

# تاثیر جزر ومد بر رفتار بلند مدت مورفولوژی در حوضچه وسیع جزر و مدی-مطالعه موردی خور موسی

محمد فیاض<sup>۱</sup>، مهدی شفیعی فر<sup>۲\*</sup>، علی دستغیب<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری عمران سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران تربیت مدرس؛ m.fayyaz@chmail.ir  
<sup>۲</sup> عضو هیئت علمی و مدیر گروه سازه‌های دریایی دانشکده عمران دانشگاه تربیت مدرس؛ shafiee@modares.ac.ir  
<sup>۳</sup> عضو هیئت علمی و مدیر گروه آب UNESCO-IHE دلفت هلند؛ a.dastgheib@gmail.com

## چکیده

## اطلاعات مقاله

رفتار مورفولوژیکی حوضچه‌های جزرو مدی و خورها معمولاً با برخی روابط تجربی مبتنی بر مشاهدات عینی فرموله می‌شوند. اگرچه روابط تجربی موجود برخی الگوهای مورفولوژی را توصیف می‌نمایند؛ ولی قابل تعمیم به شرایط پیچیده نمی‌باشند و به دلیل کمبود مشاهدات برای مناطق مختلف با شرایط مورفولوژی گوناگون، اعتبار محدودی دارند. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در توسعه مدل‌های عددی، در حال حاضر مدل‌های فرآیند محور بلند مدت مورفولوژی قادر به شبیه‌سازی رفتار مورفولوژیک حوضچه‌های جزر و مدی وسیع در بازه زمانی طولانی هستند. هدف از این مطالعه ارزیابی تاثیر نیروی جزر و مد بر تعادل مورفولوژی با برپاسازی آزمایشگاهی عددی و تولید داده‌های کافی در مورد حوضچه جزر و مدی خور موسی می‌باشد. در این راستا پارامترهای مهم رسوبی ارزیابی گردیده و سپس رفتار بلند مدت مورفولوژیک خور موسی تحت نیروی جزر و مدی ارزیابی شده است. با توجه به هزینه محاسباتی مدل‌های بلند مدت و همچنین تعداد زیاد مدل‌های مورد نیاز، در این تحقیق از روش‌های بهینه‌سازی جهت طراحی سناریوهای مورد نیاز آزمایشگاه عددی استفاده شده است. پاسخ سناریوها با استفاده از روش‌های آماری تحلیل گردید تا تعریف جامعی از تاثیر جزر و مد بر تغییرات بلند مدت مورفولوژی ارائه گردد. مقایسه نتایج مدل و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد روش استفاده شده در این مقاله نتایج مدل بلند مدت مورفولوژی در شرایط مختلف را بهبود داده است؛ در حالیکه از لحاظ زمان محاسبات نیز کارآمد می‌باشد.

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۴  
 تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۹

کلمات کلیدی:

مدلسازی بلند مدت  
 مورفولوژی  
 واقعیت مجازی  
 شبیه‌سازی واقع‌گرایانه

## Tidal Effects on Long-Term Morphology Behavior in Large Tidal Basin- Case Study of Musa Estuary

Mohammad Fayyaz<sup>1</sup>, Mehdi Shafieefar<sup>2\*</sup>, Ali Dastgheib<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Candidate of Hydraulic Structure, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran; [M.fayyaz@chmail.ir](mailto:M.fayyaz@chmail.ir)

<sup>2</sup> Professor of Civil Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran; [shafieefar@chmail.ir](mailto:shafieefar@chmail.ir)

<sup>3</sup> Assistant Professor of UNESCO-IHE, Delft, Netherlands; [a.dastgheib@gmail.com](mailto:a.dastgheib@gmail.com)

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received: 13 May. 2016  
 Accepted: 28 Jan. 2017

#### Keywords:

Long-Term Simulation  
 Morphology  
 Statistical Approach  
 Realistic  
 Deterministic

### ABSTRACT

Tidal basins have been formulated by some empirical relations based on field observations. Although empirical relations explain some morphological patterns, they are not applicable to all conditions. This study aims to evaluate the effects of morphological parameters on tidal basin equilibrium by setting up a numerical lab for the case of Musa Tidal Basin (MTB). In order to assess the morphology pattern which is affected by parameter values and to reduce the computational cost of long-term models, efficient scenarios are designed to optimize the number of runs. Then the responses are analysed by statistical approaches to define comprehensive effects of those parameters on the simulated morphological equilibrium. This methodology improves the long-term results in different conditions, which is confirmed by the comparison of the output and measured data.

حوضچه‌های جزر و مدی اصطلاحاً به حوضچه‌های تشکیل شده با پشته‌های رسوبی یا دهانه رودخانه‌ها اطلاق می‌شود. سیستم حوضچه‌های جزر و مدی را می‌توان به دو گروه با پشته رسوبی و رودخانه‌ای تقسیم نمود. حوضچه‌های با پشته رسوبی پس از شکاف بخشی از یک پشته تشکیل شده در حالیکه نوع رودخانه‌ای آن پس از استغراق دهانه یک رودخانه تشکیل می‌شود [۱]. حوضچه‌های جزر و مدی بخش مهمی از سواحل دنیا را تشکیل می‌دهند که معادل ۱۰-۱۳٪ خطوط ساحلی است [۲]. حوضچه‌های جزر و مدی دارای اهمیت فراوانی به لحاظ اقتصادی (برای نمونه با فراهم کردن بنادر طبیعی، آبراهه‌های سرزمینی، نواحی تفریحی و منابع سرزمینی)، و زیستی (به لحاظ فراهم نمودن زیستگاه جانوران دریایی، پرندگان مهاجر و منابع تغذیه آبزیان) می‌باشند [۳].

به دلیل بازه وسیع مقیاس‌های زمانی و مکانی و پارامترهای مورفولوژی متعدد، رفتار حوضچه‌های جزر و مدی پیچیده می‌باشند. اگرچه کل سیستم حوضچه (بزرگ مقیاس) و المان‌های مورفولوژی (ریز مقیاس) پاسخ‌های متفاوتی دارند [۴]، تغییرات مقیاس مکانی به رفتار ریز مقیاس‌ها و به عبارتی به پارامترهای رسوبی بستگی دارد. تغییر محدود در هر یک از پارامترها می‌تواند منجر به تغییر کلی الگو و مقادیر گردد. برای پیش‌بینی پاسخ‌های مورفودینامیک و اتخاذ تصمیمات راهبردی درک کاملی از رفتار المان‌ها و پارامترهای حوضچه‌های جزر و مدی ضروری است [۵-۹].

مقیاس‌های بزرگ زمانی و مکانی مدلهای بلند مدت اطلاعات جامعی را برای تصمیم‌گیران در زمینه مدیریت نواحی ساحلی فراهم می‌نماید. در طول چند دهه گذشته مدل‌های مختلف رفتاری و فرآیندی برای مشخص نمودن تعادل (که عبارت است از شرایط پایدار مورفولوژی در حوضچه جزر و مدی) و برای محاسبه تغییرات مورفولوژی در حوضچه‌های جزر و مدی توسعه یافته‌اند. مدل رفتاری با استفاده از روابط تجربی توسعه یافته خصوصیات مورفولوژیک حوضچه جزر و مدی را تعریف می‌نماید. این خصوصیات در برگزیده ترکیبی از پارامترهای حوضچه نظیر رابطه  $P/A$  (حجم محصور شده بین حداکثر و حداقل تراز آب،  $A$ : مساحت حوضچه) برای مطالعه داخل حوضچه [۱۰-۱۷]،  $Af/Ab$  ( $Af$ : مساحت ناحیه بین جزر و مدی<sup>۱</sup>،  $Ab$ : مساحت حوضچه) برای ارزیابی ناحیه بین جزر و مدی [۱۱، ۱۸-۲۱]، تبادل رسوبی حوضچه برای تحلیل تمام نواحی حوضچه جزر و مدی [۲۲] و  $a/h$  و  $VS/VC$  (دامنه جزر و مد،  $h$ : عمق متوسط کانال‌های جزر و مدی،  $VS$ : حجم آب ذخیره شده در ناحیه بین جزر و مدی،  $VC$ : حجم کانال) برای مطالعه تشکیل کانال [۲۲-۲۵] می‌باشند. مدل‌های مبتنی بر تحلیل نیز همزمان به ابزاری قدرتمند تبدیل

شدند که توانایی تخمین تعادل بلند مدت مورفولوژی و محاسبه تغییرات را دارند. این مدل‌ها امکان شبیه‌سازی موارد متعددی نظیر تعادل حوضچه جزر و مدی [۲۶-۳۳]، انتقال رسوبات و تغییرات مورفولوژی ناشی از احداث سازه‌ها [۲۲]، تاثیر افزایش سطح آب دریا، تغییرات رژیم رودخانه‌ها، تغییرات رسوبات ورودی [۳۴]، مورفولوژی رودخانه و مصب‌ها در مقیاس‌های زمانی چند قرن [۲۸، ۳۵، ۳۶]، و تغییرات کانال جزر و مدی [۳۶، ۳۷] را دارند.

مدل‌های عددی بلند مدت مورفولوژی مبتنی بر فرآیند را می‌توان به دو روش اساساً متفاوت استفاده نمود: واقعیت مجازی<sup>۲</sup> و شبیه‌سازی واقع‌گرایانه<sup>۳</sup> [۳۸]. اغلب مدل‌ها قطعی هستند و واقعیت مجازی را ایجاد می‌کنند و در واقع فعل و انفعالات مورفولوژی را تا حد امکان نزدیک به واقعیت معرفی می‌کنند. Van der Wegen و Jaffe مطالعه کاملی را گزارش کردند که حتی شامل آنالیز حساسیت نیز می‌شود [۳۹]. ولی این روش اغلب به منظور انجام شبیه‌سازی<sup>۴</sup> در بازه زمانی گذشته استفاده می‌شود، در حالیکه نتایج مدل در برابر اطلاعات مشاهداتی کالیبره می‌شوند. بنابراین شرایط اولیه مدل ممکن است با روابط مدل که اغلب ساده سازی شده‌اند تطابق نداشته باشد. در نتیجه این روش مدل مورفولوژی را بر مبنای نتایج بازه زمانی گذشته متعادل می‌نماید و فرسایش یا رسوبگذاری ممکن است با الگوی مشاهداتی متفاوت گردیده و حتی آنالیز حساسیت نیز پاسخگو نباشد [۱]. در این مطالعه روش شبیه‌سازی واقع‌گرایانه بکار رفته و با استفاده از یک بتیمتری شماتیک تاثیر پارامترهای اصلی مورفولوژی بر تعادل مورفولوژیک حوضچه جزر و مدی تحلیل شده است. این مدل به الگویی نزدیک به واقعیت منتج می‌شود، ولی تضمینی برای مدل شدن صحیح تاثیرات پارامترها وجود ندارد، و همانطور که درانکر بیان کرد بررسی مجموعه‌ای از سناریوها برای قضاوت نسبت به تاثیرات پارامترهای مورفولوژی ضروری است [۱]. با توجه به هزینه محاسباتی بالای مدل‌های بلند مدت و محاسبات زیادی که میبایست برای پوشش دادن تمام تاثیرات مورفولوژی انجام شود، طراحی بهینه‌ای از سناریوهای مورد نیاز برای آزمایش بر مبنای الگوریتم D-Optimal بکار رفته تا تعداد مدلسازی‌ها بهینه شده و دقت افزایش یابد.

در این مطالعه حوضچه جزر و مدی خور موسی که از نوع با پشته رسوبی است برای مطالعه موردی انتخاب شده است. ابتدا بجای تلاش برای شبیه‌سازی دقیق شرایط، مدل برای بررسی فرآیند و تاثیر پارامترهای اصلی نظیر اندازه ذرات رسوبی  $d_{50}$ ، رسوبات در دسترس، چسبندگی و نتیجتاً بسیاری دیگر پارامترهای وابسته استفاده شد. نتایج با روابط تجربی مقایسه گردید، سپس با استفاده از متغیرهای آماری، مدل با بتیمتری اندازه‌گیری شده مقایسه و بهترین مقادیر پارامترهای مورفولوژی از طریق پروسه‌ای متشکل از

وسیعی از نواحی فعال جزر و مدی را از خلیج فارس جدا می‌نماید. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است این حوضچه جزر و مدی متشکل از دلتاهای فروکشی<sup>۶</sup> کم عمق و وسیعی است که با کانال‌های عمیق و کم عرض به یکدیگر متصل شده‌اند، چهار زیر حوضچه اصلی این خور در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این مطالعه تمام حوضچه جزر و مدی موسی شامل زیر حوضچه‌ها، دلتاهای فروکشی و کانال‌های جزر و مدی در نظر گرفته شده است. با وجود تمام مداخلاتی که توسط بشر یا طبیعت بر روی خور موسی اعمال شده است در این مطالعه نشان داده شد که این حوضچه جزر و مدی به تعادل نهایی خود رسیده است. همانگونه که در مطالعات دستغیب و همکاران، رنجر و پارتنزکی، ایسینک و ونگ و همکاران به صفر گراییدن تغییرات پارامترهای حوضچه جزر و مدی به عنوان شاخصی از تعادل نهایی معرفی گردیده [۹، ۱۱، ۱۹، ۲۲]، در این مطالعه نیز با استفاده از این پارامترها مشخص گردید خور موسی به تعادل نهایی خود رسیده و مداخلات طبیعی و غیر طبیعی تاثیر قابل توجهی بر تعادل نهایی خور ندارد. مداخلات انجام شده در خور موسی نسبت به حجم کل رسوبات به تعادل رسیده ناچیز بوده و تعادل را بر هم نمی‌زند. از اینرو می‌توان وضعیت فعلی خور را شکل به تعادل رسیده آن فرض نمود. در این شرایط می‌توان مشخصات المان‌های مورفولوژیک حوضچه‌های جزر و مدی را با استفاده از روابط تجربی بیان نمود.

روش‌های شبیه سازی حقیقی و قطعی انتخاب گردید. از اینرو می‌توان هدف از این تحقیق را بصورت زیر خلاصه نمود:

- ۱- ارزیابی تاثیر پارامترهای اصلی رسوبی بر تغییرات بلند مدت مورفولوژی با استفاده از سناریوهای طراحی شده برای آزمایشگاه عددی خور موسی.
- ۲- درک رفتار مورفولوژیک بلند مدت خور موسی از طریق تحلیل‌های آماری.
- ۳- شبیه‌سازی بلند مدت مورفولوژی خور موسی با روش واقع گرایانه.

## ۲- روش انجام مطالعه

هدف از این تحقیق ارزیابی تاثیر مولفه هیدرودینامیک جزر و مد بر تعادل مورفولوژی بلند مدت است. حوضچه جزر و مدی خور موسی به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد و تاثیر این مولفه بر پارامترهای اصلی مورفولوژی در شرایط تعادلی با استفاده از مدلسازی ۶۵ سناریوی بهینه شده تحلیل گردید. بعلاوه شرایط تعادل خور موسی با مقایسه نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری و همچنین روابط تجربی تعریف گردید.

### ۲-۱- محدوده مورد مطالعه

خور موسی در محدوده انتهایی شمال غربی خلیج فارس قرار گرفته و بخشی از سواحل جنوبی ایران را تشکیل می‌دهد که در بر دارنده بنادر متعدد و مهمی می‌باشد. این سیستم پشته جزیره‌ای<sup>۵</sup> بخش

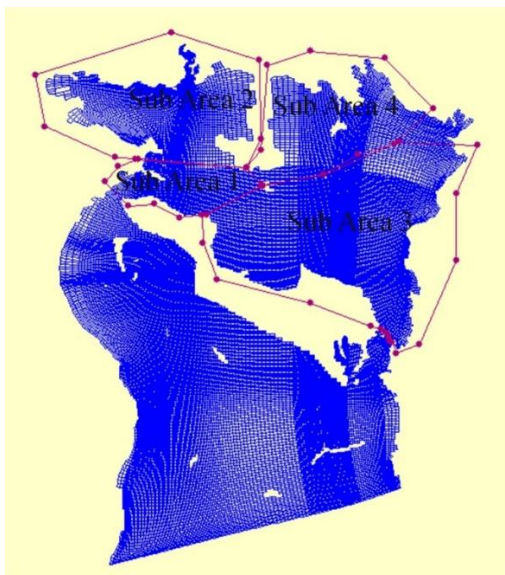


شکل ۱- موقعیت حوضچه خور موسی (طول ۴۹/۱ و عرض ۳۰/۴ درجه). خطوط مشخص کننده مرزهای چهار زیر حوضه اصلی می‌باشند. خور موسی از طریق کانال غربی که تا پایین تصویر ادامه یافته به خلیج فارس متصل شده است.

چند قرن با استفاده از MORFAC شبیه سازی نمودند [۳۲]. دستغیب و همکاران این روش را به منظور مدلسازی تاثیر احداث سد بر مورفولوژی حوضچه جزر و مدی Wadden Sea استفاده نمود [۲۲]. در این روش تغییرات تراز بستر در هر گام زمانی هیدرودینامیک با استفاده از ضریب شتاب دهنده مورفولوژیک که MORFAC نامیده می شود افزایش می یابد [۴۶].

### ۲-۳- محدوده مدل

محدوده مدل خور موسی بگونه ای انتخاب شده است که تمام محدوده موثر بر تغییرات مورفولوژیک پوشش داده شود. این محدوده تمام ناحیه مرطوب در زمان بیشترین مد بالا (MHHW) را در بر می گیرد. از اینرو اندازه مش ها در نواحی مختلف بگونه ای انتخاب شده است که نواحی خشک و مرطوب شونده شامل تمام کانال های فعال، جزایر و مرزها در یک دوره کامل جزر و مدی مدلسازی گردند. در طرف مقابل افزایش کوچکی در تعداد سلول های شبکه بندی مدل های بلند مدت، زمان محاسبات را بطور قابل ملاحظه ای افزایش می دهد. برای نمونه، دو برابر نمودن تعداد مش ها منجر به افزایش پنج برابری زمان محاسبات می گردد. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است نتیجه بهینه با حفظ ۶۴۰۰۰ سلول و انتخاب اندازه سلول ها به میزان ۵ تا ۵۰۰ متر به دست آمد.



شکل ۲- شبکه بندی مستطیلی خور موسی که در محیط Delft3D تهیه شده است. تعداد بهینه سلول ها تعادل بین هزینه محاسباتی و دقت مدلسازی بلند مدت پدیده های مهم را برقرار می نماید.

### ۲-۴- شرایط مرزی

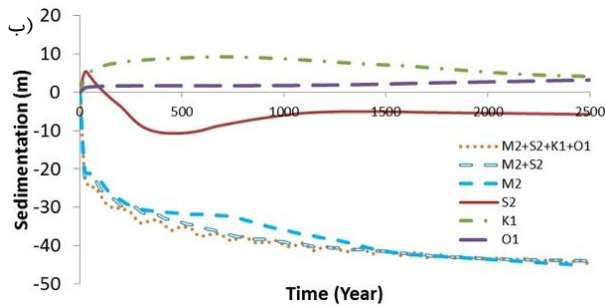
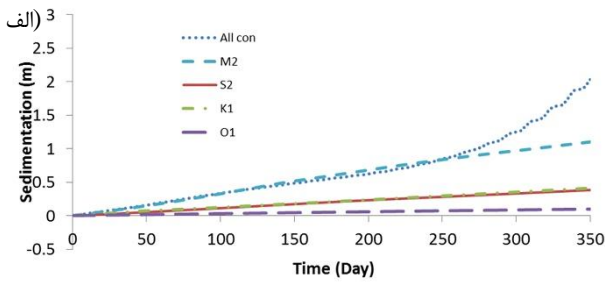
در میان نیروهای هیدرودینامیک، جزر و مد موثر ترین نیرو بر مورفولوژی حوضچه های جزر و مدی است [۳۱]. تاثیر برخی نیروها

حوضچه جزر و مدی موسی از شرایط منحصر بفردی به لحاظ اندرکنش انواع رسوبات برخوردار است. رسوبات چسبنده در کنار غیر چسبنده موجب گردیده تا دلتاهای فروکشی با شاخاب های کشندی متعدد، عمیق و کم عرضی به یکدیگر متصل شده و ناحیه مورفولوژیک به شدت فعالی را در طول شکل گیری، تکامل و به تعادل رسیدن این خور داشته باشد. در ورودی این محدوده ایستگاه جزر و مدی وجود دارد که تغییرات سطح آب و ثابت های هارمونیک جزر و مدی را با دقت قابل قبولی ارائه می نماید. همچنین عملیات هیدروگرافی کاملی مربوط به سال ۱۳۸۳ از تمام نواحی این محدوده در دسترس است که به منظور صحت سنجی نتایج مدل مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۲-۲- شرح و برپاسازی مدل

از مدل عددی دو بعدی متوسط گیری شده در عمق Delft3D جهت مدلسازی استفاده شده که جزئیات بیشتر از این مدل توسط لسر و همکاران ارائه شده است [۴۰]. این مدل می تواند با استفاده از روش تفاضل محدود و شبکه بندی منحنی الخط معادلات پیوستگی و ممنتوم را حل نموده و تغییرات هیدرودینامیک و مورفولوژیک را در مقیاس های زمانی متفاوت محاسبه نماید. انتقال رسوب به شکل بار بستر و بار معلق یکجا و با استفاده از روابط انگلاند هسنن همانطور که توسط دستغیب شرح داده شده است مدلسازی گردید و تبادل رسوبات با بستر از رابطه اکسنر محاسبه می شود [۲۲]. با توجه به اهمیت مدلسازی همزمان رسوبات چسبنده و غیر چسبنده جهت ارزیابی تاثیر هر یک و اندرکنش آنها با یکدیگر بر شکل نهایی تعادل مورفولوژی از روش ون لدن استفاده شده است [۴۱]. ون کسل و همکاران این روابط را در مدل Delft3D بکار گرفتند [۴۲].

مدل می تواند جهت محاسبه تغییرات هیدرودینامیک و مورفولوژیک در مقیاس های زمانی مختلف استفاده گردد. با در نظر گرفتن سه زیر مدل اصلی هیدرودینامیک (شامل موج، باد و جزر و مد)، انتقال رسوب و مورفولوژی، مدل های بلند مدت با تکنیکی فاصله موجود بین مقیاس زمانی هیدرودینامیک و مورفولوژی را مرتبط می نماید. از میان تکنیک های مدلسازی بلند مدت، همانطور که رولونیک و همکاران گزارش کردند [۲۰]، روش آنلاین دارای بهترین پایداری، دقت و توان کوپل نمودن است. این روش توسط محققین مختلفی استفاده شده است: رنیز و همکاران این روش را برای مدلسازی نحوه توسعه مورفولوژی نزدیک ساحل بکار گرفت [۴۳]، گرونو و همکاران این روش را که به روش آنلاین MORFAC نیز شناخته شده است برای شبیه سازی شکل گیری مورفولوژی سواحل در معرض تغذیه رسوبی استفاده نمود [۴۴، ۴۵]، ون در وگن و رولونیک شکل گیری حوضچه جزر و مدی شماتیکی را در طول



شکل ۳- نتایج مدل‌سازی رسوبگذاری تجمعی در زیر ناحیه ۱ با استفاده از شرایط مرزی مختلف جزر و مدی در دو مقیاس زمانی الف) کوتاه مدت، ۱ ساله و ب) بلند مدت، ۲۵۰۰ ساله.

## ۲-۵- ترکیب رسوبات

وضعیت فعلی رسوبات در نواحی مختلف متأثر از شرایط اولیه محدوده مورد مطالعه است که در طولانی مدت تحت تاثیر نیروهای هیدرودینامیک قرار گرفته و به تعادل رسیده است. مشکل اصلی عمده مناطق ساحلی عدم اطلاع از تاریخچه زمانی رسوبات تمام محدوده است.

جهت غلبه بر این مشکل و استحصال ترکیب رسوبات در شرایط اولیه میبایست از یک حدس اولیه توأم با یک عملیات سعی و خطا در مدل‌سازی استفاده نمود. با توجه به توانایی مدل‌های بلند مدت در رسیدن به شرایط پایدار، تاثیر استفاده از ترکیبات رسوبی مختلف به عنوان شرایط اولیه در نواحی متنوع مورد ارزیابی قرار گرفت.

بستر خور موسی شامل رسوبات چسبنده و غیر چسبنده است. بازه وسیعی از قطر متوسط ذرات،  $d_{50}$ ، و مقادیر مختلفی از نسبت رسوبات چسبنده به کل رسوبات در محاسبات استفاده شده است تا تاثیر ترکیب رسوبات در شرایط اولیه ارزیابی گردد. همانطور که در جدول (۱) تقسیم بنده شده است، مقادیر  $d_{50}$  شامل بازه ۰،۰۶ تا ۰،۳ بوده و نسبت رسوبات چسبنده به کل از ۰ تا ۹۰٪ می‌باشد که بازه‌ای جامع از ترکیب رسوبات بستر را ارائه کرده است.

## ۲-۶- بتیمتری اولیه

مولفه دیگری که می‌تواند بر تعادل نهایی مورفولوژیک حوضچه جزر و مدی اثر گذارد حجم رسوب در دسترس و یا بتیمتری اولیه است. عمق یا بتیمتری اولیه با اثر گذاری بر سرعت جریان و تنش برشی

نظیر باد، امواج و جریان‌های مربوطه در طول موجگاه کم قابل صرف نظر می‌باشند [۴۷]. مطابق نتایج مدل‌سازی جندقی و همکاران بیشترین سرعت جریان تولید شده از باد  $0.15 \text{ m/s}$  است، همچنین بیشترین ارتفاع موج مشخصه  $0.4 \text{ m}$  با احتمال رخداد پایین می‌باشد که منجر به سرعت جریان کم و انتقال رسوب ناچیزی می‌گردد [۴۸].

مفهوم جزر و مد مشخصه مطابق مطالعه لتکس در این مطالعه استفاده شده است [۴۹]. جزر و مد مشخصه جزر و مدی شماتیک است که تغییرات مورفولوژی شبیه به یک سیکل کامل جزر و مد واقعی را تولید می‌کند.

بر اساس اندازه‌گیری‌ها و تحلیل جزر و مد [۵۰]، چهار مولفه اصلی جزر و مدی تعریف گردید. ضریب MORFAC تغییرات بستر در مدل‌سازی بلند مدت را با ضریبی که مرتبط کننده فاصله بین مقیاس زمانی مورفولوژی و زیر مدل‌های هیدرودینامیک است چند برابر می‌نماید. از اینرو یک روش مناسب جهت ارزیابی نتایج، مقایسه تغییرات بتیمتری در دراز مدت می‌باشد. نتایج مدل‌سازی که از یک بستر صاف شروع شده و تاثیر استفاده از مولفه‌های جزر و مدی مختلف بر رسوبگذاری تجمعی در یک ناحیه به شدت فعال رسوبی (زیر ناحیه ۱) در شکل (۳-الف) و (۳-ب) به ترتیب برای کوتاه مدت و بلند مدت نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۳-ا) ملاحظه می‌شود تغییرات مورفولوژی ناشی از تمام مولفه‌های جزر و مدی در کوتاه مدت به دلیل ورود رسوبات به حوضچه رخ می‌دهد، اگرچه تاثیر این ضرایب در بلند مدت متفاوت است. ضرایب روزانه  $K_1$  و  $O_1$  منتج به ورود رسوبات همانند رفتار مدل کوتاه مدت شده است در حالیکه ضرایب نیم روزانه  $M_2$  و  $S_2$  منتج به خروج رسوبات می‌گردند.

در مدل‌سازی کوتاه مدت تنها الگوی رسوبگذاری  $M_2$  را می‌توان جزر و مد مشخصه معرفی نمود که به نتایج مدل‌سازی جزر و مد واقعی نزدیک است و سایر مولفه‌ها از الگوی واقعی فاصله دارند. عدم انطباق سایر مولفه‌ها در بازه‌های زمانی بزرگتر بیشتر شده است. در مدل بلند مدت (شکل (۳-ب))، الگوی رسوبگذاری ناشی از  $M_2$  به نتایج مدل‌سازی چهار مولفه نزدیک است و این دو الگو در دراز مدت همگرا شده‌اند. بنابراین در مطالعه حاضر مولفه  $M_2$  به عنوان جزر و مد مورفولوژی انتخاب گردید. اغلب دیگر مطالعات مورفولوژی نظیر آنچه توسط لتکس، جلفنبوم و همکاران و لسر گزارش شد، ضریب کالیبراسیون ۷ الی ۲۰٪ برای جزر و مد مورفولوژیک پیشنهاد گردید [۴۶، ۵۱، ۴۹]. در این مطالعه به دلیل تعدیل پارامترها در روش مدل‌سازی که شرح داده می‌شود نیازی به ضریب افزایشی وجود ندارد.

همچنین به منظور بررسی تاثیر عمق اولیه بر تعادل نهایی از ۶۵ آزمایش عددی مطابق جدول ۱ استفاده شده است. این آزمایش‌ها از عمق ۲ تا ۸ متر تشکیل شده است.

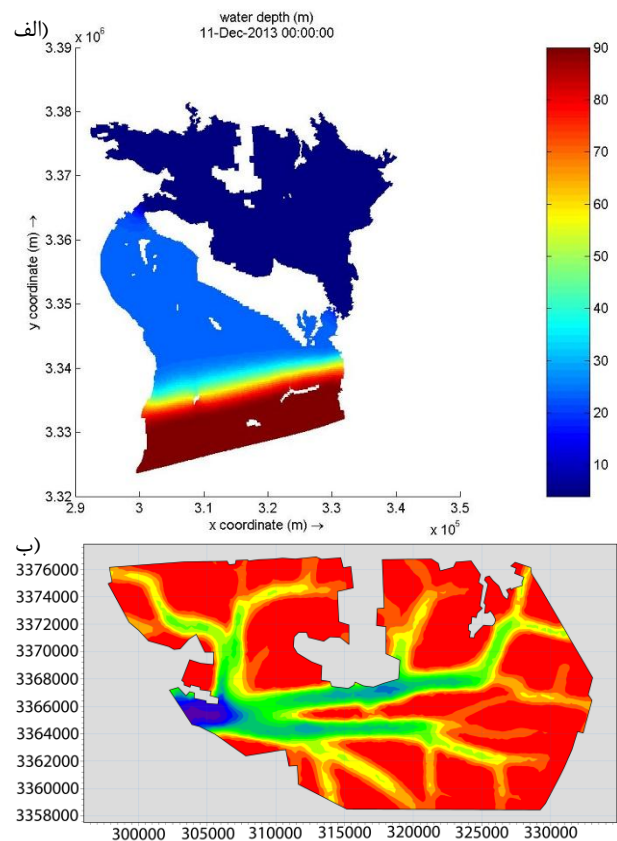
## ۲-۷- شرح محاسبات و بحث

همانطور که رولوپینک و رنیرز گزارش دادند، مدلسازی با پارامترهای اولیه دقیق قادر به مشخص نمودن تاثیر پارامترها نبوده و مجموعه‌ای از سناریوها جهت آنالیز مکانیزم و تاثیر پارامترهای مختلف لازم است [۳۸]. از اینرو روش Response Surface بر نتایج مدلسازی بلند مدت مورفولوژی اعمال شده تا ارتباط بین یک یا چند تابع پاسخ و مولفه‌های ورودی حساس را ارزیابی نماید. روش Response Surface یک مدل ریاضی را جهت پیش بینی تابع پاسخ تولید می‌نماید. جزئیات بیشتر به مطالعه اریکسون و همکاران و گز و دنو ارجاع داده می‌شود [۵۶، ۵۷].

به منظور مدلسازی تاثیر پارامترها بوسیله روش Response Surface، ابتدا الگوریتم D-Optimal جهت طراحی سناریوهای بهینه و بهبود دقت تابع پاسخ استفاده شده است. این الگوریتم آزمایش‌های مناسبی که برای افزایش دقت تابع پاسخ (که با پارامترهای حوضچه جزر و مدی جایگزین شده است) لازم است با تعریف ماتریس ضرایب (X) ارزیابی می‌کند. این ضرایب با به حداقل رسانی  $(X'X)^{-1}$  محاسبه می‌شود [۵۸]. سه مولفه اصلی اندازه متوسط ذرات، نسبت رسوبات چسبنده به غیر چسبنده و حجم رسوبات اولیه در دسترس به عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شد. این سه مولفه برخی پارامترهای رسوبی نظیر سرعت سقوط، تنش برشی بحرانی، تعلیق و اصطکاک بستر را بطور مستقیم و برخی پارامترهای حوضچه را که در ادامه به عنوان خصوصیات حوضچه‌های جزر و مدی مورد بحث قرار می‌گیرند غیر مستقیم تعریف می‌کنند. در مجموع ۶۵ سناریو طراحی و هر یک تا رسیدن به تعادل مورفولوژی اجرا گردید. محدوده سناریوها و خلاصه‌ای از نتایج در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. با استفاده از روش Response Surface تاثیر پارامترها و روند مکانیزم‌های مورفولوژی مدلسازی شده‌اند.

در بخش‌های بعد تاثیر استفاده از مقادیر مختلف خصوصیات رسوبی اولیه بر تعادل نهایی نشان داده شده است، تغییر برخی از پارامترها منجر به رنج وسیعی از تغییرات مورفولوژی نهایی می‌گردد. لذا میبایست با استفاده از معیاری تعادل نهایی واقعی را از

بستر بر رقابت بین نواحی مختلف در انتقال رسوب و رسیدن به تعادل نهایی تاثیر می‌گذارد. دیسانایک در مدلسازی بلند مدت حوضچه جزر و مدی و وندروگن در مدلسازی مصب از بتیمتری با عمق یکنواخت استفاده کردند [۵۲، ۵۳]. دستغیب و همکاران در مدلسازی خلیج waddensea و هاو جی در مدلسازی مصب رودخانه یانگتزه از بتیمتری با شیب اولیه یکنواخت استفاده کردند [۵۴، ۵۵]. اگرچه استفاده از بتیمتری نزدیک به بتیمتری واقعی نظیر مطالعه دستغیب و هاو جی زمان رسیدن به تعادل را کاهش می‌دهد ولی استفاده از بتیمتری مسطح امکان مشاهده و بررسی مکانیزم شکل‌گیری پدیده‌های مورفولوژیک را علاوه بر تعادل نهایی بستر ارائه می‌دهد. از اینرو در این تحقیق مطابق شکل ۴ از حوضچه مسطح درون حوضچه و از بستر شیبدار یکنواخت خارج از حوضچه و تا مرزهای مدل استفاده شده است.



شکل ۴-الف) هیدروگرافی شماتیک اولیه برای مدلسازی درون حوضچه از یک بتیمتری مسطح با عمق ۴ m استفاده شده است که توسط یک بتیمتری با شیب ملایم به خلیج فارس متصل شده است. ب) بتیمتری اندازه‌گیری شده در سال ۱۳۸۳ درون حوضچه خور موسی.

جدول ۱- بازه مقادیر پارامترهای ورودی برای سناریوهای طراحی شده

متغیر	نام	واحد	انحراف معیار	متوسط	بیشینه	کمینه
A	D <sub>50</sub>	mm	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۳	۰/۰۶
B	Mud ratio	%	۳۵/۶۸	۴۰/۰۷	۹۰	۰
C	Depth	m	۲/۲۳	۴/۶۵	۸	۲

جدول ۲- بازه مقادیر پاسخ سناریوهای طراحی شده

تعداد اجرا	کمینه	بیشینه <sup>۱۰٪</sup> *	متوسط <sup>۱۰٪</sup> *	انحراف معیار <sup>۱۰٪</sup> *	مدل	واحد	نام	پاسخ
۶۵	۵۰۰	۴۸/۲	۵/۲۴	۹/۰۹	Cubic	m3	V <sub>f</sub>	Y1
۶۵	۰	۳۶/۷	۱۲/۷	۱۲/۲	Cubic	m2	A <sub>f</sub>	Y2
۶۵	۵/۶۹*۱۰ <sup>-۸</sup>	۱۰۵/۱	۹۹/۸۶	۹/۰۸۷	linear	m3	P	Y3
۶۵	۵/۱	۰/۰۰۰۰۰۱	۹/۳۴	۲/۴۲	Cubic	m2	Ac	Y4

$$BSS = 1 - \frac{(\Delta vol_{mod} - \Delta vol_{meas})^2}{(\Delta vol_{meas})^2} \quad (1)$$

اندازه ذرات رسوبی اولیه  $d_{50}$ ، درصد رسوبات چسبنده و اندرکنش این پارامترها بر مورفولوژی نهایی با استفاده از ۶۵ سناریوی مدلسازی به عنوان آزمایشگاه عددی ارزیابی گردید. مدل‌های برون‌یابی به منظور استخراج تاثیر پارامترها استفاده گردید.

جدول ۳ تاثیر استفاده از مدل‌های مختلف برازش و به عبارتی بهبود تجمعی مدل‌ها را با استفاده از پارامترهای آماری نشان می‌دهد. برای مثال سطر سوم تاثیر اضافه نمودن ترم‌های غیر خطی بر مدل‌های قبلی شامل مقادیر متوسط گیری شده و ترم خطی را با استفاده از پارامترهای آماری جمع مجذور انحراف (ستون اول) و مقدار آزمون فرضیه P (ستون دوم) نشان می‌دهد. جمع مجذور انحراف جمع خطای مدل برازش داده شده به نتایج را نشان می‌دهد، همچنین در این مطالعه از آزمون فرضیه (P-Value) بجای آزمون‌های متداول نظیر همبستگی یا R-Squared جهت تعیین مدل نهایی برازش یافته به مقادیر پاسخ آزمایش‌های عددی استفاده شده است. آزمون‌های متداول، همبستگی  $R^2$  را بر مبنای نسبت تغییرات در تابع پاسخ  $\Delta Y$  به کل انحراف پاسخ  $(\Delta Y + \sigma)$ ، در گستره وسیعی از مقادیر محاسبه می‌کنند. از اینرو این آزمون‌ها اگرچه در آزمایش‌های با مقادیر  $\Delta Y$  بزرگ نسبت به مقادیر نویزها ( $\sigma$ ) مناسب عمل می‌کند ولی برای برآورد با دقت کافی در آزمون‌های با  $\Delta Y$  کوچک نسبت به نویزها، با خطای بالایی روبرو است و با محاسبه مقادیر کم همبستگی مدل‌های مناسب حذف می‌شوند. برای جلوگیری از این خطا نیاز به انجام آزمون‌های مکرر در برآورد شاخص می‌باشد. از اینرو در الگوریتم D-Optimal تعدادی از آزمایش‌ها برای بررسی احتمال وقوع صحت مدل‌های برازش داده شده تعیین می‌گردد که به آن آزمون فرضیه نیز گویند. به عبارت دیگر احتمال وقوع صحت مدل‌های برازش داده شده که تابعی از نتایج نمونه‌های مشاهده شده و مقدار آستانه سطح معنی داری آزمون (که بر اساس توصیه نوزو ۵٪ انتخاب گردید [۶۲]) است ارزیابی شده‌اند [۶۳]

میان این تعادل‌ها مشخص نمود. تعادل نهایی مورفولوژی شامل به محدود شدن تغییرات بتیمتری، جنس و ترکیب رسوبات بستر است. لذا معیاری نیاز است که همزمان تعادل این مولفه‌ها را ارزیابی نماید.

روش استفاده شده در این مطالعه در دو گام خلاصه شده است. ابتدا یکسری از آنالیز حساسیت‌ها به منظور ارزیابی جامع خصوصیات رسوبی انجام شده است. سپس بهترین شرایط اولیه برای هر یک از زیر نواحی با تحلیل مورفولوژی تعادلی و مقایسه با بتیمتری واقعی انتخاب گردیده است. به منظور تعیین خطای مدل بلند مدت مورفولوژی در استفاده از مقادیر مختلف پارامترهای رسوبی، بتیمتری خروجی مدل‌ها با هیدروگرافی اندازه‌گیری‌ها مقایسه شده است. استفاده از معیار مشخصی جهت سنجش میزان خطای ناشی از استفاده از مقادیر مختلف پارامترهای رسوبی الزامی است. سادرلند و همکاران و ونزاین و همکاران جهت ارزیابی نتایج مدل از پارامتر BSS مطابق رابطه (۱) استفاده نمودند و بر اساس مقادیر این پارامتر نتایج را از عالی تا ضعیف تقسیم بندی کردند [۵۹، ۶۰]. همانطور که وندروگن و همکاران و وندروگن و جف اشاره نمودند این پارامتر دارای خطای زیادی در برآورد الگوی رسوبگذاری بخصوص در دامنه تغییرات کم هستند [۲۱، ۳۹]. وندروگن و جف در مطالعه پارامترهای کالیبراسیون مدل نشان دادند تغییر کوچکی در موقعیت الگوی رسوبگذاری مدل شده منجر به تغییر زیادی در پارامتر BSS شده و در نهایت اگرچه ممکن است الگوی رسوبگذاری به سمت صحیحی میل کند ولی BSS توانایی تشخیص بهبود در الگوی نتایج را ندارد. از اینرو وندروگن و جف بر مبنای اصلاح ضریب CI که توسط فرچونتو و همکاران ارائه شد، معیار MPI را توسعه داده که مقادیر بالای آن نشان دهنده کارایی بهتر مدل به دلیل عدم قطعیت کمتر است [۶۱]. وندروگن و جف اگرچه توانستند با MPI خطای مقادیر احجام جابجا شده رسوبی را بهبود دهند ولی در این روش مقادیر هر سلول رسوبی مدل با مقادیر اندازه‌گیری سلول مقایسه می‌گردد که موجب خطای زیاد در برآورد الگوی صحیح است. در این مطالعه از شاخص BSS برای تعداد مشخصی از زیر نواحی استفاده شد و مقادیر  $\Delta Vol_{mod}$  و  $\Delta Vol_{mes}$  بجای محاسبه در هر سلول رسوبی بر روی هر زیر ناحیه مشخص انتگرال گیری شده و در رابطه (۱) اعمال می‌گردد.

جدول ۳- تاثیر تجمعی مدل‌های برون‌یابی بر پیش‌یابی مورفولوژی

مدل $V_f$			مدل P			مدل
مجموع مربعات	متوسط مربعات	شاخص p	مجموع مربعات $\times 10^{16}$ *	متوسط مربعات $\times 10^{16}$ *	شاخص p	
۲۸۰۵/۷۷	۲۸۰۵/۷۷		۵۹۸۳	۵۹۸۳		Mean vs Total
۴۹/۴۵	۱۶/۴۸	۰/۰۰۰۱	۹/۳۱	۳/۱	۰/۰۰۸	Linear vs Mean
۹/۱۸	۳/۰۶	۰/۰۷	۱/۰۳	۰/۳۴	۰/۷	2FI vs Linear
۳۴/۲۵	۱۱/۴۲	۰/۰۰۰۱	۳/۵۸	۱/۱۹	۰/۱۸۴	Quadratic vs 2FI
۱۶/۲۹	۱/۶۳	۰/۰۰۰۴	۶/۳۴	۰/۶۳۴	۰/۵۷	Cubic vs Quadratic
۱۵/۰۶	۰/۳۸		۲۹/۲۷	۰/۷۳		Residual
۲۹۳۰	۴۸/۸۳		۶۰۳۲	۱۰۰/۵		Total

مدل $A_f$			مدل $A_c$			مدل
مجموع مربعات $\times 10^{16}$ *	متوسط مربعات $\times 10^{16}$ *	شاخص p	مجموع مربعات	متوسط مربعات	شاخص p	
۹۶/۳	۹۶/۳		۵۲۳۱/۴۷	۵۲۳۱/۴۷		Mean vs Total
۶۲/۹	۲۱	۰/۰۰۰۱	۱۸۲/۶۴	۶۰/۸۸	۰/۰۰۰۱	Linear vs Mean
۱۰/۲	۳/۳۹	۰/۰۰۱۸	۲۲/۴۰	۷/۴۷	۰/۰۵۶	2FI vs Linear
۸/۰۷	۲/۶۹	۰/۰۰۱۸	۸/۷۳	۲/۹۱	۰/۳۷۹	Quadratic vs 2FI
۱۲/۷	۱۲/۷	۰/۰۰۰۲	۶۱/۶۰	۶/۱۶	۰/۰۰۰۴۲	Cubic vs Quadratic
۱۰/۶	۰/۲۶۵		۷۷/۰۹	۱/۹۳		Residual
۲۰۱	۳/۳۵		۵۵۸۳/۹۳	۹۳/۰۷		Total

جدول ۴- نتایج آماری مدل‌های برون‌یابی

مدل $V_f$			مدل P			مدل
انحراف معیار	مربعات R	مربعات تخمین زده شده R	انحراف معیار $\times 10^7$ *	مربعات R	مربعات تخمین زده شده R	
۱/۱۶	۰/۳۹۸	۰/۲۸۶	۸/۴۷۶	۰/۱۸۸	۰/۰۹۱۵	Linear
۱/۱۱	۰/۴۷۲	۰/۳۴۶	۸/۶	۰/۲۰۸۸	۰/۰۷۲۸	2FI
۰/۷۹	۰/۷۴۸	۰/۶۰۹	۸/۴۴	۰/۲۸۱۲	۰/۰۵۰۳	Quadratic
۰/۶۱	۰/۸۷۹	۰/۵۳۶	۸/۵۵۴	۰/۴۰۹۲	-۰/۴۴۱۴	Cubic

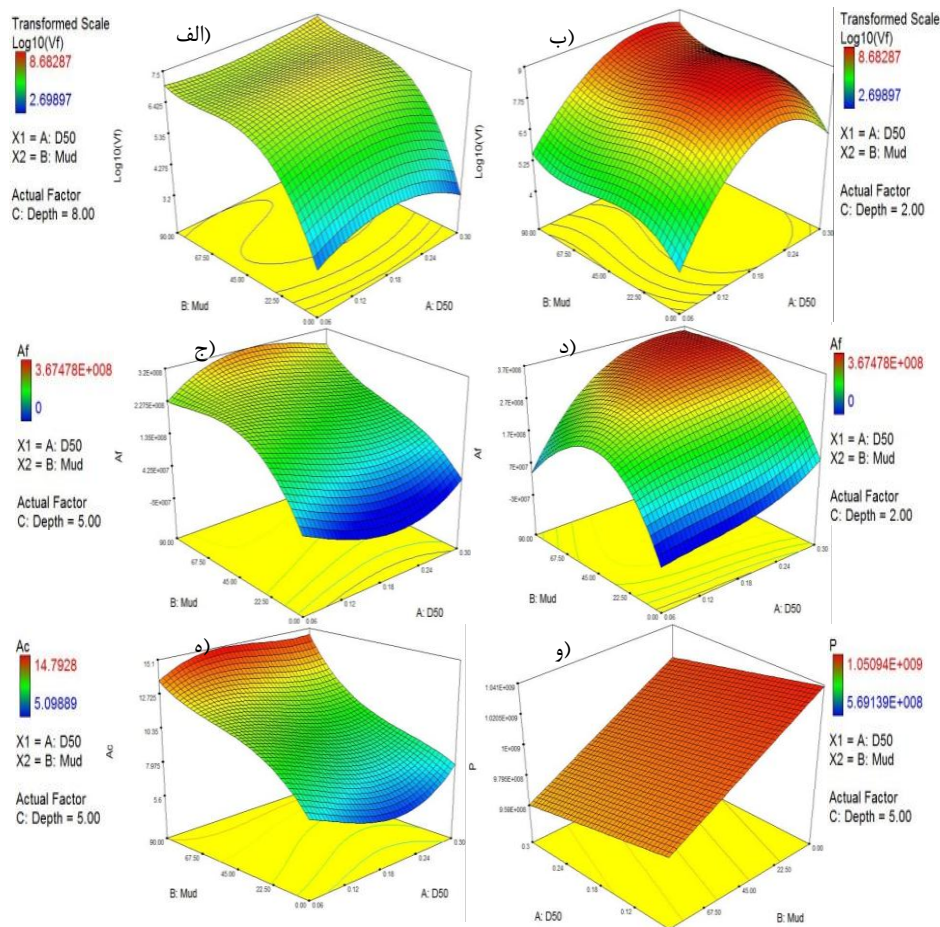
مدل $A_f$			مدل $A_c$			مدل
انحراف معیار $\times 10^7$ *	مربعات R	مربعات تخمین زده شده R	انحراف معیار	مربعات R	مربعات تخمین زده شده R	
۸/۶۱	۰/۶۰۲	۰/۵۳۲	۱/۷۴	۰/۵۱۸۲	۰/۴۲۰۵	Linear
۷/۶۹	۰/۷۰۰	۰/۵۸۶	۱/۶۷	۰/۵۸۱۷	۰/۳۷۷۷	2FI
۶/۸۲	۰/۷۷۷	۰/۶۳۶	۱/۶۷	۰/۶۰۶۵	۰/۳۲	Quadratic
۵/۱۵	۰/۸۹۸	۰/۷۲۵	۱/۳۹	۰/۷۸۱۳	۰/۳۵۲۶	Cubic

شکل ۵ مدل‌های برون‌یابی شده بر پاسخ حوضچه را نشان می‌دهد. مطابق شکل در حوضچه‌های عمیق مقادیر کوچک افزایش رسوبات چسبنده منجر به افزایش حجم ناحیه بین جزر و مدی می‌شود. این ویژگی نرخ بالای رسوب گذاری در ناحیه بین جزر و مدی را نشان می‌دهد. از آنجاییکه مصالح فرسایش یافته کانال‌ها به ناحیه بین جزر و مدی منتقل می‌شوند،  $V_f$  با افزایش مصالح چسبنده به شدت افزایش می‌یابد. این ناحیه بیشتر از ماسه به مصالح چسبنده وابسته است. شکل (e-۵) نیز وابستگی شدید کانال‌ها به رسوب چسبنده را نشان می‌دهد. تنش برشی جریان‌های

مقادیر آماری مدل برازش داده شده بر نتایج شامل انحراف معیار (Root MSE)، R-Squared و Pred R-Squared برای هر یک از مدل‌ها بطور جداگانه در جدول (۴) ارائه شده است. R-Squared و Pred-Squared بیان‌کننده مقدار انحراف نتایج مدل برازش یافته از متوسط به ترتیب با استفاده از جمع مجذور خطای مدل SSmodel و جمع مجذور خطای ترم‌های اعمال نشده در مدل SSresidual می‌باشد. مقدار کم انحراف معیار، R-Squared و Pred-Squared نزدیک به ۱ برای مدل cubic نشان دهنده دقت مناسب این مدل می‌باشد.

می‌نماید)، ذرات درشت تر در نواحی کم عمق ته نشین می‌شوند [۴۱]، الگوی رسوبگذاری ذرات ماسه غالب می‌باشد. از اینرو با افزایش  $d_{50}$ ، پروفیل تعادلی بلند مدت به آب کم عمق یا به عبارتی ناحیه بین جزر و مدی نزدیک می‌شود. بنابراین  $V_f$  و  $P$  همانطور که به ترتیب در شکل‌های ۵-ب و ۵-ف نشان داده شده است افزایش می‌یابند. اندازه کوچکتر ذرات رسوبی پروفیل ساحلی را به سمت نواحی عمیق منتقل می‌نماید که به کاهش  $V_f$  (شکل ۵-ب)،  $A_f$  (شکل ۵-ج) و متعاقباً افزایش منشور جزر و مدی منجر می‌شود. زیر نواحی بر اساس الگوی نهایی مورفولوژی و عوارض مورفولوژیک مورد نظر تعیین می‌گردد. در مورد خور موسی بر اساس شکل نهایی کانال‌های جزر و مدی ۱۰ زیر ناحیه اصلی حوضچه جزر و مدی خور موسی به عنوان زیر نواحی معیار انتخاب شده‌اند. جدول ۶ مقادیر BSS را برای زیر نواحی حوضچه خور موسی در شرایطی که از مقادیر مختلفی برای پارامترهای رسوبی استفاده شده است نشان می‌دهد که مقادیر نزدیک به ۱ معرف بهترین نتایج هستند. با در نظر گرفتن نتایج BSS برای تمام سناریوها، مشخصات بهترین سناریو برای هر یک از زیر نواحی انتخاب شده است.

جزر و مدی قدرت لازم برای جابجایی مقادیر قابل توجه ماسه‌ها را بخصوص در مناطق عمیق که تنش برشی قابل توجه نیست ندارد. مطابق تعریف، منشور جزر و مدی<sup>۷</sup> (حجم آبی است که در مقطع عرضی و بین دو تراز کشندی بالا و پایین جریان دارد [۵۳]) میبایست الگوی معکوس ناحیه بین جزر و مدی را داشته باشد. این رفتار با الگوی مدل شده که در شکل ۵-ف نمایش داده شده تایید شده است. تغییرات اصلی  $P$  مربوط به شرایط با عمق اولیه کم و  $d_{50}$  کوچک است همانند مدل‌های ۱ و ۱۶. همانطور که در شکل ۵-الف، ج، د، ه، و نشان داده شده است تاثیر اندازه ذرات رسوبی بر مورفولوژی کانال، منشور جزر و مدی و ناحیه بین جزر و مدی ناچیز بوده و تنها در حوضچه‌های کم عمق قابل مشاهده است. در حوضچه‌های کم عمق با افزایش تنش برشی، رسوبات ماسه‌ای در شکل دهی به مورفولوژی فعال می‌شوند. همانطور که در شکل ۵-ب نشان داده شده در شرایطی که عمق اولیه ۲ متر است، قطر متوسط ذرات ماسه تنها پارامتر موثر می‌گردد. در چنین شرایطی به دلیل این واقعیت که تحت رژیم جریان عمود بر ساحل<sup>۸</sup> (که اینجا جریان جزر و مدی ایجاد



شکل ۵- مدل‌سازی آماری پاسخ‌المان‌های حوضچه به تغییرات پارامترهای مورفولوژیک رسوبات چسبنده و  $d_{50}$  (الف)  $V_f$  در عمق حداکثر ۸ متر ب)  $V_f$  در عمق حداقل ۲ متر ج)  $A_f$  در عمق حداکثر ۵ متر د)  $A_f$  در عمق حداقل ۲ متر ه) سطح مقطع عرضی کانال  $Ac$  و حجم منشور جزر و مدی  $P$

همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، به زیر نواحی ۱ تا ۱۰ به ترتیب خصوصیات زیر نواحی ۳۲، ۳۳، ۳۳، ۳۳، ۳۳، ۳۳، ۳۰، ۳۳، ۳۳، ۳۲، ۳۳، ۳۲ و ۳۳ اختصاص داده شده است. با استفاده از مشخصات رسوبی مذکور برای هر زیر ناحیه، مدل نهایی مورفولوژی برپا شده است. شکل ۶ بتیمتری مدلسازی شده پس از ۳۰۰۰ سال را نشان می‌دهد.

جدول ۵- مشخصات سناریوهای طراحی شده و نتایج مدلسازی‌ها

اجرا	فاکتور ۱	فاکتور ۲	فاکتور ۳	پاسخ ۱	پاسخ ۲	پاسخ ۳	پاسخ ۴
	A:d50 mm	B:Mud %	C:Depth m	$V_f m^3$ * $10^7$	$h_f m$	$A_f m^2$ * $10^7$	Ai/Ab
۱	۰/۱۸	۸۷/۱۹	۳/۵۷	۴۷/۲	۱/۷۱	۲۷/۶	۰/۴۷
۴	۰/۱۷	۳۶/۵۵	۴/۷۶	۱۹/۴	۰/۵۵	۳۵	۰/۶
۵	۰/۳	۹۰	۵/۴۱	۶/۲۳	۰/۲۴	۲۵/۲	۰/۴۳
۹	۰/۳	۰	۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۰/۰۱
۱۶	۰/۱۸	۲/۸	۲/۵۶	۴۸/۲	۱۵/۲۱	۳/۱۷	۰/۰۵
۱۹	۰/۰۶	۷۱/۶	۸	۱/۷	۰/۲۴	۷/۱	۰/۱۲
۲۱	۰/۰۶	۹۰	۵/۱۵	۶/۲۴	۰/۲۴	۲/۵۷	۰/۴۴
۲۴	۰/۳	۰	۲	۶/۲۳	۰/۲۴	۲۵/۵	۰/۴۳
۲۵	۰/۳	۹۰	۲	۱۲/۵	۰/۳۴	۳۶/۷	۰/۶۳
۲۸	۰/۱۷	۴۳/۱۵	۲	۹/۵۶	۰/۳۱	۳۰/۷	۰/۵۲
۳۰	۰/۱	۰	۸	۰/۰۰۰۵	۰	۰	۰
۳۶	۰/۱۲	۵	۳	۰/۹۷	۰/۲۳	۴/۱۸	۰/۰۷
۳۸	۰/۲۲	۵	۳	۰/۷۷	۰/۲۲	۳/۴۷	۰/۰۶
۳۹	۰/۲۴	۵	۳	۰/۶۹	۰/۲	۳/۴۴	۰/۰۵۸
۴۲	۰/۲۲	۸۰	۳	۹/۳۴	۰/۳	۳۱	۰/۵۳
۴۴	۰/۱۱	۸۰	۳	۹/۳۷	۰/۲۹	۳/۱۷	۰/۵۴
۴۵	۰/۱۲	۶۰	۳	۸/۸۶	۰/۲۹	۲۹/۸	۰/۵۱
۴۷	۰/۲۲	۶۰	۳	۸/۷۵	۰/۲۹	۲۹/۵	۰/۵
۴۸	۰/۲۴	۶۰	۳	۸/۷۵	۰/۲۹	۲۹/۸	۰/۵۱
۴۹	۰/۲	۱۰	۶/۵	۰/۳۹	۰/۱۸	۲/۱۷	۰/۰۳۷
۵۱	۰/۲۲	۱۰	۶/۵	۰/۴۳	۰/۲۱	۲/۰۲	۰/۰۳
۵۴	۰/۱۲	۵	۶/۵	۰/۳۹	۰/۱۹	۲	۰/۰۳
۵۶	۰/۲۲	۵	۶/۵	۰/۳۷	۰/۲۳	۱/۶۳	۰/۰۳
۵۷	۰/۲۴	۵	۶/۵	۰/۳۷	۰/۲۴	۱/۵۳	۰/۰۳
۵۸	۰/۱۲	۶۰	۶/۵	۲/۷۷	۰/۲۷	۱۰	۰/۱۷
۶۰	۰/۲۲	۶۰	۶/۵	۲/۳۲	۰/۲۵	۹/۰۶	۰/۱۵

جدول ۶: مقادیر BSS در زیر نواحی خور موسی

اجرا	پارامترها	زیر ناحیه ۱۰	زیر ناحیه ۹	زیر ناحیه ۸	زیر ناحیه ۷	زیر ناحیه ۶	زیر ناحیه ۵	زیر ناحیه ۴	زیر ناحیه ۳	زیر ناحیه ۲	زیر ناحیه ۱
۳۰	$\Delta Vol_{model}^{*10^8}$	۴/۴	۰/۲	-۱/۱	-۰/۹	-۰/۸	-۰/۶	-۰/۲	-۱/۱	-۱۸/۳	-۲۵/۱
	BSS	۰/۸۲	-۰/۱۱	۰/۹۸	-۰/۲۴	۰/۳۱	-۰/۱۷	-۰/۰۶	-۰/۲۹	-۱۰/۳۹	۰/۷۶
۳۲	$\Delta Vol_{measured}^{*10^8}$	۷/۶	-۳/۵	-۱/۰	۷/۶	-۴/۷	۷/۴	۱۷/۷	۷/۹	۷/۷	-۱۶/۸
	$\Delta Vol_{model}^{*10^8}$	-۱/۶	-۹/۴	-۶/۱	۵/۷	۲/۶	-۰/۱	-۲/۶	-۲/۹	-۸/۵	-۲۶/۸
۳۳	BSS	-۱/۶۲	۰/۹۹	۱/۰۰	-۹/۱۱	-۰/۶۲	-۰/۱۲	-۳/۰۰	-۲/۹۹	-۱۵/۵۴	۰/۹۵
	$\Delta Vol_{measured}^{*10^8}$	۲/۶	-۸/۵	-۶/۰	۲/۶	-۹/۷	۲/۴	۲/۶۸	۲/۹	۲/۷	-۲۱/۸
اجرای نهایی	$\Delta Vol_{model}^{*10^8}$	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰
	BSS	۰/۹۸	-۰/۸۳	-۱/۲۵	۰/۹۸	-۰/۷۱	۰/۹۴	۰/۹۹	۱/۰۰	۰/۹۹	-۰/۲۹
اجرای نهایی	$\Delta Vol_{measured}^{*10^8}$	۲/۶	-۸/۵	-۶/۰	۲/۶	-۹/۷	۲/۴	۲/۷	۲/۹	۲/۷	-۲۱/۸
	$\Delta Vol_{model}^{*10^8}$	۲/۷	-۹/۵	-۶/۹	۳/۵	-۱/۳	۳/۱	۲/۸	۳/۰	۳/۱	-۲۵/۷
اجرای نهایی	BSS	۱	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۸۷	۰/۴۶	-۰/۹۱	۱	۱	۰/۹۸	۰/۹۷
	$\Delta Vol_{measured}^{*10^8}$	۲/۶	-۸/۵	-۶/۰	۲/۶	-۴/۷	۲/۴	۲/۷	۲/۹	۲/۷	-۲۱/۸

درک جامعی از تاثیر پارامترهای مورفولوژی را ارائه نمود. در این راستا حوضچه جزر و مدی خور موسی به عنوان یک آزمایشگاه عددی در نظر گرفته و با استفاده از مدل‌های آماری، تاثیر پارامترهای اصلی مورفولوژی بر تعادل نمایش داده شد. اندرکنش هر یک از این پارامترها با یکدیگر اثرات مختلفی بر تعادل، مشخصات منشور جزر و مدی، شکل کانال‌ها، ناحیه بین جزر و مدی و الگوی کلی رسوبگذاری داخل حوضچه دارد.

از اینرو بیشترین فعالیت‌های رسوبی در حوضچه‌های جزر و مدی در ناحیه بین جزر و مدی بوده که تاثیر نیروهای هیدرودینامیک بیشتر از سایر نواحی است. حوضچه‌های با رسوبات چسبنده بیشتر دارای فعالیت به مراتب بیشتری بوده و فعالیت حوضچه‌های ماسه‌ای محدود به مناطق کم عمق بوده و مناطق با سرعت جریان بیشتر است. حوضچه‌های با رسوبات ماسه‌ای دارای کانال‌های عمیق و تغییرات محدود در نواحی وسیع تر و افزایش حجم رسوبات انباشته شده در ناحیه بین جزر و مدی را دارد.

در نهایت با استخراج تاثیر پارامترهای مورفولوژی بر تعادل و تعیین مقادیر مناسب برای پارامترهای رسوبی در زیر نواحی و در ادامه استفاده از روش واقع گرایانه، مورفولوژی حوضچه جزر و مدی خور موسی ارائه گردید. بر مبنای تحلیل‌های واقع گرایانه این مطالعه، تضمین شده است که بر خلاف دیگر مدل‌های واقعیت مجازی، مدل خور موسی قادر به تخمین درست تغییرات بلند مدت مورفولوژی در شرایط مختلف مورفولوژی است.

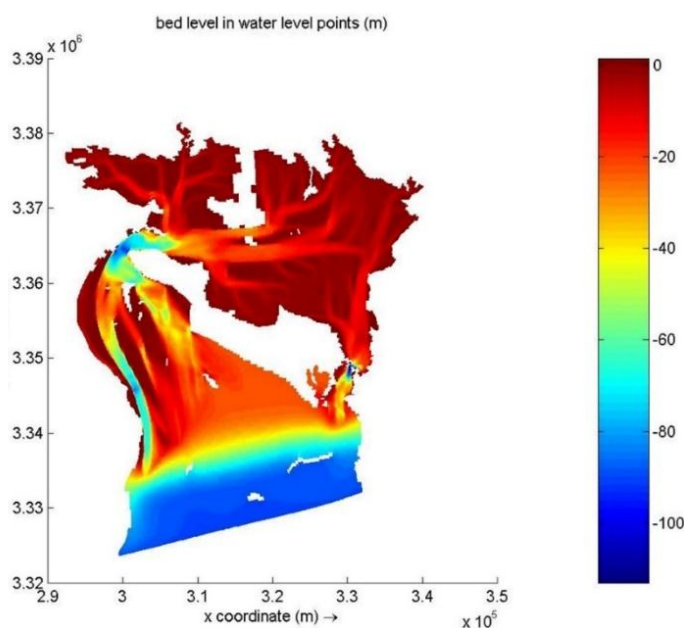
#### کلید واژگان

- 1- Intertidal flat area
- 2- Virtual reality
- 3- Realistic analogue
- 4- Hindcast
- 5- Barrier Island
- 6- Ebb Tidal Delta
- 7- Tidal Prism
- 8- Cross Shore Current

#### ۵- مراجع

- 1- Dronkers, J., (2005), *Dynamics of coastal systems*, Advanced Series on Ocean Engineering. Singapore: World Scientific, 520p.
- 2- Schwartz, M.L., (1973), *Barrier Islands*. Stroudsburg: Hutchinson & Ross, Dowden, 464p.
- 3- Reise, K., (2001), *Ecological Comparison of Sedimentary Shores*, Berlin: Springer-Verlag, Heidelberg, 384p.
- 4- De Vriend, H.J., (1991), *Mathematical modeling and large-scale coastal behavior, Part 1: physical processes*, J. Hydraulic. Res. Vol. 29(6), p.727-740.

در این مقاله ادعا نمی‌شود که خور موسی در مدت زمان ۳۰۰۰ سال به تعادل رسیده است؛ لکن نشان داده می‌شود با روش پیشنهادی می‌توان تعادل مورفولوژی موجود را شبیه‌سازی نمود. با مقایسه نتایج ارائه شده در شکل ۱ و شکل (۴-ب) و شکل (۶)، سه کانال اصلی و چهار زیر حوزه تطابق خوبی با بتیمتری اندازه گیری شده دارند. اگرچه برخی خصوصیات کوچکتر با اندازه‌گیری مطابقت ندارند. راستا و موقعیت کانال انتهایی شمالغرب خور موسی (زیر ناحیه ۲ در شکل ۱ و شکل ۲) از تطابق کمتری با وضع موجود برخوردار است که ممکن است به دلیل دقت پایین اندازه‌گیری‌ها در اعماق کم باشد. همچنین کانال‌های انتهایی در ناحیه شرقی خور موسی به سمت شمال انحراف دارند. علت این امر می‌تواند به دلیل نبود اندازه‌گیری (شکل (۴-ب)) و کمبود داده‌های مربوط به کانال جنوب شرقی خور موسی باشد. مقادیر BSS مدلسازی نهایی که در جدول ۶ ارائه شده است نشان می‌دهد BSS متوسط بهبود یافته است. استفاده از تکنیک BSS بهبود یافته در کنار مدل‌های آماری در این مطالعه، ابزاری مطمئن و از لحاظ زمانی کارآمد می‌باشد.



شکل ۶: نتیجه مدل نهایی بر مبنای تحلیل واقع گرایانه

#### ۴- نتیجه گیری

در این مطالعه مورفولوژی تعادلی حوضچه جزر و مدی با استفاده از روش واقع گرایانه مورد تحلیل قرار گرفت. بر خلاف روش‌های واقعیت مجازی، تاثیر پارامترهای اصلی مورفولوژی بر مورفولوژی تعادلی حوضچه جزر و مدی مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تضمین مدلسازی صحیح تاثیر پارامترها مجموعه‌ای از سناریوها بر مبنای الگوریتم D-Optimal طراحی گردید. این تکنیک پیشتر در مدل‌های بلند مدت مورفولوژی استفاده نشده بود. این فرآیند

- 19- Renger, E. and Partenscky, H.W., (1974), *Stability criteria for tidal basins*, Proceedings of the 14th Coastal Engineering Conference, Vol. 2, p.1605–1618.
- 20- Roelvink, J.; Reniers, A.; Van Dongeren, A.; Van Thiel de Vries, J.; McCall, R. and Lescinski, J., (2009), *Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands*, Coastal Eng, Vol. 56(11-12), p.1133–1152.
- 21- Van der Wegen, M.; Dastgheib, A.; Jaffe, B.E. and Roelvink, J., (2011), *Bed composition generation for morphodynamic modeling: Case study of San Pablo Bay in California, USA*, Ocean Dynamics, Vol. 61(2-3), p.173-186.
- 22- Dastgheib A.; Roelvink J.A. and Wang Z.B., (2008), *Long-term Process-based morphological Modeling of the Marsdeip Tidal Basin*, Marine Geology, Vol. 256(1-4), p.90-100.
- 23- Dronkers, J., (1998), *Morphodynamics of the Dutch delta*, In: Dronkers, J., Scheffers, M.B.A.M. (eds.), proceedings of Physics of Estuaries and Coastal Seas. (Rotterdam, Netherlands), p.297–304.
- 24- Friedrichs, C.T. and Aubrey, D.G., (1988), *Non-linear Tidal distortion in Shallow Well-mixed Estuaries: a Synthesis*, Journal of Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 27(5), p.521-545.
- 25- Speer, P.E. and Aubrey, D., (1985), *A Study of non-linear tidal propagation in shallow Inlet/Estuarine Systems. Part II: Theory*, Journal of Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 21(2), p.207-224.
- 26- Cayocca, F., (2001), *Long-term morphological modeling of a tidal inlet: the Arcachon Basin, France*, Coastal Engineering, Vol. 42(2), p.115-142.
- 27- Fortunato, A.B. and Oliveira, A., (2004), *A modeling system for tidally driven long-term morphodynamics*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 42(4), p.426–434.
- 28- Ganju, N.K., Schoellhamer, D.H. and Jaffe, B.E., (2009), *Hindcasting of decadal-timescale estuarine bathymetric change with a tidal-timescale model*, Journal of Geophysical Research, Vol. 114(F4), doi: 10.1029/2008JF001191.
- 29- Marciano, R., Wang, Z.B., Hibma, A., de Vriend, H.J. and Defina, A., (2005), *Modelling of channel patterns in short tidal basins*, J. Geophys. Res, Vol. 110(F1), doi: 10.1029/2003JF000092.
- 30- Nahon, A., Bertin, X., Fortunato, A.B. and Oliveira, A., (2012), *Process-based 2DH morphodynamic modeling of tidal inlets: a comparison with empirical classifications and theories*, Marine Geology, Vol. 291–294(1), p.1–11.
- 31- Qian Yu., Yunwei Wang., Burg Flemming. and Shu Gao., (2014), *Scale-dependent characteristics of equilibrium morphology of tidal basins along the Dutch– German North Sea Coast*, Marine Geology, Vol. 348(1), p.63–72.
- 5- FitzGerald, D.M.; Fenster, M.S.; Argow, B.A. and Buynevich, I.V., (2008), *Coastal impacts due to sea-level rise*, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol. 36(1), p.601–647.
- 6- Gao, S., (2009), *Modeling the preservation potential of tidal flat sedimentary records, Jiangsu coast, eastern China*, Continental Shelf Research, Vol. 29(16), p.1927–1936.
- 7- Lee, H.J.; Chu, Y.S. and Park, Y.A., (1999), *Sedimentary processes of fine-grained material and the effect of seawall construction in the Daeho macro tidal flat–nearshore area, northern west coast of Korea*, Marine Geology, Vol. 157(3-4), p.171–184.
- 8- Van Goor, M.A.; Zitman, T.J.; Wang, Z.B. and Stive, M.J.F., (2003), *Impact of rising sea level on the morphologic equilibrium state of tidal inlets*, Marine Geology, Vol. 202(3-4), p.211–227.
- 9- Wang, Y.P.; Gao, S.; Jia, J.; Thompson, C.L.; Gao, J. and Yang, Y., (2012), *Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China*. Marine Geology, Vol. 291–294(1), p.147–161.
- 10- De Jong, H. and Gerritsen, F., (1984), *Stability parameters of Western Scheldt estuary*, In: Edge, B.L. (ed.), Proceedings of the 19th Coastal Engineering Conference, (Houston, U.S.), p.3078-3093.
- 11- Eysink, W.D., (1990), *Morphologic response of tidal basins to changes*, Proceedings of the 22nd Coastal engineering Conference, Vol. 2, p.1948-1961.
- 12- Friedrichs, C.T., (1995), *Stability shear stress and equilibrium cross-sectional geometry of sheltered tidal channels*, Journal of Coastal Research, Vol. 11(4), p.1062-1074
- 13- Le Conte, L.J., (1905), *Discussion on river and harbour outlets*. In: Watts, D.A., Notes on the improvement of river and harbor outlets in the United States, Vol. 55, p.306-308.
- 14- O'Brien, M.P., (1931), *Estuary tidal prisms related to entrance areas*, Civ. Eng, Vol. 1(8), p.738–739.
- 15- O'Brien, M., (1969), *Equilibrium flow areas of inlets on sandy coasts*, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 95(1), p.43–52.
- 16- Powell, M.A.; Thieke, R.J. and Mehta, A.J., (2004), *Morphodynamic relationships for ebb and flood delta volumes at Florida's entrances*, Ocean Dynamics, Vol. 56(3), p.295-307.
- 17- Townend, I.H. and Dun, R.W., (2000), *A diagnostic tool to study long-term changes in estuary morphology*, In: Pye K.A. (ed.), Coastal and Estuarine Environments, sedimentology, geomorphology and geoarchaeology, London: Geological Society, p.75-86.
- 18- De Vriend, H.J.; Bakker, W.T. and Bilsse, D.P., (1994), *A morphological behaviour model for the outer delta of mixed-energy tidal inlets*, Coast. Eng., Vol. 23(3-4), p.305-327.

- nourishment, Coastal Engineering, Vol. 51 (7), p.581–607.
- 46- Lesser, G.R., (2009), *An approach to medium-term coastal morphological modeling*, Delft, The Netherlands, Delft University of Technology, Ph.D. thesis, 255p.
- 47- Fayyaz, M. and Moeini, H., (2014), *Evaluation of the Effect of Wind Forcing In the Local Wave Propagation Models*, Proc., 11th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures, ICOPMAS, Tehran, p.147-173.
- 48- Jandaghi, M., Kolahdoozan, M., Nazarali, M., and Pattiaratchi, C., (2008), *Hydrodynamic and sediment transport modeling of Imam Khomeini port*, Proc., 8th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures, ICOPMAS, Tehran, p.122-150.
- 49- Latteux, B., (1995), *Techniques for long-term morphological simulation under tidal action*, Marine Geology, Vol. 126(1–4), p.129–141.
- 50- Iran Tide Table., (2005), *Tide tables of Persian Gulf*, Tehran, Iran. Port and Maritime Organization, Available online at: <http://iranhydrography.ncc.org.ir/>.
- 51- Gelfenbaum, G., Roelvink, J.A., Meijs, M. and Ruggiero, P., (2003), *Process-based morphological modeling of Grays Harbor inlet at decadal time scales*, Proceedings of the international conference on Coastal Sediments, (Florida, USA), p.1-13.
- 52- Dissanayake, D.M.P.K., (2011), *Modelling Morphological Response of Large Tidal Basins to Sea Level Rise*, The Netherlands, UNESCO-IHE, TU Delft. Ph.D. Thesis, 181p.
- 53- Van der Wegen, M., Dastgheib, A. and Roelvink, J., (2010), *Morphodynamic modeling of tidal channel evolution in comparison to empirical PA relationship*, Coastal Engineering, Vol. 57(9), p.827–837.
- 54- Dastgheib, A., (2012), *Long-term process-based morphological modeling of large tidal basins*, Delft, The Netherlands, Delft University of Technology, Ph.D. thesis, 180p.
- 55- Hao Jie., (2013), *Hindcasting morphodynamic evolution in the Yangtze Estuary with sand-mud interactions*, Delft, Delft University of Technology, Master's thesis, 85p.
- 56- Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wikstrom, C., and Wold, S., (2008), *Design of Experiments: Principles and Applications*, Umetrics Academy, 459p.
- 57- Goos, P. and Donev, A. N., (2005), *Blocking Response Surface Designs*, Computational Statistics and Data Analysis, Vol. 51(2), p.1075-1088.
- 58- De Aguiar, P. F., Bourguignon, B., Khots, M. S., Massart, D. L. and Phan-Thau-Luu, R., (1995), *D-optimal Designs*, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, Vol. 30(2), p.199-210.
- 59- Sutherland, J., Peet, A.H. and Soulsby R.L., (2004), *Evaluating the performance of morphological models*, Coastal Engineering, Vol. 51(8-9), p.917-939.
- 32- Van der Wegen, M. and Roelvink, J.A., (2008), *Long-term morphodynamic evolution of a tidal embayment using a two-dimensional, process-based model*, Journal of Geophysical Research, Vol. 113(C3), doi: 10.1029/2006JC003983.
- 33- Wang, Z.B., Louters, T. and de Vriend, H.J., (1995), *Morphodynamic modeling for a tidal inlet in the Wadden Sea*, Mar. Geol, Vol. 126(1-4), p.289–300.
- 34- Ganju, N.K. and Schoellhamer, D.H., (2009), *Calibration of an estuarine sediment transport model to sediment fluxes as an intermediate step for simulation of geomorphic evolution*, Continental Shelf Research, Vol. 29(1), p.148-158.
- 35- Gerard Dam., Mick van der Wegen. and Dano Roelvink., (2013), *Long-term performance of process-based models in estuaries*, Proceedings of Coastal Dynamics (Bordeaux, France), p.409-420.
- 36- Van der Wegen, M., (2010), *Modeling morphodynamic evolution in alluvial estuaries*, Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, Ph.D. Thesis, 208p.
- 37- De Swart, H.E. and Zimmerman, J.T.F., (2009), *Morphodynamics of tidal inlet systems*, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 41(1), p.203–229.
- 38- Roelvink, J. and Reniers, A., (2011), *A guide to modelling coastal morphology. Advances in Coastal and Ocean Engineering*, World Scientific Pub. Co., 284p.
- 39- Van der Wegen, M. and Jaffe, B.E., (2013), *Towards a probabilistic assessment of process-based, morphodynamic models*, Coastal Engineering, Vol. 75(1), p.52–63.
- 40- Lesser, G., Roelvink, J., van Kester, J. and Stelling, G., (2004), *Development and validation of a three-dimensional morphological model*, Coastal Eng, Vol. 51(8-9), p.883–915.
- 41- Van Ledden, M., (2012), *Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins*, The Netherlands, Delft: Delft University of Technology, Ph.D. thesis, 221p.
- 42- Van Kessel, T., Spruyt-de Boer, A., van der Werf, J, Sittoni, L., van Prooijen, B. and Winterwerp, H., (2012), *Bed module for sand-mud mixturesin, framework of BwN project NTW 1.3 mud dynamics*, Delft, the Netherlands: Deltares, 111p.
- 43- Reniers, A., Roelvink, J. and Thornton, E., (2004), *Morphodynamic modeling of an embayed beach under wave group forcing*, J. Geophys. Res., Vol. 109(C1), doi: 10.1029/2002JC001586.
- 44- Grunnet, N.M., Ruessink, B.G. and Walstra, D.J.R., (2005), *The influence of tides, wind and waves on the redistribution of nourished sediment at Terschelling, The Netherlands*, Coastal Engineering, Vol. 52(7), p.617–631.
- 45- Grunnet, N.M., Walstra, D.J.R. and Ruessink, B.G., (2004), *Process-based modelling of a shoreface*

*morphodynamic simulations*, Coastal Engineering, Vol. 56(8), p.886– 894.

62- Nuzzo, R., (2014), [\*Scientific method: Statistical errors\*](#). Nature, Vol. 506(7487), p.105-152.

63- Scherrish, M.J., (1995), *Theory of Statistics*, New York: Springer, 569p.

60- Van Rijn, L.C., Walstra, D.J.R., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S. and Sierra, J.P., (2003), *The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models*, Coastal Engineering, Vol. 47(3), p.295– 327.

61- Fortunato, A.B., Bertin, X. and Oliveira, A., (2009), *Space and time variability of uncertainty in*