

مطالعه اثر آبشکنها بر الگوی امواج و جریانات دریایی در کرانه سواحل به کمک شبیه سازی ریاضی

پیمان بدیعی

معاون پژوهش و مطالعات منابع آب ایران

(تاریخ دریافت ۷۹/۷/۴، تاریخ تصویب ۸۰/۹/۳)

چکیده

در این مقاله مبانی توسعه یک مدل ریاضی که بتواند تاثیر آبشکنها را بر میدان جریانات ناشی از امواج در نزدیک ساحل شبیه سازی نماید، توضیح داده شده است. مدل مورد بحث که با استفاده از روش تفاضل محدود^۱ نگاشته شده است، جریانهای ناشی از امواج را با استفاده از حل عددی معادلات دو بعدی Navier Stokes که در عمق انتگرال گیری شده اند، محاسبه مینماید. با توجه به اهمیت اندرکنش موج-جریان در شکل گیری رژیم هیدرودینامیک ناحیه کرانه ای^۲، تدابیر لازم برای منظور داشتن این فرآیند در محاسبات برنامه ریزی شده در این مدل ریاضی اندیشیده شده است. مدل ریاضی توسعه یافته با اطلاعات حاصل از اندازه گیریهای آزمایشگاهی گزارش شده در مرجع [۱] و برخی مراجع دیگر مورد واسنجی و تصدیق قرار گرفته است. مقایسات نتایج محاسبات در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش موج-جریان صورت گرفته است و اثر ملحوظ داشتن این فرآیند در اصلاح نتایج مورد بحث قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: مدل سازی ریاضی، معادلات Navier Stokes انتگرال گیری شده در عمق، روش تفاضل محدود، آب شکن، جریانات ناشی از امواج، اندرکنش موج-جریان، منطقه ساحلی

مقدمه

است و سپس اثرات ملحوظ نمودن این پدیده در بهبود نتایج محاسبات و انطباق بیشتر آنها با نتایج اندازه گیریهای آزمایشگاهی مورد بحث قرار گرفته است.

زیر مدل جریان

جریان اطراف آبشکنها اصولا دارای یک ماهیت سه بعدی است، لیکن مشکلات موجود در مدل سازی سه بعدی، کاربرد چنین مدلی را در شبیه سازی محدوده های بزرگ ساحلی عملا غیر ممکن میسازد. علاوه بر این پدیده های سه بعدی عمدتا در محدوده نزدیک به آبشکنها از اهمیت برخوردار هستند و در فواصل دورتر یک مدل دوبعدی جوابگوی بسیاری از مسائل مهندسی است. لذا در این مطالعه یک مدل دو بعدی انتگرال گیری شده در عمق و متوسط گیری شده در زمان بر مبنای روابط Navier-Stokes برای زیر مدل جریان کفایت مینماید. این معادلات به شکل زیر هستند:

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{d(U, d)}{\partial x_i} = 0$$

(۱)

طراحی و اجرای آبشکنها به عنوان سازه هایی که با هدف حفاظت سواحل در مقابله با فرسایش ناشی از حمله امواج احداث میشوند نیازمند ابزارهای مهندسی است که بر مبنای شناخت مناسب از اندرکنش این نوع سازه ها با محیط اطراف خود توسعه یافته اند. یکی از این ابزارها مدل های عددی هستند. در مقاله حاضر از یک مدل عددی به نام NEWIC (NEAR SHORE WAVE INDUCED CURRENT) که در جریان انجام این مطالعات نگاشته شده است، جهت بررسی تاثیر آبشکنها بر الگوی جریانات ناشی از امواج در منطقه کرانه ای استفاده شده است. نتایج محاسبات این مدل با اطلاعات حاصل از اندازه گیریهای آزمایشگاهی که در مرجع [۱] تشریح شده اند، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته اند. NEWIC شامل دو بخش (زیر مدل) اصلی است؛ زیر مدل موج و زیر مدل جریان. زیر مدل موج در مرجع [۱] توضیح داده شده است. در این مقاله مجموعه معادلات حاکم بر زیر مدل جریان و روش حل عددی آنها به اجمال تشریح شده است. محاسبات مدل ابتدا بدون ملحوظ نمودن اثر اندرکنش موج و جریان با نتایج آزمایشات مقایسه شده

در رابطه فوق v_i ضریب لزجت گردابه ای است که بر اساس رابطه پیشنهادی مرجع [۲] به شکل زیر محاسبه میگردد:

$$v_i = N l_x \sqrt{gd} \quad (۶)$$

که l_x فاصله از خط ساحل است. بر اساس نظر مولفین مرجع [۲] رابطه فوق فقط بعد از شکست موج صادق است و خارج از ناحیه کرانه ای^۷ یک مقدار حداقل $(v_{i,min} = ۰/۰۰۰۵)$ برای این ضریب پیشنهاد شده است.

تنشهای تشعشی توسط رابطه زیر قابل محاسبه میباشند.

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{2} [(3 + \cos 2\theta)n_w - 1] & E n_w \sin \theta \cos \theta \\ E n_w \sin \theta \cos \theta & \frac{E}{2} [(3 - \cos 2\theta)n_w - 1] \end{bmatrix} \quad (۷)$$

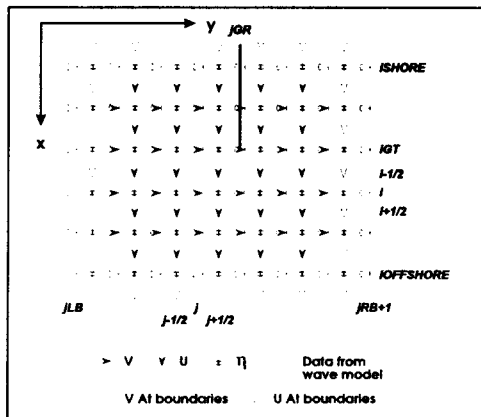
x امتداد عمود بر ساحل، y امتداد موازی با ساحل، E چگالی انرژی موج، θ زاویه برخورد موج با محور x و n_w از رابطه:

$$n_w = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (۸)$$

محاسبه میشود. k عدد موج $\left(k = \frac{2\pi}{L} \right)$ و L طول موج است.

حل عددی

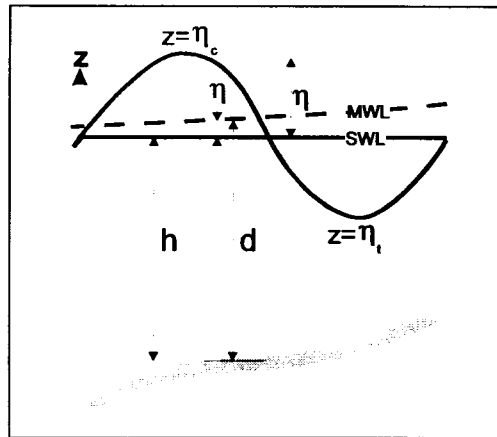
روش حل عددی تفاوتیهای محدود ضمنی در جهات متغیر^۸ (ADI) روی یک شبکه محاسباتی یک در میان^۹ در زیر مدل جریان بکار گرفته شده است. شکل (۲) بیانگر شیوه گره بندی محیط محاسباتی است.



شکل ۲: شیوه یک در میان در گره بندی محیط محاسباتی.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho d} \frac{\partial}{\partial x_j} (S_{ij} - T_{ij}) - \frac{\tau_{ij}}{\rho d} \quad (۲)$$

شکل (۱) برخی پارامترهای اصلی مورد استفاده در این معادلات را تعریف مینماید.



شکل ۱: تعریف پارامترهای مرتبط با موج مورد استفاده در زیر مدل جریان.

در این معادلات S_{ij} و T_{ij} به ترتیب تانسورهای تنشهای تشعشی^۲ و تنشهای آشفتگی^۴، τ_{ij} تنش ناشی از اصطکاک کف و U_i سرعت جریان در جهت x_i است.

برای محاسبه اصطکاک بستر از روابط پیشنهاد شده در مرجع [۱] استفاده شده است. در این روابط فرض بر این است که سرعت جریان بسیار کمتر از سرعت مداری^۵ موج میباشند. این روابط عبارتند از:

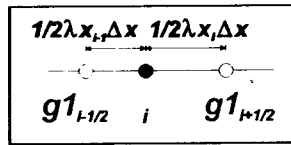
$$\tau_{ix} = 4.0 \rho \frac{C_f}{\pi} \hat{u}_{nw} U \quad (۳)$$

$$\tau_{iy} = 2.0 \rho \frac{C_f}{\pi} \hat{u}_{nw} V \quad (۴)$$

که در آنها سرعت مداری موج در نزدیک بستر، \hat{u}_{nw} از رابطه $\hat{u}_{nw} = \frac{\pi H}{T \sinh(kd)}$ و ضریب اصطکاک $C_f = ۰/۰۱$ در نظر گرفته شده است.

تنشهای آشفتگی بر اساس مفهوم لزجت گردابه ای^۶ Boussinesque و با استفاده از رابطه زیر محاسبه میشوند:

$$\frac{T_{ij}}{\rho d} = v_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (۵)$$



شکل ۴: نماد مورد استفاده در استخراج معادله (۱۳)

مقدار gI_i در یک شبکه یک در میان معلوم نیست. اگر از متوسط وزنی gI در گره i بجای gI_i در رابطه (۱۳) استفاده نماییم، خواهیم داشت:

$$\left. \frac{\partial gI}{\partial x} \right|_i = \frac{gI_{i+1/2} - gI_{i-1/2}}{\frac{1}{2}(\lambda_{x_i} + \lambda_{x_{i+1}})\Delta x} \quad (14)$$

این رابطه فقط در حد درجه اول دقت دارد چرا که از درون یابی خطی برای تخمین gI_i استفاده شده است. لیکن اگر $\lambda_{x_i} = \lambda_{x_{i+1}}$ باشد، مقدار gI_i از رابطه (۱۳) حذف میشود و رابطه (۱۴) از درجه دوم دقت خواهد شد. در این مطالعه در مواردی که از گره بندی با فواصل نامساوی استفاده شده است محیط محاسباتی به نواحی با گره بندی متساوی الفاصله تقسیم شده است و فقط در مرز این نواحی دقت از مرتبه اول خواهد بود. استفاده از این روش هیچگونه ناپایداری در محاسبات ایجاد ننمود.

در خط ساحل، سرعت عمود بر ساحل صفر فرض شده است و شرطی روی سطح متوسط آب ($\bar{\eta}$) اعمال نشده است. دو گزینه برای شرط مرزی سرعت موازی ساحل در این مرز در نظر گرفته شده است که عبارتند از:

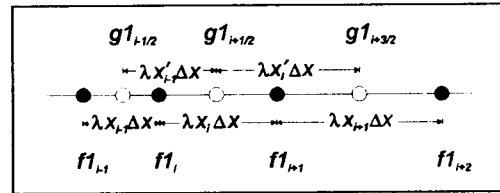
$$V=0 \quad (\text{Dirichlet boundary condition})$$

$$\left. \frac{\partial V}{\partial x} \right| = 0 \quad (\text{Neumann boundary condition})$$

مرزهای جانبی میتوانند کاملاً بسته یا نیمه بسته باشند. در قسمتهای بسته مرز، V صفر فرض میشود، U بر اساس شرط مرزی دیوار^۱، که میدان جریان را در دو طرف دیوار متقارن فرض مینماید، محاسبه میگردد. هیچ شرطی در مرزهای جانبی روی $\bar{\eta}$ اعمال نمیکردد. در قسمتهای باز مرز، شرط مرزی Neumann در مورد هر سه مجهول U ، V و $\bar{\eta}$ اعمال میگردد.

در مرز دور از ساحل یکی از شروط مرزی Neumann یا Dirichlet نسبت به U و V اعمال میگردد و $\bar{\eta}$ در این

شکل (۳)، متغیرهای مورد استفاده در استخراج روابط تفاوت محدود روی یک شبکه یک در میان با فواصل متغیر را نشان میدهد.



شکل ۳: نمادهای مورد استفاده در گره بندی با فواصل متغیر.

Δx و Δy فواصل گره های مبنا در جهات x و y هستند. ضرایب λ_{x_i} و λ_{y_i} در هر گره جهت تولید شبکه گره های با فواصل متغیر در محیط محاسباتی مورد استفاده قرار میگیرند. رابطه بین λ_{x_i} و $\lambda_{x_{i+1}}$ براساس شکل فوق به صورت زیر است:

$$\lambda_{x_i} \Delta x = \frac{1}{2}(\lambda_{x_i} \Delta x + \lambda_{x_{i+1}} \Delta x) \Rightarrow \lambda_{x_i}' = \frac{1}{2}(\lambda_{x_i} + \lambda_{x_{i+1}}) \quad (9)$$

تابع fI را میتوان به کمک سری Taylor به شکل زیر بسط داد:

$$fI_{i+1} = fI_i + (\lambda_{x_i} \Delta x) \left. \frac{\partial fI}{\partial x} \right|_i + \frac{(\lambda_{x_i} \Delta x)^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 fI}{\partial x^2} \right|_i + O(\Delta x)^3 \quad (10)$$

$$fI_{i-1} = fI_i - (\lambda_{x_{i-1}} \Delta x) \left. \frac{\partial fI}{\partial x} \right|_i + \frac{(\lambda_{x_{i-1}} \Delta x)^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 fI}{\partial x^2} \right|_i + O(\Delta x)^3 \quad (11)$$

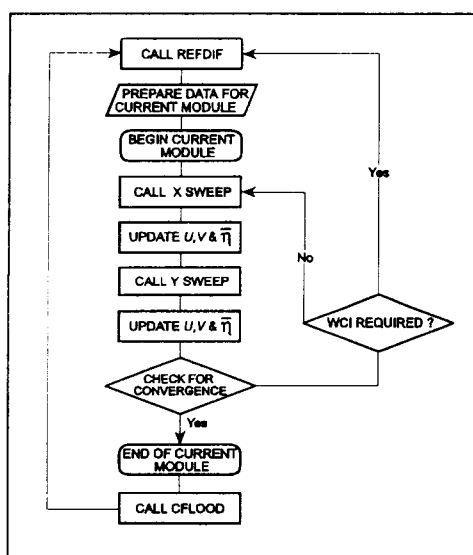
چنانچه رابطه (۱۰) را در $(\lambda_{x_{i-1}})^2$ و رابطه (۱۱) را در $(\lambda_{x_i})^2$ ضرب کنیم و حاصل را با یکدیگر جمع نماییم خواهیم داشت:

$$\left. \frac{\partial fI}{\partial x} \right|_i = \frac{\lambda_{x_{i-1}}^2 fI_{i+1} + (\lambda_{x_i}^2 - \lambda_{x_{i-1}}^2) fI_i - \lambda_{x_i}^2 fI_{i-1}}{\lambda_{x_i} \lambda_{x_{i-1}} (\lambda_{x_i} + \lambda_{x_{i-1}}) \Delta x} + O(\Delta x)^2 \quad (12)$$

و با شیوه ای مشابه و با توجه به شکل (۴) میتوان رابطه زیر را بدست آورد:

$$\left. \frac{\partial gI}{\partial x} \right|_i = \frac{\lambda_{x_{i-1}}^2 gI_{i+1/2} + (\lambda_{x_i}^2 - \lambda_{x_{i-1}}^2) gI_i - \lambda_{x_i}^2 gI_{i-1/2}}{\frac{1}{2} \lambda_{x_i} \lambda_{x_{i-1}} (\lambda_{x_i} + \lambda_{x_{i-1}}) \Delta x} + O(\Delta x)^2 \quad (13)$$

است، اندرکنش بین موج و جریانات ناشی از امواج به عنوان یک گزینه قابل انتخاب در برنامه گنجانیده شده است. این فرآیند توسط یک حلقه محاسباتی عملی می‌گردد. بعد از پایان هر گام زمانی و در صورت عدم دستیابی به همگرایی در زیر مدل جریان، میدان جریان و اعماق محاسبه شده آب به زیر مدل موج که REFDIF نام دارد، منتقل میشوند و میدان جدید موج که تحت تاثیر جریانات محیطی قرار گرفته است، محاسبه می‌گردد. مشخصات موج اصلاح شده سپس مجدداً به زیر مدل جریان داده میشود و این حلقه تا همگرایی میدان جریان ادامه می‌یابد.



شکل ۵: نمودار مراحل اجرای برنامه در زیر مدل جریان.

اثرات ناحیه بیرونی^{۱۳} بر جریانات ناشی از امواج

در نتیجه شکست موج حرکت غیر چرخشی سیال در خارج از ناحیه کرانه ای به یک جریان چرخشی توأم با استهلاك انرژی در داخل ناحیه کرانه ای تبدیل میشود. استهلاك انرژی ناشی از ایجاد جریان آشفته، عامل اصلی در شکل گیری جریانات ناشی از امواج و تغییر در سطح متوسط آب در ناحیه کرانه ای است. در اولین قدمهای مرتبط با استخراج معادلات حاکم بر جریانات ناشی از امواج که با معرفی مفهوم تنشهای تشعشی توسط مؤلف مرجع [۶] آغاز گردید، فرض بر این بود که استهلاك انرژی درست پس از نقطه شکست موج آغاز می‌گردد. سرعت جریان موازی ساحل و خیزآب ناشی از موج که با این فرض محاسبه می‌گردد، در مقایسه با نتایج حاصل از اندازه گیری،

مرز صفر فرض میشود. آبشکنها، مرزهای داخلی قلمداد میشوند. محور تقارن هر آبشکن از گره های V عبور مینماید و در محل آبشکنها سرعت V صفر فرض می‌گردد. مشابه آنچه در مورد مرزهای جانبی بسته گفته شد، در محل آبشکنها شرط مرزی دیوار نسبت به دو پارامتر دیگر ($\bar{\eta}$ و U) اعمال می‌گردد. به منظور ایجاد قابلیت شبیه سازی سواحل با شکل نامنظم، موقعیت خط ساحل به عنوان یک متغیر به برنامه معرفی شده است. یک عمق حداقل (d_{min}) به همه گره هایی که عمق آب ساکن در آنها از این مقدار کمتر است نسبت داده میشود. خط ساحل بر این اساس، از مجموعه نزدیکترین گره ها به خشکی که دارای عمق حداقل میباشد، تشکیل میشود.

آب افتادن در خشکی به دلیل خیزآب ناشی از موج نیز در مدل لحاظ شده است. مقدار خیزآب در محل خط ساحل و یک نقطه ماقبل آن به عنوان مبنای برون یابی خطی برای محاسبه اعماق ناشی از خیزآب در گره های تعریف شده در خشکی مورد استفاده قرار گرفته اند. مقدار خیزآبی که بدین ترتیب محاسبه شده است به عمق واقعی آب ساکن در این گره ها اضافه میشود و چنانچه عمق حاصله از عمق حداقل بیشتر بود این نقاط نقاط "تر" محسوب می‌گردند. بر این اساس محاسبات مجدداً بر مبنای اعماق اصلاح شده تکرار میشود. تجربه نشان داد که یک تکرار در این مورد کفایت مینماید.

زیر مدل جریان از دو زیر برنامه^{۱۱} اصلی تشکیل یافته است؛ زیر برنامه XSWEEP و زیر برنامه YSWEEP که براساس روش ADI، کل محیط محاسباتی، شامل مرزها را به ترتیب در جهات X و Y پوشش میدهند و مقادیر مجهولات را در نصف گام زمانی ارتقاء میدهند. این روال در داخل یک حلقه زمانی در برنامه ادامه می‌یابد تا زمانی که مقادیر مجهولات مورد نظر (U ، V و $\bar{\eta}$) به حالت پایدار برسند. ورودیهای زیر مدل جریان از زیر مدل موج گرفته میشوند. زیر برنامه CFLOOD با هدف اصلاح خط ساحل و عمق آب اجرا میشود و کل روند توضیح داده شده در قبل یکبار دیگر تکرار میشود تا میدان سرعتها در کل گره ها محاسبه گردد.

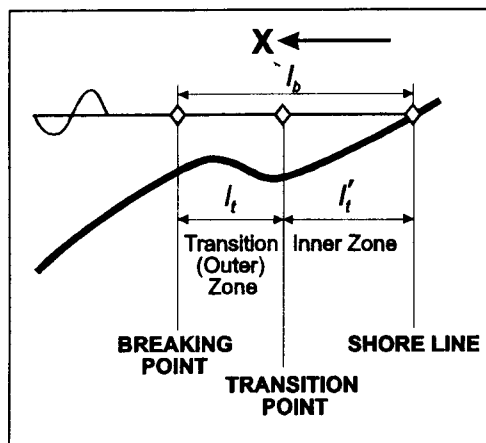
اندرکنش موج و جریان

همانگونه که در نمودار اجرا^{۱۲} مدل نشان داده شده

انرژی چرخکهای سطحی، D_b استهلاک انرژی ناشی از آشفتگی جریان، S_r تنش تشعشی کل، S_w تنش تشعشی ناشی از حرکت منظم موج و S_r نقش چرخکهای سطحی را در افزایش تنشهای تشعشی بیان میدارند. در نتیجه گیری این مقایسه چنین بیان شده است که روش ارائه شده در مرجع [۱۱] هم به لحاظ توصیف فیزیکی فرآیند و هم به لحاظ تجربی مناسب ترین روش است. روش مذکور در مرجع [۱۲] بسط داده شد تا مسائل شبه سه بعدی را نیز در یک مدل جریانات نزدیک ساحل جوابگو باشد. روشهای فوق اصولاً بر اساس اطلاعات حاصل از امواج منظم واسنجی شده اند و در مورد آزمایشات با امواج نامنظم که در این مطالعه مطرح بوده اند کاربرد ندارند.

در یک روش جایگزین و غیر مستقیم، بجای اصلاح مقادیر تنشهای تشعشی، انرژی (ارتفاع) امواج که در محاسبه تنشهای تشعشی مورد استفاده قرار میگیرند اصلاح میگردند. روشهای پیشنهاد شده در مرجع [۱۳] در این رده قرار دارد. در این روش نقطه شکست بطور مصنوعی به سمت ساحل کشانده میشود و ارتفاع امواج که بر اساس موقعیت اصلاح شده نقطه شکست محاسبه شده اند، مبنای محاسبه تنشهای تشعشی قرار میگیرند.

روش ارائه شده در مرجع [۱۳] که تطابق بیشتری با مدل NEWIC داشت، در شبیه سازیهایی که در بخشهای آتی این مقاله مطرح خواهد شد مورد آزمایش قرار گرفت لیکن این روش برای شرایطی که در پروفیل بستر پشته دور از ساحل^{۱۶} وجود داشته باشد مناسب نیست.



شکل ۶: زیر ناحیه های مختلف در ناحیه کرانه ای.

اختلافاتی را به صورت سیستماتیک نشان میدهند. برای توضیح مشخصات جریان بعد از شکست موج، مؤلفین مرجع [۷] ناحیه کرانه ای را به سه بخش تقسیم نمودند؛ ناحیه بیرونی (انتقالی)^{۱۴}، ناحیه درونی و ناحیه بالا روی (آبشستگی)^{۱۵}. تبدیل امواج از یک میدان منظم جریان غیر چرخشی به یک جریان آشفته چرخشی ناگهانی نیست و از یک مرحله گذار و انتقالی در ناحیه بیرونی به ناحیه درونی صورت میگیرد. در مرجع [۸] پیشنهاد شده است که در ناحیه بیرونی انرژی پتانسیل موج به یک جریان ممتنم به سمت ساحل تبدیل میشود که سبب به حرکت در آوردن چرخکهای سطحی میگردد. به نظر مؤلفین مرجع [۹] در ناحیه بیرونی انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی تبدیل میشود و سپس انرژی موجود در ناحیه درونی از طریق آشفتگی جریان مستهلک میشود. بر مبنای هر دوی این نظریات، در ناحیه بیرونی با افت انرژی پتانسیل مواجه میشویم که همراه با کاهش موضعی ارتفاع موج میباشد. در این زمان هنوز استهلاک انرژی صورت نگرفته است بلکه انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی تبدیل یافته است. مشخصه های نواحی بیرونی و درونی را میتوان به شرح زیر برشمرد:

۱ - در ناحیه بیرونی (انتقالی) بر اساس نظر ارائه شده در مرجع [۹]، سطح متوسط آب تقریباً ثابت باقی می ماند، در حالیکه در ناحیه درونی سطح متوسط آب به شکلی سریع افزایش می یابد.

۲ - ارتفاع موج در ناحیه بیرونی به شکلی موضعی کاهش می یابد بدون اینکه این کاهش به منزله استهلاک انرژی موج و یا افزایش تنشهای تشعشی موج باشد. در ناحیه درونی، بر اساس نظریه مرجع [۹]، تنشهای تشعشی و گذر انرژی امواج بیشتر میشود.

مرجع [۱۰] چهار روش پیشنهاد شده توسط محققین مختلف را با هم مقایسه نموده است. در هر چهار روش روابط انرژی و ممتنم اصلاح شده اند تا اثر چرخکهای سطحی (یا تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی) را در نظر بگیرند. روابط عمومی که میتوان از آن استفاده نمود عبارتست از:

$$\frac{\partial}{\partial x}(E_w c_g) + \Gamma_x = D_b$$

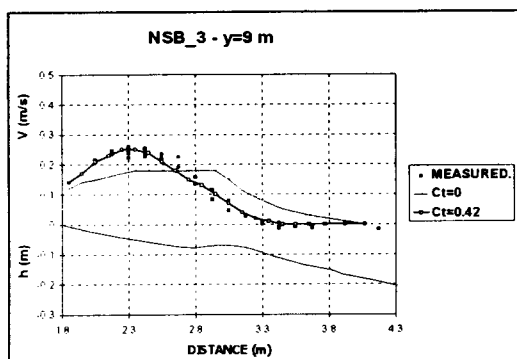
$$S_t = S_w + S_r$$

که $E_w c_g$ گذر انرژی در حرکت منظم موج است، Γ_x گذر

آزمایشات NSB_3 و NSB_4 شبیه سازی میشوند. همانگونه که در مرجع [۱] اشاره شد، نتایج آزمایشات NSB_1 و NSB_2 به دلیل وجود جریانات سوزنی شکل^{۱۷} قابل مقایسه با مدل حاضر نمیباشد چرا که مدل حاضر جریانات زیر کش^{۱۸} حاصل از امواج را شبیه سازی نمی نماید. از آزمایش NSB_3 برای واسنجی مدل در مورد امواج منظم استفاده گردید. برای ضریب اصطکاک C_f مقدار ۰/۰۱۵ انتخاب شد، ثابت N در محاسبه ضریب لزجت گردابه ای (رابطه ۶)، ۰/۰۱ در نظر گرفته شد و در رابطه نرخ استهلاك انرژی (رابطه ۱۵)، ضرایب نرخ اتلاف انرژی، $K=0/35$ و ارتفاع پایدار موج، $\gamma=0/4$ در نظر گرفته شدند.

اثر ناحیه بیرونی (انتقالی)

همانگونه که قبلا اشاره گردید، تغییر شکل موج در ناحیه بیرونی اثر بارزی روی توزیع سرعت جریان موازی ساحل دارد. با توجه به نمادهای تعریف شده در شکل (۶)، اثر طول ناحیه بیرونی (که در پارامتر $C_f = l_f/l_b$ نهفته است) بر منحنی توزیع سرعت جریانات موازی ساحل در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷: اثر نسبت طول ناحیه بیرونی C_f ، بر توزیع سرعت جریانات موازی ساحل.

اگر C_f برابر صفر فرض شود، یعنی از اثر ناحیه بیرونی صرفنظر شود، حداکثر سرعت موازی ساحل در پیش بینی مدل نسبت به اندازه گیریها کمتر خواهد شد. بر اساس یک قضاوت مشاهداتی، جهت انطباق بیشتر نتایج محاسبات مدل با داده ها، مناسب ترین مقدار $C_f=0/42$ تشخیص داده شد. نتایج پیش بینی های مدل برای سایر مقاطع در شکل (۸) نشان داده شده است. ارتفاع امواج محاسبه شده در مقایسه

روش دیگری در مقاله حاضر برای این منظور پیشنهاد شده است. ایده اصلی اصلاح انرژی موج در ناحیه بیرونی است. طول ناحیه بیرونی l_f همانگونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، کسری از طول ناحیه کرانه ای، l_b فرض میشود. نسبت $C_f = l_f/l_b$ به عنوان یک پارامتر قابل تنظیم در نظر گرفته شده است. در روش پیشنهادی محل شکست ثابت نگه داشته شد لیکن در ناحیه بیرونی مقدار استهلاك انرژی که در مرجع [۱۴] به شکل زیر پیشنهاد شده است:

$$D = \frac{K}{h} [(E - E_{st}) c_g]$$

$$E_{st} = \frac{1}{8} \rho g (H_{st})^2, \quad H_{st} = \gamma h$$

(۱۵)

کمتر از ناحیه درونی در نظر گرفته شده است. در رابطه فوق که در زیر مدل موج مورد استفاده قرار گرفته است K ضریب استهلاك انرژی، E انرژی موج، E_{st} انرژی پایدار موج، γ ضریب ارتفاع پایدار موج و D نرخ استهلاك انرژی در واحد سطح است. کاهش میزان استهلاك انرژی در ناحیه بیرونی با کاهش ضریب K با توجه به رابطه زیر صورت گرفته است.

$$K_{\text{transition zone}} = C_K K_{\text{inner zone}}$$

بر اساس تجربیات حاصل از این مطالعه، مقدار C_K برابر ۰/۲ نتایج قابل قبولی بدست میدهد و لذا C_f تنها پارامتر قابل تنظیم در این روش میباشد.

ضریب لزجت گردابه ای، γ ، حداکثر مقدار خود را در مرز دو ناحیه درونی و بیرونی بدست می آورد و بعد از این نقطه (به سمت دریا) به آرامی به حداقل خود یعنی ۰/۰۰۰۵ سیر مینماید.

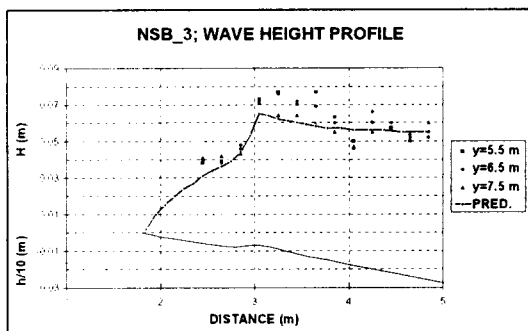
شبیه سازی ریاضی آزمایشات فیزیکی

در این بخش پیش بینی های مدل ریاضی NEWIC با نتایج حاصل از آزمایشات فیزیکی گزارش شده در مرجع [۱] مقایسه شده اند. کد گذاری آزمایشات آزمایشگاهی که در زیر مورد استفاده قرار گرفته اند از مرجع [۱] اقتباس شده است.

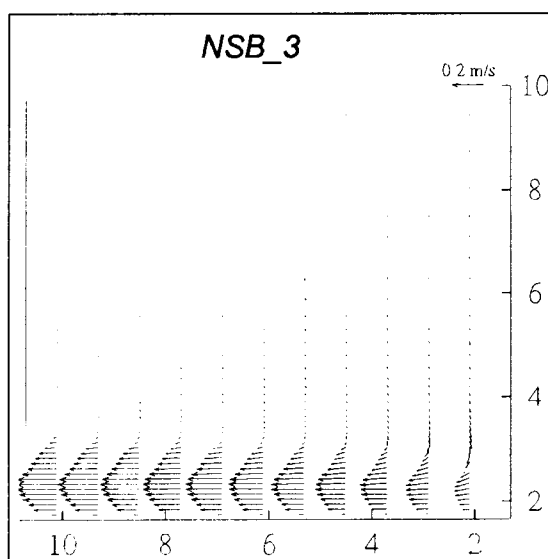
آزمایشات روی ساحل مستقیم و با طول

محدود

در اولین مرحله ساحل مستقیم و با طول محدود یعنی



شکل ۹: ارتفاع موج محاسبه شده در آزمایش NSB_3.

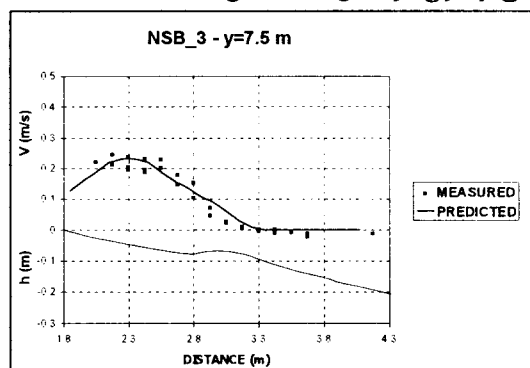


شکل ۱۰: تصویر کلی سرعت جریانات موازی ساحل محاسبه شده در آزمایش NSB_3.

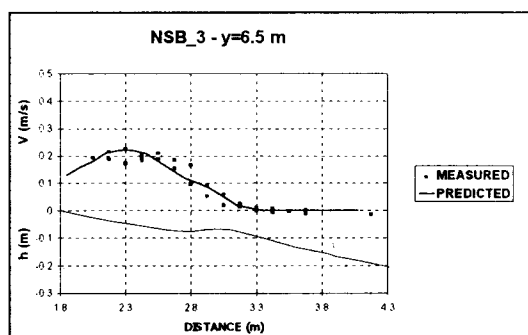
با توجه به شکل (۸) سرعت‌های محاسبه شده در طول ساحل انطباق خوبی با اندازه گیریها نشان میدهند مگر در ناحیه نزدیک به مرز بالا دست که مقادیر سرعتها بیشتر محاسبه شده است. در شکل (۹) دیده میشود که زوال انرژی موج در ناحیه کرانه ای تطابق نسبتاً خوبی با نتایج اندازه گیریها نشان میدهد. محل شکست موج نیز به خوبی پیش بینی شده است، لیکن ارتفاع موج در محل شکست از مقدار اندازه گیری شده آن کمتر است.

شرایط در آزمایش NSB_4 کاملاً شبیه به NSB_3 میباشد با این تفاوت که در این آزمایش از امواج نامنظم با ارتفاع مجذور متوسط مربعات $H_{rms} = 0.1057$ m استفاده شده است. در این آزمایش در مقایسه با آزمایش قبل، ضریب

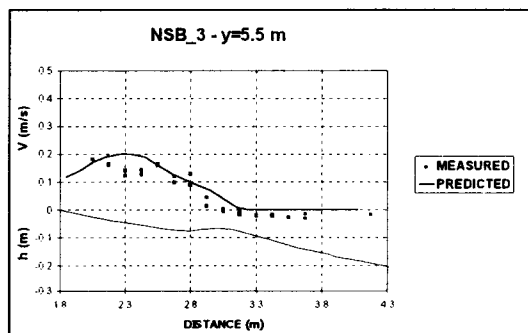
با مشاهدات آزمایشگاهی در مقاطع مختلف در شکل (۹) نشان داده شده است و تصویر کلی از جریانات موازی ساحل ناشی از امواج در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



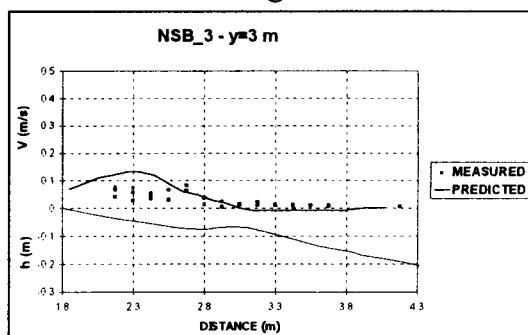
(الف)



(ب)

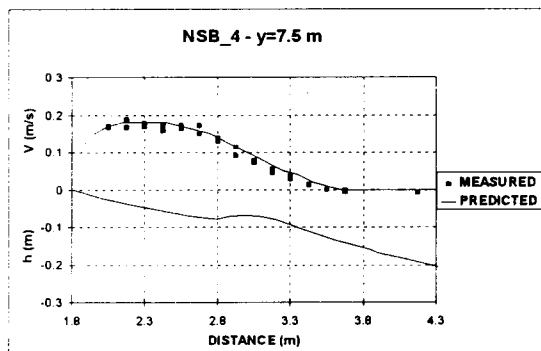


(ج)

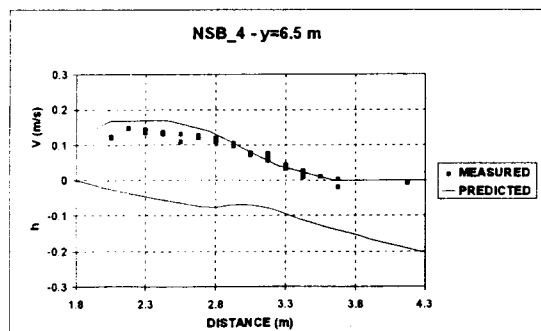


(د)

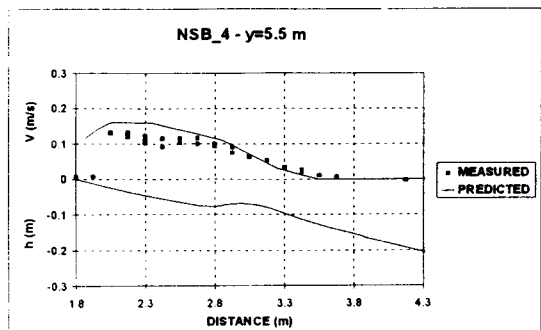
شکل ۸: سرعت‌های موازی ساحل محاسبه شده در آزمایش NSB_3، $C_f=0.42$ ، $C_r=0.015$ و $\kappa=0.35$.



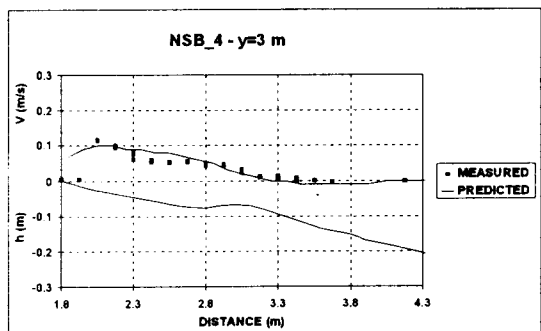
(ب-۱۲)



(ج-۱۲)



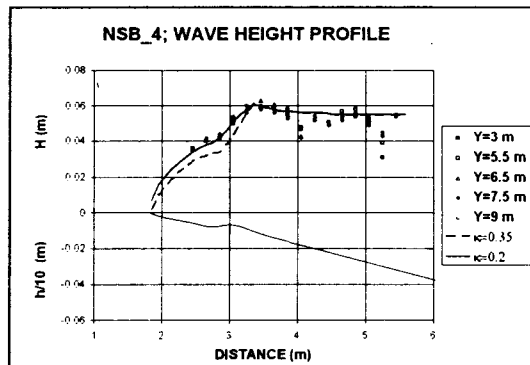
(د-۱۲)



(ه-۱۲)

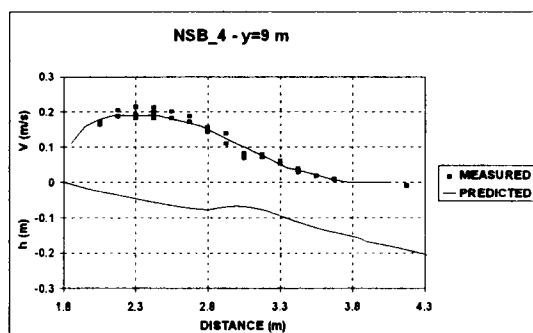
شکل ۱۲: سرعت‌های اندازه‌گیری و محاسبه شده در آزمایش NSB_4

زوال انرژی موج کمتری ($K=0.2$) باید مورد استفاده قرار گیرد تا ارتفاع موج پیش بینی شده در ناحیه کرانه ای با اندازه‌گیریهای انجام شده انطباق بیشتری داشته باشد. این مسئله بخوبی در شکل (۱۱) نمایان است.



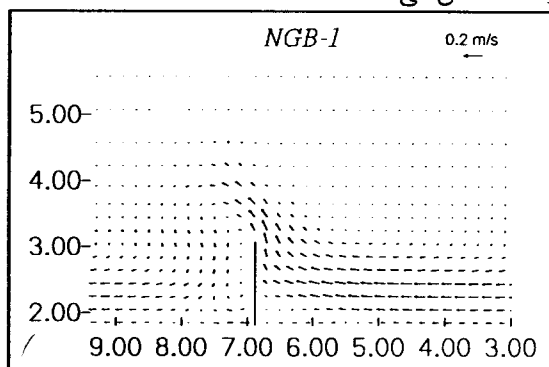
شکل ۱۱: ارتفاع موج محاسبه شده در آزمایش NSB_4

این تفاوت احتمالاً بدین سبب است که در آزمایش با امواج نامنظم عرض ناحیه کرانه ای بیشتر از آزمایش با امواج منظم است (در آزمایش NSB_3، طول b ، $1/2$ متر بود در حالیکه در آزمایش NSB_4، این طول $1/5$ متر اندازه‌گیری شده بود) و لذا طول بیشتری برای زوال انرژی موج در اختیار است. تفاوت دوم در شبیه‌سازی این آزمایش این بود که نسبت $C_r=0.34$ جوابهای مناسب تری بدست میداد. مقدار کمتر این ضریب نسبت به آزمایشات با موج منظم ($C_r=0.42$) احتمالاً به این دلیل است که در آزمایش با امواج نامنظم آشفتگی بیشتری در حرکت ذرات سیال وجود دارد و لذا طول ناحیه بیرونی کمتر میشود. مقادیر پیش بینی شده سرعتها در مقاطع مختلف در طول ساحل و تصویر کلی از جریانات موازی ساحل در اشکال (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده‌اند.

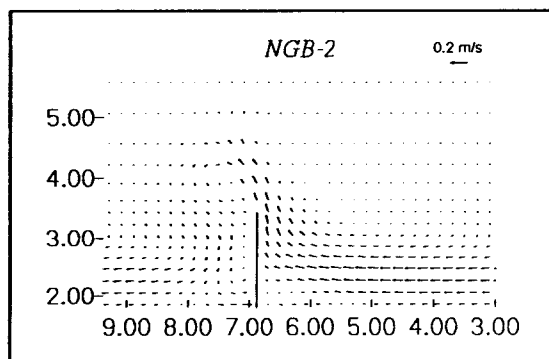
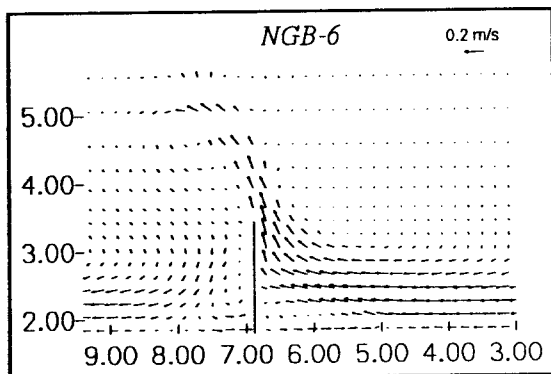


(الف-۱۲)

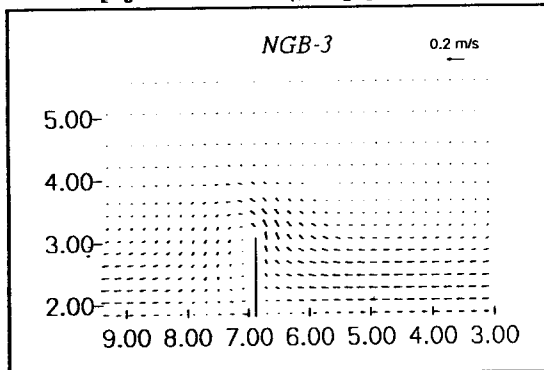
گردید. اشکال (۱۴) تا (۲۱) میادین سرعت‌های محاسبه شده بدون اثر اندرکنش موج و جریان را در آزمایشات NGB_1 تا NGB_8 نشان می‌دهند.



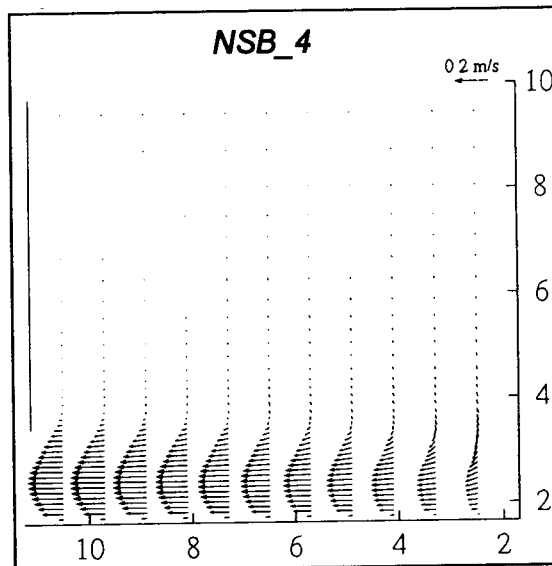
شکل ۱۴: امواج منظم، $\alpha=10^\circ$ ، $l_p/l_b=1$.



شکل ۱۵: امواج منظم، $\alpha=10^\circ$ ، $l_p/l_b=1.25$.



شکل ۱۶: امواج نامنظم، $\alpha=10^\circ$ ، $l_p/l_b=1$.



شکل ۱۳: تصویر کلی سرعت جریانات موازی ساحل محاسبه شده در آزمایش NSB_4.

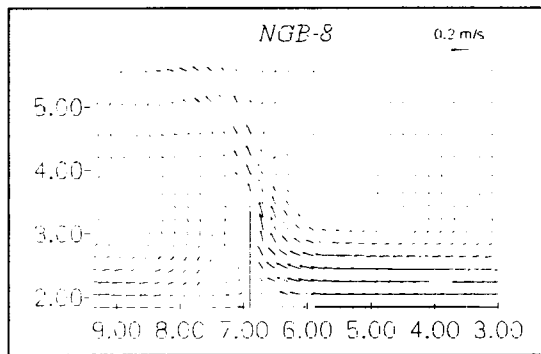
از این اشکال چنین استنباط میشود که انطباق نتایج محاسبات با پیش بینی های مدل در آزمایش NSB_4 خیلی بهتر از آزمایش NSB_3 است. بطور خلاصه مقادیر عوامل مورد استفاده در واسنجی مدل در جدول زیر ذکر گردیده اند:

جدول ۱: مقادیر بکار برده شده برای عوامل مورد استفاده در واسنجی مدل.

	موج منظم	امواج نامنظم
N	۰/۰۱	۰/۰۱
C_f	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵
κ	۰/۳۵	۰/۲
γ	۰/۴	۰/۴
C_κ	۰/۲	۰/۲
C_l	$\cong 0/4$	$\cong 0/3$

ساحل با آبشکن منفرد

در این بخش، از مدل ریاضی برای شبیه سازی جریانات ناشی از امواج در حضور یک آبشکن منفرد در آزمایشات NGB_1 تا NGB_8 استفاده گردید. همان مقادیر ذکر شده در جدول (۱) در این شبیه سازیها مورد استفاده قرار گرفت. برای اطلاع از اثر اندرکنش موج و جریان، محاسبات با و بدون در نظر گرفتن این اندرکنش انجام

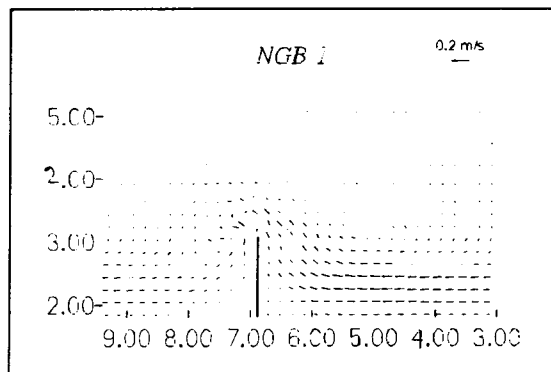


شکل ۲۱: امواج نامنظم، $\alpha=20^\circ$ ، $l_g/l_b=1.25$.

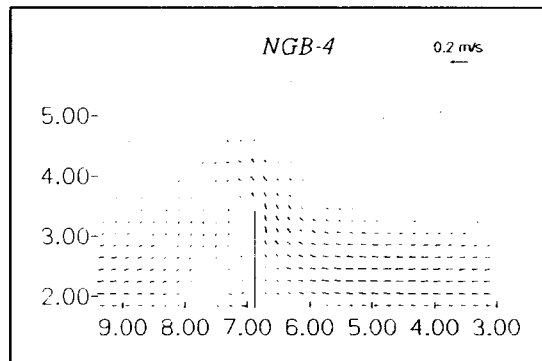
مؤلفه عمود بر ساحل سرعت‌های اندازه‌گیری شده خود از دو جزء تشکیل شده است؛ جزء مربوط به جریان زیرکش^{۱۶} و جزء مربوط به جریان موازی ساحل که توسط آبشکن به سمت دریا منحرف گردیده است. لاکن مدل موجود قادر به محاسبه جریانات زیرکش نیست و فقط جزء مربوط به جریانات منحرف شده را محاسبه می‌نماید. این نکته دلیل اصلی اختلاف بین جهت‌ها و سرعت‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده است. در یک روند عمومی، مؤلفه عمود بر ساحل سرعت‌های محاسبه شده همیشه کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده هستند.

تاثیر اندرکنش موج-جریان در محاسبات

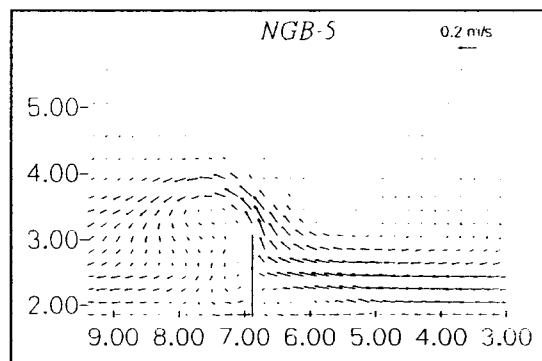
در این بخش آزمایشات قبل (NGB_1 تا NGB_8) با ملحوظ نمودن اثر اندرکنش موج-جریان در محاسبات، شبیه‌سازی گردیده‌اند. اشکال (۲۲) تا (۳۷) سرعت‌ها و ارتفاع موج را در این شبیه‌سازیها نشان می‌دهند.



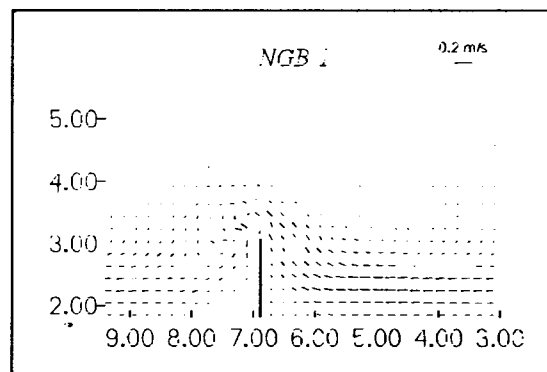
شکل ۲۲: میدان برداری سرعت‌های محاسبه شده، امواج منظم، $\alpha=10^\circ$ ، $l_g/l_b=1$.



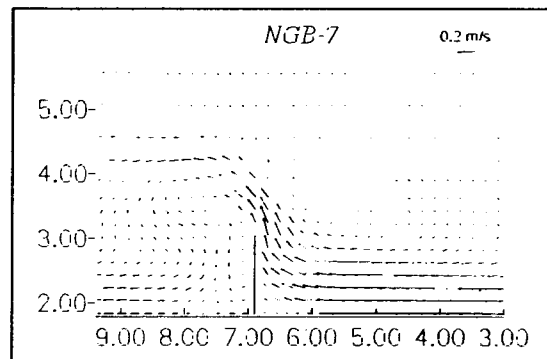
شکل ۱۷: امواج نامنظم، $\alpha=10^\circ$ ، $l_g/l_b=1.25$.



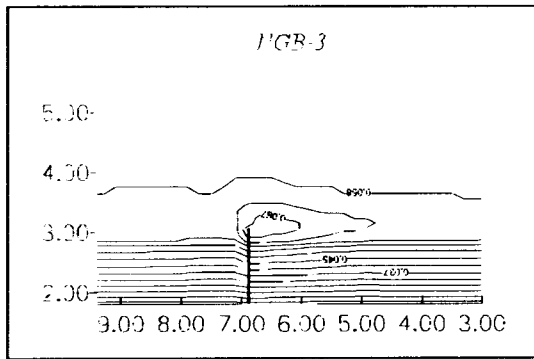
شکل ۱۸: امواج منظم، $\alpha=20^\circ$ ، $l_g/l_b=1$.



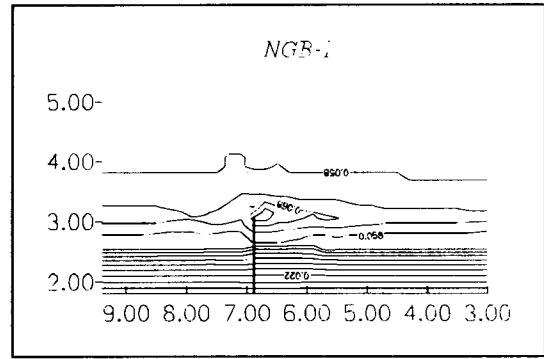
شکل ۱۹: امواج منظم، $\alpha=20^\circ$ ، $l_g/l_b=1.25$.



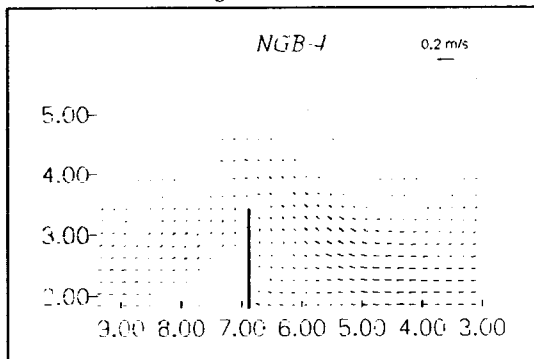
شکل ۲۰: امواج نامنظم، $\alpha=20^\circ$ ، $l_g/l_b=1$.



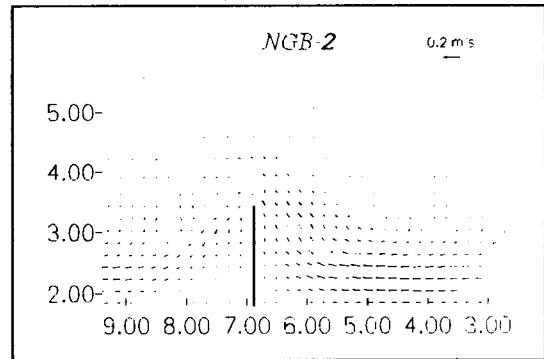
شکل ۲۷: خطوط هم ارتفاع موج محاسبه شده، امواج نامنظم،
 $I_g/I_b=1, \alpha=10^\circ$



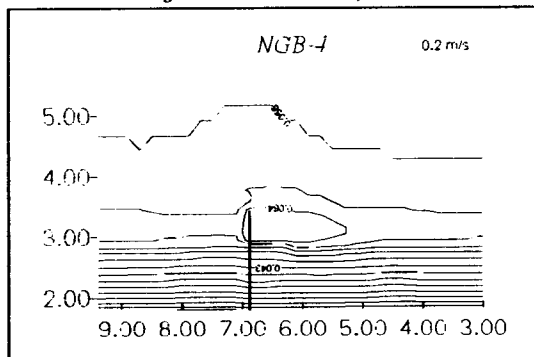
شکل ۲۳: خطوط هم ارتفاع موج محاسبه شده، امواج منظم،
 $I_g/I_b=1, \alpha=10^\circ$



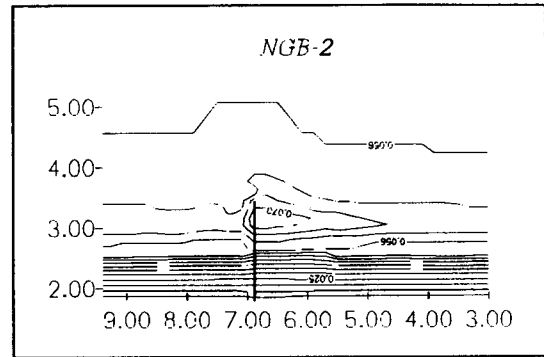
شکل ۲۸: میدان برداری سرعت‌های محاسبه شده، امواج نامنظم،
 $I_g/I_b=1.25, \alpha=10^\circ$



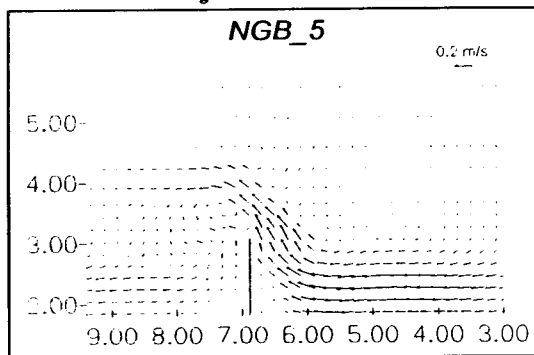
شکل ۲۴: میدان برداری سرعت‌های محاسبه شده، امواج منظم،
 $I_g/I_b=1.25, \alpha=10^\circ$



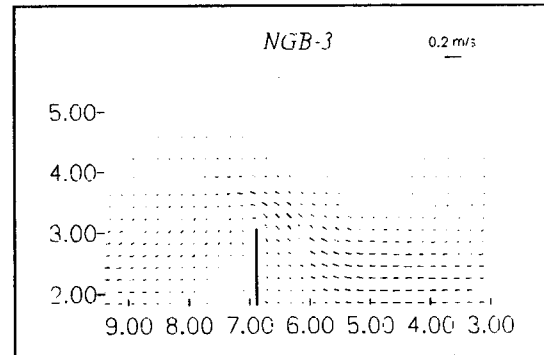
شکل ۲۹: خطوط هم ارتفاع موج محاسبه شده، امواج نامنظم،
 $I_g/I_b=1.25, \alpha=10^\circ$



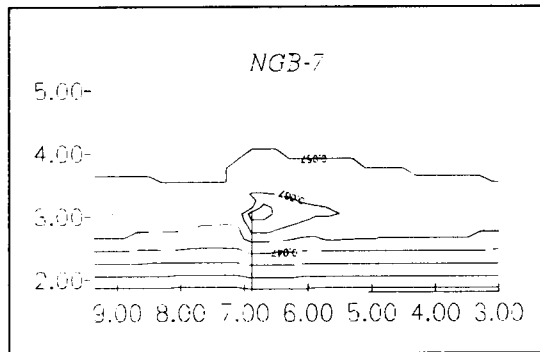
شکل ۲۵: خطوط هم ارتفاع موج محاسبه شده، امواج منظم،
 $I_g/I_b=1.25, \alpha=10^\circ$



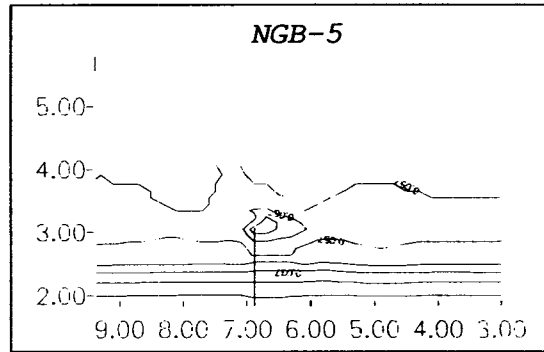
شکل ۳۰: میدان برداری سرعت‌های محاسبه شده، امواج منظم،
 $I_g/I_b=1, \alpha=20^\circ$



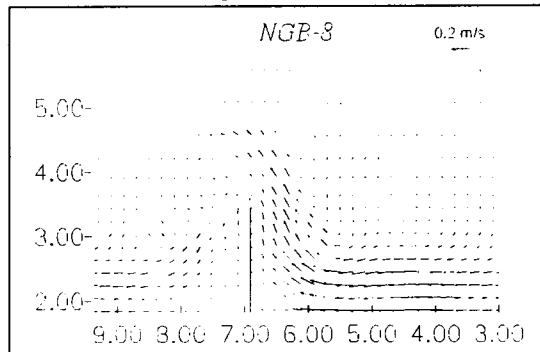
شکل ۲۶: میدان برداری سرعت‌های محاسبه شده، امواج نامنظم،
 $I_g/I_b=1, \alpha=10^\circ$



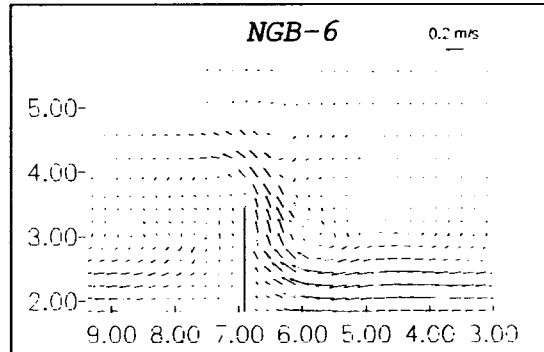
شکل ۳۵ : خطوط هم ارتفاع موج محاسبه شده، امواج نامنظم،
 $l_p/l_b=1, \alpha=20^\circ$



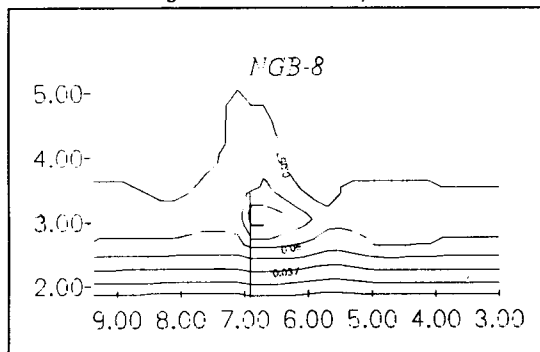
شکل ۳۱ : خطوط هم ارتفاع موج محاسبه شده، امواج منظم،
 $l_p/l_b=1, \alpha=20^\circ$



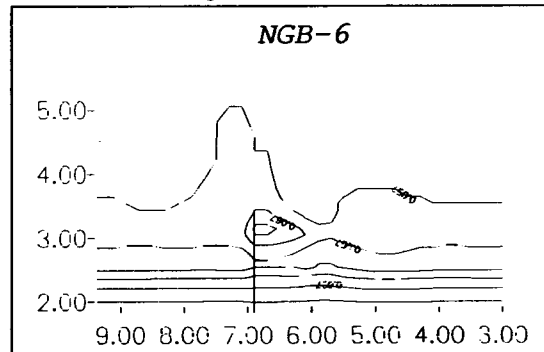
شکل ۳۶ : میدان برداری سرعت‌های محاسبه شده، امواج نامنظم،
 $l_p/l_b=1.25, \alpha=20^\circ$



شکل ۳۲ : میدان برداری سرعت‌های محاسبه شده، امواج منظم،
 $l_p/l_b=1.25, \alpha=20^\circ$

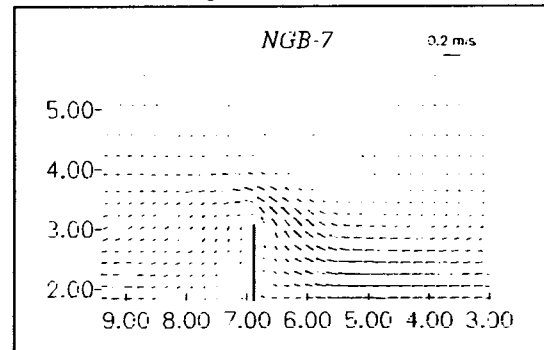


شکل ۳۷ : خطوط هم ارتفاع موج محاسبه شده، امواج نامنظم،
 $l_p/l_b=1.25, \alpha=20^\circ$



شکل ۳۳ : خطوط هم ارتفاع موج محاسبه شده، امواج منظم،
 $l_p/l_b=1.25, \alpha=20^\circ$

در این محاسبات از همان گام زمانی که در زیر مدل جریان‌ات ناشی از امواج بکار گرفته شده بود ($\Delta t=0.5$ s)، استفا ده گردید. همانطور که در این اشکال دیده میشود، اثر جریان منحرف شده بر میدان امواج کاملاً محسوس است. در تمام این شبیه سازیها ارتفاع موج در ناحیه نزدیک به دماغه آبشکن و به سمت بالا دست آن، بطور نسبی افزایش می یابد. میداین ارتفاع موج اندازه گیری شده نیز چنین ناحیه ای را نشان میدهند. در این ناحیه ارتفاع موج محاسبه شده و اندازه گیری شده در آزمایشات با امواج نامنظم.



شکل ۳۴ : میدان برداری سرعت‌های محاسبه شده، امواج نامنظم،
 $l_p/l_b=1, \alpha=20^\circ$

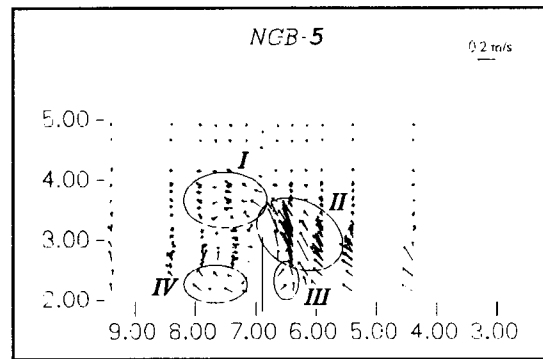
سوزنی شکل گرفته اند. مدل حاضر قادر به شبیه سازی این جریانات سوزنی شکل نیست.

الگوی جریانات در نزدیک آبشکن نیز به شکلی محسوس با ملحوظ داشتن اثر اندرکنش موج و جریان اصلاح شده است. با هدف بیان تاثیر این اندرکنش، نتایج حاصل از اندازه گیریها و محاسبات (با و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش) در آزمایش NGB_5 در شکل (۳۸) مقایسه شده اند با نادیده گرفتن اثر اندرکنش، مقایسه بین اشکال (۳۸ - الف)

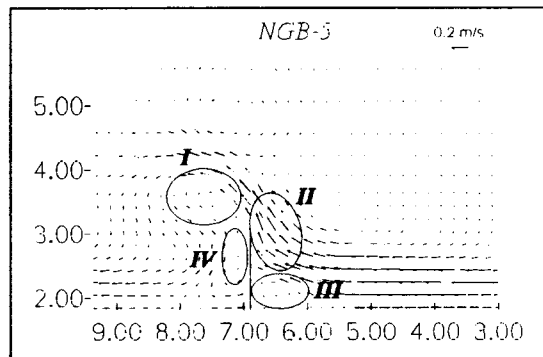
و (۳۸ - ب) نشان میدهد که تشابهاتی بین دو شکل در ارتباط با موقعیت گردابه تشکیل شده در پایین دست آبشکن (ناحیه I) وجود دارد. هرچند که گردابه محاسبه شده در این حالت بزرگتر از گردابه اندازه گیری شده است. گردابه های محاسبه شده در نواحی III و IV در شکل (۳۸ - ب) در الگوی جریان اندازه گیری شده دیده نمیشود.

الگوی جریان محاسبه شده با در نظر گرفتن اثر اندرکنش موج-جریان، به شکل محسوسی اصلاح گردیده است (شکل ۳۸ - ج). گردابه های غیر واقعی در نواحی III و IV در شکل (۳۸ - ب) حذف شده اند. شکل گیری مجدد جریان موازی ساحل در پایین دست آبشکن (ناحیه IV) در منطقه نزدیکتر به آبشکن رخ داده است که در تطابق بیشتری با الگوی اندازه گیری شده (ناحیه IV در شکل ۳۸ - الف)

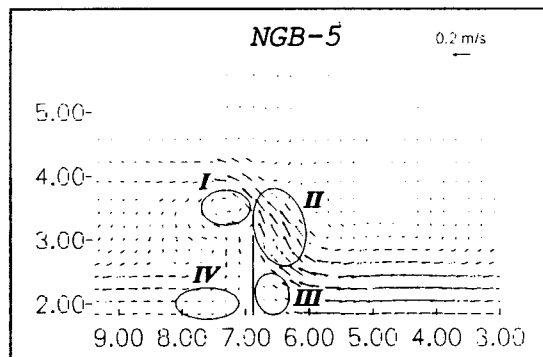
است. تمامی این اصلاحات با ملحوظ نمودن اثر اندرکنش موج و جریان حاصل شده است. جریان برگشتی نسبتاً قوی که در الگوی جریانات اندازه گیری شده در ناحیه III در شکل (۳۸ - الف) دیده میشود در نتایج محاسبات دیده نمیشود. یک توجیه احتمالی این است که جریانات برگشتی عمدتاً به دلیل جریانات زیرکش ایجاد میشوند و از آنجاییکه این جریانات توسط مدل حاضر محاسبه نمیشوند، الگوی مورد نظر نیز ایجاد نشده است. علاوه بر این اصلاحات جریان منحرف شده قوی که بدون تاثیر اندرکنش موج-جریان در آزمایشات NGB_6 و NGB_8 (با آبشکن طویل، در اشکال ۱۹ و ۲۱) حاصل شده بود، با لحاظ نمودن اثر اندرکنش تا حد زیادی تضعیف شد (اشکال ۳۲ و ۳۶). در نتایج محاسبات این آزمایشات یک گردابه در پایین دست آبشکن و نزدیک دماغه آن تشکیل گردید. هر دوی این نتایج اصلاح شده توافقی بهتری با نتایج حاصل از اندازه گیریها دارد. در نتایج حاصل از اندازه گیری، شکل گیری



(۳۸- الف)



(۳۸- ب)



(۳۸- ج)

شکل ۳۸ : آزمایش NGB_5 با موج منظم، $d_p/l_b=1$ ، $\alpha=20^\circ$
 (الف) میدان بردارهای سرعت اندازه گیری شده. (ب) میدان بردارهای سرعت محاسبه شده بدون در نظر گرفتن اندرکنش موج-جریان. (ج) میدان بردارهای سرعت محاسبه شده با در نظر گرفتن اثر اندرکنش موج-جریان.

نزدیکی بیشتری نسبت به آزمایشات با امواج منظم نشان میدهند. در آزمایشات با امواج منظم ارتفاع موج محاسبه شده بیشتر است. در این آزمایشات یک قله ثانویه در میدان ارتفاع موج اندازه گیری شده دیده میشود (اشکال ۱۱، ۱۲، ۱۵ و ۱۶ در مقاله [۱]) که در محاسبات از آن اثری نیست. این قله ها، احتمالاً به دلیل اندرکنش امواج با جریانات

۵ - در حضور آبشکن منفرد، تاثیر اندرکنش موج-جریان با مقایسه آزمایشات با و بدون در نظر گرفتن این تاثیر در محاسبات صورت گرفت. یافته های اصلی از این مقایسه این است که با نادیده گرفتن اثر این اندرکنش در محاسبات:

- گردابه های غیر واقعی که در دو طرف آبشکن ایجاد شد، در نتایج حاصل از اندازه گیریها مشاهده نگردید.

- جریانات ساحلی که توسط آبشکن و به صورت یک جریان سوزنی شکل منحرف شده بود در الگوی محاسبه شده از قدرت بیشتری نسبت به الگوی اندازه گیری شده برخوردار بود.

- جریانات منحرف شده توسط آبشکن در الگوی محاسبه شده دارای مؤلفه موازی ساحل قوی تری نسبت به الگوی اندازه گیری شده است.

با در نظر گرفتن تاثیر اندرکنش موج-جریان در محاسبات، نتایج شبیه سازی در ارتباط با موارد فوق بهبود یافت.

۱ - تاثیر اندرکنش موج و جریان در نتایج محاسبات کاملا محسوس بود. در آزمایشات با امواج منظم دو قله در نمودارهای خطوط هم ارتفاع موج اندازه گیری شده دیده میشود. فقط یکی از این قله ها توسط مدل حاضر شبیه سازی شده است. در آزمایش امواج نامنظم یک قله در نتایج حاصل از اندازه گیریها مشاهده شد. این قله بلند تر و باریکتر از قله محاسبه شده بود.

مجدد جریان موازی ساحل در پایین دست آبشکن (ناحیه IV در شکل ۳۸ - الف)، در آزمایشات با امواج منظم (NGB_3,4,7,8) با قوت بیشتری نسبت به آزمایش با امواج نامنظم (NGB_1,2,5,6) برخوردار است. نتایج پیش بینیهای مدل با آزمایشات موج نامنظم انطباق بیشتری دارد.

خلاصه و نتیجه گیری

۱ - انطباق بین نتایج حاصل از اندازه گیری و محاسبات مدل با ملحوظ نمودن اثر ناحیه بیرونی منطقه کرانه ای بطور قابل ملاحظه ای بهبود یافت. یک روش جدید در خصوص چگونگی ملحوظ نمودن این اثر در این مقاله ارائه گردید.

۲ - طول ناحیه بیرونی در آزمایش با امواج منظم نسبت به امواج نامنظم بیشتر است. این نکته احتمالا به این دلیل است که در امواج نامنظم بخش عمده تری از ناحیه کرانه ای تحت رژیم آشفته قرار دارد.

۳ - بطور کلی انطباق بهتری بین نتایج حاصل از محاسبه و اندازه گیری در آزمایشات روی ساحل مستقیم با امواج نامنظم در مقایسه با امواج منظم مشاهده شد.

۴ - مقدار ضریب زوال انرژی موج، K ، در آزمایشات با امواج منظم بیشتر از آزمایشات با امواج نامنظم بود. عرض بیشتر ناحیه کرانه ای در حضور امواج نامنظم را میتوان دلیل این امر قلمداد نمود.

مراجع

- ۱ - بدیعی، پ. "مطالعه اثر آبشکنها بر الگوی امواج و جریانات دریایی در کرانه سواحل به کمک مدلسازی فیزیکی." نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۴، شماره ۴، (۱۳۷۹).
- ۲ - بدیعی، پ. "مدل ریاضی تاثیر جریانات محیطی بر امواج." مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران، (۱۳۷۶).
- 3 - Birkemeier, W. A. and Darlymple, R. A. (1975). "Nearshore water circulation induced by wind and waves." *Proc Symp. Modeling Techniques ASCE*, Vol. 2 California, PP. 1062-1081 .
- 4 - Longuet-Higgins, M. S. (1970). "Longshore currents generated by obliquely incident sea waves." *J. Geoph. Res.*, Vol. 75, PP. 6778-6801.
- 5 - Wind, H. and Vreugdenhil, C. B. (1986). "Rip current generation near structures." *J. of Fluid Mech.*, 171: PP. 459-476.
- 6 - Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W. (1964). "Radiation stresses in water waves: a physical discussion with applications." *Deep-Sea Res.*, Vol. 11, PP. 529-562.

- 7 - Svendsen, I. A., Madsen, P. A. and Hansen, J. B. (1978). "Wave characteristics in the surf zone." *Proc. of the 16th Coastal Eng. Conf. ASCE*, PP. 520-539.
- 8 - Svendsen, I. A. (1984). "Wave heights and setup in the surf zone." *Coastal Eng.*, Vol. 8, PP. 303-329.
- 9 - Roelvink, J. A. and Stive, M. J. F. (1989). "Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach." *J. of Geoph. Res.*, Vol. 94, No. C4, PP. 4785-4800.
- 10 - Mocke, G. P. and Smit, F. (1994). "A relative intercomparison between variable wave shoaling, breaking and transition zone formulations." *Proc. of 24th Conf. on Coastal Eng. ASEC*, PP. 2365-2369.
- 11 - Okayasu, A., Watanbe, A. and Isobe, M. (1990). "Modeling of the energy transfer and undertow in the surfzone." *Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE*, PP. 123-135.
- 12 - Okayasu, A., Hara, K. and Shibayma, T. (1994). "Laboratory experiments on 3-D nearshore current and a model with momentum flux by breaking waves." *Proc. of the 24th Int. Conf on Coastal Eng., ASCE*, PP. 2461-2475.
- 13 - Southgate, H. N. (1989). "A nearshore profile model of wave and tidal current interaction." *Coastal Eng.* Vol. 13, PP. 219-245.
- 14 - Dally, W. R., Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1984). "A model for breaker decay on beaches." *Proc. 19th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE*, Vol. 1, PP. 82-98.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Finite Difference Method
- 2 - Near shore Region
- 3 - Radiation Stresses
- 4 - Turbulent (Reynolds) Stresses
- 5 - Orbital Velocity
- 6 - Eddy Viscosity
- 7 - Surf Zone
- 8 - Alternating Direction Implicit (ADI) Finite Difference Scheme
- 9 - Staggered Grid
- 10 - Wall boundary Condition
- 11 - Subroutine
- 12 - Flow Chart
- 13 - Outer Region
- 14 - Outer (Transition)
- 15 - Run Up (Swash Region)
- 16 - Offshore Bar
- 17 - Rip Current
- 18 - Undertow

