# مقایسه برآورد نرخ و حجم رسوب‌گذاری در کانال دسترسی بندر امام خمینی (ره) با استفاده از روش‌های هیدروگرافی، تئوری بایکر و مدلسازی توسط مایک۲۱

امیر مهدی امامی‌زاده مهابادی [۱]  کامران لاری[۲]

مجتبی ذوالجودی [۳]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۱/۱۳  تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۱۰/۰۹

*********

## چکیده

رسوب‌گذاری در کانال‌های دسترسی بنادر یک مشکل عمده برای مسئولان بندر و همچنین شناورهایی است که در این کانال‌ها تردد می‌نمایند.این پدیده علاوه بر تحمیل هزینه‌های سنگین به بندر، خطراتی را در این بخش حیاتی از بندر برای شناورها بوجود می‌آورد. در این تحقیق به بررسی و برآورد نرخ و حجم رسوب‌گذاری در کانال دسترسی بندر امام خمینی(ره) بر اساس اطلاعات میدانی پرداخته شده است. در پژوهش حاضر، تحلیل‌هایی در مورد وضعیت جغرافیایی از قبیل تراز بستر، تحلیل سری‌های زمانی موج و جزر و مد (به عنوان جریان) در منطقه توسط نرم افزار مایک ۲۱ انجام و مدلسازی مناسبی ارائه شد.جهت بررسی حجم و نرخ رسوب‌گذاری از روش‌های هیدروگرافی، تئوری بایکر و مدلسازی توسط مایک۲۱ استفاده گردید. الگوی هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب با استفاده از روش‌های مهندسی معتبر انجام شده است. همزمان مجموعه اطلاعات و داده‌های کتابخانه‌ای و نتایج داده‌های میدانی موجود، جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل گردیده و نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف (هیدروگرافی،بایکر و مایک۲۱) کالیبره شدند. براساس نتایج حاصله و بررسی نقشه‌های هیدروگرافی مقدار واقعی رسوب‌گذاری در کانال$m^3/s/m$ ۰/۰۰۰۰۷۸بدست آمد و باتوجه به اینکه روش هیدروگرافی معیاری برای کار و محاسبات به روش‌های دیگر در نظر گرفته شد، درصد خطای نتایج حاصل از محاسبات بایکر ۱۲% و مدلسازی مایک حدود ۲۰% محاسبه گردید. بر این اساس ضرائب بدون بعد $\alpha$ =۰/۸۸ برای تئوری بایکر و $\beta$ =۱/۲ برای نتایج حاصل از محاسبات توسط مایک۲۱ بدست آمد که نشان دهنده دقت خوبی بود. براساس نتایج حاصله می‌توان شیوه بهینه لایروبی و تغییرات مورفولیژیکی منطقه را بر اساس مدل‌های حاصله بدست آورد.

**واژه‌های کلیدی: رسوب‌گذاری، بایکر، مایک ۲۱، بندر امام خمینی(ره)، کانال دسترسی، هیدروگرافی.**

*********

۱- کارشناس ارشد علوم دریایی و اقیانوسی، گروه تخصصی: هیدروگرافی (نویسنده مسئول) delgosal @yahoo.com

۲- استادیاردانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال k-lary@yahoo.com

۳- استادیار پژوهشکده هواشناسی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوّی M.zoljoodi@yahoo.com

## ۱- مقدمه

با توجه به اینکه بندر امام خمینی(ره) یکی از شریان‌های اساسی حمل نقل دریایی کشور است، نگهداری و توسعه این بندر از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد. یکی از عوامل مهم در کاهش عملکرد این بندر پدیده رسوب‌گذاری در آن می‌باشد. شناخت فرایند تولید و انتقال رسوب در این محدوده از اهمیت چشمگیری برخوردار است. چرا که بررسی میزان کارآمدی طرح‌های توسعه بندربدون داشتن آگاهی کافی از شرایط حاکم بر این پدیده عملاً مقدور نخواهد بود. همچنین رسوب‌گذاری در کانال دسترسی این بندر باعث بروز مشکلاتی از قبیل لزوم انجام لایروبی‌های دوره‌ای و تحمیل هزینه‌های گزاف به بندر می‌شود. توسعه این بندر نقش تعیین کننده‌ای در افزایش مبادلات اقتصادی کشور دارد. لذا یکی از اصلی‌ترین اهداف برای دستیابی به برترین گزینه در طرح توسعه بندر، تحلیل تغییرات مورفولوژیک منطقه بخصوص در کانال دسترسی بندر امام خمینی(ره) بعنوان شاهراهی برای دسترسی کشتی‌ها به بندر امام می‌باشد. هدف از این مطالعه بررسی الگوی هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب با استفاده از روش‌های مهندسی است. همزمان مجموعه اطلاعات و داده‌های کتابخانه‌ای و نتایج داده‌های میدانی موجود، جمع آوری و تجزیه و تحلیل گردیده و نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف (هیدروگرافی، بایکر و مایک۲۱) کالیبره می‌شوند. همچنین تحلیل‌هایی در مورد وضعیت جغرافیایی از قبیل تراز بستر، تحلیل سری‌های زمانی موج و جزر و مد (به عنوان جریان) در منطقه توسط نرم افزار مایک ۲۱ انجام و مدل‌سازی مناسبی ارائه شد. جهت بررسی حجم و نرخ رسوب‌گذاری از روش‌های هیدروگرافی،تئوری بایکر و مدل‌سازی توسط مایک۲۱ استفاده گردید. در سال ۱۳۸۷ امیرحسین بابابیک تحقیقات مشابهی برای ۵نقطه از کانال دسترسی بندر امام انجام داد. در این پروژه سعی مابراین است که این کار را برای کل کانال دسترسی بصورت یکپارچه انجام دهیم.

بندر ماهشهر یا معشور شهری است در استان خوزستان با طول جغرافیایی ٤٩درجه و ١٣دقیقه و ٣ ثانیه شرقی و ٣٠درجه و ٥٤ دقیقه و ٥٨ ثانیه شمالی و ارتفاع این شهر از سطح دریا ٣متر می‌باشد.

دانه‌بندی رسوبات منطقه مورد مطالعه از نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌های میدانی حاصل از ۳۱ نقطه مختلف توسط کارشناسان سازمان بنادر حاصل و ارائه شده است. رسوبات از نوع ریز دانه و اندازه متوسط آنها ۰/۰۰٦میلیمتر می‌باشد.

در تحقیقات ذکر شده میزان انتقال رسوب $m^3$ /s/m ۰/۰۰۰۰۷٦ و ضریب بدون بعد $\alpha$=۰/۸۸ برای بایکر بدست آمد که بر اساس آن می‌توان شیوه بهینه لایروبی و تغییرات مورفولوژیکی منطقه را بر اساس مدل‌های حاصله بدست آورد.

## ۲- فرایند رسوب‌گذاری (محاسبات و مدلسازی)

در این بخش به بررسی فرآیند رسوب‌گذاری در کانال دسترسی بندر خواهیم پرداخت. مهمترین نتیجه حاصله از این بخش میزان حجم کل رسوب انباشت شده در کانال مزبور خواهد بود. برای تحقق این مهم از سه روش کاربردی و متداول استفاده خواهیم نمود. روش اول استفاده از داده‌های هیدروگرافی و محاسبه حجم رسوب بر اساس اطلاعات عمق‌یابی می‌باشد. محاسبه حجم رسوب به روش هیدروگرافی کاری دقیق و مبنای محاسبات ما برای بخش‌های دیگر و همچنین مبنایی برای تعریف ضرائب کالیبراسیون است.

روش دوم استفاده از تئوری مشهور، متداول و کاربردی بایکر می‌باشد. فرمول انتقال رسوب بایکر یکی از اولین فرمول‌هایی است که برای ترکیب موج و جریان گسترش یافت. بایکر بین رسوبات کف و رسوبات معلق تفاوت قائل شد و سرانجام روش سوم استفاده از نرم‌افزار mike21 جهت مدل‌سازی کانال دسترسی با تعریف شرایط محیطی و شرایط مرزی است. انتخاب نوع معادله به نوع اطلاعات قابل دسترس ازجمله مشخصات امواج، حالت‌های جریان و طبیعت رسوبات بستر بستگی دارد.

**نگاره۱ : نقشه منطقه بندر امام خمینی(ره)**

با توجه به نتایج بدست آمده از بررسی‌ها در نقاط مختلف جهان برای این مورد استفاده از فرمول بایکر مفیدتر می‌باشد. فرمول‌های مشابه دیگری نیز موجود است که محققان زیادی از آنان در این رابطه بهره جسته‌اند.

به عنوان مثال فرمول‌های ون راین، سرک، واتانابه و... اما هرکدام با توجه به ویژگی‌هایی که قبلاً ذکر شد مورد استفاده قرار می‌گیرند و دراینجا با توجه به ویژگی‌های بندر امام خمینی (ره) چندان جواب مطلوبی ارائه نمی‌دهند. به عنوان مثال واتانابه یک فرمول برای رسوب نهایی (کف و معلق) بر پایه ظرفیت مدل نیرو پیشنهاد کرد.اما با توجه به اینکه ظریب بی بعد A در فرمول ثابت است یا بستگی به موج و شرایط رسوب دارد یا خیر،هنوز منتشر نشده بنابراین استفاده از این فرمول در این مقال چندان برای ما جذاب نیست.و ازطرفی زمانی که از این فرمول برای کانال دسترسی بندر امام استفاده گردید *(امیر حسین بابایک،۱۳۸۷)* بدلیل ریزدانه بودن ذرات، این فرمول از دقت خوبی برخوردار نبود.

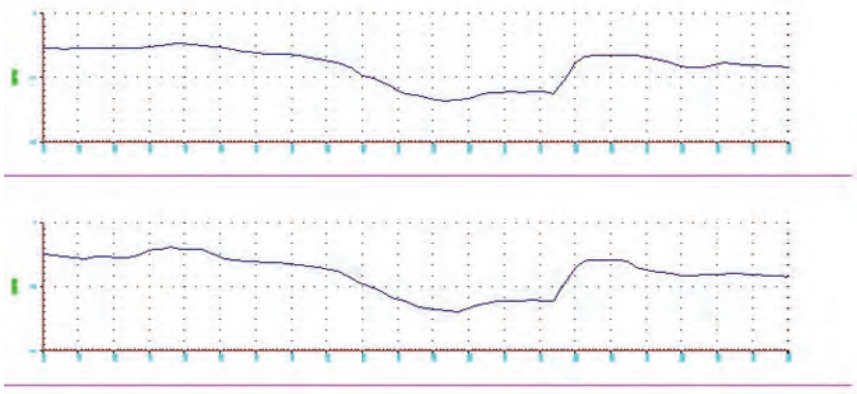
## ۲-۱- روش هیدروگرافی[۱]

هیدروگرافی جهت عمق‌یابی بدین صورت پیش می‌رود که قایق هیدروگراف طبق یک برنامه از پیش تعیین شده در مسیرهای مشخصی حرکت می‌کند. قایق مجهز به یک دستگاه جی پی اس دو یا چند فرکانسه و دستگاه سونار می‌باشد. قایق موقعیت افقی خود را از جی پی اس دریافت می‌کند. در حین حرکت دستگاه سونار یک موج صوتی را به سمت بستر فرستاده و با محاسبه زمان رفت و برگشت موج و همچنین پروفیل سرعت صوت، عمق را به ازای هر نقطه بدست می‌دهد. و از طرفی دستگاه جی پی اس موقعیت افقی آن نقطه را ارائه می‌دهد. امروزه نرم افزارهای گوناگونی قادر به ثبت همزمان این اطلاعات می‌باشند که از آنها در شناور هیدروگرافی استفاده می‌شود.

در پژوهش حاضر ما از این اطلاعات جهت ترسیم نقشه باتیمتری بستر کانال دسترسی و نهایتاً ترسیم پروفیل‌های طولی و عرضی برای محاسبه احجام رسوب‌گذاری استفاده کرده‌ایم. اطلاعات عمق صرفاً برای کانال دسترسی بالغ بر حدود ۲۳۰۰۰ نقطه (شامل طول و عرض جغرافیایی و عمق) بودند که در تهیه‌ی نقشه توپوگرافی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین در ۲۷۶ نقطه پروفیل‌هایی جهت محاسبه دقیق حجم عملیات لایروبی ترسیم گردید که به عنوان نمونه تعدادی از آنها در ذیل نمایش داده شده است.

با این روش حجم کل رسوب به ازای منطقه ای به وسعت ۵۷۲۱۳۸۱۰/٤متر مربع مقداری برابر ۲٤٤٤٦٦/۲۸۰متر مکعب بدست آمد. البته این مقدار حجم مواد جامد بوده و بنابه نظر کارشناسان سازمان بنادر این مقدار ۲۰% از مجموع حجم رسوب کل (مواد جامد و آب) می‌باشد. با محاسباتی ساده می‌توان دریافت که نرخ رسوب‌گذاری در

۱- آیین نامه هیدروگرافی در محدوده بنادر، سازمان بنادر و دریانوردی،



**نگاره ۲: پروفیل‌های عرضی از مقطع کانال دسترسی برای محاسبه حجم رسوب، محور افقی: عرض کانال دسترسی و محور عمودی ارتفاع رسوبات از سطح مبنای ۱۴- متر**

یک دوره یکساله حدود ۱۳/۷ سانتیمتر در هر مترمربع در سال بدست می‌آید که در مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی که توسط سازمان بنادر و دریانوردی صورت گرفته و میزان آن ۱۳/۵سانتیمتر در سال بدست آمده، تقریب خوبی را مشاهده می‌کنیم. بنابراین با بررسی نقشه‌های هیدروگرافی و محاسبات انجام شده مقدار واقعی رسوب‌گذاری در کانال دسترسی s/m ۰/۰۰۰۰۷۸$m^3$ / بدست آمد.

## ۲-۲- روش بایکر[1]

بایکر(۱۹۷۱)روشی برای محاسبه انتقال رسوب در حالت ترکیبی موج و جریان ارائه کرد. این روش برای محاسبه انتقال رسوب کرانه راستا بسط داده شده است. بایکر فرمول فریجلینگ-کالینسک را برای رسوب کف همراه با روش اینستن برای ارزیابی حمل رسوب که در محیط ساحلی اعمال می‌شوند را تعدیل کرد. به همین دلیل فرمول بایکر در میان مهندسان اروپایی بسیار عمومیت دارد. فرمول‌های بسیاری برای محاسبه رسوب منتقل شده به وسیله جریان‌ها وجود دارد. این فرمول‌ها شامل تنش برشی بستر ناشی از جریان در چند مکان است. بایکر این فرمول‌ها را به دو بخش بلند شدن دانه رسوبی از جای خود و انتقال رسوب تقسیم کرد. در حالت ترکیب موج و جریان، کنش موج فقط در بخش بلند شدن دانه دخالت خواهد داشت.این دخالت با جایگزین کردن تنش برشی بستر ناشی از جریان و موج به جای تنش برشی بستر ناشی از جریان در بخش بلند شدن دانه بیان می‌شود. در بخش انتقال ،تنش برشی بستر بصورت تنش ناشی از جریان باقی می‌ماند.

### ۲-۲-۱- تنش برشی بستر در اثر کنش

#### ۲-۲-۱-۱- موج و جریان:

در صورت ترکیب موج و جریان ،تنش برش میانگین بستر به صورت رابطه زیر توسط بایکر ارائه شد:

$$\tau_{wc}=\tau_c+\frac{1}{2}\tau_{w.max} \quad (۱-۲)$$

به طوری که:

$\tau_{c,max}$ و $\tau_c$ به ترتیب تنش برشی بستر به وسیله‌ی جریان تنها و تنش برشی بیشینه بستر به وسیله موج تنها هستند.

$$\tau_c=\frac{1}{2}\rho f_c u^2=\frac{1}{2}\rho\left(\frac{0/06}{log\frac{(12h)^2}{k_s^2}}\right)u^2 \quad (۲-۲)$$

$$\tau_{w.max}=\frac{1}{2}\rho f_w {u_m}^2 \quad (۳-۲)$$

$$f_w=\exp(5/5\left(\frac{k_s}{A}\right)^{0/2}-6/3 \quad (۴-۲)$$

به طوری که:

h-ژرفای آب

$k_s$- زبری بستر

U- سرعت میانگین جریان

A-دامنه‌ی ذره‌ی آب بر روی کف.

$u_m$-سرعت افقی بیشینه‌ی ذره‌ی آب بر روی کف.

**الف-انتقال بار بستر به وسیله‌ی موج و جریان:**

فرمول‌های کالینسکه و فریجلینک (۱۹۵۲) که توسط

[1]- Bijker

بایکر برای محاسبه انتقال بار بستر به وسیله موج و جریان استفاده شدند عبارتند از:

$$q_b=2d_{50}\sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}}\exp\left(\frac{0/27(s-1)\rho g d_{50}}{\mu_r\tau_{wc}}\right) \quad (۲-۵)$$

که بخش اول رابطه مربوط به انتقال دانه و بخش ثانوی مربوط به بلند شدن دانه می‌باشد.

تحت اثر ترکیبی موج و جریان، تنش برشی ناشی از جریان در بخش بلند شدن دانه با $\tau_{wc}$ جایگزین می‌شود که همان تنش برشی حاصل از ترکیب موج و جریان است.

$$q_b=2d_{50}\sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}}\exp\left(\frac{-0/27(s-1)\rho g d_{50}}{\mu_r\tau_{wc}}\right) \quad (۲-۶)$$

**ب-انتقال بار معلق بوسیله موج و جریان:**

فرمول انیشتین و بایکر برای انتقال بار بستر برای ترکیب موج و جریان عبارت است از:

$$q_s=1/83q_b\left(I_1\ln\left(\frac{h}{0/033k_s}\right)+I_2\right) \quad (۲-۷)$$

$$I_1=0/216\frac{A^{(z_0-1)}}{(1-A)^{z_0}}\int_A^1\left(\frac{1-B}{B}\right)^{z_0}dB \quad (۲-۸)$$

$$I_1=0/216\frac{A^{(z_0-1)}}{(1-A)^{z_0}}\int_A^1\left(\frac{1-B}{B}\right)^{z_0}\ln B\,dB \quad (۲-۹)$$

بطوریکه روابط $A=\frac{k_s}{h}$ و $B=\frac{z}{h}$ و $z_*=\frac{w_s}{ku_{*wc}}$ نیز برقرار هستند و $q_b$ انتقال بار بستر تحت کنش ترکیبی موج و جریان است.

برای حل معادلات فوق ابتدا تنش برشی مؤثر بر کف را محاسبه و سپس تنش برشی کل بستر و ضریب شکنج را بدست می آوریم(به ترتیب: $\tau_c'$ و $\tau_c$ و $\mu_r$).

در مراحل بعدی به حل معادله انتقال بار بستر $q_b$ می‌پردازیم. همچنین سرعت ته‌نشینی رسوب و سرعت اصطکاکی را از روابط زیر بدست می‌آوریم:

$$w_s=\left(\sqrt{\left[\left(\frac{36v}{d_{50}}\right)^2+7/5(s-1)gd_{50}-36v/d_{50}\right]}/2/8\right) \quad (۲-۱۰)$$

$$u_{*c}=\sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \quad (۲-۱۱)$$

$$A=\frac{k_s}{h} \quad (۲-۱۲)$$

$$z_0=\frac{w_s}{ku_{*c}} \quad (۲-۱۳)$$

در مرحله بعد انتگرال‌های عددی اینشتین را بدست می‌آوریم و سپس با محاسبه میزان انتقال رسوب معلق، به میزان انتقال رسوب کل تحت اثر جریان تنها با استفاده از رابطه زیر، می‌رسیم.

$$q_t=q_b+q_s \quad (۲-۱۴)$$

حال حالت ترکیبی موج و جریان در نظر گرفته می‌شود. با بکارگیری نظریه خطی موج، دامنه ذره آب روی کف از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$A=\frac{H}{2}\frac{1}{sinh\frac{2\pi h}{l}} \quad (۲-۱۵)$$

سرعت افقی بیشینه ذره آب بر روی بستر برابر است با:

$$u_m=A\omega=A\frac{2\pi}{T} \quad (۲-۱۶)$$

و ضریب اصطکاک موج برابر است با:

$$f_w=\exp(5/5(\frac{k_s}{A})^{0.2}-6/3) \quad (۲-۱۷)$$

تنش برشی بیشینه‌ی بستر به وسیله موج را از رابطه زیر بدست می‌آوریم:

$$\tau_{w.max}=\frac{1}{2}\rho f_w u_m^2 \quad (۲-۱۸)$$

و تنش برشی میانگین بستر تحت اثر ترکیبی موج و جریان برابر است با:

$$\tau_{wc}=\tau_c+\frac{1}{2}\tau_{w.max} \quad (۲-۱۹)$$

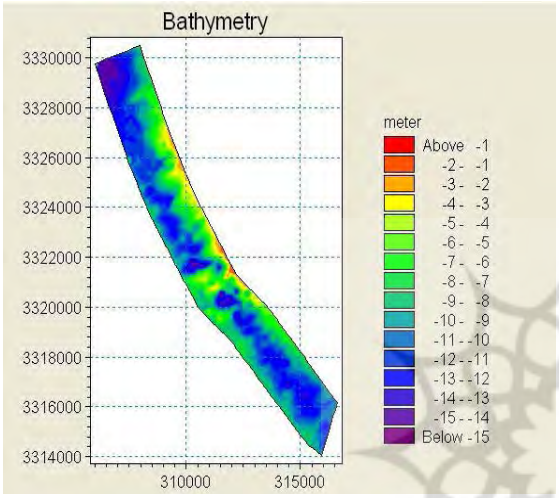
و سرعت اصطکاکی و انتگرال‌های اینشتین $q_b$ و در ادامه همچون حالت قبل عمل کرده و از روابط انتقال باربستر و معادله انتقال رسوب که همگی در قسمت قبل ذکر گردیدند مجدداً استفاده می‌نماییم. نهایتاً بعد از محاسبات به عدد ۰/۰۰۰۰۸۸۶٤ $m^3$ / s/m برای حجم رسوب‌گذاری در کانال دسترسی می‌رسیم که در مقایسه با بررسی‌های انجام شده بر نقشه‌های هیدروگرافی درصد خطا حدود ۱۲% و در نتیجه، تعریف ضریب بدون بعد $\alpha$ =۰/۸۸ دقت نسبتاً خوبی را مشاهده می‌نماییم. از سوی دیگر در محاسباتی نظیر این،

برای منطقه خورموسی *(بابابیک،لاری،۱۳۸۷)* این درصد خطا برای روش بایکر ۱۲% محاسبه شده است.

### ۲-۳- مدل‌سازی بوسیله نرم افزار Mike21

از میان مدل‌های ریاضی مطرح در جهان در تحلیل پدیده‌های حاکم بر محیط دریا، مدل ریاضی Mike۲۱ یکی از شناخته شده‌ترین آنهاست. این نرم‌افزار دارای قابلیت‌های محاسباتی و گرافیکی بالایی در زمینه مدل کردن پدیده‌های دریایی مختلف و دریاچه‌ها است. این نرم‌افزار سیستم جامعی برای مدل کردن جریان‌های آزاد دو بعدی است که در آنها لایه‌بندی جریان سیال قابل صرف‌نظر باشد. کاربرد این نرم افزار برای جریان‌های دوبعدی و یک لایه است. این نرم‌افزار به این دلیل برای این پروژه انتخاب شد که در مقایسه با نرم‌افزارها و مدل‌های دیگر از برتری‌های بسیار بالایی برخوردار است. به عنوان نمونه بکارگیری مدل‌های ریاضی و تجربی بصورت توأم، قابلیت کدنویسی، ارائه گزارش‌های متنی و گرافیکی با کیفیت بالا، اخذ ورودی‌های مختلف در قالب سری زمانی و تحلیل آن‌ها، تعیین تعداد معادلات برای حل مجهولات از طرف کاربر، درونیابی و برونیابی بسیار دقیق بر اساس روابط ریاضی و منطقی و مهمتر از همه تعیین شرایط مرزی در لایه‌های گوناگون از ویژگی‌هایی است که باعث برتری این نرم‌افزار نسبت به موارد مشابه شده است. تعریف شرایط مرزی در لایه‌های گوناگون ویژگی‌ای است که ما در این پروژه از آن بخوبی استفاده کرده‌ایم.

این کار باعث شد که کانال دسترسی را بدون نمایش سایر مناطق بندر مدل کرده و از طرفی فقط اطلاعات سایر مناطق را به نرم‌افزار درقالب شرایط مرزی معرفی نماییم.ویژگی این روش بالا رفتن سرعت محاسبات و مدل‌سازی و کاهش زمان آن بود. در این تحقیق ابتدا برای آماده‌سازی داده‌ها جهت ورود آن‌ها به نرم‌افزار از mike zero استفاده و سپس در نرم‌افزار mike۲۱ از ماژول‌های (flow model)FM و (spectral wave SW) و ST (sand transport) استفاده نموده‌ایم. در اولین مرحله، محدوده مورد مطالعه (کانال دسترسی بندر) با مختصات جغرافیایی به نرم‌افزار معرفی شده و داده‌های عمق آن نیز توسط مختصات نقاط (طول و عرض جغرافیایی و عمق) در محدوده مورد نظر وارد می‌شوند. این داده‌ها از سازمان بنادر اخذ گردیده و به فرمت مناسب(dfs.*)برای ورود به نرم‌افزار مایک ۲۱ تبدیل شد.حاصل این کار یک نقشه توپوگرافی یا Bathymetry از منطقه مورد مطالعه است.




**نگاره ۳: تصویر نقشه عمق‌یابی حاصل از مدل‌سازی کانال دسترسی**

لازم به ذکر است بدلیل اینکه این کانال توسط نرم‌افزار یک کانال بسته تلقی نشود شرایط مرزی را برای این محیط تعریف نمودیم. بطور کلی شرایط مرزی به یکی از دو روش زیر تعریف می‌شوند:

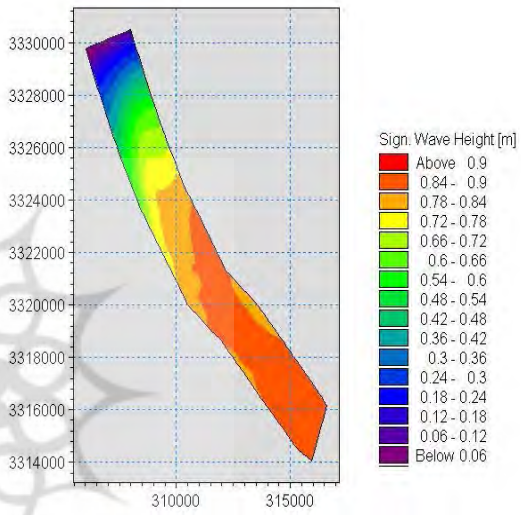
**الف)مرز متقارن:** این مرز که از منطقه آب عمیق شروع شده و به ساحل منتهی می‌شود، زمانی کاربرد دارد که اطلاعات مفصل بر روی مرزها وجود نداشته باشد. اساساً انتخاب این مرز بدان معناست که در نزدیکی مرز خطوط هم عمق موازی و مستقیم با محور Y سیستم مختصات تعریف شده (در اینجا utm) می‌باشند.

**ب)مرز جذب کننده:** این مرز نیز از منطقه آب عمیق شروع شده و به ساحل منتهی می‌شود. در این حالت در مرز میزان توان موج و عملاً انرژی وارد شده به مرز صفر فرض می‌شود.

### ۲-۳-۱- داده‌های باد و موج

داده‌های باد و موج مربوط به یک دوره دوساله که بصورت هر شش ساعت یکبار جمع‌آوری شده بود از سازمان‌های

هواشناسی و بنادر و دریانوردی گرفته شد و همگی برای ورود به نرم افزار مایک ۲۱ در قالب فایلی با فرمت dfs.* تبدیل شدند. همچنین از این داده‌ها سری‌های زمانی تشکیل گردید و در طول پروژه از این سری‌ها استفاده شد. داده‌های موج شامل ارتفاع موج شاخص، پیک دوره تناوب و جهت متوسط موج می‌باشد. داده‌های مربوط به باد نیز شامل سرعت و جهت باد در ارتفاع استاندارد ۱۰ متری می‌باشند.

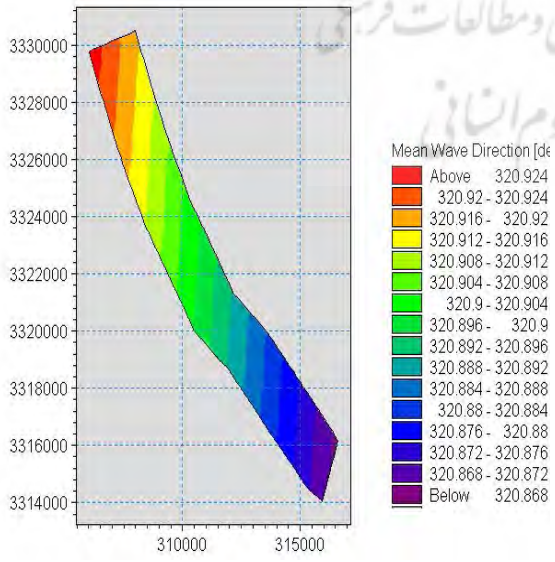



**نگاره٤: نمایش ارتفاع موج در کانال دسترسی**

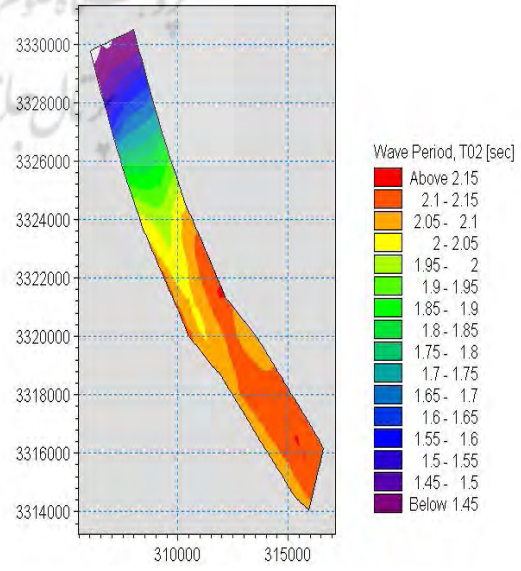
### ۲-۳-۲- مدول Spectral Wave

از آنجا که موج و جریان جزر و مدی از عمده‌ترین علل انتقال رسوب در بندر امام خمینی (ره) می‌باشند پس مدل‌سازی و آنالیز امواج و جزرو مد ضروری به نظر می‌رسند. ضمن اینکه در مرحله نهایی sand transport اطلاعات بدست آمده از این بخش کاربرد اساسی خواهد داشت. در این مدول ارتفاع موج، پریود موج، جهت متوسط امواج و بسیاری موارد دیگر را می‌توان مدل سازی کرد. موارد ذکر شده از مؤثرترین موارد در انتقال رسوب محسوب شده و در ادامه نتایج حاصله راکه بر مبنای اطلاعات مذکور بدست آمده‌اند را ارائه خواهیم داد.

با توجه به اطلاعات امواج که بصورت سری زمانی به نرم‌افزار معرفی شد و پریود زمانی ۲/۵ ثانیه که با اندازه گیری‌های میدانی (گزارشات سازمان بنادر و دریانوردی ۱۳۹۳) به عنوان زمان پایه به نرم افزار معرفی شد، wave period T02 به صورتی که در ذیل آمده، بدست می‌آید و همچنین جهت متوسط امواج در مدل‌سازی در مدول فوق الذکر بصورت زیر می‌باشد. شایان ذکر است این جهت بر حسب درجه و نسبت به شمال واقعی در جهت حرکت عقربه‌های ساعت می‌باشند:




**نگاره ٦: نمایش کلی جهت متوسط موج بر حسب درجه**




**نگاره ٥: نمایش پریود موج در کانال دسترسی**

### ۲-۳-۳- مدول ST (Sand Transport)

مدول ST ابزاری است جهت دستیابی به نرخ و الگوی انتقال رسوبات و تغییرات تراز بستر وابسته به آن در محدوده‌ای که تحت تأثیر جریان‌ها قرار دارد. نرخ تغییرات تراز بستر نیز در پایان دوره طراحی، بر اساس شرایط متوسط انتقال رسوب در طی دوره زمانی مورد نظر محاسبه می‌گردد. در این مدول رسوبات غیرچسبنده یعنی ماسه، فرض شده‌اند ولی اندازه دانه‌ها و دانه‌بندی آنها در محدوده شبیه‌سازی می‌تواند متغیر باشد. علاوه برآن هر دو حالت اندازه‌ی دانه‌های یکنواخت یا دانه‌بندی شده می‌تواند انتخاب شود.جریان‌های مورد نظر در این مدول نیز جریان‌های جزر و مدی، جریان‌های ناشی از باد یا ترکیبی از دو حالت فوق می‌باشد. ظرفیت انتقال رسوب در منطقه مدل نیز با استفاده از اطلاعات ژرفاسنجی، دانه‌بندی و مشخصات جریان به عنوان داده‌های ورودی، تعیین می‌گردد.

### ۲-۳-۳-۱- معادلات بکار رفته در مدول ST [1]

در این بخش معادلات بکار رفته در تئوری Engelund و Freds را بیان می‌کنیم. نرخ انتقال رسوب بار کل $q_t$ بصورت جمع نرخ انتقال بار بستر $q_b$ و نرخ انتقال بار معلق $q_s$ محاسبه می‌شود:

$$q_t=q_b-q_s \qquad (۲۰-۲)$$

فرض می‌شود که انتقال بار بستر در یک لایه تنها با ضخامتی برابر با قطر یک دانه d اتفاق می‌افتد. انتقال رسوب بار بستر بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$q_b=s_p(\sqrt{\theta'}-0.07\sqrt{\theta_c})\sqrt{(s-1)gd^3} \quad \text{if} \quad \theta'>\theta_c \qquad (۲۱-۲)$$

که p احتمال در حرکت بودن تمام ذرات در یک لایه تنها می‌باشد. $\theta$ تنش برشی بدون بعد بستر وابسته به اصطکاک بستر و $\theta_c$ تنش برشی بحرانی بستر برای ابتدای حرکت است.S چگالی نسبی بار کف است.

$$\theta'=\frac{u_f'^2}{(s-1)gd} \qquad (۲۲-۲)$$

$$P=\left(1+\left(\frac{\frac{\pi}{6}}{\theta'-\theta_c}\right)^4\right)^{-1/4} \qquad (۲۳-۲)$$

طبق پیشنهاد Einstein (۱۹۵۰) بار معلق بصورت زیر معین می‌شود:

$$q_s=11/6u_f'c_b a(I_1\ln(\frac{30h}{KN})+I_2 \qquad (۲۴-۲)$$

$$c_b=\frac{0/65}{(1-\frac{1}{\lambda})^3}$$

$$\lambda=\sqrt{\frac{\theta'-\theta_c-\frac{\pi}{6}}{0/027s\theta'}} \quad \text{if} \quad \theta'>\theta_c+\pi/6 \qquad (۲۵-۲)$$

حال معادلات بکار رفته در تئوری Hansen&Engelund را بررسی می‌کنیم. نرخ بدون بعد انتقال بار کل بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Phi_t=0/1\frac{c^2}{2g}\theta^{2.5} \qquad (۲۶-۲)$$

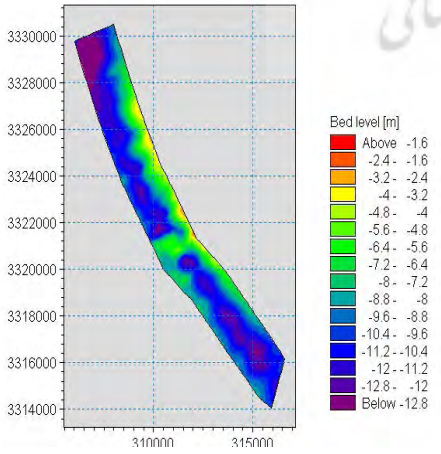
که در آن c عدد شزی و $q_t$ انتقال رسوب بار کل و g شتاب جاذبه است. تنش برشی بدون بعد بستر نیز عبارتست از:

$$\Phi_t=\frac{q_t}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \qquad (۲۷-۲)$$

$$\theta=\frac{u_f'^2}{(s-1)gd} \qquad (۲۸-۲)$$

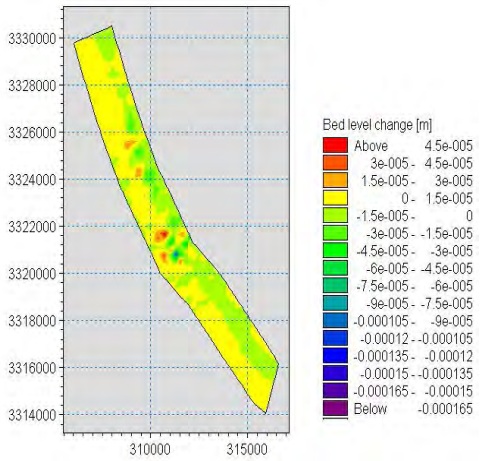
$u_f$ سرعت برشی وابسته به اصطکاک کل، d قطر دانه و s چگالی نسبی بار کف می‌باشد. اکنون به نتایج حاصل از مدول ST می‌پردازیم:

اولین مرحله Bed level یا تراز بستر است.



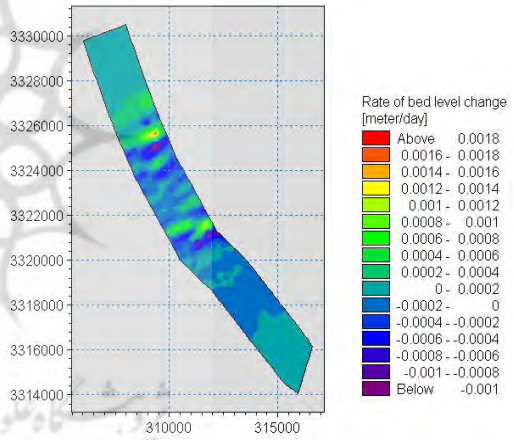

**نگاره ۷: نمایش تراز بستر در کانال دسترسی**

[1] - manual of Mike zero & Mike 21,DHI , 2012



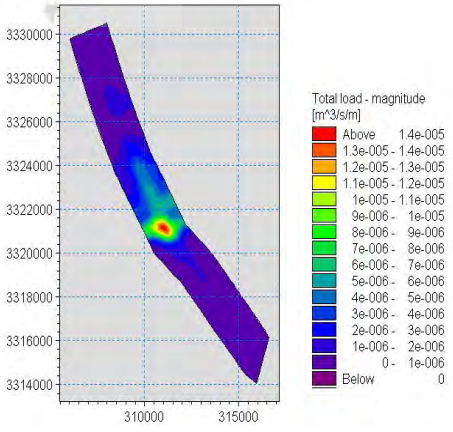

**نگاره ۸: تغییرات تراز بستر کانال دسترسی بر حسب متر**

تغییرات تراز بستر بر اثر رسوب‌گذاری و سپس نرخ این تغییرات را مشاهده می‌نماییم.



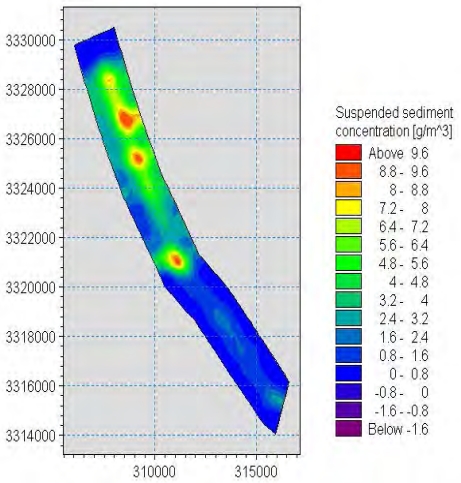

**نگاره ۹: نرخ تغییرات تراز بستر بر حسب متر بر روز**

### ۲-۳-۳-۲- حجم کل رسوب (معلق و بستر)

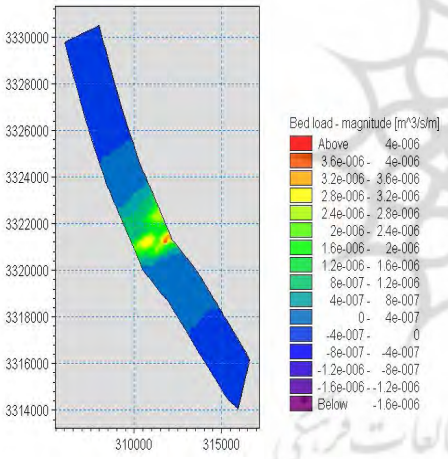



**نگاره ۱۰: مقدار کل رسوب بستر و رسوب معلق**

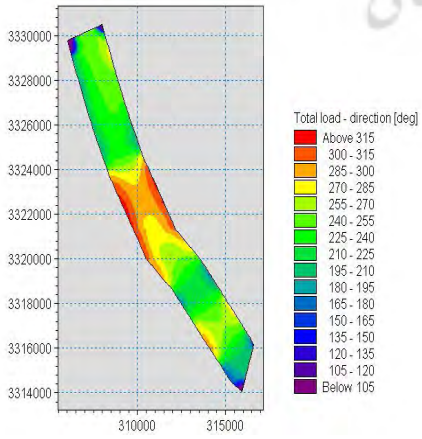
### ۲-۳-۳-۳ نمایش تمرکز رسوبات معلق



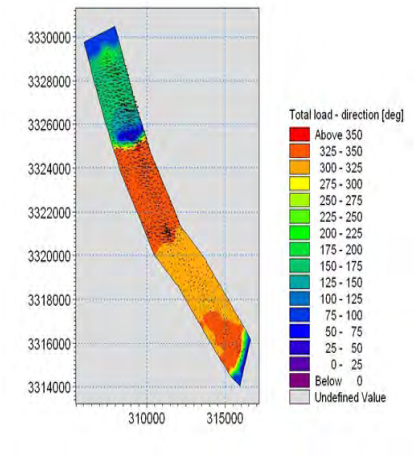

**نگاره ۱۱: تمرکز رسوبات معلق**




**نگاره ۱۲: مقدار رسوبات بستر**




**نگاره ۱۳: جهت کل رسوبات بر حسب درجه**




**نگاره ۱٤: جهت حرکت رسوبات به سمت شرق کانال دسترسی می‌باشد**

از گزارشات اخذ شده از این نرم افزار مقدارنرخ رسوب ۰/۰۰۰۰۹٤۳$m^3$ /s/m بدست می‌آید که درصد خطای آن حدود ۲۰% و ضریب کالیبراسیون بی‌بعد۱/۲=$\beta$ بدست می‌آید. البته با توجه به میزان فرسایشی که مایک با استفاده از داده‌های ورودی محاسبه و در حجم کل رسوبات لحاظ می‌کند منطقی بنظر می‌رسد که این مقدار بیش از حد محاسبه شده به روش هیدرو گرافی باشد.

## ۳- نتایج و پیشنهادات

محاسبه ضریب کالیبراسیون به ازای هر منطقه به صورت مجزا ضروری است، در نتیجه با در دست داشتن ضرایب فوق‌الذکر برای این کانال دسترسی، پژوهشگران می‌توانند در پروژه‌های آتی برای این منطقه کالیبراسیون مورد نیاز برای روش‌هایی مثل مدل‌سازی مایک۲۱ به سادگی انجام دهند.

با توجه به تجهیزات لایروبی موجود در بندر امام خمینی(ره) و موارد شرح داده شده می‌توان نتیجه گرفت که مناسب‌ترین روش لایروبی استفاده از لایروب‌ها پرساکشن خودکششی است. اما درصورت تجهیز یگان لایروبی به امکانات جدید می‌توان روش‌های بهینه‌تری را نیز بدست آورد. به عنوان مثال:

استفاده از لایروب تزریق آب- تزریق آب به موادی با دانه‌بندی ریز و استحکام کم باعث کاهش چگالی مواد و حرکت آنها به سطوح پایین‌تر می‌شود. در صورت ایجاد یک شیب مناسب در کانال دسترسی این لایروب می‌تواند بسیار کاربردی باشد.

لایروب خاکروبه ای- سر لوله مکنده رشته‌ای از واتر جت‌ها نصب شده است که باعث ایجاد ضعف و جاری نمودن مواد بستر می‌شود. مزیت این لایروب عدم استفاده از هیچ گونه برش مکانیکی است.

با توجه به الگوی بدست آمده برای حرکت رسوبات در کانال دسترسی متوجه می‌شویم که جهت حرکت این رسوبات به سمت مرزهای شرقی کانال دسترسی می‌باشد. و داده‌های عمق‌یابی و در پی آن نقشه‌های باتیمتری نیز این پدیده را تأیید می‌کنند.

پس با این وجود می‌توان گفت که باید تمرکز لایروبی را روی نوار شرقی کانال بیشتر کنیم و حتی با تعمیق این ناحیه نسبت به سایر نواحی می‌توان دوره‌های لایروبی را طولانی‌تر نمود. بخصوص که داده‌های عمق‌یابی نشان می‌دهد در نوار شرقی در برخی نقاط عمق به کمتر از ۱/۵ متر رسیده است که این امر خطر به گل زدن کشتی‌ها را در پی دارد.

پس تعمیق بیش از پیش این بخش از کانال می‌تواند این خطر بزرگ را نیز کاهش دهد. و همین طور پیشنهاد می‌گردد امکان سنجی نصب واتر جت بطور دائم در بستر کانال مطالعه و بررسی گردد تا بدین وسیله رسوبات به خارج کانال دسترسی هدایت شوند.این کار به نوعی باعث By pass کردن رسوبات می‌شود.

همانطور که در بخش های قبلی مشاهده شد با توجه به اندازه واقعی s/m / ۰۰۰۰۷۸$m^3$/ بدست آمد و تئوری بایکر نتایج مشابهی را بدست داد و همچنین مدل‌سازی انجام شده نیز با ضریب کالیبراسیون 1/2 به میزان واقعی نزدیک بود.

با توجه به اینکه روش هیدروگرافی معیاری برای کار و محاسبات به روش‌های دیگر در نظر گرفته شد،درصد خطای نتایج حاصل از محاسبات بایکر ۱۲% و مدلسازی

مایک حدود ۲۰% محاسبه گردید

با توجه به فاصله نسبتاً زیاد کانال از ساحل و تأثیر پارامتر جریان در کانال، مطالعه در ایجاد سازه‌های فرا ساحل در کاهش نرخ انتقال رسوب به درون کانال و کاهش اختلاف ارتفاع جزرو مد در محدوده مورد مطالعه بسیار مفید به نظر می‌رسد. همچنین با در نظر گرفتن هزینه‌های سنگین لایروبی در سال‌های اخیر لزوم مطالعات پایه‌ای در ایجاد سازه‌های فرا ساحلی و هیدرولیکی کاملاً احساس می‌شود. می‌دانیم که پریود امواج در این منطقه حدود۲/۵ ثانیه و طول موج حدود ۲۵ متر و تأثیر موج تا نصف طول موج در راستای عمودی در جهت رو به بستر می‌باشد. پس با تعمیق کانال به ۱۶ متر می‌توان از تأثیر پارامتر موج صرفنظر کرد.

در موارد بروز مشکل رسوب‌گذاری، لایروبی اولین و در بسیاری از موارد ساده‌ترین راه حلی است که بنظر می‌رسد. چنین راه حلی در صورت عدم وجود راه‌حل‌های مناسب‌تر و اقتصادی‌تر و نیز در صورت دسترسی آسان به لایروب‌های مناسب در بسیاری از موارد راه حل مناسبی می‌باشد. در مورد کانال دسترسی بندر امام (ره)نیز پس از بروز مشکل رسوب‌گذاری، لایروبی به عنوان در دسترس‌ترین و شاید آسان‌ترین راه جهت نگهداری کانال مورد توجه قرار گرفته است.ولی هزینه‌های گزافی که لایروبی به بندر تحمیل می‌کند، بررسی گزینه‌های دیگری غیر از لایروبی را اجتناب ناپذیر می‌سازد.

با توجه به مسیر باند رسوبی که ناحیه شرقی کانال را بخصوص در ابتدا و انتهای کانال را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد، بنظر می‌رسد که اگر به گونه‌ای از برخاستن رسوبات پایین دست جلوگیری شود، در واقع رسوبات بستر به گونه‌ای تثبیت شود، میزان رسوب‌گذاری در کانال تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد.

یکی از راه‌های مطرح در جهان جهت تثبیت رسوبات بستر، ایجاد پوشش گیاهی در نواحی است که رسوبات بستر بصورت فعال در روند انتقال رسوب دخالت دارند. جهت بررسی اثر تثبیت رسوبات ناحیه غربی و جنوبی کانال بر روند رسوب‌گذاری در کانال دسترسی از طریق مدل ریاضی، ضخامت رسوبات فعال بستر برای ناحیه مذکور صفر در نظر گرفته شده است. اجرای این مدل برای این وضعیت حاکی از کاهش قابل توجه رسوب‌گذاری در کانال دسترسی از حدود میانه کانال تا انتهای آن در سمت شرق حکایت دارد. میزان این کاهش بطور متوسط حدود ۵۰% می‌باشد.

در سال‌های گذشته تحقیقات بسیاری بر روی پارامترهای مختلف دریایی در منطقه خلیج فارس و به ویژه بندر امام خمینی(ره)انجام گرفته است که یکی از آنها بررسی پارامتر رسوب توسط لاری و بابابیک۱۳۸۳ بوده است ، در تحقیق ایشان میزان رسوبگذاری در کانال دسترسی بندر امام بدون در نظر گرفتن پدیده فرسایش ۰/۰۰۰۰۷۶$m^3$ s/m است که با مقایسه با نتایج بدست آمده در این تحقیق، به صحت قابل قبولی برای این پروژه می‌رسیم.

## ٤-منابع و مآخذ

۱-بابابیک، الف.، ۱۳۸۷، الگوی انتقال رسوب و روش‌های مناسب لایروبی در بار کانال خور موسی، پایان نامه کارشناسی ارشد.دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.

۲- چگینی، ر.، ۱۳۷۹، نظریه‌های موج، شرکت جهاد و آبخیزداری.

۳- خلعتبری، ۱۳۸۵، بررسی نرخ انتقال رسوب در کانال بندر شهید رجایی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.

٤- سازمان بنادر و دریانوردی،۱۳۹۰، بررسی نقشه‌های موجود در آرشیو اداره حفاظت و ایمنی کانال در بندر امام خمینی(ره) از جمله نقشه‌های دریایی و ماهواره‌ای، اداره حفاظت و ایمنی کانال.

۵- سازمان بنادر و دریانوردی،۱۳۸۰، کتاب مرجع لایروبی

٦- سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۳۸٤، بررسی و شبیه سازی موج و جریان در بندر امام خمینی،اداره کل سواحل و بنادر.

۷- سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۳۸٤، اندازه‌گیری‌های

میدانی پارامترهای فیزیکی و رسوبی توسط شرکت جهاد و آبخیزداری در بار خور موسی در کانال دسترسی بندر امام خمینی(ره)، داره کل سواحل و بنادر.

۸- سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۳۹٤، اطلاعات موجود لایروبی توسط لایروب‌های هویزه و بستان، اداره حفاظت و ایمنی کانال بندر امام خمینی(ره).

۹- سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۳۹٤، اطلاعات و نقشه‌های عمق موجود در کانال جهت بررسی تراز سطح آب در بار خور موسی، اداره حفاظت و ایمنی کانال در بندر امام خمینی(ره).

۱۰- سازمان بنادر و کشتیرانی،۱۳۸۷، هیدروگرافی در محدوده بنادر.

۱۱- سازمان بنادر و کشتیرانی، ۱۳۹۰، اندازه‌گیری پارامترهای دریایی و رسوب در بندر بوشهر.

۱۲- سازمان هواشناسی ماهشهر، ۱۳۹۳، اطلاعات هواشناسی ماهشهر، فرودگاه ماهشهر.

۱۳- سورنس،ر.، ترجمه خسرو برگی، ۱۳۸۹، چاپ دوم، اصول مهندسی دریا (هیدرولیک/سازه‌های دریایی و مهندسی رسوب.

۱٤- سیر،ک.،۱۳۸۸، بررسی رسوب‌گذاری در کانال‌های دسترسی بنادرتحت اثر عبور جریان و موج، یازدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور.

۱۵- قاسمی،ع. «مدل‌سازی عددی بهسازی خاک به روش تراکم دینامیکی در خاک‌های خشک و اشباع»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

۱٦-کرباسی،ع.،۱۳۸۹ ارزیابی اثرات محیط زیستی طرح‌های لایروبی، همایش ملی توسعه سواحل مکران.

۱۷- لیو، زو، ترجمه وحید چگینی، ۱۳۹۰، انتقال رسوب، موسسه ملی اقیانوس شناسی.

۱۸- محمدی ساوه،ن.، ۱۳۹۲، الگوی جریان‌های موازی با ساحل در سواحل بوشهر با استفاده از نرم افزار Mike21 ، پایان نامه کارشناسی ارشد.دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.

۱۹- وزارت راه و ترابری، ۱۳۹۰، آیین نامه طراحی بنادر و سازه‌های دریایی ایران.

20 Bayram, A., Larson ,M., Miller ,HC .,and Kraus, N. C. 2001. Cross- shore distribution of longshore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements. J. Coast. Eng. 99-79: 44.

21- British Standard Code of Practice for Maritime Structures (2015).

22- Brooks، N.H.,1999، calculation of suspended load discharge from velocity،and concentration parameters، proceedings of the federal interagency sedimentation conference. 2003. Miscellaneous publication No.970، agricultural research service، VSDA، Washington DC

23-B.S. Code of Parctice،1999.،part 1،B.S. 6349.

24- Chow،Y.K.، Yong، D. M.، Yong، K. Y.، Lee، S. L.،2001 "Monitoring of dynamic compaction by deceleration measurements"، Computers and Geotechnics، Vol.90، No.3، PP.209-189.

25- consideration about scales for coastal models with movable bed(2011)،Delft Hydraulics Laboratory publication. 50،Delft،the Netherland.

26- Design Manual, Harbour and Coastal Facilities, NAVFAC , DM 2005/ 26

27- Ir. W.J.Vlasblom، Introduction to dredging equipment ،2003,chapter3 per Bruun, 1999 ،Port Engineering ،4th Edition ،Gulf Publishing Company.

28 M. Petersen، 1991, River Engineering. sediment transport mechanics, 2014,chapter 9.

29- Report of working Group ,2008,Factors Involved in Standardizing of the Dimensions of class V Inland Waterways No. 20 ,PIANC.

30- Sediment dredging at superfund megasite, 2007,the national academies press.

31- Standardization of Ships & Inland Waterways for River, Sea Navigation,Report of working group No.16 , PIANC ,1996.

32-TAPH Working Group II30-in Cooperation with IMPA & IALA,(2010),Approach channels Preliminary Guidelines ,First Report of PIANC.