بررسی پارامتر جریان حجمی در تنگهٔ هرمز با استفاده از مدل عددی MIKE21

سید حسین حسن تبار بزرودی[1*]، محمد رضا خلیل آبادی[2]

[1*] نویسنده مسئول، دانشجوی دکترا فیزیک دریا، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس shh.tabar@yahoo.com
[2] دکترای فیزیک دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز rezakhalilabadi@gmail.com

تاریخ دریافت:۹۵/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش:۹۶/۴/۷

چکیده

در مناطقی همچون تنگهٔ هرمز بررسی پارامتر جریان حجمی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. چراکه در این مناطق جریانات زیرسطحی می‌تواند باعث تغییر مقدار جریان حجمی‌ای شود که در حمل و نقل دریایی به‌خصوص در دریانوردی‌های زیر سطحی باعث بروز مشکلات می‌شود. در این مقاله مشخصهٔ جریان و پارامترهای جریان حجمی عبوری ($\frac{m^3}{s/m}$) در محدودهٔ تنگهٔ هرمز با استفاده از مدول HD بررسی شده است. بدین منظور مشخصهٔ جریان در منطقهٔ تحقیق با مدل عددی MIKE21 شبیه‌سازی شده و پس از صحت‌سنجی به بررسی مقادیر مؤلفه‌های جریان حجمی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که بازهٔ‌تغییرات مؤلفهٔ جریان حجمی عبوری در راستای تنگهٔ هرمز به سمت خلیج فارس (مؤلفهٔ P) در محدودهٔ بین ۱/۴- تا ۰/۶ $\frac{m^3}{s/m}$ و در عرض تنگهٔ هرمز (مؤلفهٔ Q) در محدودهٔ بین ۰/۶- تا ۰/۵ $\frac{m^3}{s/m}$ است. به‌طور کلی نتایج این بررسی نشان می‌دهد که به دلیل وابستگی مؤلفه‌های جریان حجمی به سرعت سطحی، مقدار حجمهٔ آب در زیر سطح به دلیل گردش‌های ترموهالاینی و افزایش سرعت زیر سطحی در هنگام خروج از تنگه و همچنین اختلاف عمق افزایش می‌یابد. طراحی این الگو (جریان حجمی عبوری) در ناوبری و رسم نقشه‌های مسیر دریانوردی و نیز رسم مسیر حرکت زیردریایی جهت حرکت آسان در زیر آب بسیار پراهمیت است.

واژگان کلیدی: تنگهٔ هرمز، جریان حجمی، شبیه‌سازی جریان، مدل *MIKE21*.

۱. مقدمه

مطالعات هیدرودینامیک و تعیین الگوی جریان در مناطق دریایی یکی از بخش‌های مهم در تعیین تغییرات خط ساحلی به شمار می‌آید. جریان‌های دریایی و اقیانوسی همان حرکت آب دریا است که ناشی از سه عامل اصلی جزرومد، نیروی باد و اختلاف چگالی هستند. بستر رسوبی دریاها و مناطق ساحلی همواره تحت تأثیر تنش‌های برشی ناشی از وجود جریان و امواج هستند. تعیین ساختار و مقدار جریان در یک منطقه، اطلاعات مفیدی در خصوص تخمین آثار سوء بر روی سازه و خطوط ساحلی در اختیار قرار می‌دهد[۱]. کشور ما به‌دلیل وجود پهنهٔ آبی وسیع در شمال و جنوب، به مطالعه و پایش الگوی‌جریان در مناطق دریایی، به‌خصوص نقاط حساسی چون تنگهٔ هرمز، نیاز دارد.

تنگهٔ هرمز یکی از راهبردی‌ترین و حیاتی‌ترین تنگه‌های بین‌المللی جهان است و از جمله مهم‌ترین آبراه‌های عبوری دنیا محسوب می‌گردد. این تنگه، باریکهٔ دریایی خمیده‌شکلی است که فلات ایران را از شبه‌جزیرهٔ عربستان جدا می‌کند و آب‌های خلیج فارس را به دریای عمان و اقیانوس هند پیوند می‌دهد. در این گذرگاه دریایی که تنها راهِ خروجی آبِ خلیج فارس به شمار می‌آید؛ به علت ارتباط با دریای عمان، عرضِ کمِ تنگه و وجود تغییرات جزر و مدی، روزانه جریان‌های تقریباً شدیدی اتفاق می‌افتد. با دانستن الگوی جریان منطقه، درصورت وقوع سوانح دریایی از جمله نفوذ آلودگی نفتی می‌توان به پیش‌یابی حرکت لکه‌ها در دریا پرداخت و از این طریق برای پاک‌سازی سطح دریا و حفاظت از

سواحل حساس زیست‌محیطی، روش‌های مدیریتی و اقدامات مؤثرتری اتخاذ کرد. لازم به ذکر است؛ کسب این اطلاعات و ترسیم الگوی‌جریان، نیازمند اندازه‌گیری‌های مداوم در کل منطقه است.

به دلیل هزینهٔ زیاد برداشت‌های میدانی گسترده در دریا، امروزه با افزایش سرعت پردازش رایانه‌ها و رشد روش‌های عددی، شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی خصوصیات پدیده‌های هیدرودینامیکی استفاده می‌شود. در این زمینه، مدل MIKE21 که یک سیستم مدل‌سازی دوبعدی برای مدل‌سازی جریان‌هایی با سطح آزاد است، قابلیت شبیه‌سازی هیدرولیکی پدیده‌های محیطی در دریاچه‌ها، مدخل رودخانه‌ها، نواحی ساحلی و دریایی را دارد. این مدل با بهره‌گیری از زیربرنامه‌های مختلف، توانایی بررسی پدیده‌هایی چون تغییرات جزرومدی، امواج حاصل از طوفان، بررسی توزیع شوری، انتشار حرارت، برآورد نرخ انتقال رسوب و مقدار فرسایش در منطقهٔ ساحلی را دارد. این مدل ریاضی از زیربرنامه‌های متعددی برای شبیه‌سازی پدیده‌ها استفاده می‌کند که در این پروژه از دو زیربرنامهٔ HD و SW استفاده شده است[۲]. زیربرنامهٔ هیدرودینامیکی (HD)، زیربرنامهٔ پایه‌ای برای مدل‌سازی‌جریان است که قادر است تغییرات تراز آب را در دریاچه‌ها، مناطق ساحلی و مدخل رودخانه‌ها نیز شبیه‌سازی کند. زیربرنامهٔ SW شامل یک مدل تولیدکنندهٔ موج طیفی است. این مدل رشد، زوال و انتقال امواج ناشی از باد و امواج دورا را در مناطق ساحلی و فراساحلی شبیه‌سازی می‌کند[۳]. کارهای بسیاری در زمینهٔ مدل‌سازی‌جریان انجام گرفته است که در این رابطه می‌توان به چند مورد اشاره کرد:

توفیقی و همکاران در سال ۱۳۸۵ به مدل‌سازی هیدرودینامیکی دریاچهٔ ارومیه با استفاده از مدل MIKE21 پرداختند و در این کار الگوی جریان دریاچه را در یک سال شاخص در شرایط متعارف محیطی تعیین کردند؛ در نتایج بیان کردند که مدل دوبعدی به‌دلیل به‌دست دادن نتایج نزدیک به واقعیت برای مقادیر سرعت و تراز دریاچه، مدل مناسبی برای هیدرودینامیک دریاچهٔ ارومیه است[۴]. شربتی در سال ۱۳۹۰ جریان‌های دریایی خلیج گرگان را در فصل تابستان ۲۰۰۹ با استفاده از مدل MIKE21 شبیه‌سازی کرد تا الگوهای جریان و نوسانات آب و همچنین مؤلفه‌های سرعت را محاسبه کند. در نتایج بیان شد که الگوی جریان از تنش باد غالب، توپوگرافی بستر، ورودی و خروجی آب از تنها مرز باز و همچنین احاطهٔ خلیج توسط شبه‌جزیرهٔ میان‌کاله متأثر است[۵]. پراساد فابیل و هاگان در سال ۲۰۱۰ در کاری مدل‌سازی چرخش وادی در خلیج فارس را بررسی کردند. ن نتایج نشان داد که جریان‌های ورودی و خروجی ناشی از چگالی در تنگهٔ هرمز، شدید است.جریان‌های ساحلی شمال غربی در محل تنگهٔ هرمز و شمال قطر دامنهٔ شمالی سلول را تشکیل می‌دهند و از جولای تا آگوست این جریان‌ها به دلیل مکانیسم ناپایداری باروکلینیک ناپایدار می‌شود[۶]. در کاری دیگر استفان پوس و ژاویر کارتن در سال ۲۰۰۴ در مقاله‌ای با عنوان هیدرولوژی و گردش آب در محدودهٔ تنگهٔ هرمز و دریای عمان با استفاده از داده‌های بویهٔ چندمنظوره در تنگهٔ هرمز وتجزیه وتحلیل این داده‌ها، ساختار توده در این محدوده را بررسی کردند. آنان نشان دادند که هستهٔ گردش آب در خلیج فارس در سواحل عمان متراکم است، بدین معنی که در این منطقه لایه‌بندی چگالی به‌صورت قوی وجود دارد؛ در حالی که آب‌های سطحی اقیانوس هند، به سمت سواحل ایران حرکت می‌کنند، این توده‌های آب معمولاً توسط یک لایهٔ سطحی همگن پوشیده می‌شوند. تجزیه و تحلیل آن‌ها به‌خوبی نشان داده است که ساختار هیدرولوژی گردش آب در این منطقه در ماه اکتبر و نوامبر به‌گونه‌ای است که یک لایهٔ آمیخته به ضخامت ۳۰ متر در مرکز هستهٔ گردش آب در خلیج فارس در سواحل عمان تشکیل می‌شود[۷].

همان‌طور که گفته شد، جریان‌های شدیدی در تنگهٔ هرمز وجود دارد که بررسی الگوی جریان را در این

منطقه ضروری می‌کند. این جریان‌ها دو نوع هستند: نوع اول جریان‌هایی هستند که به صورت سطحی ازدریای عمان به خلیج فارس نفوذ می کنند و نوع دوم، جریان‌های زیرسطحی هستند که از تنگهٔ هرمز خارج می‌شود. این دو نوع جریان می‌تواند در منطقهٔ تنگهٔ هرمز بر جریان حجمی و مؤلفه‌های آن تأثیر بگذارد.

در تحقیق‌های پیشین عموماً پارامترهای سرعت و جهت جریان، جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته است و به مقدار جریان حجمی عبوری از منطقه توجهی نشده است؛ حال آنکه جریان حجمی پارامتر مناسبی برای تعیین الگوی جریان در منطقه است. پارامتر جریان حجمی یکی از مشخصه‌های جریان‌های دریایی است که متأثر از سه عامل سرعت جریان، حجم آب عبوری از منطقه و جهت جریان بوده و معرف مقدار حجم آب عبوری با سرعت (V) از منطقه است ($\frac{m^3}{s/m}$) این پارامتر با دو مؤلفهٔ (P) و (Q) معرفی می‌گردد که به‌ترتیب جریان حجمی عبوری در راستای X (طول تنگهٔ هرمز، در راستای از داخل خلیج فارس به سمت بیرون) و جریان حجمی عبوری در راستای Y (عرض تنگهٔ هرمز یا فاصلهٔ بین دو خشکی) را نشان می‌دهند[۸].

با توجه به کاربرد جریان حجمی در ناوبری زیر سطحی و رسم نقشه‌های دریایی و همچنین اهمیت آن در تنگهٔ هرمز، در این تحقیق تلاش بر این است که پارامتر جریان حجمی در منطقهٔ تنگهٔ هرمز با استفاده از مدل عددی MIKE21 مطالعه شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. برپایی مدل

۲-۱-۱. انتخاب محدودهٔ مدل‌سازی

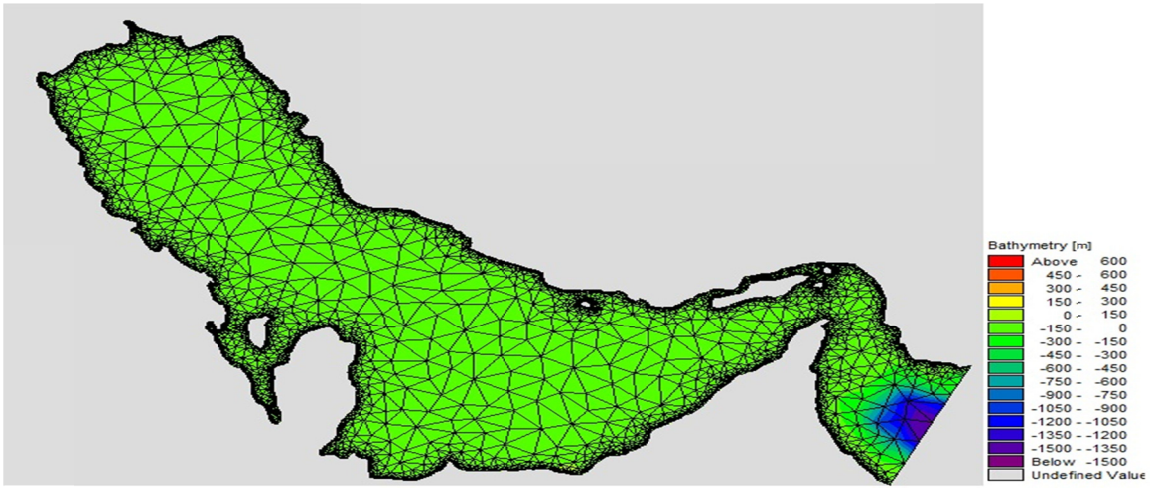
نبود داده‌های کافی در شرایط مرزی سبب شد، مدل‌سازی در دو مقیاس بزرگ و کوچک انجام گیرد. در مرحلهٔ اولِ مدل‌سازی برای محدودهٔ بزرگی که شامل کل خلیج فارس و بخش شرقی تنگهٔ هرمز است اجرا گردید و در مرحلهٔ بعد با استفاده از نتایج این مدل‌سازی، اطلاعات مرزی در محل مرزِ مدل کوچک، استخراج و محدودهٔ مورد نظر با دقت بیشتری مدل‌سازی شد. در مجموع، در منطقهٔ تنگهٔ هرمز دو مرتبه در مقیاس بزرگ و کوچک شبیه‌سازی صورت گرفته است. در شکل ۱ موقعیت داده‌های میدانی و محدودهٔ دو مدل بزرگ و کوچک و مرزهای آن نشان داده شده است.

شکل ۱. موقعیت داده‌های موجود و محدودهٔ مدل‌سازی

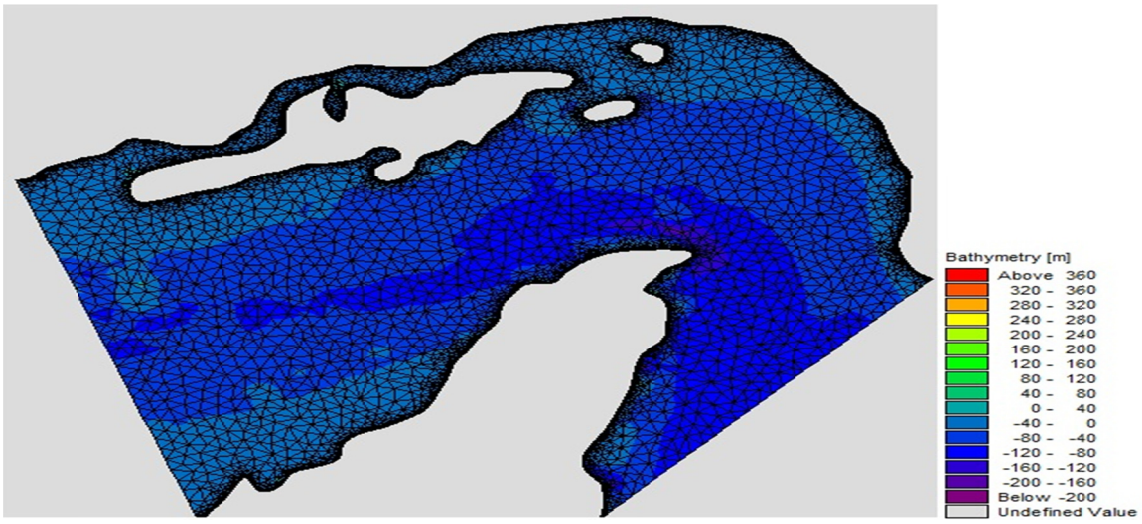
۲-۱-۲. تهیهٔ فایل شبکه‌بندی و ژرفاسنجی

همان‌طور که توضیح داده شد، به‌منظور تهیهٔ شرط مرزی مدل کوچک در تنگهٔ هرمز، دو شبکهٔ محاسباتی بزرگ‌مقیاس و کوچک‌مقیاس ساخته شده است. نقشهٔ هیدروگرافی استفاده‌شده در این تحقیق از پایگاه جبکو[۹] تهیه شده و سپس توسط زیربرنامهٔ MeshGeneration در بستهٔ نرم‌افزاری MIKE21-MIKE ZERO به‌صورت ساختارنیافته (مثلثی) شبکه‌بندی و درون‌یابی شده است. در این حالت بسته به دقت مورد نیاز در بخش‌های مختلف مدل و با توجه به سرعت مدل‌سازی، از المان‌های ریز و درشت استفاده شده است.

با توجه به این مورد، در شبکهٔ تهیه‌شده برای مدل بزرگ، در نواحی دورتر از منطقهٔ تنگهٔ هرمز مش‌هایی درشت‌تر و در نواحی نزدیک به منطقهٔ تنگهٔ هرمز از شبکهٔ ریزتر استفاده شده است. همچنین در شبکه‌بندی مدل کوچک تمامی نواحی، مش‌های ریز و با اندازه‌های یکسان ساخته شده است. شبکهٔ نهایی مورد استفاده در مدل بزرگ شامل ۱۱۵۶۸ شبکه و ۷۰۲۲ گره و در مدل کوچک شامل ۳۹۸۱۹ المان و ۲۱۹۱۵ گره است. اندازهٔ شبکه‌ها و تغییرات عمق مدل بزرگ و کوچک در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۲. شبکه‌بندی مدل بزرگ (ساخته‌شده توسط زیربرنامهٔ Mesh Generation)



شکل ۳. شبکه‌بندی مدل کوچک (ساخته‌شده توسط زیربرنامهٔ Mesh Generation)

۲-۱-۳. نیروی باد

در این تحقیق از دادهٔ باد شبکه‌بندی‌شده با سری زمانی متغیر در مکان و زمان استفاده شده که از خروجی مدل هواشناسی WRF گرفته شده است. درشکل ۴ گلبادهای مربوط به داده‌های ۶ ایستگاه مشاهده می‌شوند.

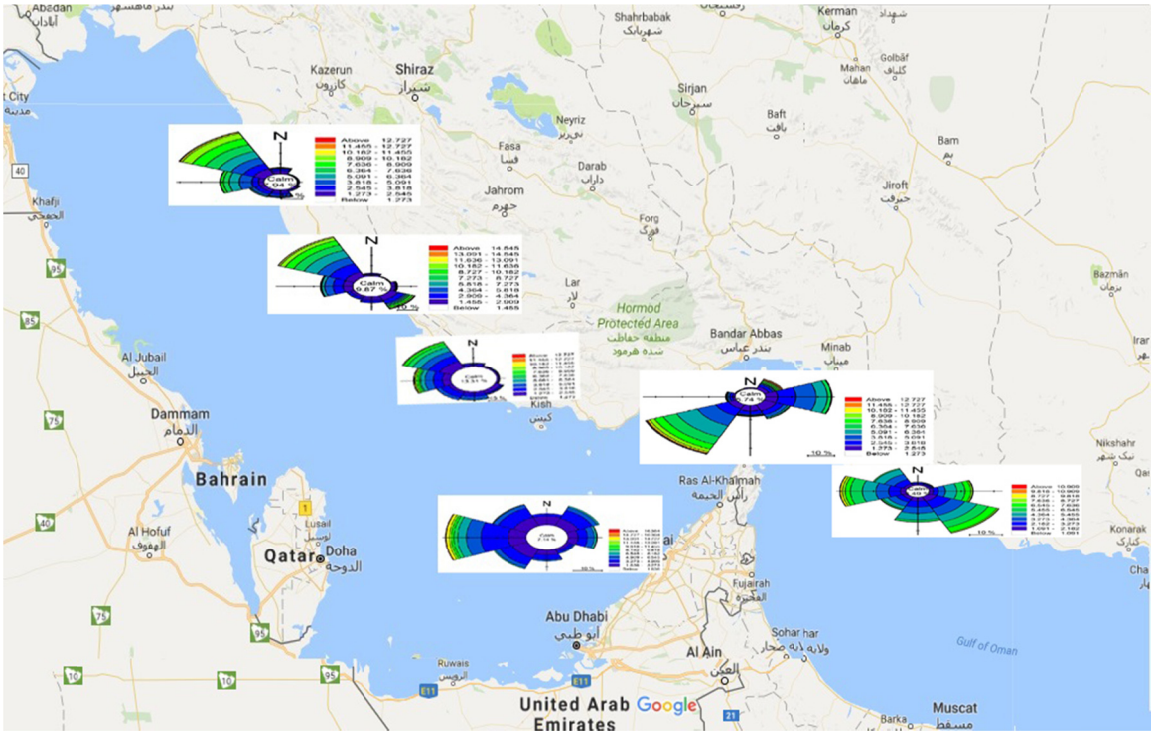
۲-۱-٤. تعیین گام زمانی محاسبات

تعیین گام زمانی محاسبات یکی از مراحل مهم در برپایی مدل است. اصولاً اگر گام زمانی از حد خاصی بزرگ‌تر گردد، عدم توانایی مدل در دنباله‌روی از پدیده و سرانجام ناپایداری مدل را به دنبال خواهد داشت. معیار معمول در تعیین گام زمانی این است که سرعت انتشار ایجادشده از سرعت انجام محاسبات بر روی شبکه تجاوز نکند. چنین ضابطه‌ای به ضابطهٔ کورانت موسوم بوده و عدد به‌دست‌آمده برای نسبت سرعت موج ایجادشده به سرعت محاسبات روی شبکه، عدد کورانت نامیده می‌شود. این عدد برای پایداری مدل باید همیشه کمتر از یک باشد[۱۰].

در مدل مورد استفاده حداقل گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه و حداکثر ۳۰۰ ثانیه انتخاب شده است. با توجه به پیش‌فرض مدل، گام زمانی به صورتی تعیین می‌شود که شرایط CFL<1 را تأمین کند. در این مطالعه عدد CFL با مقدار ۰/۸ در نظر گرفته شده است.

۲-۱-۵. جزر و مد

در این مقاله، مؤلفه‌های کشندی در قالب ۴ مؤلفهٔ اصلی M2 , S2 , K1 , O1 مربوط به منطقهٔ تنگهٔ هرمز و سال ۲۰۱۴، از سازمان بنادر و کشتیرانی تهیه شده و به مدل اعمال شده است که در جدول ۱ مقادیر این پارامترها مشاهده می‌شود. در قسمت معرفی مرزهای باز در مدل بزرگ نیز از فایل جزرومد مربوط به ایستگاه‌های دریای عمان، بندر جاسک و بندر فجیره در کشور امارات برای مرز شرقی استفاده شده است که از پایگاه اینترنتی tide4fish.com [۱۱] تهیه شده است و به فرمتی خوانا برای MIKE21 (فرمت dfs1) تبدیل شده است.



شکل ۴. گلباد مربوط به داده‌های باد در منطقه

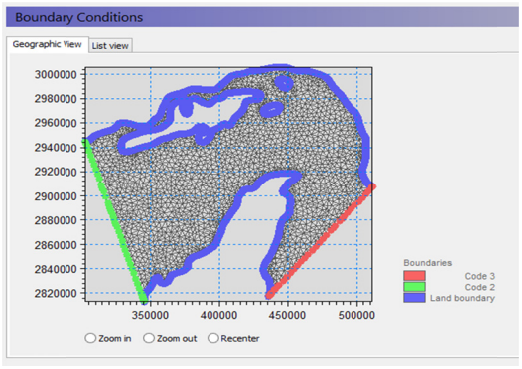
جدول ۱. دامنه و فازهای ۴ مؤلفهٔ اصلی جزر و مد برای منطقهٔ تنگهٔ هرمز

	M2	S2	K1	O1
Apmlitude (m)	۱/۱	۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۲۳
Period (hour)	۱۲/۴۲	۱۲	۲۳/۹۳	۲۵/۸۱
Phase	۳۰۲	۳۴۱	۷۰	۵۸

۲-۱-۶. شرایط مرزی مدول HD

در مدل کوچک، دو مرز آبی در غرب و شرق تنگهٔ هرمز و دو محدودهٔ خشکی در شمال و جنوب آن قرار دارد؛ البته جزایر هرمز و لارک و قشم نیز به‌عنوان مرز خشکی در نظر گرفته شده‌اند. اطلاعات موجود در مرزهای دریایی به‌صورت یک فایل متغیر در زمان و در طول مرز و در قالب سطوح مشخص‌شده به مدل اعمال شده است. فرمت اطلاعات مرزی در مدل کوچک در مرز غربی به‌صورت مؤلفهٔ u و v سرعت جریان و در مرز شرقی به‌صورت قایل مؤلفه‌های جریان حجمی بوده است که تماماً از نتایج حاصل از مدل بزرگ استخراج شده است.

در مدل بزرگ نیز یک مرز باز در قسمت شرقی تنگهٔ هرمز در نظر گرفته شده است. اطلاعات موجود در این مرز دریایی نیز همان‌طور که گفته شد، به‌صورت یک فایل جزرومدی متغیر در زمان و در طول مرز است. فرمت اطلاعات آن به‌صورت فایل سطح تراز آب در تاریخ اجرای شبیه‌سازی است. برای این مرز باز از داده‌های تراز آب در بندر فجیره از کشور امارات و تراز آب در بندر جاسک استفاده شده است. شکل ۵ نمایی از مرزهای باز مدل کوچک را نشان می‌دهد.



شکل ۵. مرزهای دریایی و خشکی منطقهٔ مورد مطالعه

۲-۱-۷. تشعشات امواج

ابتدا با استفاده از مدول SW (مدول مدل‌سازی امواج)، برای هر دو مدل کوچک و بزرگ، سه مؤلفهٔ تنش(Sxx،Syy،Sxy) به‌عنوان خروجی از مدول مذکور (SW) استخراج شده و سپس به‌عنوان تشعشات حاصل از امواج در محدودهٔ زمانی و مکانی مورد نظر به مدل HD اعمال شده است.

۲-۲. کالیبراسیون

منظور از کالیبراسیون مدل، اطمینان از شبیه‌سازی صحیح پدیدهٔ مورد نظر با استفاده از مقایسهٔ اطلاعات اندازه‌گیری‌شده و نتایج حاصل از مدل‌سازی است. واسنجی مدل موجب ایجاد دقت مناسب در مدل‌سازی آن دوره‌ها و افزایش همخوانی نتایج با واقعیت در کل بازهٔ مدل‌سازی می‌گردد. انجام کالیبراسیون با چندین نوبت اجرای مدل همراه است. اجرای اولیه با ضرایب پیش‌فرض ارائه‌شده توسط مدل صورت گرفته است. در مراحل بعدی با توجه به روند نتایج از ضرایب مناسب‌تری استفاده می‌شود.

۲-۲-۱. پارامترهای کالیبراسیون مدل HD

پس از چندین بار اجرا، ضرایب مناسب که نتایج بهتری نشان دادند برای پارامترهای کالیبراسیون انتخاب شد [۱۰، ۱۲].

۲-۲-۱-۱. مرز تری و خشکی

نقاطی که در شبیه‌سازی تحت تأثیر جزر و مد از آب خارج می‌شوند با تعریف عمق خشک‌شدگی، از محاسبات خارج شده و در مقابل، نقاطی که به زیر آب می‌روند با تعریف عمق ترشدگی، وارد محاسبات می‌شوند. در واقع زیربرنامهٔ هیدرودینامیک، در هر گام زمانی، تغییرات سطح آب را محاسبه نموده و با توجه به نسبت تغییرات سطح آب دو حالت را در نظر می‌گیرد. اگر این نسبت مثبت باشد به این حالت غرق‌شدگی و در غیر این صورت خشک‌شدگی می‌گویند. با تعیین حداقل عمق برای این دو حالت، شبکه گره‌های محاسباتی را برای رسیدن به عمق مورد نظر گسترش داده و اعماق کمتر از آن در محاسبات در نظر گرفته نمی‌شود. در این مقاله عمق خشک‌شدگی ۰/۰۰۵ متر و عمق غرق‌شدگی ۰/۰۵ متر در نظرگرفته شده است.

۲-۲-۱-۲. لزجت گردابی

این پارامتر عاملی است که به‌منظور درنظرگرفتن تأثیر پدیده‌های گوناگون بر مقدار اتلاف انرژی جریان به مدل اعمال می‌شود. در این قسمت با استفاده از فرمول اسماگورینسکی، مقدار ثابت ۰/۲۸ به مدل اعمال شده است.

۲-۲-۱-۳. نیروی کوریولیس

در این پروژه نیروی کوریولیس با توجه به وسعت محدودهٔ شبیه‌سازی به‌صورت متغیر در محدوده به مدل اعمال شده‌است؛ بنابراین با اعمال این نیرو به شکل متغیر، مدل به‌صورت اتوماتیک با توجه به عرض‌های جغرافیایی، نیروی کوریولیس را متغیر در نظر می‌گیرد.

۲-۲-۱-٤. اصطکاک بستر

این عامل به‌عنوان عامل اثرگذار بر الگوی جریان معرفی می‌گردد. این ضریب، به دو صورت عدد ثابت برای کل سطح مدل یا به‌صورت یک ماتریس دوبعدی در سطح مدل قابل تعریف است. دراین قسمت با استفاده ازعدد شزی مقدار ثابت ۱۵ برای این پارامتر به مدل اعمال شده است؛ این کار با توجه به ضریب اصطکاک بستر در محدودهٔ خلیج فارس و تنگهٔ هرمز صورت گرفته است.

۲-۲-۲. اطلاعات ورودی مدل SW

اطلاعات ورودی به مدل SW بدین شرح است:

۱. زبری کف با استفاده از رابطهٔ Nikurads و *به‌صورت* ثابت و به‌مقدار ۰/۰۱ متر؛

۲. داده‌های تراز سطح باز مدول HD؛

۳. داده‌های مربوط به شرایط جریان از مدول HD؛

۴. دادهٔ مرز باز که دادهٔ ارتفاع موج، دورهٔ تناوب موج، جهت موج است.

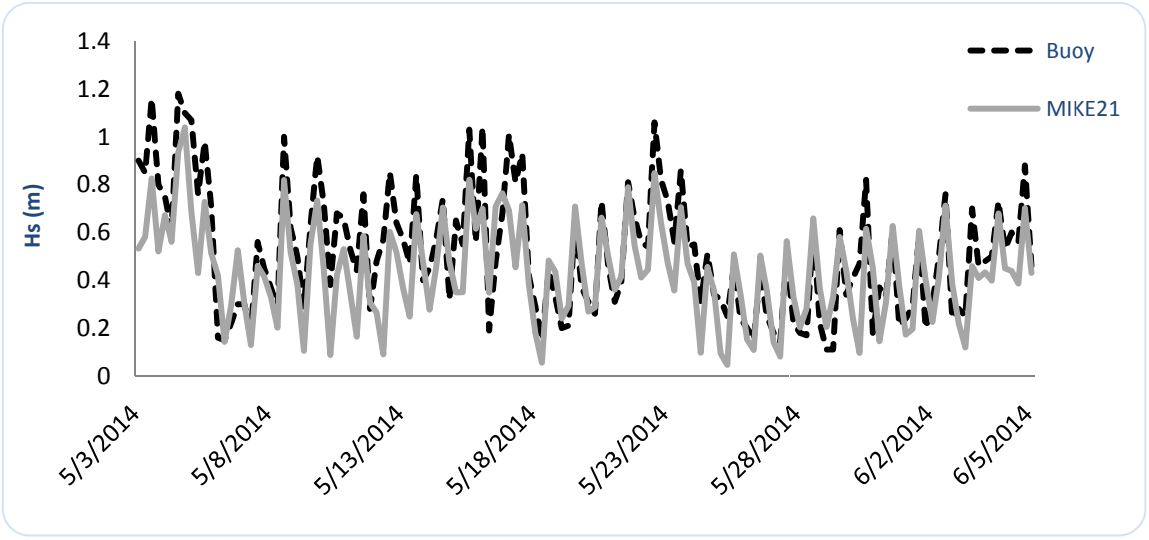
۳. نتایج

۳-۱. صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های بویهٔ بندرعباس استفاده شده است. مدول SW برای ۳۲ روز در محدودهٔ زمانی ۲۰۱۴/۵/۳ تا ۲۰۱۴/۶/۵ و با گام زمانی شش‌ساعته اجرا گردید و نتایج حاصل از این مدل‌سازی برای صحت‌سنجی و بررسی هم‌خوانی، با داده‌های بویهٔ بندرعباس مقایسه شد. مقدار خطای به‌دست‌آمده با توجه به رابطهٔ ۱ برای ارتفاع موج در حدود ۱۵/۸۴ درصد است. شکل ۶ مقایسهٔ ارتفاع موج شبیه‌سازی شده با دادهٔ میدانی را نشان می‌دهد.

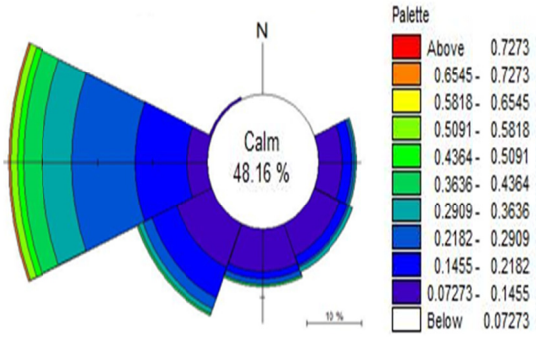
$$R_e = \left|\frac{Y_0 - Y_e}{Y_0}\right| \times 100 \qquad (۱)$$

Y0= مقدار مشاهده‌ای متغیر، Ye= مقدار تخمینی متغیر، Re= خطای نسبی.

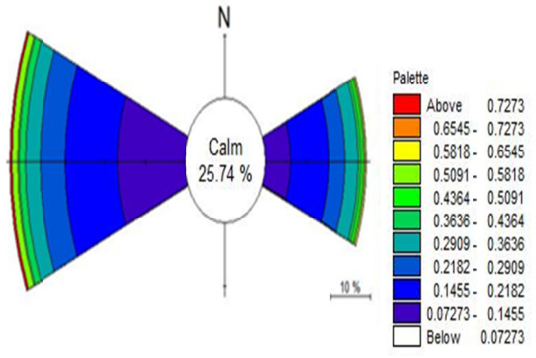


شکل۶ . مقایسهٔ ارتفاع موج ثبت‌شده توسط بویه با داده‌های حاصل از مدل

در شکل ۷ و ۸ مقایسهٔ بین مقادیر جریان نشان داده شده است.



شکل ۷. گلجریان مربوط به دادهٔ میدانی در دورهٔ صحت‌سنجی



شکل ۸ . گلجریان مربوط به مدل‌سازی در دورهٔ صحت‌سنجی

پس از بررسی‌های اولیه و صحت‌سنجی، مدل برای مدت ۳۵ روز از تاریخ ۲۰۱۴/۶/۷ تا تاریخ ۲۰۱۴/۷/۱۱ اجرا شد و نتایج آن بررسی گردید.

از آنجا که در این مقاله مدل‌سازی هیدرودینامیکی به‌صورت دوبعدی انجام گرفته است، بررسی نقاط تنها به‌صورت سطحی امکان‌پذیر است و امکان بررسی عمق‌های مختلف برای یک ایستگاه وجود ندارد. در این تحقیق برای بررسی دقیق‌تر، چهار نقطه با عمق‌های متفاوت در محدودهٔ تنگهٔ هرمز مشخص گردید که موقعیت جغرافیایی این نقاط در جدول ۲ آورده شده است و همچنین در شکل ۹ موقعیت مکانی این چهار نقطه نشان داده شده است. به دلیل ازدیاد داده‌ها و نبود امکان مقایسهٔ آن‌ها در یک نمودار و جدول، طول زمان اجرای مدل به تعداد ۵ دوره زمانی هفت روزه تقسیم شده است و میانگین داده‌های مشخصه برای هر دوره بررسی شده است.

جدول ۲. موقعیت جغرافیایی نقاط مورد مطالعه

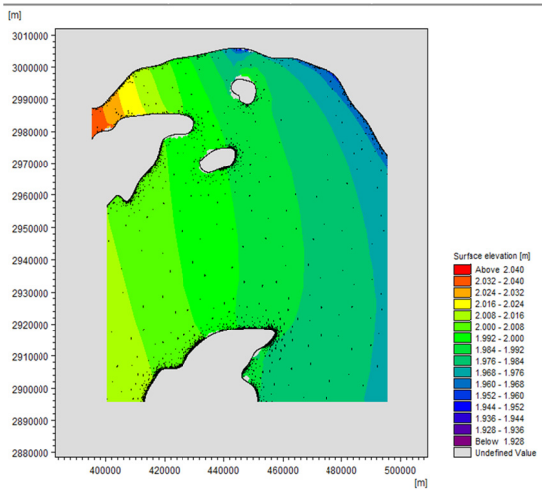
ردیف	شمارهٔ نقطه	عمق (m)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	۱	۱۲	۵۶/۶۷	۲۷/۰۷
۲	۲	۳۸	۵۶/۶۵	۲۶/۹۱
۳	۳	۶۰	۵۶/۶۲	۲۶/۶۹
۴	۴	۱۱۸	۵۶/۵۹	۲۶/۴۸

شکل ۹. موقعیت مکانی نقاط مورد مطالعه

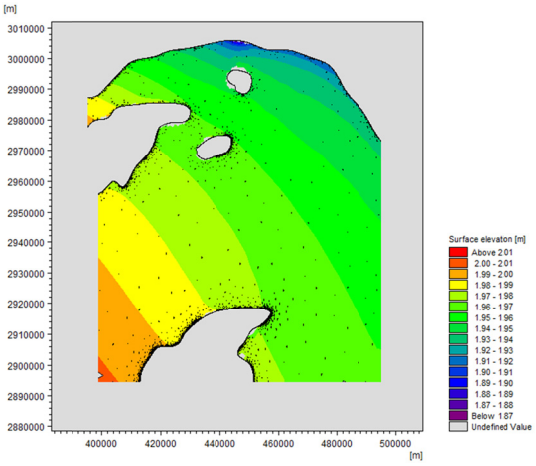
۳-۲. نتایج حاصل از مدول HD

با بررسی نتایج حاصل از اجرای مدل، در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که به‌طور میانگین سرعت جریان بین ۰/۱ تا ۰/۲ متر بر ثانیه است. شکل ۱۰ تا ۱۳ تغییرات سطح آب را در منطقه به‌صورت موردی نشان می‌دهد. مشخصات آماری حاصل از اجرای مدل HD برای چهار نقطه درجدول ۳ به‌صورت موردی آمده است.

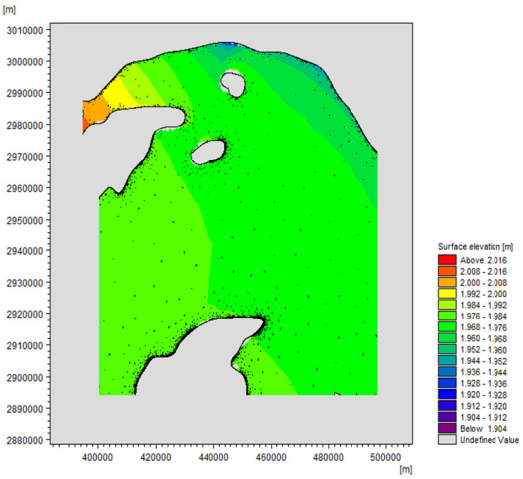
طبق جدول ۳ بیشترین اختلاف بیشینه و کمینه برای پارامتر تراز از سطح، مربوط به نقطهٔ اول و برای مؤلفهٔ (P) و (Q) شارش، مربوط به نقطهٔ چهارم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عمق، سرعت جریان در سطح کاهش می‌یابد و بدین ترتیب مؤلفهٔ P شارش به‌طور میانگین کاهش یافته و با منفی‌شدن تغییر جهت می‌دهد. درشکل ۱۴ و ۱۵ نمودار تغییرات میانگین هفتگی مؤلفه‌های شارش در طول چهار نقطه به نمایش گذاشته شده است.



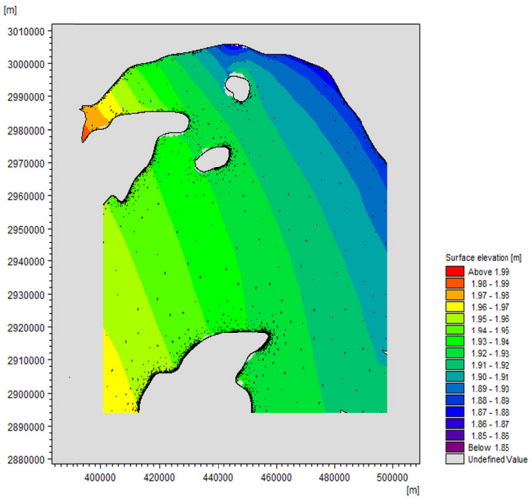
شکل ۱۰. سطح آب در تاریخ ۲۰۱۴/۶/۹ ساعت ۱۲:۰۰



شکل ۱۱. سطح آب در تاریخ ۲۰۱۴/۶/۹ ساعت ۱۸:۰۰



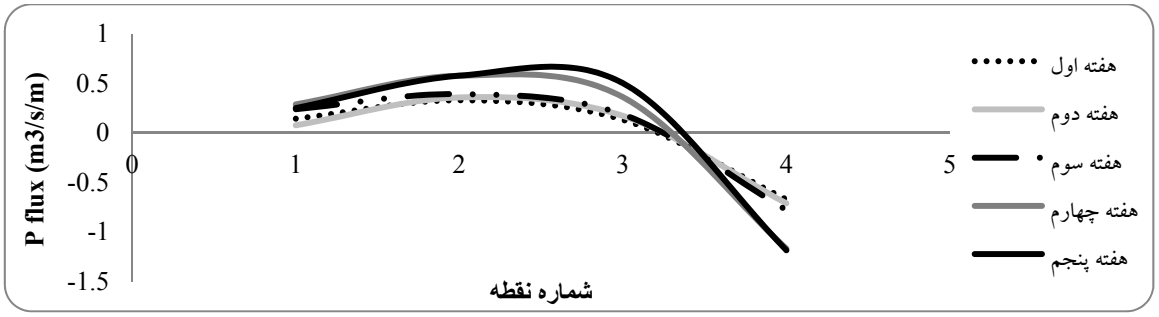
شکل ۱۲. سطح آب در تاریخ ۲۰۱۴/۶/۲۹ ساعت ۱۸:۰۰



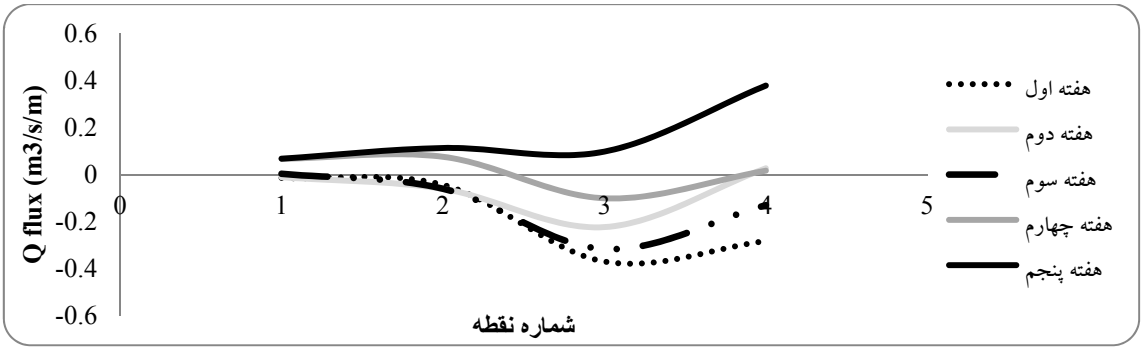
شکل ۱۳. سطح آب در تاریخ ۲۰۱۴/۷/۹ ساعت ۱۸:۰۰

جدول۳. نتایج آماری حاصل از اجرای مدول HD در چهار نقطه

		Surface Elevation (m)	P flux ($\frac{m^3}{s/m}$)	Q flux ($\frac{m^3}{s/m}$)
نقطهٔ شمارهٔ یک	مقدار متوسط	۱/۹۲	۰/۱۶	۰/۰۲
	مقدار بیشینه	۲/۰۲	۰/۲۹	۰/۰۸
	مقدار کمینه	۱/۷۵	۰/۱۴	-۰/۰۶
نقطهٔ شمارهٔ دو	مقدار متوسط	۱/۹۳	۰/۴۴	۰/۰۰
	مقدار بیشینه	۲/۰۰	۰/۶۵	۰/۱۳
	مقدار کمینه	۱/۷۵	۰/۲۱	-۰/۱۲
نقطهٔ شمارهٔ سه	مقدار متوسط	۱/۹۳	۰/۲۵	-۰/۱۹
	مقدار بیشینه	۲/۰۰	۰/۵۹	۰/۰۶
	مقدار کمینه	۱/۷۷	-۰/۰۷	-۰/۴۵
نقطهٔ شمارهٔ چهار	مقدار متوسط	۱/۹۳	-۰/۸۴	۰/۰۴
	مقدار بیشینه	۲/۰۰	-۰/۰۱	۰/۵۲
	مقدار کمینه	۱/۷۷	-۱/۴۹	-۰/۶۵



شکل ۱۴. نمودار تغییرات میانگین مؤلفهٔ (P) شارش در طول چهار نقطه



شکل ۱۵. نمودار تغییرات میانگین مؤلفهٔ (Q) شارش در طول چهار نقطه

با توجه به شکل ۱۵ می‌توان گفت الگوی تغییرات مؤلفهٔ (P) شارش، در طول چهار نقطه و مربوط به پنج دوره زمانی، با یکدیگر مشابه است. الگوی تغییرات آن از نقطهٔ اول به نقطهٔ سوم، افزایشی و سپس کاهشی است و در نقطهٔ چهارم تغییر جهت جریان حجمی مشاهده می‌شود. در تحلیل مؤلفهٔ (Q) شارش عکس این مورد مشاهده می‌شود، یعنی با افزایش عمق ابتدا کاهش و سپس افزایش مقدار مؤلفهٔ شارش مشاهده می‌شود.

٤. نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق بررسی جریان‌ها و روند تغییرات جریان حجمی عبوری در دهانهٔ تنگهٔ هرمز بوده است. بدین منظور از مدل دوبعدی هیدرودینامیکی بستهٔ نرم‌افزاری MIKE21 جهت مدل‌سازی و بررسی جریان حجمی در تنگهٔ هرمز استفاده شده است.

بررسی‌های اولیهٔ نتایج حاصل از اجرای مدل نشان می‌دهند که در تنگهٔ هرمز، آب‌های سطحی دریای عمان به سمت خلیج فارس حرکت می‌کنند؛ این نتایج درمورد جهت حرکت آب و سرعت جریان، با نتایج مدل‌سازی در تحقیق پاخیره‌زن مشابه است[۱۲]. نتایج در چهار نقطه با عمق‌های متفاوت و در طول پنج دوره زمانی نشان می‌دهند که حداکثر تغییرات برای مؤلفهٔ P جریان حجمی بین ۱/۴- تا $۰/۶\frac{m^3}{s/m}$ و برای مؤلفهٔ (Q) بین ۰/۶- تا $۰/۵\frac{m^3}{s/m}$ است و با افزایش عمق، کاهش سرعت جریان در سطح مشاهده شده و به دنبال آن مؤلفهٔ (P) شارش به‌طور میانگین کاهش یافته است.

با توجه به گردش آب در خلیج فارس و تنگهٔ هرمز و همچنین نتایج تحقیقات پوس و همکاران که نشان داد ویژگی‌های ترموهالین با حرکت از خلیج فارس به دریای عمان کاهش می‌یابد و مکانیسم انتقال جرم متأثر از این چرخش است، در مقالهٔ حاضر نیز روندی مشابه آن مشاهده شده است[۷و۱۳] . با توجه به این موضوع در بررسی چهار نقطه می‌توان گفت، الگوی تغییرات مؤلفهٔ (P) شارش مربوط به چهار نقطه، در طول پنج دوره زمانی با یکدیگرمشابه است. مقدار این مؤلفه از نقطهٔ اول به نقطهٔ سوم افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. تأثیر سرعت سطحی در این الگوها مشهود است، به‌طوری‌که روند افزایشی مؤلفهٔ (P) شارش از نقطهٔ اول تا نقطهٔ سوم نشان‌دهندهٔ افزایش سرعت سطحی است. در مقابل با کاهش مؤلفهٔ سرعت سطحی به دلیل افزایش عمق، جریان حجمی ورودی در جهت مؤلفهٔ (P) کاهش یافته است. در تحلیل مؤلفهٔ (Q) جریان حجمی، عکس این مورد مشاهده می‌شود؛ یعنی با افزایش عمق ابتدا کاهش و سپس افزایش مقدار این مؤلفه مشاهده می‌شود؛ بنابراین تغییرات سرعت سطحی بر تغییرات مؤلفه‌های (P) و (Q) شارش موثر هستند.

به طور کلی می‌توان گفت، با افزایش عمق مقدار سرعت سطحی کاهش یافته اما جریان حجمی در زیرسطحی افزایش خواهد یافت. این موضوع (افزایش جریان حجمی زیرسطحی) در ناوبری زیرسطحی و به‌خصوص حرکت زیردریایی بسیار اهمیت دارد. حرکت زیردریایی در مسیر و منطقه‌ای با جریان حجمی زیاد با مشکل همراه خواهد بود و گاه موجب انحراف آن از مسیر اصلی خواهد شد. بنابراین با شناخت این مناطق می‌توان اندازه و عمق جریان حجمی عبوری را مشخص کرد تا زیردریایی در مسیرهای مناسب غوص کند و با حرکت در مسیری که جریان حجمی کمتری وجود دارد، ناوبری آسان‌تری داشته باشد.

مراجع

[۱] کاظمی محمد عامر، حکیم‌زاده حبیب، ناهید شهرزاد. بررسی عددی جریان‌های ناشی از موج در بندر امیرآباد. ارائه شده در: پنجمین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران؛ ۱۳۸۹ اردیبهشت ۱۴-۱۶ ؛ مشهد، ایران.

[۲] حسن‌تبار سیدحسین. مقایسهٔ مدل‌های عددی MIKE21 و SWAN در تحلیل امواج ناشی از باد در خزر جنوبی[پایان‌نامه]. بندرعباس: دانشگاه هرمزگان؛ ۱۳۹۳.

[۳] ذبیحی قمی علی. ارزیابی تأثیرات هیدرودینامیکی و مورفولوژیکی احداث بندر کنارک به روی نواحی ساحلی [پایان‌نامه]. بندرعباس: دانشگاه هرمزگان؛ ۱۳۹۰.

[۴] توفیقی محمد علی، زین الدینی مصطفی، گلشنی علی اصغر. شبیه‌سازی دوبعدی هیدرودینامیک

دریاچهٔ ارومیه برای تعیین الگوی جریان. مهندسی دریا. ۱۳۸۵؛ (۳)۴: ۳۷ – ۴۷.

[۵] شربتی سعید. شبیه‌سازی دوبعدی الگوی‌جریان در خلیج گرگان با استفاده از نرم‌افزار مایک۲۱. مجلهٔ پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۳۹۰؛ ۴:۲۴۱–۲۴۶.

[6] Thoppil PG, Hogan PJ. A modeling study of circulation and eddies in the Persian Gulf. Journal of Physical Oceanography. 2010; 40(9): 22-34.

[7] Pous SP, Carton X, Lazure P. Hydrology and circulation in the Strait of Hormuz and the Gulf of Oman—Results from the GOGP99 Experiment: 2. Gulf of Oman. Journal of Geophysical Research Oceans. 2004;1:109.

[8] Dyke P. Modelling Coastal and Marine Processes. World Scientific Publishing Co Inc; 2016. p.381-82.

[9] Meirion TJ, Former C. GEBCO. 2014 [cited 2014]. Available from: http://www.gebco.net/.

[۱۰] چگینی وحید، گلشنی علی اصغر، تائبی سهیلا، چگینی فاطمه. امواج ناشی از باد و پیش‌بینی آنها در خلیج فارس و دریای عمان و دریای خزر. تهران: آموزش و سنجش مؤسسهٔ ملی اقیانوس‌شناسی؛ ۱۳۹۱.ص.۲۷۲ – ۲۷۳.

[11] Available from: http: //tide4fish.com/. [cited 2014].

[۱۲] پاخیره‌زن محمد. مدل‌سازی عددی جریان‌های شمال غربی دریای عمان و تأثیر آن برطبقه‌بندی سواحل شرق هرمزگان به روش شپارد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای [پایان‌نامه]. بندرعباس: دانشگاه هرمزگان؛ ۱۳۹۲.

[13] Pous S, Lazure P, Carton X. A model of the general circulation in the Persian Gulf and in the Strait of Hormuz: Intraseasonal to interannual variability. Continental Shelf Research. 2015 Feb;15:55-70.