افزایش دقت مدل جزرومد جهانی TPXO با استفاده از مدل عددی TELEMAC در خلیج بوشهر

معصومه رسولیان[۱]، محمد اکبری‌نسب[۲*]، علی ناصری[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه مازندران، بابلسر، پست الکترونیکی: masoomehrasoolian@gmail.com

۲- استادیار گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه مازندران، بابلسر، پست الکترونیکی: m.akbarinasab@umz.ac.ir

۳- مربی گروه فیزیک دریا، سازمان بنادر و دریانوردی، تهران، پست الکترونیکی: ali.s.naseri@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۱۷ ** نویسنده مسوول* *تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۳*

چکیده

روش‌های متعددی از قبیل روش‌های تجربی، مدل‌های عددی و محاسباتی برای مطالعات جزرومدی توسعه یافته است. هدف از این پژوهش ارزیابی و صحت سنجی مدل عددی Telemac در آب‌های خلیج بوشهر با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری می‌باشد. در همین راستا از ماژول دوبعدی نرم‌افزار Telemac ، برای شبیه سازی جزرومد در یک دوره ۱۵ روزه از تاریخ ۲۰۱۱/۰۸/۰۱ واقع در منطقه خلیج بوشهر پرداخته شده است. پس از تهیه داده‌های هیدروگرافی، ایجاد مش نامنظم مثلثی، اعمال داده‌های جزرومدی به عنوان نیروی نجومی روی نقاط مرز، تراز آب و جریان جزرومدی مدل‌سازی گردید. جهت صحت سنجی ضرایب تراز آب، دامنه جزرومد، تغییرات سرعت جریان و اصطکاک بستر مدل از داده‌های اندازه‌گیری تراز آب و سرعت جریان ثبت شده توسط اداره بنادر در منطقه بهره برده شد. در گام بعدی تراز آب، سرعت جریان توسط مدل جهانی TPXO با استفاده از نرم‌افزار Matlab استخراج شدند. نتایج آنالیز جزرومدی حاصل از مدل جهانی کشند اقیانوسی با نتایج حاصل از مدلسازی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج پژوهش بیانگر کاهش خطای RMSE از ۱۴ درصد به ۷ درصد برای تراز آب و از ۲۰ درصد به ۵ درصد برای سرعت جریان بعد از انجام مدلسازی بر روی داده‌های TPXO است.

کلمات کلیدی: *مدل TELEMAC، تراز آب، خلیج بوشهر، TXPO، جزر و مد.*

۱. مقدمه

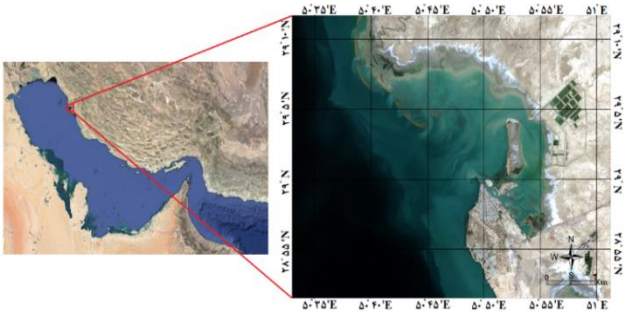
اثرات اقیانوسی، تأثیرات هواشناسی، جزرومد، تغییرات آب و هوایی و حرکت عمودی پوسته زمین را می‌توان به‌عنوان پنج عامل که نوسانات تراز آب را تحت تأثیر می‌گذارند اشاره کرد (کارابیل، ۲۰۱۱). این اطلاعات در ناوبری آب‌های ساحلی (الدیاستی و همکاران، ۲۰۱۸)، مصب رودخانه‌ها (لی و همکاران، ۲۰۱۸)، خلیج‌ها و بنادر، در پروژه‌های مهندسی مانند ساخت‌وساز پل‌ها، اسکله‌ها، موج‌شکن‌ها و ایجاد نقشه‌های استاندارد مبنا برای هیدرو گرافی، در مسائل حقوقی مانند مشخص کردن حدود خط ساحلی (باموناوالا و همکاران، ۲۰۱۸) بدلیل هزینه بالای برداشت های دریایی بصورت گسترده، امروزه در مناطق مختلف دنیا از مدل‌های عددی برای بررسی و پیش‌بینی جریان‌ها و امواج استفاده می‌گردد. دلیل این امر انجام حجم بالایی از محاسبات در زمان کوتاه، دقت بالا و کم‌هزینه بودن آن‌ها است. اساس این روش استفاده از معادلات مربوط به تمامی فراسنج های تأثیرگذار

بر هر فرآیند اقیانوسی می‌باشد (محد و همکاران، ۲۰۱۸). در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در ارتباط با مدل‌سازی تراز آب و جریان های جزر و مدی با استفاده از نرم‌افزارهای محاسباتی مختلفی انجام شد. از جمله می‌توان به مطالعات طوریان و آزموده اردلان، ۱۳۸۹، ربیعی فر و باقری، ۱۳۹۱ و اکبری و همکاران، ۱۳۹۵ و بلاند و بهاج، ۲۰۰۶ و چن و همکاران، ۲۰۱۳.

در مطالعه حاضر مدل هیدرودینامیکی TELEMAC کد باز توسعه‌یافته، کالیبره شده و برای مدل‌سازی تراز آب ناشی از جزرومد و استخراج مؤلفه‌های جزرومدی در خلیج بوشهر استفاده شد؛ و برای صحت سنجی، نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های میدانی تراز آب و سرعت جریان اخذ شده از سازمان بنادر و دریانوردی، مورد مقایسه قرار داده شد.

۲. مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه در ایـن پژوهش خلیج بوشهر است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی خلیج بوشهر

به طور کلـی معـادلات در مـاژول TELEMAC-2D حـل می‌شوند (باتیکا و همکاران، ۲۰۱۸)، فرم میانگین معادله پیوستگی و اندازه جهت در راستای x و y به ترتیب عبارت است از:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial (hu)}{\partial t}+\frac{\partial (hUU)}{\partial x}+\frac{\partial (hUV)}{\partial y}-gh\frac{\partial z}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left[hv_e\frac{\partial U}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[hv_e\frac{\partial U}{\partial y}\right]+hF_x \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial (hv)}{\partial t}+\frac{\partial (hVV)}{\partial y}+\frac{\partial (hUV)}{\partial x}-gh\frac{\partial z}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left[hv_e\frac{\partial V}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[hv_e\frac{\partial V}{\partial y}\right]+hF_y \qquad (۳)$$

h عمق آب (m)، u و v مؤلفه‌های دوبعدی سرعت U،(m/s) و V اندازه مؤلفه‌های دوبعدی سرعت (m/s)، g شتاب گرانشی (m/s^2)، v_e،(m/s^2) ضریب انتشار تکانه t : زمان (s)، x و y : مولفه‌های افقی مکان در دستگاه دکارتی (m)، F_x و F_y عبارت چشمه و چاه در معادلات دینامیکی می‌باشد که می‌توانند نیروی باد، کوریولیس، اصطکاک بستر یا هر پروسه دیگری که منجر به اعمال نیروی خارجی به مدل شود تعریف کرد. اصطکاک بستر به‌عنوان تابع درجه دوم سرعت نشان داده می‌شود، تنش $\tau = \rho C_f|U|\vec{U}$؛ که $\vec{U}=(U.V)$ مولفه دوبعدی سرعت می‌باشد. ضریب اصطکاک (C_f) بستر را می‌توان به‌عنوان پارامتری در معادله Strickler محاسبه نمود.

$$C_f=\frac{2g}{S^2h^{\frac{1}{3}}} \qquad (۴)$$

S ضریب Strickler است (منبالیو و همکاران، ۲۰۰۹).

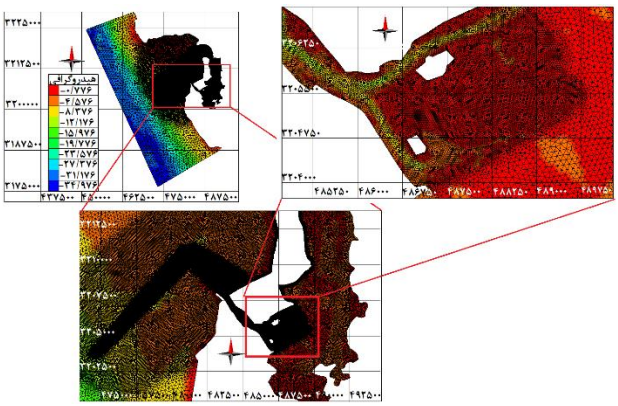
۲-۱ ورودی‌های مدل

ورودی‌های مورد جهت انجام مدل‌سازی جریانات جزر و مدی شامل:

۲-۱-۱ هیدروگرافی بستر و ساختار شبکه‌بندی

هیدروگرافی بستر منطقه مورد مطالعه از سازمان بنادر و دریانوردی با مختصات UTM با دقت مناسب در محدوده مدل محلی، اخذ گردید. مقیاس شبکه‌بندی بهینه با استفاده از حساسیت تراکم شبکه با اجرای مدل به ازای مقایر مختلف مقیاس شبکه بندی، برای کل منطقه با نسبت یک به سه، از کوچک‌ترین شبکه‌بندی ۳۰ متر تا ۸۱۰ متر انتخاب شد، مقیاس این شبکه با توجه به اهمیت مناطق و کاهش زمان محاسبات با نزدیک شدن به مرز دریایی بزرگ‌تر در نظر گرفته شد. هیدرو گرافی بستر با درون‌یابی خطی به شبکه‌بندی بارگذاری شد. شبکه‌بندی نهایی مورداستفاده به‌صورت المان‌های غیرمنظم

مثلثاتی شامل ۱۴۶۷۶۲ المان و ۷۴۶۹۸ گره است که توسط نرم‌افزار Bluekenue تهیه شد (شکل ۲).



شکل ۲: بزرگ‌نمایی شبکه‌بندی و توپوگرافی محدوده موردمطالعه بر اساس مختصات UTM

۲-۱-۲ داده‌های جزرومدی

برای اعمال داده‌های جزرومدی به مرز باز در مدل با توجه به منطقه موردمطالعه از پایگاه TPXO استفاده شد. دقت داده‌های این پایگاه برای منطقه خلیج‌فارس حدود ۲ کیلومتر است.

۲-۱-۳ شرایط مرزی

اعمال داده‌های جزرومدی به مدل مستلزم شرایط مرزی مناسب می‌باشد. در مدل منطقه‌ای خلیج بوشهر، شرایط مرزی ثابت در زمان به همراه سه مرز باز با ارتفاع آب h و مولفه های افقی سرعت u و v، در نظر گرفته شد که شامل مرز شمال غربی، جنوب شرقی و جنوب غربی است.

۳. نتایج و بحث

جهت کالیبراسیون مدل جزر و مدی، داده‌های اندازه‌گیری تراز آب و سرعت جریان در منطقه مورد مطالعه در طول جغرافیایی ۴۸۰۸۲۰ و عرض جغرافیایی ۳۲۱۰۱۷۸ از پایگاه داده مشخصه‌های دریایی دریافت شد. مدلسازی جزر و مد در مدل TELEMAC-2D مستلزم کالیبره چهار ضریب دامنه جزرومد[1]، تراز آب[2]، تغییرات سرعت[3] و اصطکاک[4] بستر است که این چهار ضریب با در نظر گرفتن محدوده پیش فرض مدل، در منطقه مورد مطالعه برای ۱۵ روز از تاریخ ۲۰۱۱/۰۸/۰۱ کالیبره شدند. برای صحت سنجی، داده‌های تراز آب و سرعت جریان حاصل از مدل با داده‌های اندازه گیری میدانی در منطقه در همان بازه زمانی مورد مقایسه قرار گرفتند. مقادیر ضرایب کالیبراسیون جهت مشخص نمودن بهترین ضریب کالیبره، در محدوده ضرایب توصیه شده توسط مدل و تغییر آن با توجه به منطقه خلیج بوشهر به شیوه‌ی آزمون‌وخطا با اجرا گرفتن مکرر مدل و مقایسه نتایج سری زمانی خروجی‌های هر ضریب کالیبره با مقادیر اندازه‌گیری انتخاب شدند در جدول ۱ به برخی از تغییرات ضرایب انتخاب‌شده جهت کالیبراسیون از میان تعداد زیادی اعداد انتخابی که اجرا گرفته شد، اشاره شده است. با بررسی عدد کورانت برای پایداری مدل ($\sigma = C\frac{\Delta t}{\Delta x} < 1$)، گام زمانی ۳۰ ثانیه برای اجرا، انتخاب شد. با توجه به تاریخ داده‌های در دسترس تراز آب و سرعت جریان در منطقه، مدت‌زمان اجرای مدل، ۱۵ روز از تاریخ ۲۰۱۱/۰۸/۰۱ در نظر گرفته شد. ازجمله تنظیمات دیگر در نظر گرفته‌شده، صرف‌نظر از نیروی کوریولیس با توجه به وسعت منطقه مورد مطالعه است. برای بررسی دقیق‌تر میزان درستی داده‌های محاسبه شده توسط مدل نسبت به داده‌های اندازه‌گیری از پارامترهای آماری RMSE[5] و ضریب همبستگی پیرسون[6] در این پژوهش استفاده شد.

با توجه به جدول ۱ سرعت جریان در خلیج بوشهر به ضرایب اصطکاک بستر و تغییرات سرعت جریان حساسیت دارد در صورتی که به ضرایب دامنه جزر و مد و میانگین تراز آب حساسیت قابل توجهی نشان نداد.

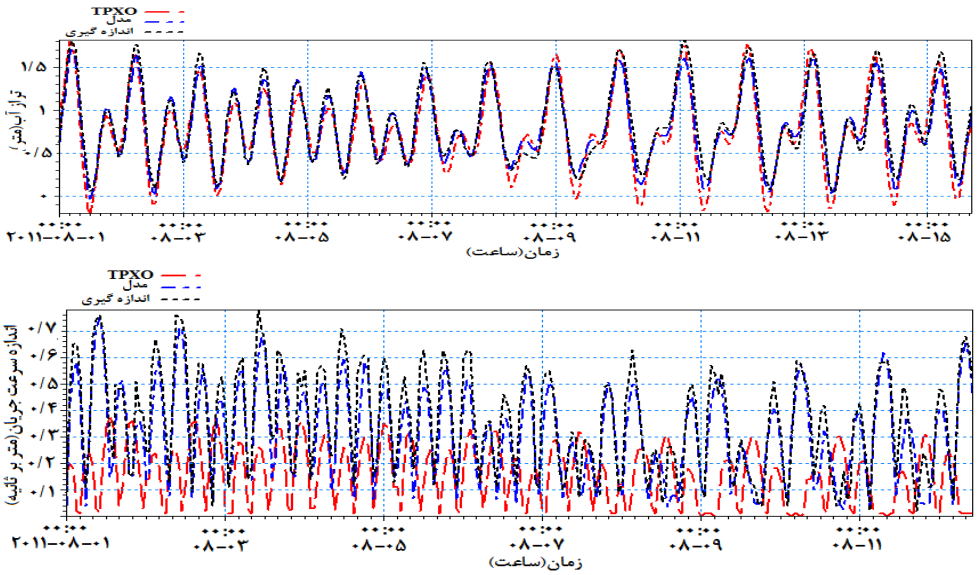
در شکل ۳، مقایسه سری زمانی تراز آب و سرعت جریان مدل با مناسب‌ترین ضرایب در طول جغرافیایی ۴۸۰۸۲۰ و عرض جغرافیایی ۳۲۱۰۱۷۸ ، مقادیر پیش بینی شده پایگاه جهانی TPXO و مقادیر متناظر اندازه‌گیری نشان داده شد.

با توجه به شکل ۳، و پارامترهای آماری جدول ۲ داده‌های تراز آب و سرعت جریان حاصل از مدل همپوشانی بیشتری با داده‌های اندازه گیری متناظر در منطقه نسبت به داده‌های پایگاه جهانی TPXO داشت. مدل با وجود ورودی مرزی با درصد خطا و اختلاف نسبت به اندازه‌گیری توانسته سطح تراز و جریان ناشی از جزرومد را به‌خوبی پیش‌بینی کند.

[1] Tidal range
[2] water level
[3] Velocity range
[4] friction
[5] Root Mean Square Error
[6] Correlation Coefficient

جدول ۱: کالیبراسیون مدل جزرومدی

	ضریب میانگین تراز آب (m)	ضریب دامنه جزرومد (m)	ضریب اصطکاک بستر ($m^{1/2}s^{-1}$)	ضریب تغییرات سرعت جریان (m/s)	RMSE تراز آب	RMSE سرعت جریان	همبستگی تراز آب	همبستگی سرعت جریان
تغییر ضریب میانگین تراز آب	۰/۸	۰/۹۸	۵۰	۱/۱	۰/۰۷۳۹	۰/۰۵۹۶	۰/۹۸۲۳	۰/۹۲۷۷
	۰/۹				۰/۰۷۱۱	۰/۰۵۵۸	۰/۹۸۸۸	۰/۹۳۳۵
	۱/۱				۰/۱۷۷	۰/۰۵۹۹	۰/۹۸۲۲	۰/۹۲۸۹
تغییر ضریب دامنه جزر و مد	۰/۹	۰/۸	۵۰	۱/۱	۰/۰۷۰۵	۰/۰۷۱۴	۰/۹۸۲۰	۰/۹۳۱۲
		۰/۹۸			۰/۰۷۱۱	۰/۰۵۵۸	۰/۹۸۸۸	۰/۹۳۳۵
		۱/۳			۰/۰۷۷۳	۰/۰۶۶۵	۰/۹۸۰۳	۰/۹۲۸۷
تغییر ضریب اصطکاک بستر	۰/۹	۰/۹۸	۴۰	۱/۱	۰/۰۷۹۳	۰/۰۵۹۱	۰/۹۸۰۹	۰/۹۲۵۷
			۵۰		۰/۰۷۱۱	۰/۰۵۵۸	۰/۹۸۸۸	۰/۹۳۳۵
			۶۰		۰/۰۷۳	۰/۰۶۰۲	۰/۹۸۲۰	۰/۹۲۶۰
تغییر ضریب تغییرات سرعت جریان	۰/۹	۰/۹۸	۵۰	۰/۵	۰/۰۷۸۸	۰/۰۵۷	۰/۹۸۱۹	۰/۹۰۹۵
				۱/۱	۰/۰۷۱۱	۰/۰۵۵۸	۰/۹۸۸۸	۰/۹۳۳۵
				۲	۰/۰۷۹۹	۰/۰۵۶۸	۰/۹۷۵۶	۰/۹۱۷۸
مقادیر نهایی	۰/۹	۰/۹۸	۵۰	۱/۱	۰/۰۷۱۱	۰/۰۵۵۸	۰/۹۸۸۸	۰/۹۳۳۵



(الف)

(ب)

شکل ۳: مقایسه نوسانات الف) تراز آب ب) سرعت جریان مدل، پایگاه TPXO و مقادیر متناظر اندازه‌گیری

با توجه به مقدار عدد کشند (ماسل، ۲۰۱۲) که ۱/۱ محاسبه شد، رژیم جزرومدی مختلط غالبا نیم روزانه در خلیج بوشهر تعیین گردید.

جدول ۲: پارامترهای آماری برای تراز آب و سرعت جریان مدل و پایگاه جهانی TPXO

	تراز آب		سرعت جریان	
	همبستگی	RMSE	همبستگی	RMSE
پایگاه جهانی TRXO	۰/۹۳	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۲۰
مدل	۰/۹۸	۰/۰۷	۰/۹۳	۰/۰۵

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به مدلسازی تراز آب در خلیج بوشهر با استفاده از نرم‌افزار TELEMAC-2D پرداخته شد. نتایج کالیبراسیون مدل نشان دهنده حساسیت بالای مدل جهت مدلسازی جزرومد به مقیاس شبکه‌بندی و همچنین ضرایب دامنه جزرومد، میانگین تراز آب، تغییرات سرعت جریان و اصطکاک بستر در خلیج بوشهر بود که مقادیر نهایی این ضرایب به ترتیب با توجه به جدول ۱، ۰/۹۸ m، ۰/۹ m، ۱/۱ m/s و ۵۰ $m^{1/2}s^{-1}$ در نظر گرفته شد. نتایج خروجی تراز آب حساسیت بالایی به ضریب اصطکاک بستر و تغییرات سرعت جریان نشان نداد در صورتی که نتایج خروجی سرعت جریان به این ضرایب حساسیت داشت در نتیجه برای مدلسازی جزرومد با استفاده TELEMAC-2D کالیبره هر چهار ضریب الزامی می‌باشد.

مدل‌های متنوع کشندی در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای در دسترس هستند. در این تحقیق ضمن معرفی مدل جهانی TPXO،

نشان داده شد که این مدل به تنهایی قادر به فراهم کردن تمام اطلاعات لازم و کافی جزرومدی در خلیج بوشهر نمی‌باشد. مقایسه سری زمانی تراز آب حاصل از این مدل با سری زمانی پایگاه جهانی TPXO با داده‌های اندازه‌گیری در منطقه نشان داد که مدل telemac نسبت به پایگاه TPXO دارای خطای کمتری است. از طرفی مدل جهانی TPXO برای تراز آب خلیج بوشهر پیش بینی قابل قبولی با همبستگی ۹۳ درصد را ارایه می‌دهد در صورتی که سرعت جریان با همبستگی ۲ درصد پیش بینی غیر قابل قبولی بود. نتایج مقایسه‌ای آماری مدل و اندازه‌گیری نشان‌دهنده همبستگی خوب ۹۸ درصد تراز آب و ۹۳ درصد سرعت جریان بود و مدل با وجود ورودی مرزی با درصد خطا و اختلاف زیاد نسبت به اندازه‌گیری توانسته سطح تراز و سرعت جریان ناشی از جزرومد را به‌خوبی پیش بینی کند.

یکی از مزایای این مدل تعیین ضریب اصطکاک بستر در خلیج بوشهر می‌باشد، زیرا یافتن این ضریب به دلیل جنس بستر منطقه به راحتی ممکن نمی‌باشد و با توجه به تطابق خوبی که بین مدل Telemac و داده‌های اندازه‌گیری در خلیج بوشهر دیده شد می‌توان نتیجه گرفت که مدل Telemac مدل مناسب و کاربردی در خلیج بوشهر است.

منابع

اداره بنادر و دریانوردی کل استان بوشهر، https://bushehrport.pmo.ir

اکبری، پ.، صدری نسب،م.، چگینی، و.، و سیادت موسوی، س.، (۱۳۹۵). مطالعه و بررسی توزیع دامنه مؤلفه‌های جزرومدی در خلیج‌فارس، دریای عمان و دریای عرب با استفاده از شبیه‌سازی عددی، مجله علوم و فنون دریایی.

آزموده اردلان، ع.، و طوریان، م. (۱۳۸۹). مدل سازی جزرومد در دریای عمان و خلیج‌فارس با استفاده از داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای و تایدگیج های ساحلی. مجله فیزیک زمین و فضا، شماره ۳، دوره ۳۶، ص. ۲۵-۱۵.

پایگاه داده‌های جزرومدی TPXO، http://volkov.oce.orst.edu/tides

ربیعی‌فر، ح.، باقری، ن.، (۱۳۹۱)، مدل‌سازی تغییرات جزرومد (با مطالعه موردی در بندر شهید رجایی)، دومین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، تهران، منطقه ویژه اقتصاد انرژی پارس جنوبی.

سازمان بنادر و دریانوردی، https://www.pmo.ir

Bamunawala, J., Ranasinghe, R., van der Spek, A., Maskey, S., Udo, K., 2018. Assessing Future Coastline Change in the Vicinity of Tidal Inlets via Reduced Complexity Modelling. Journal of Coastal Research, 85(sp1), 636-640. https://doi.org/10.2112/SI85-128.1

Batica, J., Gourbesville, P., Erlich, M., Coulet, C., Mejean, A., 2018. Xynthia Flood, Learning from the Past Events—Introducing a FRI to Stakeholders. In Advances in Hydroinformatics, 607-619. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7218-5_43

Blunden, L. S., & Bahaj, A. S. 2006. Initial evaluation of tidal stream energy resources at Portland Bill, UK. Renewable Energy, 31(2), 121-132. https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.016

Chen, W. B., Liu, W. C., & Hsu, M. H. 2013. Modeling evaluation of tidal stream energy and the impacts of energy extraction on hydrodynamics in the Taiwan Strait. Energies, 6(4), 2191-2203. https://doi.org/10.3390/en6042191

El-Diasty, M., Salim,a., Spiros,P.,2018. Hybrid harmonic analysis and wavelet network model for sea water level prediction. Applied Ocean Research, 70 (2018): 14-21. https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.11.007

Karabil, S. I. T. A. R., 2011. Determination of sea level trends and vertical land motions from satellite altimetry and tide gauge observations at the Mediterranean coast of Turkey(Doctoral dissertation.Master thesis. Middle East Technical University. Ankara, Turkey.

Lee, H. J., Do, J. D., Kim, S. S., Lim, H. S., 2018. Sands Escaping Haeundae Beach. Journal of Coastal Research, 85(sp1), 1006-1010. https://doi.org/10.2112/SI85-202.1

Manbaliu, J.; Choudhur, A.; Nolivos Alvarez, I., 2009. N 2d hydrodynamic modelling of a tidal inlet using

telemac. case study of “de ijzermonding. Bachelor's thesis.

Massel, S. R. (2012). Fluid mechanics for marine ecologists. Springer Science & Business Media.

Mohd, F. A.; Maulud, K. A.; Rahman, A. A.; Ibrahim, M. A.; Awang, N. A.; Rahim, N. A.; Razak, A. A, 2018. Evaluation and verification of numerical modelling of nearshore changes due to waves and currents parameter in Carey Island, Malaysia. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. june. Vol. 169, No. 1, p. 012054.
https://doi.org/10.1088/1755-1315/169/1/012054