

مدل سازی آزمایشگاهی و عددی پیشروی و شکست موج بر روی موج شکن مستغرق نفوذناپذیر

امین محمودی^{1*}، حبیب حکیمزاده²، محمد جواد کتابداری³، محمد واقفی⁴

- 1- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر
- 2- استاد مهندسی سواحل، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
- 3- دانشیار مهندسی سواحل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
- 4- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

a_mahmoudi@pgu.ac.ir

چکیده - در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی پیشروی و شکست موج منظم پریودیک بر روی موج شکن مستغرق دوزنقه‌ای نفوذناپذیر پرداخته شده است. آزمایش‌های مورد نظر در علوم موج آزمایشگاه مهندسی سواحل دانشگاه گریفیث استرالیا انجام شده است. همچنین در ادامه از یک مدل عددی لاگرانژی بدون شبکه، به نام مدل هیدرودینامیک ذرات هموار نسبتاً تراکم‌پذیر (WCSPH) برای شبیه‌سازی پیشروی موج منظم بر روی موج شکن مستغرق نفوذناپذیر استفاده شده است. این مدل، دو بعدی بوده و سیال را به صورت کمی تراکم‌پذیر در نظر می‌گیرد و علاوه بر حل معادلات حاکم بر سیال لزج برای بدست آوردن میدان سرعت و چگالی، از حل معادله حالت برای بدست آوردن فشار استفاده می‌کند. این مسئله باعث کاهش حجم محاسبات نسبت به روش پایه مدل هیدرودینامیک ذرات هموار می‌شود. برای شبیه‌سازی آشفستگی سیال در روند پیشروی و شکست موج بر روی موج شکن مستغرق نفوذناپذیر، از مدل آشفستگی SPS که بوسیله تئوری شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) بدست آمده، استفاده شده است. در تحقیق حاضر، برای بررسی دقت مدل در شبیه‌سازی پیشروی موج منظم بر روی موج شکن مستغرق نفوذناپذیر، نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی حاضر مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین نتایج مدل عددی حاضر با نتایج مدل عددی Rambabu و Mani (2005) مورد مقایسه قرار گرفت، که نتایج مدل عددی حاضر از تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی برخوردار بود. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل عددی تهیه شده، ابزاری قوی برای شبیه‌سازی پیشروی موج بر روی موج شکن مستغرق می‌باشد.

کلید واژگان: مدل آزمایشگاهی، هیدرودینامیک ذرات هموار، موج شکن مستغرق، پیشروی موج، شکست موج

1- مقدمه

محدوده بنادر دارای اهمیت بسیاری است. یکی از روش‌های حفاظت از سواحل در برابر فرسایش، ساخت سازه‌هایی در مناطق ساحلی یا مناطق فراساحلی است، به گونه‌ای که شرایط هیدرودینامیکی منطقه طرح تغییر داده می‌شود. یکی از روش‌های سازه‌ای، ایجاد موج شکن‌های

حفاظت از سواحل در برابر فرسایش، همواره یکی از مسائل مهم و پیش روی مهندسان سواحل بوده است. این پدیده در شهرهای ساحلی مجاور دریاها و بزرگ و نیز در

مستغرق می‌باشند، که تراز تاج آنها پایین‌تر از سطح متوسط آب (MWL) بوده و مهمترین مزیت آنها حفظ چشم انداز طبیعی ساحل می‌باشد. با ساخت چنین موج-شکن‌هایی، آب دریا به راحتی با آب درون حوضچه تشکیل شده پشت موج‌شکن، تداخل پیدا کرده و در نتیجه از بوجود آمدن یک حوضچه تقریباً محبوس که باعث ممانعت از چرخه طبیعی آب شود، جلوگیری می‌شود. در چند سال اخیر مطالعات عددی و آزمایشگاهی متعددی در مورد عملکرد موج‌شکن‌های مستغرق صورت گرفته است. در ادامه، تعدادی از مهمترین مطالعات عددی انجام شده در ارتباط با موج‌شکن‌های مستغرق ارائه شده توسط محققین مختلف ارائه می‌گردد.

(2001) Losada و همچنین (2003) Huang et al. با استفاده از معادلات ناویراستوکس، عبور و شکست امواج منفرد را بر روی سازه‌های مستغرق بررسی نمودند. (2004) Garcia et al. مدلی که در سال 1998 توسط Lin در زمینه شکست امواج در منطقه ساحلی، ارائه شده بود را برای شبیه‌سازی عبور و شکست امواج از روی موج‌شکن مستغرق با طول تاج بلند استفاده نمودند.

(2004) Shen et al. با استفاده از معادلات ناویر استوکس، پیشروی و انتشار یک موج کنوئیدال را بر روی یک مانع دوزنقه‌ای مستغرق مورد بررسی قرار دادند. در این مدل عددی برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استفاده شده است و برای مدل‌سازی سطح آب از روش VOF استفاده شده است. (2004) Hasu et al. با استفاده از معادلات متوسط گیری شده زمانی ناویر استوکس (RANS) تولید پیچک، پخش و از بین رفتن آن را در اثر پیشروی یک موج از روی دو موج‌شکن مستطیلی مستغرق مورد ارزیابی قرار دادند. در این مدل عددی برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استفاده شده است و برای مدل‌سازی سطح آب از روش Height Function (HF) و نیز برای گسسته سازی معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شده است. (Johnson et al. 2005) با استفاده از دو روش متوسط‌گیری فاز و حلگر فاز، موج و جریان را در اطراف موج‌شکن مستغرق شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق در روش متوسط‌گیری فاز از

مدل MIKE 21 و مدل LIM استفاده شده است و در روش حلگر فاز که بر اساس مدل مرتبه بالاتر بوسینسک (2DH-Boussinesq-type) بوده است و برای شبیه‌سازی موج بر روی موج‌شکن‌های مستغرق توسط دانشگاه ارسطو تسالونیکا یونان در سال 1997 ارائه شده بود، استفاده شده است. (Rambabu and Mani 2005) یک مدل عددی ارائه نمودند که با استفاده از آن عملکرد موج‌شکن مستغرق در برابر یک موج منظم مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل عددی مسئله مقدار مرزی¹ بصورت دو بعدی در نظر گرفته شده است و تابع پتانسیل سرعت موج $(\phi(x, z))$ بگونه‌ای انتخاب شده بود که معادله لاپلاس را ارضا نماید. (Jeon and Cho 2006) مدلی برای بررسی بازتاب پراگ در اثر چند آرایش موج‌شکن دوزنقه‌ای مستغرق ارائه دادند. در این مدل عددی از معادلات متوسط گیری شده زمانی ناویر استوکس (RANS) و برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ و برای مدل‌سازی سطح آب از روش VOF استفاده شده است. (Christou et al. 2008) با استفاده از روش المان مرزی اندرکنش یک موج منظم را با یک موج‌شکن مستطیلی مستغرق مورد ارزیابی قرار دادند. (Carevic et al. 2009) با استفاده از نرم‌افزار MIKE 21 BW 1D عبور امواج منظم را از روی موج شکن مستغرق مورد مطالعه قرار دادند. (2010) Cao et al. با استفاده از معادلات متوسط گیری شده زمانی ناویر استوکس (RANS) عملکرد دو موج شکن مستغرق را بر روی یک بستر شیب-دار در برابر موج کنوئیدال مورد بررسی قرار دادند. در این مدل برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استفاده شده است و برای مدل‌سازی سطح آب از روش VOF استفاده شده است. (2010) Jie et al. با استفاده از معادلات متوسط‌گیری شده زمانی ناویر استوکس (RANS) موج و جریان را در نزدیکی یک موج شکن مستغرق بر روی یک بستر شیب‌دار مورد بررسی قرار دادند. در این مدل عددی برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استفاده شده است و برای مدل‌سازی سطح آب از روش PLIC-VOF استفاده شده است. در

¹ Boundary-value problem

است.

در این تحقیق با استفاده از مدل آزمایشگاهی به بررسی پیشروی و شکست موج منظم پریودیک بر روی موج شکن مستغرق دوزنقه‌ای نفوذناپذیر پرداخته شده است. به منظور استخراج تاریخچه زمانی پروفیل سطح آب از سنسورهایی در قبل و بعد از موج شکن استفاده شد و همچنین با استفاده از دوربین فیلم‌برداری با سرعت بالا، روند پیشروی و شکست موج بر روی موج‌شکن مزبور بصورت کیفی استخراج شد. همچنین در این مقاله با استفاده از روش WSPH و مدل آشفتگی LES به بررسی پیشروی امواج منظم پریودیک بر روی موج‌شکن مستغرق دوزنقه‌ای پرداخته شده است و در ادامه با ثابت فرض کردن شرایط موج، اثر تغییر ارتفاع تاج موج‌شکن بر روی شکست امواج و ارتفاع امواج تشکیل شده بعد از مانع مورد بررسی قرار گرفت.

2- مدل آزمایشگاهی

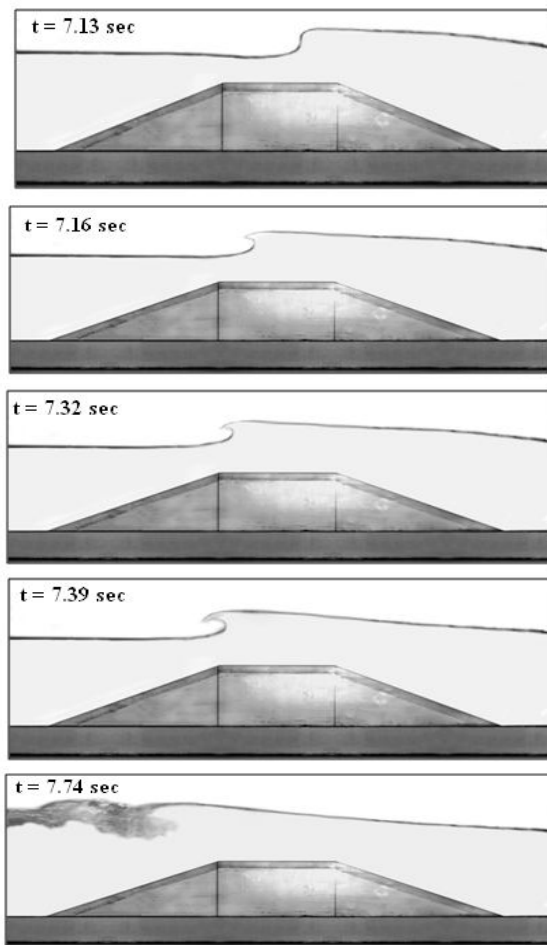
آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در فلوم موج آزمایشگاه مهندسی سواحل دانشگاه گریفیث استرالیا¹ انجام شده است. این فلوم دارای دستگاه مولد موج با قابلیت تولید امواج منظم و امواج نامنظم با طیف‌های انرژی مختلف است. فلوم موج آزمایشگاه مهندسی سواحل دانشگاه گریفیث استرالیا دارای 8 متر طول، 0/5 متر عرض و 0/8 متر عمق است. کف فلوم کاملاً صاف بوده و دیواره‌های فلوم از شیشه ساخته شده است و در انتهای فلوم به منظور جلوگیری از انعکاس موج از انتهای فلوم، از یک جاذب موج استفاده شده است (شکل 1).

در این آزمایش موج‌های منظمی با پریودها و ارتفاع امواج مختلف تولید شده، سپس این امواج بر روی موج‌شکن مستغرق پیشروی کرده و دچار شکست می‌شوند. عمق آب در جلوی موج‌ساز 30 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. به منظور تهیه تصاویر لحظه‌ای از مراحل شکست موج منظم پریودیک در حین پیشروی بر روی موج‌شکن مستغرق، از یک دوربین با قابلیت تصویربرداری با سرعت بالا استفاده شده است.

سال‌های اخیر با پیشرفت مدل‌های عددی، پیشرفت تکنولوژی و افزایش قدرت پردازنده رایانه‌ها، همچنان محققان در پی یافتن روش‌های جدیدی در شبیه‌سازی دقیق‌تر واکنش‌های هیدرودینامیکی در ارتباط با موج-شکن‌های مستغرق و شبیه‌سازی سطح آزاد آب هستند. یکی از این روش‌ها روش لاگرانژی هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) است. با توجه به موارد گزارش شده در کاربرد روش SPH در ارتباط با سازه‌های ساحلی، تنها به واکنش‌های هیدرودینامیکی از جمله بالاروی و پایین روی موج و روگذری موج در ارتباط با دیوارهای ساحلی شیب-دار و قائم پرداخته شده است. همچنین شکست موج بر روی یک سطح شیب‌دار با استفاده از روش SPH توسط پژوهشگران مختلف مدل‌سازی شده است. ولی با توجه به عملکرد موج‌شکن‌های مستغرق در ارتباط با عبور موج و پیشروی و شکست موج بر روی موج‌شکن مستغرق، تاکنون مدل‌سازی‌های بسیار محدودی با استفاده از روش SPH گزارش شده است که در ادامه به برخی از این تحقیقات اشاره شده است.

(Kim et al. 2010) با استفاده از روش WSPH عبور موج بر روی موج‌شکن مستغرق مستطیلی بر روی یک بستر صاف را مورد بررسی قرار دادند. در این مدل‌سازی از لزجت مصنوعی استفاده شده و تنش‌های ناشی از آشفتگی در این مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است. Liu و همکارانش در سال 2013 به منظور مدل‌سازی اندرکنش موج با سازه‌های ساحلی، یک مدل ISPH بهبود یافته را ارائه دادند. در این مدل یک رفتار بهبود یافته برای ذرات آینه‌ای به منظور مدل‌سازی مرزهای جامد ارائه شده است. ایشان در این تحقیق انعکاس موج خطی از یک موج‌شکن نفوذناپذیر، همچنین عبور موج تنها از روی یک مانع مستطیلی و عبور موج پریودیک بر روی یک مانع مستغرق را مورد بررسی قرار دادند. Mansouri and Aminnejad (2014) با استفاده از مدل WSPH اندرکنش موج تنها را با یک موج‌شکن مستغرق مورد بررسی قرار دادند. در این مدل‌سازی از لزجت مصنوعی استفاده شده و اثرات آشفتگی در نظر گرفته نشده است. در این مدل از تابع کرنل cubic-spline و فیلتر چگالی MLS استفاده شده

¹ Griffith University



شکل 2 تصاویر لحظه‌ای از مراحل شکست موج منظم بر روی موج شکن مستغرق

$$A(\vec{r}) = \int_{\Omega} A(\vec{r}') W(\vec{r} - \vec{r}', h) dr' \quad (3)$$

در رابطه فوق، $\vec{r}$ بردار موقعیت، W تابع کرنل میان یاب یا تابع وزنی، Ω میدان تاثیر و h شعاع هموارسازی است که بطور متداول باید بزرگتر از فاصله اولیه بین ذرات در نظر گرفته شود (شکل 3).

در روش‌های عددی، میان یاب انتگرالی معمولاً با یک مجموع میان یاب تقریب زده می‌شود (Monaghan, 2005, 1992):

$$A(r) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W_{ab} \quad (4)$$

$$W_{ab} = W(\vec{r}_a - \vec{r}_b, h) \quad (5)$$

در روابط فوق m_b و ρ_b به ترتیب جرم و چگالی ذره b است که عمل جمع بر روی تمامی ذرات واقع در داخل



شکل 1 نمایی از فلوم موج آزمایشگاه دانشگاه گریفیث استرالیا

تصاویر تهیه شده از مراحل شکست موج با سرعت 100 فریم بر ثانیه تهیه گردیده است. از آنجایی که دوربین‌های با سرعت بالا نیاز به نور بسیار زیادی دارند با توجه به امکانات موجود از 2 پروژکتور 500 وات استفاده شده است. همچنین به منظور تهیه تصاویر با کیفیت بهتر، وجه دیگر فلوم شیشه‌ای با استفاده از مقوای سفید پوشانده شد. شکل 2 تصاویر لحظه‌ای از مراحل شکست موج منظم را بر روی موج شکن مستغرق برای موج منظمی با ارتفاع $H = 0.1m$ ، پریود $T = 1.2sec$ و عمق استغراق $h_s = 0.1m$ نشان می‌دهد.

3- معادلات اساسی حاکم بر سیال لزج

معادلات حاکم بر حرکت سیال، معادلات بقای جرم و مومنتم بوده و به فرم لاگرانژی به صورت زیر نوشته می‌شوند (Crespo, 2008):

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + \nu_0 \nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (2)$$

در معادله فوق $\vec{u}$ بردار سرعت، P فشار، ρ چگالی، g شتاب گرانشی، ν_0 لزجت سینماتیکی جریان لایه‌ای و $\vec{\tau}$ تانسور تنش مقیاس تحت ذرات (SPS) می‌باشد.

4- مدل عددی SPH

در ذات روش SPH یک روش میان یابی قرار دارد. میان-یاب انتگرالی هر تابع به صورت رابطه (3) تعریف می‌شود (Monaghan, 2005, 1992):

در فرم استاندارد مدل SPH، سیال بصورت تراکم‌پذیر در نظر گرفته می‌شود که در نتیجه سبب می‌شود برای تعیین فشار به جای استفاده از یک معادله دیفرانسیل اضافه، از معادله حالت استفاده گردد. تغییرات چگالی سیال با استفاده از رابطه (8) محاسبه می‌شود:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b u_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (8)$$

با توجه به مطالب فوق، در شکل استاندارد SPH، سیال بصورت تراکم‌پذیری ضعیف در نظر گرفته می‌شود، بنابراین می‌توان برای محاسبه فشار از معادله حالت استفاده کرد که در مقایسه با معادله دیگر مانند معادله پواسون، محاسبات سریعتر و استفاده از آن ساده‌تر می‌باشد.

Monaghan در سال 1994 رابطه بین فشار و چگالی را بصورت رابطه (9) فرض کرد که در واقع معادله حالت Tait می‌باشد (Monaghan, 1994).

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (9)$$

در رابطه بالا، پارامتر $B = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma}$ ، پارامتر ثابتی است که به مدول حجمی الاستیسیته سیال مربوط است، $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ چگالی مرجع بوده که معمولاً چگالی سیال در سطح آب در نظر گرفته می‌شود، γ ثابت پلی-تروپیک است و معمولاً بین 1 تا 7 است، c_0 سرعت صوت در چگالی مرجع (سطح آزاد سیال) می‌باشد. جمله گرادیان فشار در مدل SPH به شکل متقارن بصورت رابطه (10) بیان می‌شود:

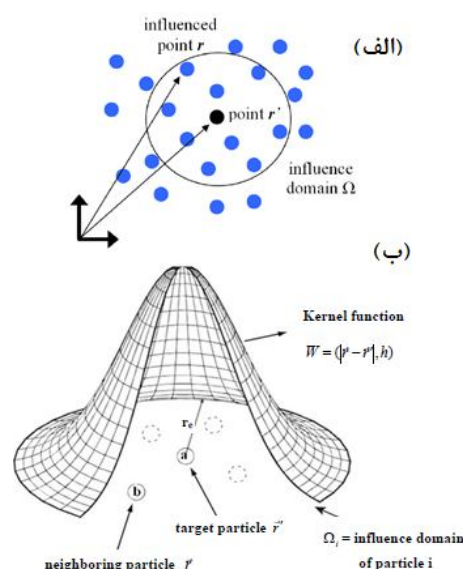
$$-\frac{1}{\rho} \nabla P = -\sum_b m_b \left(\frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_a W_{ab} \quad (10)$$

ترم تنش‌های خطی توسط Lo و Shao در سال 2002 بصورت رابطه (11) ساده شده‌اند (Lo and Shao, 2002):

$$(\nu_0 \nabla^2 \vec{u}) = \sum_b m_b \left(\frac{4\nu_0 \vec{r}_{ab} \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b) |\vec{r}_{ab}|^2} \right) \vec{u}_{ab} \quad (11)$$

معمولترین مدل SPS برای مدل‌سازی τ_{ij} بصورت زیر نوشته می‌شود (Dalrymple and Rogers, 2006):

شعاع همسایگی $2h$ از موقعیت مکانی r تعریف شده است.



شکل 3 (الف) طرح شماتیکی از میدان تأثیر Ω (ب) شکل شماتیکی از تابع کرنل

گرادیان تابع A با مشتق‌گیری از تابع میان یاب (4) بصورت رابطه (6) بدست می‌آید:

$$\nabla A(r) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} \nabla W_{ab} \quad (6)$$

عملکرد روش SPH به انتخاب تابع‌های وزنی وابسته می‌باشد. خواص تابع وزن در SPH، مشخص می‌کند که چگونه متغیرها از بین ذرات، درونیابی و هموار می‌شوند. انتخاب تابع وزن نه تنها بر روی هزینه محاسباتی رایانه تأثیر می‌گذارد، بلکه در پایداری محاسبات نیز نقش مهمی دارد.

در این تحقیق از تابع وزن به نام Quintic که توسط Wendland در سال 1995 معرفی شده است، استفاده گردیده است (Wendland, 1995).

$$W(R, h) = \alpha_D \left(1 - \frac{R}{2} \right)^4 (2R + 1) \quad 0 \leq R \leq 2 \quad (7)$$

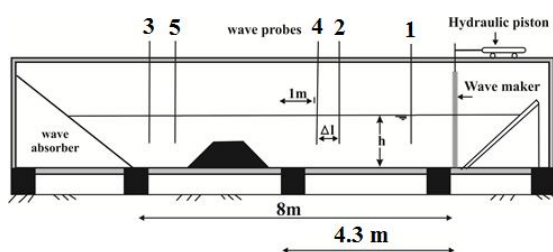
در رابطه فوق $R = \frac{r}{h}$ که در آن r فاصله بین دو ذره a و b و α_D ضریب بعد می‌باشند. برای مدل‌های دو بعدی برابر $\frac{7}{4\pi h^2}$ و برای مدل‌های سه بعدی برابر $\frac{7}{8\pi h^3}$ می‌باشد (Crespo, 2008).

این امواج انعکاسی از مرزها می توانند سبب بوجود آمدن امواج ایستا شوند که در نهایت باعث بوجود آمدن رفتارهای غیر فیزیکی در مرزها شده و نتیجه آن به هم خوردن میدان محاسباتی فلوم موج خواهد بود. در این تحقیق به منظور مستهلک کردن موج در مرزها از روش لایه اسفنجی که Xu در سال 2010 پیشنهاد داده است، استفاده شده است (Xu, 2010; Mahmoudi, 2014).

5- شبیه سازی پیشروی امواج منظم بر روی موج شکن مستغرق

به منظور بررسی پیشروی امواج منظم بر روی موج شکن مستغرق دوزنقه ای بر اساس کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق شبیه سازی عددی زیر انجام شده و نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در این بخش بر اساس مدل سازی آزمایشگاهی انجام شده، کانالی به طول 8 متر و ارتفاع 1 متر با عمق آب 35 سانتی متر در نظر گرفته شده است. امواج منظمی با دوره تناوب 1/0 ثانیه و ارتفاع 0/1 متر در محل موج ساز تولید شدند. در انتهای این کانال یک لایه اسفنجی به عنوان ناحیه مستهلک کننده موج به طول 3 متر در نظر گرفته شد. برای ثبت نتایج آزمایشات از 5 سنسور فشار استفاده شده است. چیدمان آزمایشگاهی، موقعیت سنسورهای فشار و محل موج شکن در شکل 4 نشان داده شده است.

سنسورهای شماره 2 و 4 در جلوی موج شکن به منظور اندازه گیری ارتفاع موج تابشی قرار داده شده است.



شکل 4 طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی و عددی همراه با موقعیت قرارگیری سنسورها

به منظور تفکیک ارتفاع موج تابشی و ارتفاع موج انعکاسی

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = 2\nu_t \tilde{S}_{ij} - \frac{2}{3} \tilde{S}_{kk} \delta_{ij} - \frac{2}{3} C_I \Delta l^2 \delta_{ij} |\tilde{S}_{ij}|^2 \quad (12)$$

$$\tilde{S}_{ij} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

که در آن ν_t لزجت گردابی بوده و S_{ij} تانسور نرخ کرنش است (Dalrymple and Rogers, 2006):

$$\nu_t = (C_s \Delta l)^2 |\bar{S}| \quad (14)$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{0.5} \quad (15)$$

C_s ثابت Smagorinsky است که مقدار آن در حدود 0.1 بوده و در این پژوهش 0.12 در نظر گرفته شده است. Δl فاصله بین ذرات و δ_{ij} دلتا کرونکر می باشد.

(Dalrymple and Rogers, 2006) معادله مومنتم را در شکل SPH به صورت رابطه (16) بکار گرفتند (Dalrymple and Rogers, 2006):

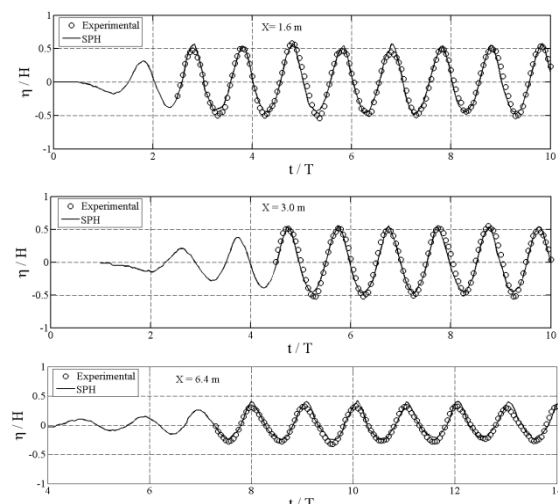
$$\begin{aligned} \frac{D\bar{u}_a}{Dt} = & -\sum_b m_b \left(\frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{\tau_a}{\rho_a^2} + \frac{\tau_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_a W \\ & + \sum_b m_b \left(\frac{4\nu_0 \bar{r}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b) |\bar{r}_{ab}|^2} \right) \bar{u}_{ab} + g \end{aligned} \quad (16)$$

در این تحقیق از الگوریتم Symplectic به منظور گسسته سازی معادلات در مدل سازی های گوناگون استفاده شده است. شبیه سازی دینامیکی در WCSPH منجر به تغییرات زیادی در میدان فشار ذرات سیال می شود. تلاش هایی به منظور غلبه بر این مسئله انجام گرفته است که یکی از آنها طراحی فیلتر مناسبی برای چگالی یا مقداری مجدد چگالی برای ذرات است. در این تحقیق از فیلتر چگالی مرتبه اول MLS استفاده شده است.

یکی از مسائل مهم در روش SPH، مشخص نمودن مرزهای جامد است. روشهای متفاوتی برای اعمال شرایط مرزی وجود دارد. در این تحقیق از شرط مرزی دینامیکی استفاده شده است (Dalrymple and Rogers, 2006). همچنین در این مدل سازی به منظور تولید یک موج منظم از موج ساز پیستونی استفاده شده است، بطوری که حرکت ذرات موج ساز و سرعت ذرات موج ساز بر اساس تئوری خطی موج ساز، تعیین می شوند.

تولید موج در میدان محاسباتی و برخورد آن با یک دیواره باعث بوجود آمدن موج های انعکاسی از این مرزها می شود.

و مدل آشفتگی LES استفاده شده است و فاصله بین ذرات $dx = dz = 0.01m$ بوده و از فیلتر چگالی MLS استفاده شد. مقایسه کیفی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در شکل 6 آمده است.



شکل 5 مقایسه تراز سطح آب محاسبه شده در مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در این شکل، مراحل شکست تاج موج و تشکیل جت شیرجه‌ای مشهود است و نتایج مدل عددی WCSPH-LES مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان داده است. اما به منظور بررسی هر چه بهتر تأثیرات بعد از شکست موج، مثل تشکیل حباب‌های هوا درون آب (مثلاً شکل مربوط به $t = 7.74 \text{ sec}$) و موارد دیگری که به تأثیر هوا بر روی آب وابسته است، باید از مدل 2 فاز سیال - هوا استفاده شود که در این تحقیق به آن پرداخته نشده است. همچنین مقایسه کمی نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای پارامترهای ارتفاع و پریود موج در موقعیت‌های مختلف در جدول 1 آورده شده است.

مقایسه کیفی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در شکل 7 آورده شده است که در آن خط توپر نشان دهنده پروفیل سطح آب حاصل از نتایج آزمایشگاهی است. همان‌طور که در قسمت‌های قبلی نیز اشاره شد، در مدل‌سازی آزمایشگاهی به منظور جذب امواج انعکاسی از انتهای فلوم از یک لایه اسفنجی متخلخل جاذب موج

از موج‌شکن، روش‌های متعددی وجود دارد که در این تحقیق از روش (Goda and Suzuki, 1976) استفاده شده است. در این روش از دو سنسور برای تفکیک موج تابشی و موج انعکاسی استفاده می‌شود و نکته حائز اهمیت تعیین فاصله بین سنسورها است. آنها محدوده زیر را برای فاصله بین سنسورها پیشنهاد داده‌اند:

$$0.05 \leq \Delta l / L \leq 0.45 \quad (17)$$

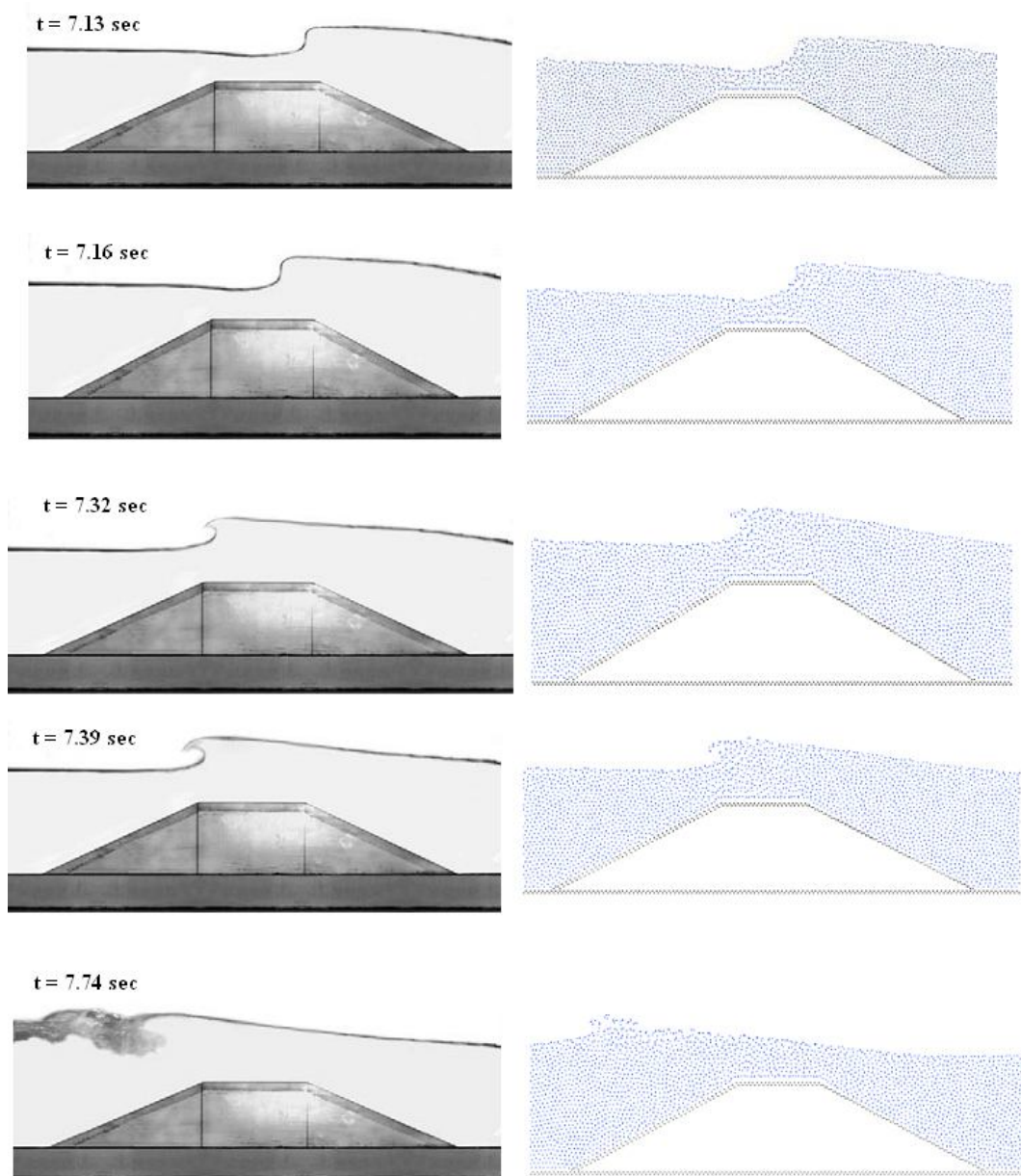
در رابطه فوق Δl فاصله بین دو سنسور و L طول موج می‌باشد. سنسور شماره 5 به منظور اندازه‌گیری ارتفاع موج انتقالی از موج‌شکن در پشت موج‌شکن و به فاصله 60 سانتی‌متر از انتهای موج‌شکن قرار داده شده است. همچنین از سنسورهای 1، 2 و 3 به منظور تعیین تاریخچه زمانی پروفیل سطح آب در موقعیت‌های مختلف به منظور صحت سنجی نتایج مدل عددی استفاده شده است. تاریخچه زمانی پروفیل سطح آب حاصل از نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در موقعیت سنسورهای 1، 2 و 3 که به ترتیب در فاصله $x=1.6 \text{ m}$ ، $x=3.0 \text{ m}$ و $x=6.4 \text{ m}$ از موج‌ساز قرار دارند، در شکل 5 مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌شود تطابق نسبتاً مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی مشاهده می‌شود.

6- مدل‌سازی شکست موج بر روی موج-شکن مستغرق

همچنین به منظور بررسی شکست امواج منظم بر روی موج‌شکن مستغرق دوزنقه‌ای بر اساس کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی زیر انجام شده و نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در این بخش بر اساس مدل‌سازی آزمایشگاهی انجام شده، کانالی به طول 8 متر و عمق 1 متر با عمق آب 30 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. سپس امواج منظمی با دوره تناوب $1/2$ ثانیه ارتفاع موج $0/1$ متر در محل موج‌ساز تولید شدند. در انتهای این کانال یک لایه اسفنجی به عنوان ناحیه مستهلک‌کننده موج به طول 3 متر در نظر گرفته شده است. در این مدل‌سازی از تابع کرنل Wenland، الگوریتم Symplectic

وجود خواهد داشت.

استفاده شده است، که علی رغم عملکرد مناسب این لایه جاذب موج، قطعاً مقدار ناچیزی انعکاس از انتهای فلوم



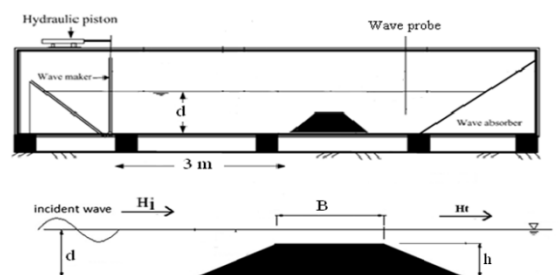
شکل 6 مقایسه بین نتایج مدل عددی (سمت راست) و نتایج آزمایشگاهی (سمت چپ) برای موج تناوبی

جدول 1 مقایسه کمی نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای پارامترهای ارتفاع و پریود موج در موقعیت های مختلف

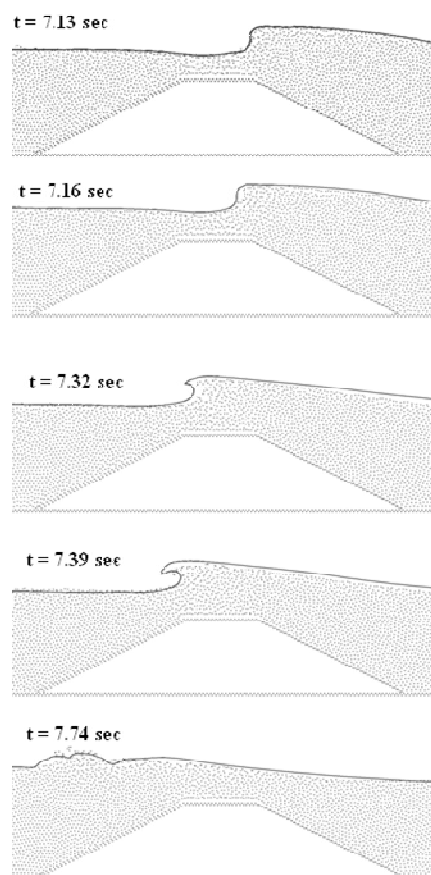
موقعیت	$x = 1.6 \text{ m}$		$x = 3 \text{ m}$		$x = 6.4 \text{ m}$	
	$H \text{ (m)}$	$T \text{ (sec)}$	$H \text{ (m)}$	$T \text{ (sec)}$	$H \text{ (m)}$	$T \text{ (sec)}$
پارامتر مورد اندازه گیری						
مدل آزمایشگاهی	0/0970	1/2	0/0940	1/2	0/0597	1/194
مدل عددی حاضر	0/0904	1/2	0/08648	1/212	0/0555	1/209
درصد خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی	-6/8	0	-8	1	-7/03	1/3

فلوم موج به طول 30 متر، عرض $91/4$ سانتی متر و عمق 90 سانتی متر انجام گرفت. در این آزمایش ها موج شکن به فاصله 10 متر از موج ساز قرار گرفته بود و ارتفاع موج، طول موج و پریود موج تابشی بعد از خارج نمودن موج-شکن از فلوم موج، در محل موج شکن مورد اندازه گیری قرار می گرفت. همچنین ارتفاع موج عبوری از روی موج-شکن مستغرق در فاصله 3.6 m در پایین دست موج شکن اندازه گیری می شد. این آزمایشات با ارتفاع موج تابشی در محدوده 4.7 cm تا 13.1 cm و طول موج های در محدوده 162 cm تا 257 cm انجام شده اند. یکی از مدل های آزمایشگاهی شامل یک موج شکن نفوذناپذیر دوزنقه ای با شیب وجه جلویی و عقبی $2H:1V$ و عرض تاج 15 سانتی متر بود. در مدل عددی حاضر به منظور کاهش حجم محاسبات ناحیه ای به طول 11 متر و ارتفاع $0/5$ متر در نظر گرفته شد و موج شکن مورد نظر در فاصله بین $x=3.0$ m از موج ساز قرار داده شد. طرح شماتیک فلوم عددی به منظور بررسی عملکرد موج شکن مستغرق در شکل 8 نشان داده شده است.

در این بخش دو نمونه از شرایط آزمایشگاهی انجام شده بر روی موج شکن مستغرق دوزنقه ای که توسط Abdul Khader و Rai در سال 1980 انجام شده بود مورد شبیه سازی عددی قرار گرفت (Abdul Khader and Rai, 1980). شرایط این دو آزمایش در جدول 2 آورده شده است. در این جدول T پریود موج تابشی، H ارتفاع موج تابشی، d عمق آب در کانال و B عرض تاج موج شکن است. در این مدل سازی ها عرض تاج موج شکن 0.15 m در نظر گرفته شد. در هر آزمایش ارتفاع موج تابشی در فاصله 3.6 m در پایین دست موج شکن مورد اندازه گیری قرار گرفت.



شکل 8 طرح شماتیک فلوم عددی به منظور بررسی عملکرد موج شکن مستغرق



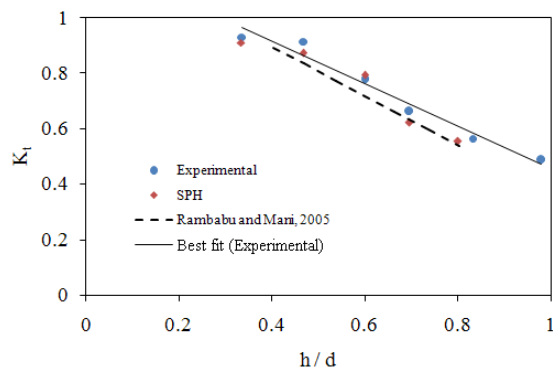
شکل 7 مقایسه کیفی بین نتایج مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی (خط تو پر) برای موج تناوبی

در تهیه تصاویر از مراحل شکست موج بر روی موج شکن سعی شده است این تصاویر در لحظاتی که امواج ناچیز انعکاسی از انتهای فلوم، حداقل تأثیر را بر روی پروفیل سطح آب و مراحل شکست موج داشته باشد، تهیه گردد. با این وجود، اختلاف نسبتاً کم بین مدل سازی عددی و آزمایشگاهی علاوه بر خطاهای ناشی از مدل سازی عددی، می تواند ناشی از عدم تطابق کامل شرایط مدل سازی عددی و آزمایشگاهی نیز باشد.

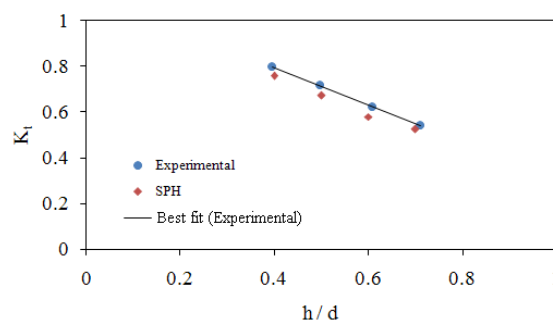
7- بررسی تأثیر ارتفاع تاج موج شکن بر عملکرد موج شکن مستغرق

در این بخش به منظور بررسی تأثیر ارتفاع تاج موج شکن بر روی عملکرد موج شکن مستغرق از نتایج آزمایشگاهی Abdul Khader و Rai در سال 1980 استفاده شده است (Abdul Khader and Rai, 1980). این آزمایش ها در یک

کمیت بدون بعد h/d ، ضریب انتقال موج از روی موج شکن افزایش پیدا می کند. با کاهش h/d احتمال شکست موج بر روی موج شکن مستغرق و به تبع آن استهلاك انرژی موج کاهش پیدا می کند.



شکل 9 تغییرات ضریب انتقال موج نسبت به متغیر بدون بعد ارتفاع تاج موج شکن به عمق آب (h/d) برای آزمایش دوم



شکل 10 تغییرات ضریب انتقال موج نسبت به متغیر بدون بعد ارتفاع تاج موج شکن به عمق آب (h/d) برای آزمایش اول

لذا ارتفاع موج عبوری و در نتیجه ضریب انتقال موج افزایش می یابد. با توجه به ثابت بودن پارامتر عمق آب (d) در مورد هر آزمایش، مشاهده می شود که با افزایش ارتفاع موج شکن (h)، ضریب انتقال موج کاهش می یابد. برای توجیه این مطلب می توان چنین بیان داشت که با افزایش ارتفاع موج شکن، احتمال شکست موج بر روی موج شکن افزایش یافته و در نتیجه استهلاك انرژی موج نیز افزایش پیدا کرده و بنابراین ارتفاع موج عبوری از موج شکن کاهش یافته که منجر به کاهش ضریب انتقال موج می شود. تاثیر عرض تاج موج شکن بر روی ضریب عبور موج از موج شکن به ازای $H_i/gT^2 = 0.00667$ در شکل 11 نشان داده شده است.

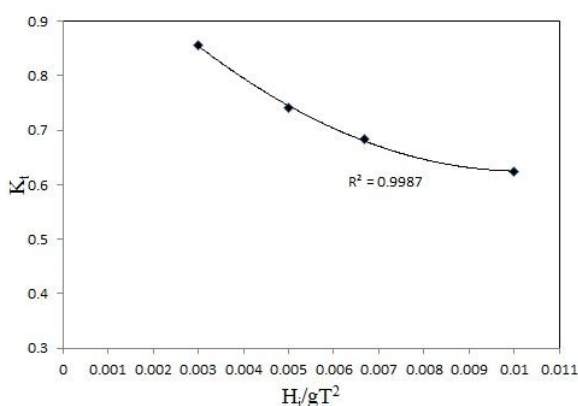
جدول 2 مشخصات آزمایشهای عددی انجام گرفته بر روی

موج شکن مستغرق				
	H (m)	T (sec)	d (m)	B (m)
آزمایش 1	0/104	1/26	0/2	0/15
آزمایش 2	0/056	1/26	0/18	0/15

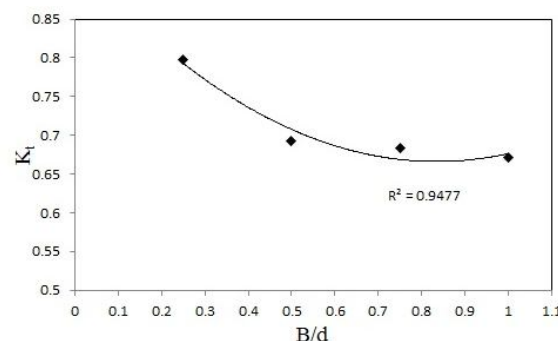
به منظور اندازه گیری مشخصات موج تابشی در محل موج شکن همانند مدل آزمایشگاهی، مدل عددی بدون حضور موج شکن آنالیز شده و با استخراج پروفیل سطح آب در محل موج شکن، ارتفاع موج تابشی مورد اندازه گیری قرار گرفت.

عملکرد موج شکن مستغرق با استفاده از ضریب عبور موج $(K_t = H_t / H_i)$ مورد ارزیابی قرار می گیرد که در این رابطه H_t ارتفاع موج عبوری و H_i ارتفاع موج تابشی می باشد. ضریب عبور موج در برابر پارامتر بدون بعد h/d برای آزمایش های مربوط به آزمایش دوم در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شکل 8 نشان داده شده است. همچنین به منظور مقایسه نتایج مدل عددی حاضر با نتایج مدل عددی سایر محققین، نتایج مدل سازی عددی Rambabu و Mani در سال 2005 نیز در شکل 9 آورده شده است. این محققان به منظور بررسی عملکرد موج شکن مستغرق در برابر یک موج منظم، با فرض مسئله مقدار مرزی بصورت دو بعدی تابع پتانسیل سرعت موج را به گونه ای در نظر گرفتند که معادله لاپلاس را ارضا نماید. همان طوری که شکل 9 نشان می دهد، علی رغم اینکه مطابقت خوبی بین مدل های عددی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود، ولی این نتایج نشان می دهند که نتایج مدل عددی حاضر از تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. نتایج بدست آمده از مدل عددی حاضر نشان می دهد که با افزایش h/d از 0/33 تا 0/8، مقدار ضریب عبور موج (K_t) به اندازه 39 درصد کاهش می یابد.

همچنین ضریب عبور موج در برابر پارامتر بدون بعد h/d برای آزمایش های مربوط به آزمایش اول در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شکل 10 نشان داده شده است. همان طور که نتایج بدست آمده نشان می دهند، با کاهش



شکل 12 تغییرات ضریب انتقال موج نسبت به متغیر بدون بعد (H_i / gT^2)



شکل 11 تغییرات ضریب انتقال موج نسبت به متغیر بدون بعد عرض تاج موج شکن به عمق آب (B/d)

8- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی، به بررسی پیشروی و شکست موج منظم پریودیک بر روی موج شکن مستغرق دوزنقه‌ای نفوذناپذیر پرداخته شده است. تصاویر لحظه‌ای از پیشروی و شکست موج منظم پریودیک بر روی موج شکن مستغرق ارائه شده است که می‌تواند به فهم فیزیکی پدیده کمک کند. همچنین در ادامه با استفاده از روش WCSPH و مدل آشفتگی LES به بررسی پیشروی امواج منظم پریودیک بر روی موج شکن مستغرق دوزنقه‌ای پرداخته شده است و در ادامه با ثابت فرض کردن شرایط موج، اثر تغییر ارتفاع تاج موج شکن بر روی شکست امواج و ارتفاع امواج تشکیل شده بعد از مانع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که روش WCSPH قادر است تا با دقتی بهتر از برخی از روشهای عددی پیشین در حالت دو بعدی پدیده عبور موج، پیشروی و شکست موج بر روی موج شکن مستغرق نفوذناپذیر را شبیه سازی نماید.

بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق، با افزایش متغیر بدون بعد عرض تاج موج شکن به عمق آب (B/d) از 0/25 تا 1 مقدار ضریب K_t به میزان 20 درصد کاهش می‌یابد، اما تغییرات محسوسی در مقدار ضریب K_t به ازای B/d از 0/75 تا 1 مشاهده نمی‌شود و بنابراین با توجه به این نتایج مقدار $B/d = 0/75$ مقدار مناسبی برای عملکرد این موج شکن مستغرق پیشنهاد می‌شود.

همان طور که از شکل مشاهده می‌شود با افزایش متغیر بدون بعد عرض تاج موج شکن به عمق آب نسبت B/d از 0/25 تا 1 مقدار ضریب K_t به میزان 20 درصد کاهش می‌یابد، اما تغییرات محسوسی در مقدار ضریب K_t به ازای B/d از 0/75 تا 1 مشاهده نمی‌شود و بنابراین با توجه به این نتایج مقدار $B/d = 0/75$ به عنوان مقدار مناسبی برای عملکرد این موج شکن مستغرق پیشنهاد می‌شود. با توجه به ثابت بودن عمق آب در مورد هر آزمایش، مشاهده می‌شود که با افزایش عرض تاج موج شکن (B) ، ضریب انتقال موج از روی موج شکن کاهش می‌یابد. دلیل این روند تغییرات را می‌توان در طول ناحیه کم عمق به منظور تکمیل شکست موج جستجو نمود. برای موج شکن‌های با عرض تاج بیشتر، طول کافی آب کم عمق در مسیر حرکت موج وجود داشته و در نتیجه روند شکست موج کامل شده و انرژی بیشتری آزاد می‌شود.

شکل 12 تاثیر متغیر بدون بعد (H_i / gT^2) بر روی تغییرات K_t را به ازای عمق آب ثابت و همچنین نسبت $d_s/d = 0/5$ نشان می‌دهد که عمق استغراق موج شکن می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد با افزایش H_i / gT^2 از 0/003 تا 0/01 مقدار ضریب K_t به میزان 40% کاهش می‌یابد. بنابراین در مورد هر آزمایش با توجه به ثابت بودن پریود موج تابشی و عمق آب، طول موج نیز ثابت می‌باشد. مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع موج تابشی و یا به عبارت دیگر افزایش تیزی موج (H_i / L_0) ، احتمال شکست موج و در نتیجه استهلاک انرژی موج ناشی از شکست موج افزایش می‌یابد و در نتیجه ضریب عبور موج کاهش می‌یابد.

Abdul Khader, M.H., Rai, S.P., (1980). "A study of submerged breakwaters", Journal of Hydraulic Research, 18: 2, 113–121.

Cao, Y.G., Jiang, Ch.B., and Bai, Y.Ch., (2010). "Numerical study on flow structure near two impermeable trapezoid submerged breakwaters on slop bottoms", 9th International Conference on Hydrodynamics October 11-15, Shanghai, China.

Crespo, A.J.C., (2008). "Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamic", PhD Thesis, Universidad de Vigo.

Garcia N., Lara J.L., and Losada I.J., (2004). "2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters", Coastal Engineering, 51, 991–1020.

Carević, D., Pršić, M., and Ocvirk, E., (2009). "Modelling of wave interaction with submerged breakwater using MIKE 21 BW", International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ohrid/Macedonia.

Christou, M., Swan, C., and Gudmestad, O.T., (2008). "The interaction of surface water waves with submerged breakwaters", Coastal Engineering, 55, 945–958.

Dalrymple, R.A., and Rogers, B.D., (2006). "Numerical modeling of water waves with the SPH method", Coastal Engineering, Vol 53, pp 141 – 147.

Goda, Y., and Suzuki, Y., (1976), "Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments", In: Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering, Hawaii, USA, pp.828–845.

Hsu, T.W., Hsieh, Ch.M., and Hwang, R., (2004). "Using RANS to simulate vortex generation and dissipation around impermeable submerged double breakwaters", Coastal Engineering, 51, 557–579.

Huang, C.J., Chang, H.H., and Hwang, H.H., (2003). "Structural permeability effects on the interaction of a solitary wave and a submerged breakwater", Coastal Engineering, 49, 1–24.

Jeon, Ch.H., and Cho, Y.S., (2006). "Bragg reflection of sinusoidal waves due to trapezoidal submerged breakwaters", Ocean Engineering, 33, 2067–2082.

Jie, Ch., Changbo, J., Shixiong, U., and Wenwei, H., (2010). "Numerical study on the characteristics of flow field and wave propagation near submerged breakwater on slope", Acta Oceanol. Sin., Vol.29, No.1, p.88-99.

همچنین با افزایش H_i/gT^2 از 0/003 تا 0/01 مقدار ضریب K_t به میزان 40% کاهش می یابد.

9- فهرست علائم

B	عرض تاج موج شکن (m)
c_0	سرعت صوت در چگالی مرجع (سطح آزاد سیال) (ms^{-1})
C_s	ثابت Smagorinsky
d	ارتفاع موج شکن (m)
g	شتاب گرانشی (ms^{-2})
H	ارتفاع موج (m)
H_i	ارتفاع موج تابشی (m)
H_t	ارتفاع موج عبوری (m)
h	شعاع هموارسازی (m)
K_t	ضریب عبور موج
L	طول موج (m)
m_b	جرم ذره b (kg)
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
r	فاصله بین دو ذره (m)
$\vec{r}$	برداز موقعیت (m)
T	پریود موج (s)
$\bar{u}$	سرعت (ms^{-1})
W	تابع کرنل میان یاب
Δl	فاصله بین ذرات (m)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
δ_{ij}	دلتا کرونکر
ν_t	لزجت گردابی
γ	ثابت پلی تروپیک
ρ_b	چگالی ذره b (kgm^{-3})
α_D	ضریب بی بعد
Ω	میدان تأثیر
$\bar{\tau}$	تانسور تنش ($kgm^{-1}s^{-2}$)
ν_0	لزجت سینماتیکی جریان لایه ای (m^2s^{-1})

10- مراجع

محمودی، ا.، (1393). "مدل هیدرودینامیک ذرات هموار اصلاح شده دو بعدی جهت بررسی عملکرد موج شکن مستغرق دوزنقه ای نفوذ ناپذیر تحت امواج منظم"، رساله دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

- Monaghan, J.J., (1992). "Smoothed Particle Hydrodynamics", Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 30, pp 543–574.
- Monaghan, J.J., (1994). "Simulating free surface flows with SPH", Journal Computational Physics , Vol 110, pp 399–406.
- Monaghan, J.J., (2005). "Smoothed Particle Hydrodynamics", Reports on Progress in Physics, 68: 1703-1759.
- Rambabu, A.Ch., and Mani, J.S., (2005). "Numerical prediction of performance of submerged breakwaters", Ocean Engineering, 32, 1235–1246.
- Shen, Y.M., Ng, C.O. and Zheng, Y.H., (2004). "Simulation of wave propagation over a submerged bar using the VOF method with a two-equation $k-\varepsilon$ turbulence modeling", Ocean Engineering, 31, 87–95.
- Wendland, H., (1995). "Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree", Advances in Computational Mathematics, Vol 4, pp 389– 396.
- Xu, R., (2010). "An improved incompressible smoothed particle hydrodynamics method and its application in free-surface simulations", PhD Dissertation, University of Manchester, UK.
- Johnson, H.K., Karambas, T.V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Marco, D.G., and Caceres, I., (2005). "Modelling of waves and currents around submerged breakwaters", Coastal Engineering, 52, 949– 969.
- Kim, N.H., Kim, S.R., and Ko, H.S., (2010). "Numerical simulation of wave transmission over a submerged breakwater in wave flume by using SPH method", The 2010 KSCE Annual Conference, Incheon, Korea, pp. 2289-2292.
- Liu, X., Xu, H., Shao, S., and Lin, P., (2013). "An improved incompressible SPH model for simulation of wave–structure interaction", Computers & Fluids, Vol 71, pp113–123.
- Lo, E., and Shao, S., (2002). "Simulation of near-shore solitary waves mechanics by an incompressible SPH method", Applied Ocean Research, Vol 24, pp 275–286.
- Losada, I.J., (2001). "Recent advances in the modeling of wave and permeable structure interaction", Advances in Coastal and Ocean Eng., 7, 163–202.
- Mansouri, A. and Aminnejad, B., (2014). "Interaction of submerged breakwater by a solitary wave using WCSPH method", Modelling and Simulation in Engineering, Vol. 2014, Article ID 524824.