فرکانس‌های کشندی استفاده می‌کند. در این الگوریتم، برازش پایدار چهار تابع پایه پیچیده به نام‌های  $M_2A$ ،  $S_2A$ ،  $O_1A$  و  $K_1A$  به سری‌های زمانی کشند انجام می‌شود. توابع پایه  $S_2A$  و  $M_2A$ ، نماینده تغییرات کشند نیم‌روزانه و توابع  $O_1A$  و  $K_1A$ ، نماینده تغییرات کشند روزانه هستند.

برخلاف تحلیل هارمونیک فوری که سری زمانی کشند را به مجموع توابع سینوسی پایه مانا (مستقل از زمان) تجزیه می‌کند، توابع پایه  $M_2A$ ،  $S_2A$ ،  $O_1A$  و  $K_1A$  به صورت غیرمانا (non-stationary) و شبه‌سینوسی هستند. این توابع، ترکیبی از شکل فشرده‌ای از بیست مؤلفه هارمونیک به شرح جدول ۲ هستند (گلن، ۲۰۱۵).

تصحیح فاز نودال و  $V_j(t)$ ، آرگومان نجومی مؤلفه  $j$ -ام است.

روش کمترین مربعات، اولین مرحله تجزیه و تحلیل مشاهدات کشند برای استخراج فاز و دامنه مؤلفه‌هاست. در این روش، در هنگام برازش اطلاعات کشندی، مجموع مربعات اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و مدل باید به کمترین مقدار برسد. اگر حداقل زمان مشاهدات کشندی سیزده ساعت باشد، می‌توان حداقل یک مؤلفه نظیر  $Z_0$  یا  $MSL$  را به دست آورد. استخراج مؤلفه‌های کشندی با روش IOS، به طول مشاهدات کشند بستگی دارد. پارامتر مقایسه رایلی، برای تصمیم‌گیری در این باره است که آیا می‌توان یک مؤلفه خاص را در تحلیل گنجانند یا خیر. اگر  $F_0$  فرکانس مؤلفه درخواستی،  $F_1$  فرکانس مؤلفه مقایسه رایلی و  $T$  مدت زمان کشند ثبت شده برای تحلیل باشد؛ آنگاه اگر  $T \geq Ray \parallel F_0 - F_1 \parallel$  باشد، مؤلفه درخواستی در نتیجه تحلیل نهایی وجود خواهد داشت. به‌طور کلی، مقدار  $Ray$ ، برابر یک (واحد) فرض می‌شود. بسته نرم‌افزاری، به کمک معیار رایلی (Rayleigh) و با توجه به طول اطلاعات کشندی، تعداد مؤلفه‌های استخراج‌شده را تعیین می‌کند. فرکانس مؤلفه‌هایی را که با معیار رایلی در برنامه تجزیه و تحلیل انتخاب می‌شوند با  $\sigma_j$  نشان می‌دهیم ( $j=1, \dots, m$ ). حداکثر می‌توان ۱۴۶ مؤلفه کشندی از تحلیل کشندی به روش IOS استخراج کرد که ۴۵ مؤلفه منشأ نجومی دارند و ۱۰۱ مؤلفه دیگر، از مؤلفه‌های آب-های کم‌عمق هستند. از آنجایی که اغلب این نوع مؤلفه‌ها دامنه ناچیزی دارند، خروجی مؤلفه آب‌های کم‌عمق در این نرم‌افزار، حداکثر ۲۴ مؤلفه در نظر گرفته شده است. به‌هرحال، با تمهیداتی می‌توان هر تعداد از ۷۷ مؤلفه آب-های کم‌عمق را در نتیجه تحلیل درخواست کرد (گودین، ۱۹۷۲).

در تحلیل اطلاعات کشندی با روش IOS، در دوره‌های یک‌ساله، ۶۸ مؤلفه؛ در دوره ماهانه، سی مؤلفه؛

علاوه بر مؤلفه‌های پایه چهارگانه، دو مؤلفه آب‌های کم‌عمق به نام‌های  $F_4$  (نماینده مؤلفه‌های یک‌چهارم روزانه) و  $F_6$  (نماینده مؤلفه‌های یک‌ششم روزانه) هم از تحلیل استخراج می‌شوند. این مؤلفه‌ها به ترتیب ترکیبی از مؤلفه‌های هارمونیک (MN4, M4, MS4) و (2MN6, M6, 2MS6) هستند. فازهای این مؤلفه‌های آب‌های کم‌عمق را با نمادهای  $f_4$  و  $f_6$  نشان می‌دهند. اغلب، مقدار دامنه آب‌های کم‌عمق حاصل از تحلیل آد میرالتی، ناچیز است (دودسن و واربورگ، ۱۹۴۱).

#### ۴ مشاهدات کشتی و اجرا کردن نرم‌افزار

مدل‌های کشتی در بعضی از نواحی ساحلی چندان دقیق نیستند و برای مدل‌های هیدرودینامیکی کوچک مقیاس و محلی در نواحی ساحلی و بندری کاربرد ندارند؛ لذا همیشه مشاهدات مستقیم کشتی در این زمینه اولویت دارد. به‌هرحال، همان‌طور که قبلاً بیان شد، مشاهدات طولانی و دقیق مستلزم صرف هزینه و زمان است و در بعضی مواقع هم ناممکن است. از طرف دیگر، مشاهدات طولانی همیشه نمی‌تواند در دسترس باشد.

برای بررسی کاربرد روش‌های تحلیل و پیش‌بینی کشتی، از داده‌های کشتی سه ایستگاه دائمی چابهار، شهیدرجایی و بوشهر با گرایش‌های متفاوت کشتی استفاده شده است. درباره ویژگی هر کشتی در بخش ۵ بحث خواهد شد. اطلاعات کشتی ایستگاه شهیدرجایی مربوط به سال ۲۰۰۰ میلادی (۸۷۸۴ ساعت) است. این اطلاعات برای ایستگاه چابهار، مربوط به سال ۲۰۰۸ میلادی (۸۷۷۶ ساعت) و برای ایستگاه بوشهر مربوط به سال ۲۰۰۴ میلادی (۹۷۷۴ ساعت) است. تمامی این کشتی‌ها از نوع آمیخته و به‌طور عمده نیم‌روزانه (Mixed Semi-Diurnal) هستند، اما کشتی بندر چابهار به‌عنوان نماینده کشتی دریای عمان با گرایش متوسط در ناتساوی روزانه، کشتی بندر شهیدرجایی با گرایش کمتر در

جدول ۲. ارتباط مؤلفه‌های پایه استخراج‌شده از تحلیل آد میرالتی با مؤلفه‌های هارمونیک

مؤلفه روش آد میرالتی	مؤلفه روش هارمونیک	دوره زمانی (ساعت)	بزرگای نسبی در گروه
M2A	2N2	12.90	0.02534
	mu2	12.87	0.03057
	N2	12.66	0.19146
	eta2	12.63	0.03636
	M2	12.42	1.00000
	lambda2	12.22	0.00738
S2A	L2	12.19	0.02827
	T2	12.02	0.05861
	S2	12.00	1.00000
K1A	K2	11.97	0.27215
	pi1	24.13	0.01939
	P1	24.06	0.33093
	K1	23.94	1.00000
	phi1	23.81	0.01424
O1A	J1	23.09	0.05591
	2Q1	28.02	0.02534
	sigma1	27.84	0.03056
	Q1	26.87	0.19146
	rho1	26.73	0.03637
	O1	25.83	1.00000

با کمینه کردن اختلاف سری‌های زمانی مشاهده‌ای و تولید شده از این مؤلفه‌های پایه، پارامترهای فاز و دامنه چهار مؤلفه پایه آد میرالتی محاسبه می‌شوند. استخراج مؤلفه‌های پایه آد میرالتی با کمک رابطه زیر انجام می‌شود (پاگ، ۱۹۸۷):

$$h(t) = \sum_{j=1}^4 H_j f_j \cos(\phi_j - g_j) + e(t), \quad (2)$$

که  $e(t)$  نویز ناهمبسته (uncorrelated noise)،  $g_j$  و  $\phi_j$  تصحیح مدولاسیون زمان برای رسیدن به دامنه و فاز و  $H_j$  و  $f_j$  مؤلفه‌های توابع پایه کشتی آد میرالتی هستند. مقادیر  $\phi_j$  و  $f_j$  را به ترتیب زاویه کشتی (tidal angle) و ضریب کشتی (tidal factor) می‌نامند و با روابط و داده‌های نجومی محاسبه می‌شوند. این مقادیر به‌صورت متوسط روزانه، در جداول پیش‌بینی کشتی سالانه اداره آبنگاری بریتانیا موسوم به جداول کشتی آد میرالتی (Admiralty Tide Tables) چاپ و منتشر می‌شوند (جداول کشتی آد میرالتی، ۲۰۰۳).

نمودارهای ساعتی در دوره‌های یک‌ساله و یک‌ماهه ایستگاه‌های کشندی به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ رسم شده‌اند. تمامی اطلاعات فاقد فاصله (Gap) هستند و از نظر اطلاعات نادرست و اشتباه نیز ارزیابی شده‌اند (سازمان نقشه‌برداری کشور، ۲۰۱۶).

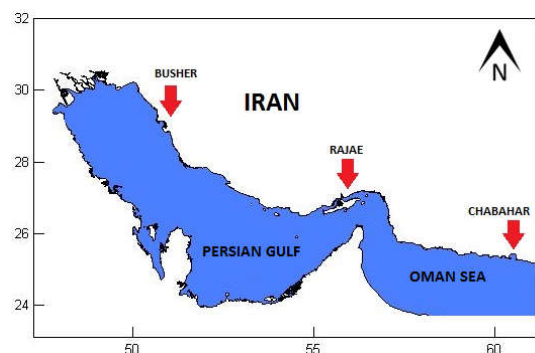
نتایج تحلیل و پیش‌بینی به صورت عددی به ترتیب در جداول ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که هر یک از این روش‌ها برای دوره‌های مختلف، دقت متفاوتی دارند و منجر به نتایج مختلفی می‌شوند. در شکل‌های ۷ تا ۱۰، نمودارهای کشندی، پیش‌بینی و باقی‌مانده برای دوره‌های زمانی گوناگون نشان داده شده است که از دوروش تحلیل و پیش‌بینی به دست آمده‌اند.

### ۵ ویژگی کشندها

ویژگی کشند هر ایستگاه با نسبت دامنه مؤلفه روزانه به دامنه مؤلفه نیم‌روزانه تعریف می‌شود (هیکس و همکاران، ۲۰۰۰):

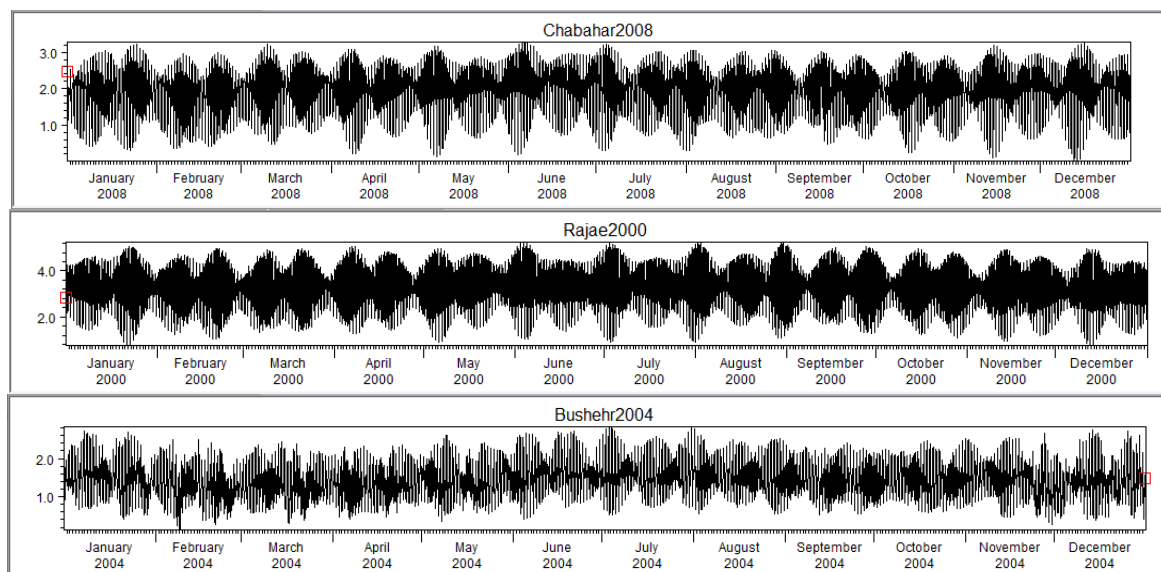
$$FF = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}, \quad (3)$$

ناتساوی روزانه و کشند بندر بوشهر با گرایش‌های شدید روزانه در خلیج فارس در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۶). دامنه متوسط کشند بندر چابهار ۱/۶۷، بندر شهیدرجایی ۲/۳۲ و بندر بوشهر ۱/۱۵ متر است. موقعیت ایستگاه شهیدرجایی (۲۶/۵N, ۵۶/۵E)، ایستگاه بوشهر (۲۸N, ۵۱E) و ایستگاه چابهار (۲۵/۵N, ۶۰/۵E) است (شکل ۴).



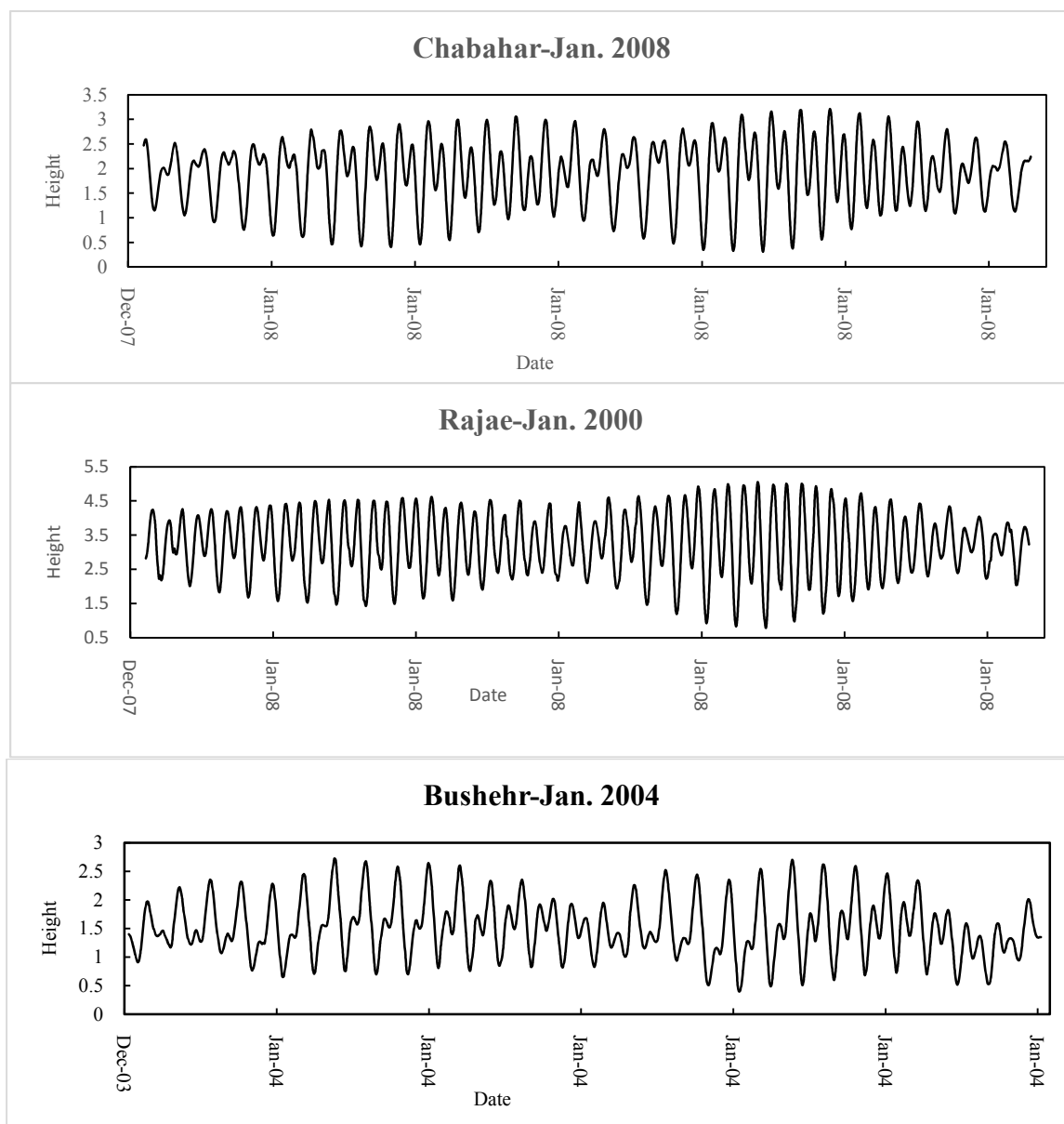
شکل ۴. موقعیت ایستگاه‌های کشندی مورد مطالعه در خلیج فارس و دریای عمان.

داده‌ها از ایستگاه‌های ثبت خودکار کشند (Tide Gage) سازمان نقشه‌برداری کشور اخذ شده‌اند.



شکل ۵. نمودارهای اطلاعات کشندی دوره یک‌ساله ایستگاه‌های چابهار، شهیدرجایی و بوشهر.





شکل ۶. نمودارهای اطلاعات کشندی دوره یک‌ماهه ایستگاه‌های چابهار، شهیدرجایی و بوشهر.

به‌طور عمده روزانه است. در این حالت، ناتساوی‌های روزانه بسیار زیاد خواهند بود. اگر  $FF \geq 3.0$  باشد؛ کشند، روزانه خواهد بود. جدول ۳ مقادیر  $FF$  را برای سه ایستگاه کشندی مورد مطالعه نشان می‌دهد. رژیم کشندی هر سه ایستگاه، آمیخته ولی نیم‌روزانه است. البته گرایش ایستگاه شهیدرجایی به نیم‌روزانه بسیار نزدیک‌تر از

این نسبت، ضریب شکل (Form Factor) نامیده می‌شود. اگر  $FF \leq 0.25$  باشد؛ کشند، نیم‌روزانه و اگر  $0.25 \leq FF \leq 1.5$  باشد؛ کشند، آمیخته و به‌طور عمده نیم‌روزانه است. در این حالت، کشند از شکل کاملاً نیم‌روزانه خارج شده و ناتساوی‌های روزانه در آن پدیدار می‌شود. اگر  $1.5 \leq FF \leq 3.0$  باشد؛ کشند، آمیخته و

جدول ۳. ویژگی‌های کشند در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

ایستگاه	چابهار	شهیدرجایی	بوشهر
ضریب شکل	0.66	0.39	1.04
نوع کشند	MSD	MSD	MSD
بیشترین برد	3.25	4.50	2.70
تراز میانگین	1.67	2.32	1.15

گرایش ایستگاه بوشهر است. رژیم کشندی بوشهر به رژیم روزانه نزدیک‌تر است. ایستگاه چابهار در میانه این دو وضعیت قرار دارد. حداکثر دامنه ارتفاعی کشند (اختلاف بین حداقل جزر و حداکثر مد) و متوسط تراز کشند در طول دوره مشاهدات برای سه ایستگاه مورد مطالعه در جدول ۳ آمده است.

جدول ۴. نتایج تحلیل یک‌ساله ایستگاه شهیدرجایی با روش IOS.

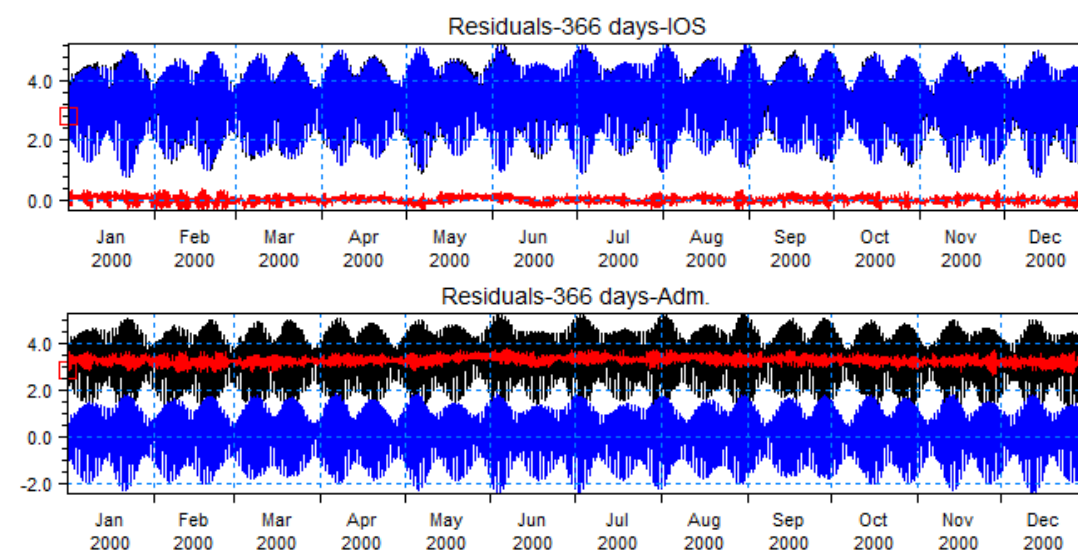
شماره	نام	دامنه	فاز	شماره	نام	دامنه	فاز
1	Z0	3.248	0.000	35	H1	0.021	270.060
2	SA	0.086	184.980	36	M2	1.088	297.040
3	SSA	0.016	195.940	37	H2	0.016	5.120
4	MSM	0.011	76.430	38	MKS2	0.019	166.500
5	MM	0.005	122.050	39	LDA2	0.016	162.040
6	MSF	0.011	211.110	40	L2	0.044	302.220
7	MF	0.007	92.260	41	T2	0.029	7.430
8	ALP1	0.005	112.680	42	S2	0.429	335.890
9	2Q1	0.007	358.340	43	R2	0.003	104.030
10	SIG1	0.012	88.830	44	K2	0.125	328.490
11	Q1	0.044	52.780	45	MSN2	0.003	91.880
12	RHO1	0.007	60.030	46	ETA2	0.014	310.880
13	O1	0.232	54.900	47	MO3	0.022	51.640
14	TAU1	0.001	283.570	48	M3	0.023	40.850
15	BET1	0.003	180.670	49	SO3	0.013	104.010
16	NO1	0.019	70.810	50	MK3	0.029	85.830
17	CHI1	0.002	253.870	51	SK3	0.022	171.830
18	PI1	0.009	67.870	52	MN4	0.013	115.290
19	P1	0.110	62.800	53	M4	0.021	142.320
20	S1	0.017	11.990	54	SN4	0.003	148.090
21	K1	0.360	66.860	55	MS4	0.006	288.530
22	PSI1	0.009	60.440	56	MK4	0.005	144.270
23	PHI1	0.005	342.100	57	S4	0.001	230.890
24	THE1	0.005	101.290	58	SK4	0.005	108.280
25	J1	0.021	76.940	59	2MK5	0.004	163.460
26	SO1	0.009	103.450	60	2SK5	0.002	18.250
27	OO1	0.008	98.980	61	2MN6	0.002	104.190
28	UPS1	0.002	346.940	62	M6	0.002	137.200
29	OQ2	0.009	323.630	63	2MS6	0.003	113.810
30	EPS2	0.005	110.910	64	2MK6	0.003	131.870
31	2N2	0.040	241.230	65	2SM6	0.003	187.300
32	MU2	0.011	246.300	66	MSK6	0.005	157.290
33	N2	0.271	276.420	67	3MK7	0.002	180.480
34	NU2	0.043	288.150	68	M8	0.001	354.800

جدول ۵. نتایج تحلیل یک‌ساله ایستگاه شهیدرجایی با روش آدمیرالتی.

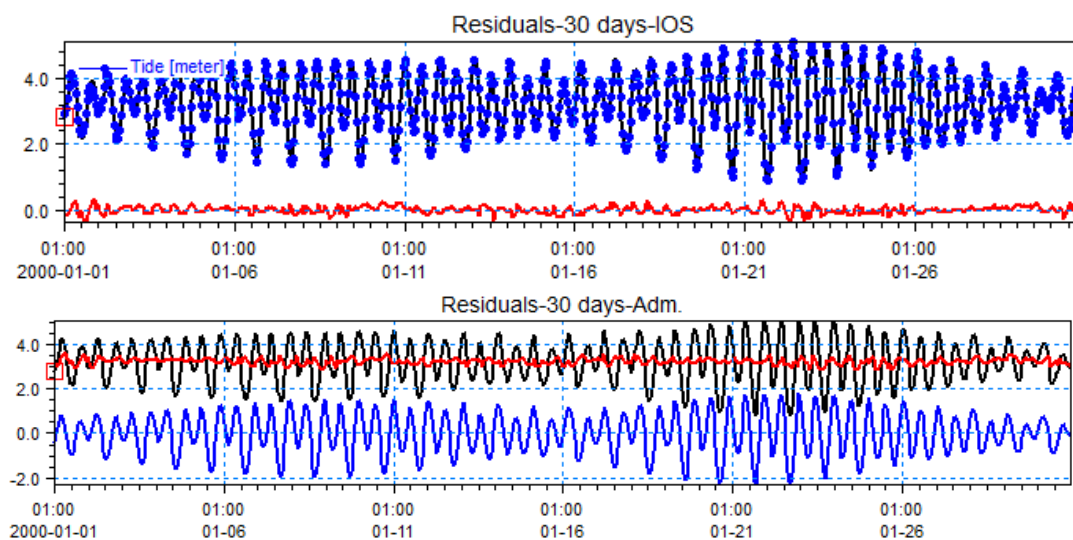
شماره	نام	دامنه	فاز	شماره	نام	دامنه	فاز	شماره	نام	دامنه	فاز
1	M2	1.1028	296.13	3	K1	0.354	66.45	5	F4	0.0113	270.43
2	S2	0.4298	335.64	4	O1	0.2316	55.05	6	F6	0.0023	285.42

جدول ۶. مؤلفه‌های اصلی کشتند در ایستگاه‌های چابهار، شهیدرجایی و بوشهر برای زمان‌های مختلف از دو روش IOS و آدمیرالتی در هر ایستگاه کشتندی.

ایستگاه چابهار	IOS				آدمیرالتی			
	مؤلفه‌های اصلی	O1	K1	M2	S2	O1A	K1A	M2A
A(روز ۳۶۶)	0.20	0.40	0.66	0.25	0.21	0.40	0.67	0.25
G(روز ۳۶۶)	30.03	32.17	258.94	291.75	30.10	31.77	258.00	291.37
A(روز ۳۰)	0.21	0.50	0.67	0.25	0.21	0.42	0.67	0.26
G(روز ۳۰)	29.24	43.25	260.63	315.25	30.38	31.71	260.93	295.93
A(روز ۱۵)	0.20	0.51	0.61	0.26	0.21	0.41	0.64	0.28
G(روز ۱۵)	22.66	41.80	257.34	309.46	34.86	33.03	262.44	295.00
A(روز ۱۰)	**	0.56	0.65	**	0.21	0.39	0.62	0.28
G(روز ۱۰)	**	46.89	262.01	**	29.39	34.30	263.66	290.66
ایستگاه شهیدرجایی	IOS				آدمیرالتی			
مؤلفه‌های اصلی	O1	K1	M2	S2	O1A	K1A	M2A	S2A
A(روز ۳۶۶)	0.23	0.36	1.09	0.43	0.23	0.35	1.10	0.43
G(روز ۳۶۶)	54.90	66.86	297.04	335.89	55.05	66.45	296.13	335.64
A(روز ۳۰)	0.25	0.48	1.08	0.40	0.24	0.37	1.09	0.46
G(روز ۳۰)	53.19	75.63	299.22	352.18	55.10	65.40	299.38	341.41
A(روز ۱۵)	0.23	0.47	0.94	0.44	0.24	0.35	1.03	0.46
G(روز ۱۵)	46.27	72.57	296.88	345.76	60.15	64.97	302.63	337.18
A(روز ۱۰)	***	0.55	0.98	***	0.23	0.36	1.01	0.43
G(روز ۱۰)	***	68.31	310.74	***	60.31	65.37	306.35	330.07
ایستگاه بوشهر	IOS				آدمیرالتی			
مؤلفه‌های اصلی	O1	K1	M2	S2	O1A	K1A	M2A	S2A
A(روز ۳۶۶)	0.22	0.34	0.39	0.15	0.23	0.34	0.39	0.15
G(روز ۳۶۶)	238.81	282.75	227.21	280.24	238.17	282.04	226.33	278.70
A(روز ۳۰)	0.21	0.43	0.38	0.13	0.20	0.35	0.39	0.15
G(روز ۳۰)	239.63	288.22	225.26	302.07	238.81	278.51	225.19	288.56
A(روز ۱۵)	0.19	0.46	0.34	0.15	0.20	0.36	0.37	0.17
G(روز ۱۵)	237.62	284.46	221.34	286.39	238.20	274.58	226.62	278.04
A(روز ۱۰)	**	0.51	0.34	**	0.20	0.37	0.38	0.13
G(روز ۱۰)	**	275.56	237.63	**	238.03	273.07	232.53	277.42



شکل ۷. نمودارهای مشاهدات، پیش‌بینی و باقی‌مانده‌ها در ایستگاه شهیدرجایی در دوره یک‌ساله. در نمودار مربوط به روش آدمیرالتی، مشاهدات با منحنی نازک در بالا و پیش‌بینی با منحنی ضخیم در پایین نشان داده شده است. منحنی باقی‌مانده‌ها، دامنه‌کوتاه و قرمز رنگ است. در نمودارهای مربوط به روش IOS، مشاهدات با دایره، پیش‌بینی با منحنی سیاه‌رنگ و باقی‌مانده‌ها با منحنی دامنه‌کوتاه قرمز رنگ نشان داده شده‌اند.



شکل ۸. نمودارهای مشاهدات، پیش‌بینی و باقی‌مانده‌ها در ایستگاه شهیدرجایی در دوره سی‌روزه. توضیح نمودارها همانند شکل ۷ است.

## ۶ مقایسه مؤلفه‌های هارمونیک مدل کشندی

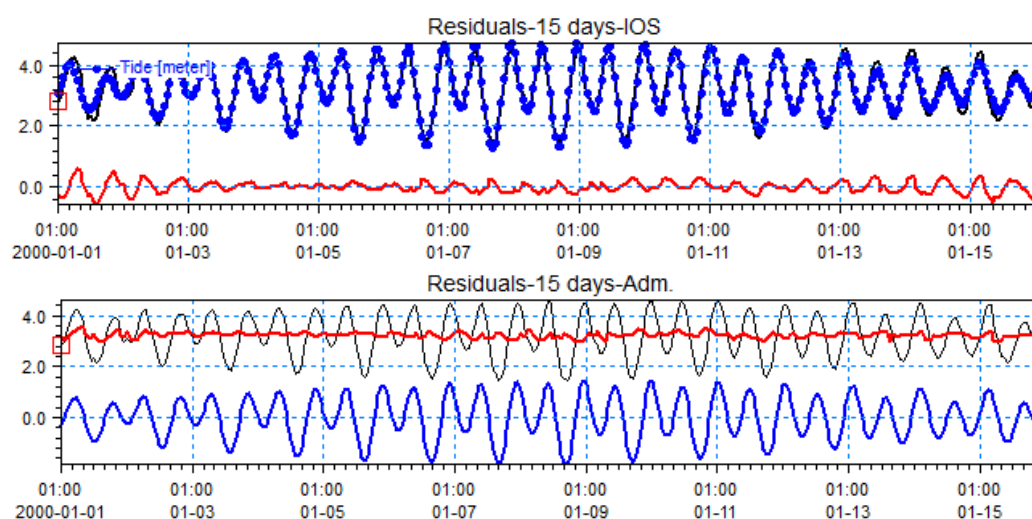
### TMD و تحلیل مشاهدات

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مدل‌های کشندی مختلفی در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای برای استخراج مؤلفه‌های هارمونیک و پیش‌بینی کشند معرفی شده‌اند. این مدل‌ها با تفکیک مکانی متفاوت، دقت‌های مختلفی دارند. مدل

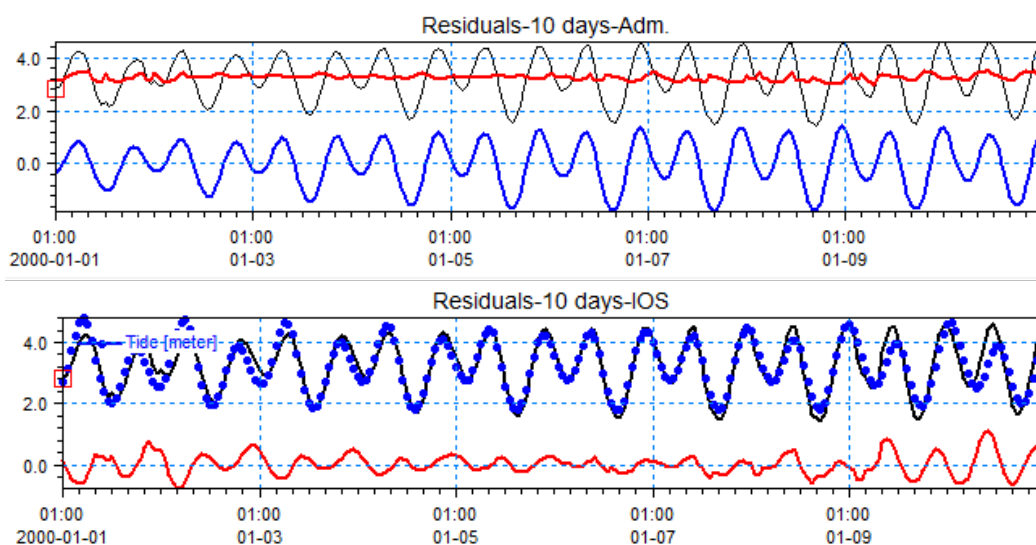
TMD، یکی از دقیق‌ترین مدل‌ها برای شمال اقیانوس هند شامل دریای عمان و خلیج فارس است. از این مدل می‌توان هشت مؤلفه هارمونیک به نام‌های  $M_2$ ،  $S_2$ ،  $N_2$ ،  $K_2$ ،  $K_1$ ،  $O_1$  و  $P_1$  را استخراج کرد. از مقایسه مقادیر استخراج شده با نتایج تحلیل هارمونیک بنادر منتخب، می‌توان دریافت که نتایج برای ایستگاه‌های سواحل باز، انطباق زیادی با هم

مؤلفه نیم‌روزانه قمری M2 است. این مقادیر دامنه در ایستگاه‌های بوشهر و چابهار بسیار ناچیز هستند؛ لذا استفاده از مقادیر مدل کشتندی در نواحی خاص باید با احتیاط انجام شود. مقادیر این اختلاف برای هر ایستگاه در ستون Res. جدول ۷ نشان داده شده است. در ادامه نشان داده خواهد شد که نتایج تحلیل کوتاه‌مدت می‌تواند به اصلاح مقادیر دامنه مؤلفه‌های کشتندی قابل استخراج از مدل کمک کند.

دارند، درحالی‌که برای مناطق خاص نظیر خورها و تنگه‌ها، نتایج تفاوت معنی‌داری دارند که البته چندان اعتبار ندارد. در M2، مهم‌ترین مؤلفه کشتندی، مقادیر دامنه مؤلفه‌های نیم‌روزانه و روزانه ایستگاه شهیدرجایی که از مدل کشتندی TMD استخراج شده‌اند، با مقادیر مشابه حاصل از تحلیل، اختلاف زیادی دارند. این اختلاف به ۳۲ سانتی‌متر نیز می‌رسد. گفتنی است که بزرگ‌ترین و مؤثرترین مؤلفه در ایجاد کشتی ایستگاه شهیدرجایی،



شکل ۹. نمودارهای مشاهدات، پیش‌بینی و باقی‌مانده‌ها در ایستگاه شهیدرجایی در دوره پانزده‌روزه. توضیح نمودارها همانند شکل ۷ است.



شکل ۱۰. نمودارهای مشاهدات، پیش‌بینی و باقی‌مانده‌ها در ایستگاه شهیدرجایی در دوره ده‌روزه. توضیح نمودارها همانند شکل ۷ است.

جدول ۷. مقایسه دامنه مؤلفه‌های کشندی مدل TMD و تحلیل هارمونیک با روش IOS.

ایستگاه مؤلفه	چابهار			بوشهر			شهیدرجایی		
	TMD	IOS	Res.	TMD	IOS	Res.	TMD	IOS	Res.
M2	0.645	0.662	0.02	0.366	0.386	0.02	0.786	1.103	0.32
S2	0.248	0.254	0.01	0.130	0.148	0.02	0.281	0.430	0.15
N2	0.157	0.160	0.00	0.082	0.086	0.00	0.187	0.271	0.08
K2	0.071	0.069	0.00	0.024	0.004	-0.02	0.084	0.125	0.04
K1	0.390	0.400	0.01	0.332	0.344	0.01	0.280	0.360	0.08
O1	0.200	0.205	0.00	0.214	0.222	0.01	0.205	0.044	-0.16
P1	0.116	0.123	0.01	0.078	0.098	0.02	0.098	0.110	0.01
Q1	0.042	0.040	0.00	0.034	0.045	0.01	0.045	0.044	0.00

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum [h_t - h(t)]^2}{N}}, \quad (5)$$

که N تعداد مشاهدات است. هرچه این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، نشانه دقت بیشتر است. مقادیر RMSE و RV برای هر یک از روش‌های تحلیل و پیش‌بینی در جدول ۸ آمده است. نمودارهای شکل ۱۱، مقایسه‌ای از شاخص‌های دقت تحلیل و پیش‌بینی (RMSE و RV) را در دوره‌های زمانی متفاوت نشان می‌دهند.

جدول ۸. مقایسه مقادیر شاخص‌های دقت تحلیل و پیش‌بینی (RMSE و RV) در دوره‌های زمانی متفاوت.

ایستگاه	شاخص	۱۰ روزه	۱۵ روزه	۳۰ روزه	۳۶۶ روزه
ایستگاه رجایی	IOS	0.337	0.183	0.111	0.101
	RMSE	0.108	0.111	0.138	0.156
آدمیرالتی	IOS	0.847	0.951	0.986	0.984
	RV	0.985	0.982	0.978	0.968
ایستگاه بوشهر	IOS	0.191	0.112	0.147	0.138
	RMSE	0.115	0.116	0.165	0.176
آدمیرالتی	IOS	0.848	0.943	0.910	0.916
	RV	0.945	0.996	0.887	0.863
ایستگاه چلهار	IOS	0.25	0.09	0.051	0.06
	RMSE	0.09	0.05	0.068	0.10
آدمیرالتی	IOS	0.864	0.978	0.994	1.008
	RV	0.973	0.994	0.989	0.992

## ۷ ارزیابی دقت تحلیل و پیش‌بینی کشند

در اینجا لازم است به معرفی چند پارامتر مهم آماری در ارزیابی تحلیل و پیش‌بینی کشند بپردازیم. اگر کاهش واریانس (Reduction in Variance) را با RV نشان دهیم، مقدار آن نشان‌دهنده نسبت واریانس پیش‌بینی به واریانس مقادیر مشاهده شده است و از رابطه زیر به دست می‌آید (بون، ۲۰۱۳):

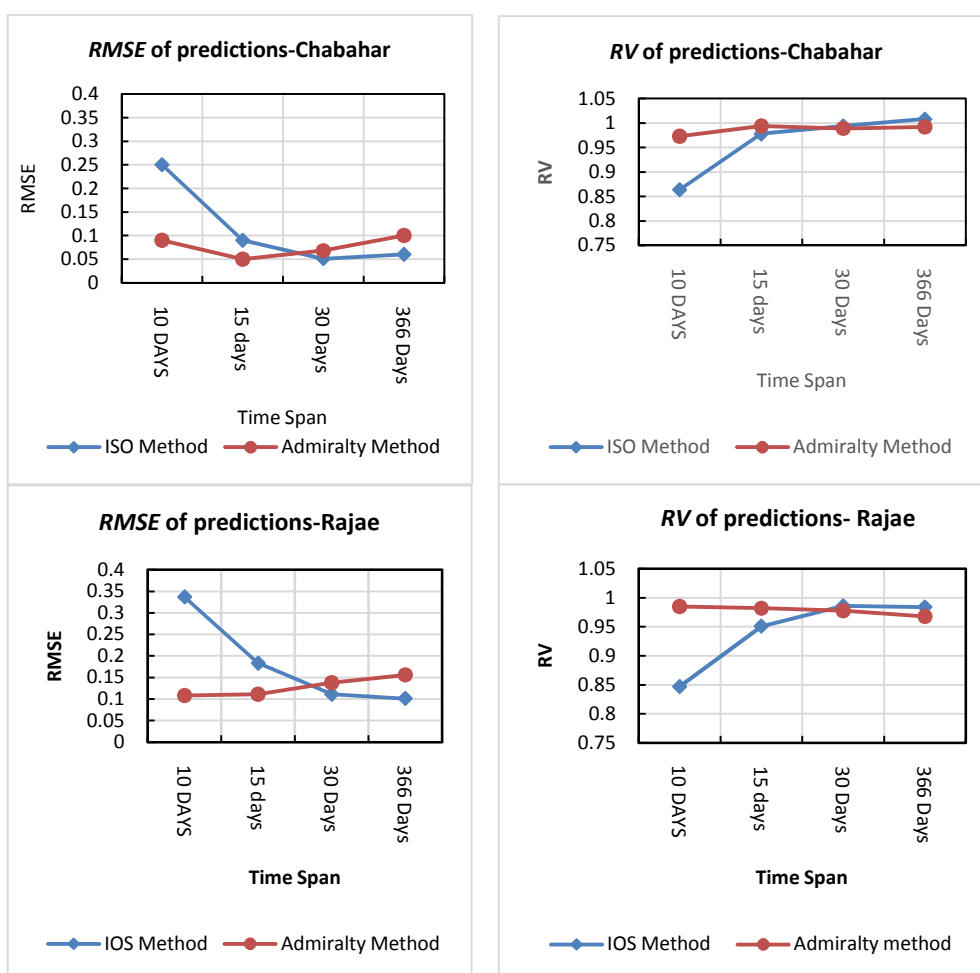
$$RV = \frac{\sum [h(t) - h_0]^2}{\sum [h_t - h_0]^2}, \quad (4)$$

که  $h_0$  میانگین مشاهدات و  $h(t)$  و  $h_t$  به ترتیب مقادیر پیش‌بینی و مشاهده ارتفاع کشندی هستند. مقدار RV نشان‌دهنده نسبت انحراف معیار پیش‌بینی به انحراف معیار مشاهدات یا به بیان دیگر نشان‌دهنده انطباق نتیجه مدل با مشاهدات است. مقدار انطباق با شاخص RV عدد یک (واحد) است؛ یعنی هرچه RV به عدد یک نزدیک‌تر باشد، دقت محاسبات بیشتر خواهد بود. شاخص دیگری که می‌تواند در ارزیابی نتیجه تحلیل و پیش‌بینی به کار رود، ریشه میانگین مربع خطاها RMSE است. این شاخص بیان‌کننده اندازه و انحراف باقی‌مانده‌ها (اختلاف مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده) است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود (بون، ۲۰۱۳):

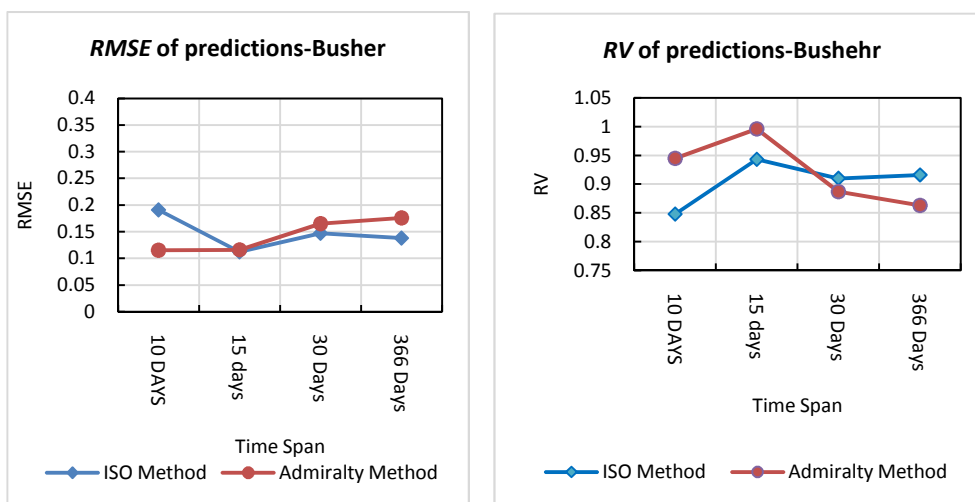
جدول ۹. مقایسه مقادیر شاخص‌های دقت پیش‌بینی RMSE و R در دوره‌های زمانی متفاوت.

روش	IOS		آدمیرالتی		
	روزهای مشاهده	RMSE	R(%)	RMSE	R(%)
ایستگاه چابهار (ژوئن ۲۰۰۸)	15	0.19	95	0.11	99
	10	0.29	90	0.11	99
رجایی (اوت ۲۰۰۰)	15	0.30	95	0.18	98
	10	0.54	83	0.22	98
بوشهر (جولای ۲۰۰۴)	15	0.17	94	0.12	97
	10	0.27	84	0.13	96

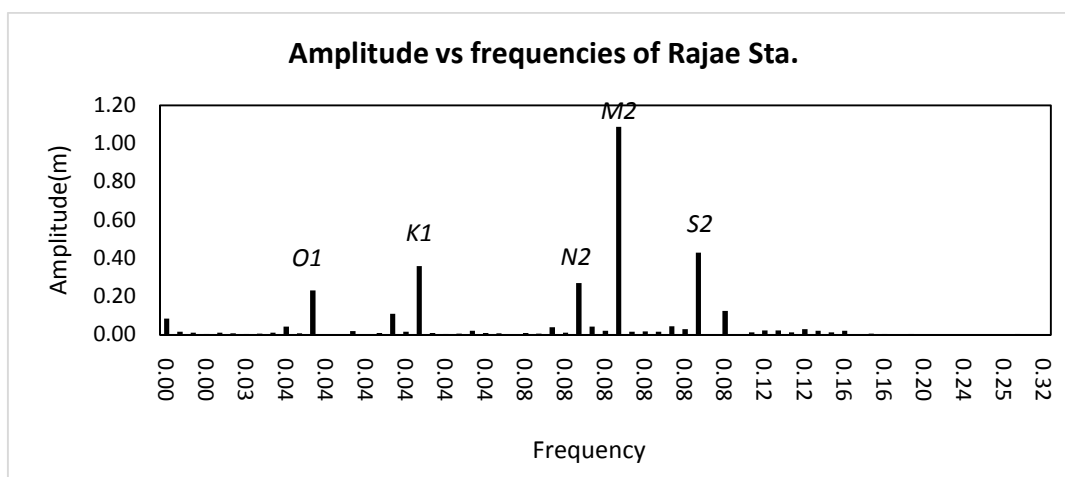
مؤلفه‌های کشتندی استخراج شده از تحلیل دوره‌های ده‌روزه و پانزده‌روزه با روش‌های IOS و آدمیرالتی ایستگاه‌های چابهار، شهیدرجایی و بوشهر نیز برای پیش‌بینی دوره‌های یک‌ماهه ارزیابی شده‌اند (جدول ۹). دوره‌های یک‌ماهه، خارج از دوره زمانی مورد استفاده در تحلیل‌های اولیه بودند. با استفاده از پارامترهای ضریب همبستگی پیرسون (R) و ریشه میانگین مربع خطاها (RMSE)، مقایسه مشاهدات و پیش‌بینی سه ایستگاه کشتندی ارزیابی شد. هرچه R بیشتر و RMSE کمتر باشد، مؤید دقت بهتر پیش‌بینی است (جدول ۹).



شکل ۱۱. مقایسه نمودارهای شاخص‌های دقت تحلیل و پیش‌بینی (RV و RMSE) در دوره‌های زمانی متفاوت.



ادامه شکل ۱۱.



شکل ۱۲. مقادیر دامنه مؤلفه‌های هارمونیک ایستگاه شهیدرجایی.

## ۸ نتایج تحلیل و پیش‌بینی

به‌منظور مقایسه روش‌های تحلیل و پیش‌بینی، هر دو روش آد میرالتی و IOS به‌کارگرفته شدند. نمودارهای مشاهدات، پیش‌بینی و باقی‌مانده‌ها در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نشان داده شده است. نتایج تحلیل یک‌ساله برای ایستگاه رجایی برای هر دو روش تحلیل و پیش‌بینی در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است. از تحلیل با روش IOS، تعداد ۶۸ مؤلفه هارمونیک استخراج شده که ۲۴ مؤلفه مربوط به آب‌های کم‌عمق است و بقیه منشأ نجومی دارند. با توجه به مقادیر دامنه مؤلفه‌های

ایستگاه‌های مورد مطالعه، می‌توان دریافت مؤلفه‌های چهارگانه به همراه مؤلفه N2 (larger lunar elliptic semidiurnal) از بزرگ‌ترین مؤلفه‌های مؤثر هستند. شکل ۱۲ به‌طور واضح این مسئله را برای ایستگاه شهیدرجایی بیان می‌کند (هیگس و همکاران، ۲۰۰۰).

در مقابل، از تحلیل با روش آد میرالتی می‌توان چهار مؤلفه پایه را به‌دست آورد که ترکیبی از بیست مؤلفه نجومی و دو مؤلفه پایه آب‌های کم‌عمق هستند. این دو مؤلفه پایه، ترکیبی از شش مؤلفه هارمونیک هستند.



شاخص‌های RMSE و RV هر سه ایستگاه در تحلیل بلندمدت یک‌ساله با روش IOS، در مقایسه با روش آدمیرالتی، به ترتیب به مقادیر یک و صفر نزدیک‌تر هستند (جدول ۸). لذا در تحلیل داده‌های بلندمدت کشتند، همواره روش IOS بر روش آدمیرالتی رجحان دارد. نمودارهای رسم شده برای مقادیر RMSE و RV نیز بر این مسئله دلالت دارند (شکل ۱۱).

در تحلیل یک‌ماهه (سی‌روزه) با روش IOS، تعداد سی مؤلفه هارمونیک استخراج شد. روش آدمیرالتی همچنان چهار مؤلفه پایه نجومی و دو مؤلفه پایه آب‌های کم‌عمق را تولید می‌کند. با توجه به مقادیر دامنه مؤلفه‌های چهارگانه از جدول ۶، درمی‌یابیم که مؤلفه‌های S2، M2 و Q1 تغییر جزئی نسبت به نتایج مشابه تحلیل یک‌ساله دارند، درحالی‌که مؤلفه K1 به‌طورنسبی تغییر معنی‌داری داشته است. نتایج باقی‌مانده‌ها (شکل ۸) و شاخص‌های دقت RMSE و RV، همچنان حاکی از وجود وضعیت بهتر در روش IOS است. مقدار RMSE برای روش IOS هنوز از مقدار مشابه آن در روش آدمیرالتی کمتر است. همچنین مقدار RV برای روش IOS از مقدار مشابه آن در روش آدمیرالتی بیشتر است (شکل ۱۱).

با بررسی یک دوره که کشتند-مه کشتند که شامل یک دوره پانزده‌روزه است، اطلاعات کشتندی در هر دو روش، تحلیل و پیش‌بینی شدند. مؤلفه‌های اصلی حاصل از تحلیل در جدول ۶ نشان داده شده‌اند. در تحلیل دوره که کشتند-مه کشتند (پانزده‌روزه) با روش IOS، تعداد هجده مؤلفه استخراج شد. در روش آدمیرالتی، همچنان چهار مؤلفه پایه نجومی و دو مؤلفه پایه آب‌های کم‌عمق استخراج می‌شود. با توجه به مقادیر دامنه مؤلفه‌های چهارگانه در جدول ۶ درمی‌یابیم که مؤلفه‌های S2 و O1 نسبت به دوره‌های طولانی‌تر تغییر جزئی دارند، درحالی‌که مؤلفه-های M2 و K1 به‌طور نسبی تغییر معنی‌داری داشته‌اند. برعکس، در تحلیل مشاهدات یک‌ساله و یک‌ماهه با

مقادیر F4 و F6 در واقع ترکیبی از شش مؤلفه آب‌های کم‌عمق، مؤلفه‌های یک‌چهارم روزانه و یک‌ششم روزانه هستند که مقادیر آنها در ایستگاه‌های کشتندی مورد مطالعه بسیار ناچیز است و تأثیری در شناسایی کمیت کشتند ندارند. خلاصه مؤلفه‌های اصلی هارمونیک و پایه در جدول ۶ ارائه شده است. با مقایسه مقادیر هارمونیک‌ها مشاهده می‌کنیم که مقادیر دامنه‌ها و فازهای مؤلفه‌های اصلی هارمونیک و پایه، تفاوت چندانی با هم ندارند؛ لذا علی‌رغم نزدیک بودن مقادیر مؤلفه‌های اصلی و پایه چهارگانه نیم‌روزانه و روزانه، همواره برای تمام ایستگاه‌های کشتندی، تحلیل و پیش‌بینی طولانی‌مدت با روش IOS از روش تحلیل و پیش‌بینی با روش آدمیرالتی بهتر است. این وضعیت برای تمام ایستگاه‌های کشتندی که از رفتارهای متفاوتی پیروی می‌کنند، صادق است.

با پیش‌بینی انجام شده از دو روش مذکور باز هم مشاهده می‌کنیم که مقادیر باقی‌مانده‌های روش IOS از روش آدمیرالتی کمتر است. هرچند مقادیر باقی‌مانده‌ها بیانگر وجود سایر عوامل غیرنجومی مانند عوامل آب‌وهوایی نظیر فشار، طوفان، بال‌آمدگی آب دریا و غیره است، در شرایط نرمال آب‌وهوایی می‌تواند در تحلیل نهایی بیانگر دقت تحلیل و پیش‌بینی روش‌های مورد مطالعه باشد (سیمون، ۲۰۱۳). نمودارهای ترسیم شده برای هر سه ایستگاه نشان می‌دهند که روش IOS باقی‌مانده‌های کمتری دارد (شکل ۷).

در این تحقیق، برای ارزیابی تحلیل و پیش‌بینی کشتند در دوره‌ها و روش‌های محاسباتی مختلف، از شاخص‌های RMSE و RV استفاده شده است. شاخص RMSE انحراف پیش‌بینی را از مقادیر واقعی کشتند نشان می‌دهد. نزدیکی این شاخص به عدد صفر نشان‌دهنده نتیجه بهتر است. از طرف دیگر، مقدار شاخص RV نیز پارامتری برای ارزیابی انطباق پیش‌بینی و مشاهدات است. اگر این نسبت به عدد یک (واحد) نزدیک باشد، انطباق بیشتر است.

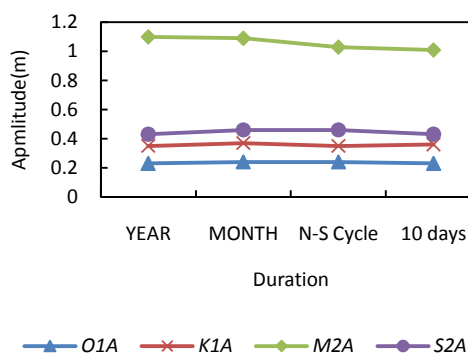
مؤلفه استخراج شده است. با توجه به معیار رایلی، این روش نمی‌تواند مؤلفه‌های S2 و O1 را استخراج کند. برای استخراج این مؤلفه‌ها از مشاهدات کمتر، می‌بایست با مراجعه به دستورالعمل تحلیل و پیش‌بینی به روش IOS (فرمن، ۱۹۸۴)، تمهیدات دیگری اتخاذ کرد که البته در محدوده بررسی این مقاله نمی‌گنجد. حاصل روش آدمیرالتی همچنان چهار مؤلفه پایه نجومی و دو مؤلفه پایه آب‌های کم عمق است. از طرف دیگر، نتایج باقی‌مانده‌ها و شاخص‌های دقت RMSE و RV در روش IOS وضعیت بدتری دارد. مقایسه مقادیر RMSE و RV در دوره ده‌روزه نیز نشان‌دهنده برتری قاطع روش آدمیرالتی بر روش IOS است. در نمودارهای شکل ۱۱ می‌توان ملاحظه کرد که نتایج شاخص‌های RV و RMSE به دست آمده از تحلیل و پیش‌بینی به روش آدمیرالتی در دوره‌های ده‌روزه و پانزده‌روزه بهتر از روش IOS است، در حالی که دقت شاخص‌های مذکور در روش IOS در دوره‌های زمانی یک‌ماهه و یک‌ساله بیشتر است.

طبق نتایج جدول ۹، محاسبات نشان می‌دهند که مقادیر R و RMSE به دست آمده از روش آدمیرالتی برای هر سه ایستگاه کشندی در بازه‌های زمانی متفاوت پیش‌بینی دوره‌های ده‌روزه و پانزده‌روزه، همچنان از مقادیر مشابه روش IOS بهتر است؛ لذا تحلیل و پیش‌بینی مشاهدات ده‌روزه و پانزده‌روزه (کوتاه‌مدت) با روش آدمیرالتی، همچنان برتری قاطعی نسبت به روش IOS دارد. آنچه که باید یادآوری کرد این است که علی‌رغم بهتر بودن وضعیت شاخص‌های دقت در دوره‌های یک‌ماهه و یک‌ساله در تحلیل و پیش‌بینی با روش IOS، وضعیت روش آدمیرالتی چندان هم ناامیدکننده نیست. این روش می‌تواند برای تحلیل و پیش‌بینی بلندمدت هم به کار رود.

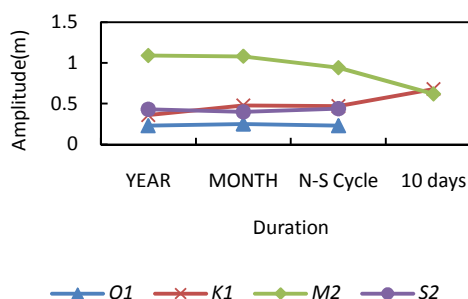
با نگاهی به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که روند تغییرات مؤلفه‌های پایه استخراج شده از روش آدمیرالتی از یک دوره یک‌ساله به دوره کوتاه‌تر ده‌روزه پایدار است و تغییرات کمتری دارد، در حالی که روند تغییرات مؤلفه-

روش IOS، نتایج باقی‌مانده‌ها و شاخص‌های دقت RMSE و RV وضعیت بهتری ندارد. مقدار RMSE برای روش IOS از مقدار مشابه روش آدمیرالتی بیشتر است. از طرف دیگر، مقدار RV برای روش IOS از مقدار مشابه روش آدمیرالتی کمتر است (شکل ۱۱)؛ بنابراین مشاهده می‌شود که روش آدمیرالتی از دقت نسبی بیشتری در تحلیل و پیش‌بینی و مقادیر باقی‌مانده‌ها برخوردار است. نمودارهای RMSE و RV نیز روند بهبود نتایج را به طور صریح نشان می‌دهند. لذا نتایج تحلیل و پیش‌بینی با روش آدمیرالتی در یک دوره پانزده‌روزه، نسبت به روش IOS در همان مدت برتری دارد. در تحلیل دوره ده‌روزه با روش IOS، تعداد ده

Variations of amplitudes in different durations in Adm. method-Rajae



Variations of amplitudes in different durations in IOS method-Rajae



شکل ۱۳. تغییرات دامنه مؤلفه‌ها از دوره بلندمدت به دوره کوتاه‌مدت در دو روش تحلیل.

کشتند با استفاده از ابزار نرم‌افزار مایک ۲۱ پیش روی کاربران قرار می‌دهد. به همین جهت، اطلاعات کشتندی سه ایستگاه در مناطق دریای عمان و خلیج فارس به کمک دو روش استاندارد تحلیل و پیش‌بینی کشتندی موسوم به IOS و آدمیرالتی بررسی شدند.

در این مطالعه، مؤلفه‌های کشتندی هارمونیک و پایه، از نتایج تحلیل استخراج و مؤلفه‌های چهارگانه اصلی با هم مقایسه شدند و درباره روند تغییرات و پایداری اندازه آنها بحث شد. با استفاده از این مؤلفه‌ها، پیش‌بینی کشتند در دوره‌های زمانی متفاوت انجام شد و باقی‌مانده‌ها محاسبه شدند. سپس مقادیر شاخص‌های RMSE و RV پیش‌بینی‌ها محاسبه و مقایسه شد. نتایج تحلیل و پیش‌بینی دو روش برای سه ایستگاه کشتندی نشان می‌دهند که روش آدمیرالتی برای داده‌های کشتندی کوتاه‌مدت و روش IOS برای داده‌های بلندمدت مناسب است. پیشنهاد می‌شود که کاربران برای مقایسه نتایج تحلیل و پیش‌بینی کشتند، از هر دو روش استفاده کنند. در ضمن نشان داده شد که تحلیل کشتند برای دوره‌های کمتر از یک دوره که کشتند - مه کشتند با روش آدمیرالتی همواره نسبت به روش IOS برتری دارد. اهمیت این موضوع در این است که جداول پیش‌بینی کشتند آدمیرالتی اغلب از چهار یا شش مؤلفه پایه حاصل از تحلیل اطلاعات کشتندی استفاده می‌کنند؛ لذا با این الگوریتم می‌توان با اطلاعات کشتندی محدود و کوتاه‌مدت نسبت به استخراج مؤلفه‌های پایه اقدام کرد. بنابراین به‌طور خلاصه می‌توان گفت روش تحلیل هارمونیک IOS براساس داده‌های بلندمدت بنا شده است. این روش با توجه به طول داده، می‌تواند مؤلفه‌های بیشتری را براساس معیار رایلی استخراج کند، اما در تحلیل کشتند با روش آدمیرالتی، همیشه فقط قادر به استخراج چهار مؤلفه پایه هستیم. در این مقاله، با مثال‌هایی روشن شد که روش IOS برای کشتند طولانی‌مدت و روش آدمیرالتی برای دوره زمانی کوتاه‌تر مناسب است.

های هارمونیک استخراج شده از تحلیل به روش IOS، ناپایدار است تا جایی که برای دوره ده‌روزه، قادر به استخراج مؤلفه‌های S2 و O1 نیست. این مسئله در مقادیر فاز و دامنه مؤلفه‌ها هم دیده می‌شود (شکل ۱۳).

به‌طور خلاصه، از مقایسه نمودارهای شاخص‌های دقت و مقادیر مؤلفه‌ها می‌توان دریافت که روش IOS برای تحلیل و پیش‌بینی مشاهدات طولانی‌مدت بیش از یک‌ماه مناسب است و اغلب مهندسان مشاور برای شبیه‌سازی مدل هیدرودینامیکی از آن استفاده می‌کنند. برای دوره‌های کوتاه‌مدت تر - که اغلب به دلیل محدودیت‌های فنی و مالی، مشاهدات کمتری در اختیار است - روش آدمیرالتی مناسب است.

## ۹ نتیجه‌گیری

نیاز به داده‌های کشتندی از اجزای جداناپذیر اجرای مدل‌های هیدرودینامیکی است. این داده‌ها معمولاً از یکی از راه‌های مشاهدات مستقیم، پیش‌بینی دقیق کشتند یا مدل‌های کشتندی آماده به‌دست می‌آیند. مدل‌های متنوع کشتندی در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای در دسترس هستند. در این تحقیق، ضمن معرفی تعدادی از مدل‌های جهانی و منطقه‌ای کشتند، نشان داده شد که این مدل‌ها به‌تنهایی نمی‌توانند اطلاعات لازم و کافی را برای شرایط مرزی مناطق خاص و ساحلی مانند دهانه خورها، تنگه‌ها و بعضی مناطق با پیچیدگی‌های توپوگرافی فراهم کنند. مقایسه مؤلفه‌های هارمونیک استخراجی از مدل TMD با مقادیر مشابه آن در ایستگاه شهیدرجایی مؤید این مطلب است. برای اصلاح مقادیر مؤلفه‌های استخراجی از این مدل‌ها، به مشاهدات مستقیم کشتند نیز نیاز است.

از آنجا که مشاهدات طولانی‌مدت همیشه نمی‌تواند در دسترس باشد؛ لذا استفاده از مشاهدات کوتاه‌مدت می‌تواند برای این هدف راهگشا باشد. این تحقیق، راهکاری عملی را برای استفاده از مشاهدات کوتاه‌مدت

- Godin, G., 1972, *The Analysis of Tides*: University of Toronto Press, 1<sup>st</sup> edition.
- Hicks, S. D., Sillcox, R. L., Nichols, C. R., Via, B., and McCray, E. C., 2000, *Tide and current glossary*: National Oceanic and Atmospheric Administration, National ocean service, Center for operational oceanographic products and services, Silver Spring, 1-29.
- Iran National Cartographic Center, 2016, *Tides*, <http://www.ncc.org.ir>.
- Martin, P. J., Smith, S. R., Posey, P. G., Dawson, G. M., and Riedlinger, S. H., 2009, *Use of the Oregon State University Tidal Inversion Software (OTIS) to generate improved tidal prediction in the East-Asian seas*, DTIC Document.
- Matsumoto, K., Takanezawa, T., and Ooe, M., 2000, *Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan*: *Journal of oceanography*, **56**(5), 567-581.
- Padman, L., and Erofeeva, S., 2005, *Tide Model Driver (TMD) Manual: Earth and space research*.
- Pugh, D., 1987, *Tides, Surges and Mean Sea Level: A handbook for engineers and scientists*: John Wiley and Sons, NY.
- Schureman, P., 1958, *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*: US Government Printing Office.
- Simon, B., 2013, *Coastal Tides*: International Hydrographic Office, France.

### سیاسگزاری

این تحقیق انجام نمی‌شد مگر با همکاری مدیریت آبنگاری سازمان نقشه‌برداری کشور که داده‌های کشند را در اختیارمان گذاشت. از آقای دکتر صادق یاری که راهنمایی‌های لازم را درخصوص بهتر شدن مقاله ارائه کردند و همچنین از مؤسسه هیدرولیک دانمارک (DHI) برای استفاده از نرم‌افزار مایک ۲۱ سپاسگزاریم.

### منابع

- Admiralty Tide Tables, 2003, *Indian Ocean and South China Sea: Hydrographer to the Navy*, Admiralty Hydrographic Department, **3**, 357 pp.
- Boon, J. D., 2013, *Secrets of the Tide: Tide and Tidal Current Analysis and Predictions, Storm Surges and Sea Level Trends*: Elsevier.
- DHI, 2014, *DHI Software 2014, Tide Tools Scientific Documentation*.
- DHI, 2017, *MIKE 21 Toolbox Global Tide Model-Tidal Prediction*.
- Doodson, A. T., and Warburg, H. D., 1941, *Admiralty Manual of Tides*: H. M. Stationery Office.
- Foreman, M. G. G., 1979, *Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction*: Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay.
- Glen, N., 2015, *The Admiralty method of tidal prediction*. NP 159: *The international hydrographic review*, **54**(1).

## Evaluation and comparison of tidal analysis and predicting methods of Mike 21 software

Bahman Tajfirooz<sup>1</sup>, Abbasali Aliakbari Bidokhti<sup>2\*</sup>, Mojtaba Ezam<sup>3</sup>, and Kamran Lari<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph. D. student, Marine Science Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Full Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistance Professor, Marine Science Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Associate Professor, Physical Oceanography Department, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received: 19 June 2017, Accepted: 02 October 2017)

### Summary

The present article addresses a new approach form using tidal analysis of long and short observations of tidal heights by tidal tools of Mike 21 software. Predicted or observed tides must be available as open boundaries in a hydrodynamic model to simulate tidal currents. Mike 21 is a powerful software in simulating of marine and oceanic parameters. Hydrodynamic models use tidal data as a main input in the open boundaries of 2D/3D simulation. The accuracy of the simulation results from tides and tidal currents as well as sediment transportation and other related marine parameters, is quite dependent on accurate input data in the open boundaries of the hydrodynamic model.

Large and meso-scale simulations usually use sophisticated global tidal models. These tidal models are prepared by assimilating of satellite altimeter data and tide gage data. The accuracy of such a tidal input seems to be quite sufficient. In shallower part of ocean, like estuaries and coastal areas, these data are not so accurate; therefore direct tide observations are important. On the other hand, long-term tide observations are limited due to technical and economical constraints.

In this study, the appropriate solution to tidal analysis and predictions was introduced in the Mike 21 software to produce acceptable and accurate tidal height data. Mike 21 is provided with two different tidal analysis and prediction modules. The IOS and Admiralty methods of tidal analysis and prediction are known for the corresponding high quality functions. Using the software, the tidal analysis of sample data was discussed in order to produce the accurate tidal data. In this article, hourly tidal observations for a year which belonged to three stations in the Oman Sea and Persian Gulf were analyzed. All tidal analyses were performed for one year, 30, 15 and 10 days periods using Canadian IOS and Admiralty method software. The predicted tidal data were compared with respect to observed data for evaluating of computations. Residuals normally will describe such discrepancies, if there are no abnormal fluctuations of tides. These abnormal inconsistencies might be produced by storm surges and other non-tidal effects. The presented results were statistically analyzed. Two different statistical indices, Root Mean Square Error and Reduction in Variance, were used to evaluate predicted tide data. Consequently, the tool for appropriate analysis and predicting of tidal data of the different periods was introduced. It is shown that for long term tide observations, the IOS method is the proper solution for tidal analysis and prediction, while the Admiralty method is fitted for short term analysis and prediction of tides.

**Keywords:** tidal analysis and prediction, tidal model, harmonic constituents, hydrodynamic model, Mike 21, Oman Sea and Persian Gulf