

پژوهشی

مدلسازی عددی پیشروی موج بر روی دیوار ساحلی و موج شکن مستغرق با استفاده از مدل WCSPH

امین محمودی^۱، محمد جواد کتابداری^۲

a_mahmoudi@pgu.ac.ir

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خلیج فارس

۲- دانشیار مهندسی سواحل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده:

در این مقاله از یک مدل عددی لاگرانژی بدون شبکه، به نام مدل هیدرودینامیک ذرات هموار نسبتاً تراکم پذیر (WCSPH) برای شبیه سازی پیشروی موج تنها بر روی دیوار ساحلی شیب دار و همچنین پیشروی موج منظم بر روی موج شکن مستغرق نفوذناپذیر استفاده شده است. برای شبیه سازی آشفتگی سیال، از مدل آشفتگی SPS که بوسیله تئوری شبیه سازی گردابه ای بزرگ (LES) بدست آمده، استفاده شده است. در تحقیق حاضر، برای بررسی دقت مدل در شبیه سازی پیشروی موج بر روی موج شکن مستغرق نفوذناپذیر و دیوار ساحلی، نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین نتایج مدل عددی حاضر با نتایج مدل عددی Shen و همکارانش (۲۰۰۴) 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 جهت شبیه سازی پیشروی موج بر روی سازه های ساحلی می باشد.

واژگان کلیدی: مدل سازی عددی، هیدرودینامیک ذرات هموار، دیوار ساحلی، موج شکن مستغرق، پیشروی موج.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۳۱

۱- مقدمه

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 بزرگ و نیز در 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 هیدرو دینامیکی منطقه طرح تغییر داده می‌شود. یکی از روش‌های سازه‌ای، ساخت دیوارهای ساحلی و موج‌شکن‌های مستغرق می‌باشند. عملکرد موج‌شکن‌های مستغرق در حفاظت از سواحل به این ترتیب می‌باشد که امواج با ارتفاع زیاد که عامل اصلی در انتقال مواد رسوبی می‌باشند با رسیدن به سازه‌ها به دلیل کاهش عمق، اصطکاک کف و افزایش پارامتر تیزی موج خواهند شکست. شکست امواج باعث ایجاد آشفتگی شدید در مجاورت سطح آب می‌شود و در نتیجه همین تولید آشفتگی، بخش زیادی از انرژی موج مستهلک می‌شود و در ادامه امواج با ارتفاع کوتاه‌تری تشکیل می‌شوند که می‌توانند از روی این سازه‌ها عبور کنند. همچنین یکی از مهمترین مزیت موج‌شکن‌های مستغرق حفظ چشم انداز طبیعی ساحل می‌باشد. با ساخت موج‌شکن‌های این چنین، 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. همچنین امواج در مواجهه با دیوارهای ساحلی شیبدار می‌تواند باعث ایجاد پدیده‌هایی از جمله پشته کردن، انعکاس، شکست و بالاروی و پایین روی و روگذری موج از روی دیوار ساحلی شوند. در چند سال اخیر مطالعات عددی و آزمایشگاهی متعددی در مورد عملکرد سازه‌های ساحلی صورت گرفته است. در ادامه، تعدادی از مهمترین مطالعات عددی انجام شده در ارتباط با این سازه‌ها، ارائه شده توسط محققین مختلف ارائه می‌گردد.

Christou و همکارانش در سال ۲۰۰۸ با استفاده از روش المان مرزی^۱ (BEM) اندرکنش یک موج منظم را با یک موج‌شکن مستطیلی مستغرق مورد ارزیابی قرار دادند [۱]. Carevic و

همکارانش در سال ۲۰۰۹ با استفاده از نرم افزار MIKE 21 BW ID عبور امواج منظم را از روی موج شکن مستغرق مورد مطالعه قرار دادند [۲]. Cao و همکارانش در سال ۲۰۱۰ با استفاده از معادلات متوسط گیری شده زمانی ناویر استوکس (RANS) عملکرد دو موج شکن مستغرق را بر روی یک بستر شیبدار در برابر موج کنونی‌دال مورد بررسی قرار دادند [۳].

Jie و همکارانش در سال ۲۰۱۰ با استفاده از معادلات متوسط گیری شده زمانی ناویر استوکس (RANS) موج و جریان را در نزدیکی یک موج شکن مستغرق بر روی یک بستر شیبدار مورد بررسی قرار دادند [۴]. Wiryanto در سال ۲۰۱۰ یک مدل خطی به منظور مدلسازی پیشروی موج بر روی یک موج‌شکن مستغرق متخلخل ارائه داد. در این مدل از ترکیب دو مسئله مقدار مرزی^۲ که هر کدام نشان دهنده معادله حاکم در لایه مربوطه می‌باشد، استفاده شده است [۵]. Hajivalie و همکارانش در سال ۲۰۱۵ مدلی برای بررسی تاثیر ابعاد موج‌شکن قائم مستغرق بر روی هیدرو دینامیک موج و تشکیل گردابه ارائه دادند. در این مدل عددی از معادلات متوسط گیری شده زمانی ناویر استوکس (RANS) و برای مدلسازی آشفتگی از مدل دو معادله‌ای $k - \epsilon$ و برای مدلسازی سطح آب از روش VOF استفاده شده است [۶].

Ji و همکارانش در سال ۲۰۱۷ با استفاده از روش پروفیل درون یابی محدود شده (CIP) و بر اساس شبکه بندی کارترین، عبور موج منظم و موج تنها را بر روی موج شکن مستغرق دوزنقه‌ای و مستطیلی مورد ارزیابی قرار دادند [۷]. Yueh و همکارانش در سال ۲۰۱۸ با استفاده از روش المان مرزی دوگانه ضریب انعکاس موج از یک صفحه موجدار نازک به عنوان یک موج شکن مستغرق را مورد بررسی قرار دادند [۸]. Wang و همکارانش در سال ۲۰۱۸ یک مدل دو بعدی چند فازی ارائه نمودند که با استفاده از آن پیشروی موج تنها بر روی یک مانع قائم مستغرق را بررسی نمودند. در این مدل از روش پروفیل درون یابی محدود شده^۳ (CIP) و بر اساس شبکه بندی کارترین برای حل معادلات ناویر استوکس استفاده شده است [۹]. در سال‌های اخیر با پیشرفت مدل‌های عددی، پیشرفت تکنولوژی و افزایش قدرت پردازنده رایانه‌ها، همچنان محققین در پی

³ Constrained Interpolation Profile

¹ Boundary Element Method

² Boundary Value Problem

از روش WCSPH پیشروی و شکست موج منظم بر روی بر روی یک بستر شیب‌دار را مورد بررسی قرار دادند [۱۷].
Yeganeh-Bakhtiary و همکارانش در سال ۲۰۱۷ با استفاده از مدل WCSPH به بررسی هیدرودینامیک امواج ایستا در مقابل موج‌شکن قائم نفوذناپذیر پرداختند [۱۸]. در این مقاله با استفاده از روش WCSPH و مدل آشفتگی LES به بررسی پیشروی موج تنها بر روی دیوار ساحلی شیب‌دار و همچنین به بررسی پیشروی امواج منظم پریودیک بر روی موج‌شکن مستغرق دوزنقه‌ای پرداخته شده است.

۲- مبانی و روش‌ها

۲-۱- معادلات اساسی حاکم بر سیال لزج

معادلات حاکم بر حرکت سیال، معادلات بقای جرم و ممنتوم بوده و به فرم لاگرانژی به صورت زیر نوشته می‌شوند:

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

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

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

۲-۲- مدل عددی SPH

عملکرد روش SPH به انتخاب تابع‌های وزنی وابسته است. 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 ۱۹۹۵ معرفی شده‌اند، استفاده گردیده است [۱۹].

$$W(R, h) = \alpha_D \left(1 - \frac{R}{2}\right)^4 (2R+1) \quad 0 \leq R \leq 2 \quad (3)$$

در رابطه فوق $R = r/h$ که در آن r فاصله بین دو ذره a و b و α_D ضریب بعد است. برای مدل‌های دو بعدی برابر $7/4\pi h^2$ و برای مدل‌های سه بعدی برابر $7/8\pi h^3$ است. در فرم استاندارد مدل SPH، سیال بصورت تراکم‌پذیر در نظر

یافتن روش‌های جدیدی در شبیه‌سازی دقیق‌تر واکنش‌های هیدرودینامیکی در ارتباط با سازه‌های ساحلی 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 قائم با استفاده از روش ISPH پرداخته 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.

Shao در سال ۲۰۰۶ با استفاده از روش SPH تراکم‌ناپذیر (ISPH) پدیده روگذری و شکست موج را بر روی دیوار ساحلی شیب‌دار مورد بررسی قرار داد [۱۰]. Crespo و همکارانش در سال ۲۰۰۷ با استفاده از معادلات سه بعدی ناویر استوکس در فرم لاگرانژی و مدل SPH اندرکنش بین یک موج بلند و یک سازه ساحلی را به صورت سه بعدی بررسی کردند [۱۱]. Shao در سال ۲۰۱۰ بر اساس روش SPH، مدلی را برای اندرکنش موج و یک لایه متخلخل ارائه داد [۱۲]. Kim و همکارانش در سال ۲۰۱۰ با استفاده از روش WCSPH عبور موج بر روی موج‌شکن مستغرق مستطیلی بر روی یک بستر صاف را مورد بررسی قرار دادند. در این مدلسازی از ویسکوزیته مصنوعی استفاده شده و تنش‌های ناشی از آشفتگی در این مدلسازی در نظر گرفته نشده است [۱۳]. Liu و همکارانش در سال ۲۰۱۳ به منظور مدلسازی اندرکنش موج با سازه‌های ساحلی، یک مدل ISPH بهبود یافته‌ای را ارائه دادند [۱۴].

Mahmoudi و همکارانش در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش WCSPH پیشروی موج منظم بر روی موج‌شکن مستغرق نفوذناپذیر بر روی یک بستر شیب‌دار را مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. Mansouri و Aminnejad در سال ۲۰۱۴ با استفاده از مدل WCSPH اندرکنش موج تنها را با یک موج‌شکن مستغرق مورد بررسی قرار دادند. در این مدلسازی از ویسکوزیته مصنوعی استفاده شده و اثرات آشفتگی در نظر گرفته نشده است [۱۶]. Mahmoudi و همکارانش در سال ۲۰۱۶ با استفاده

که در آن v_i ویسکوزیته گردابی بوده و S_{ij} تانسور نرخ کرنش است [۲۲]:

$$v_i = (C_s \Delta l)^2 |\tilde{S}| \quad (10)$$

$$|\tilde{S}| = (2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij})^{0.5} \quad (11)$$

C_s ثابت Smagorinsky است که در این پژوهش 0.12 در نظر گرفته شده است. Δl فاصله بین ذرات و δ_{ij} دلتا کرونگر است. Rogers و Dalrymple در سال ۲۰۰۶ معادله ممنتم را در فرم SPH به صورت زیر بکار گرفتند [۲۲]:

$$\frac{D\tilde{u}_a^r}{Dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{\tau_a}{\rho_a^2} + \frac{\tau_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_a W_{ab} \frac{1}{2} + \sum_b m_b \left(\frac{4v_0 \tilde{r}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b) |\tilde{r}_{ab}|^2} \right) \tilde{u}_{ab}^r + g \quad (12)$$

در این تحقیق از الگوریتم Symplectic به منظور گسسته‌سازی معادلات در مدل‌سازی‌های گوناگون استفاده شده است. شبیه‌سازی دینامیکی در WCSPPH منجر به تغییرات زیادی در میدان فشار ذرات سیال می‌شود. تلاش‌هایی به منظور غلبه بر این مسئله انجام گرفته است که یکی از آنها طراحی فیلتر مناسبی برای چگالی یا مقداردهی 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. در این تحقیق از شرط مرزی دینامیکی استفاده شده است [۲۲].

همچنین در این مدل‌سازی به منظور تولید یک موج منظم از موج‌ساز پیستونی استفاده شده است، بطوریکه حرکت ذرات موج‌ساز و سرعت ذرات موج‌ساز بر اساس تئوری خطی موج‌ساز، تعیین می‌شدند. تولید موج در میدان محاسباتی و برخورد آن با یک دیواره باعث بوجود آمدن موج‌های انعکاسی از این مرزها می‌شود. این امواج انعکاسی از مرزها می‌توانند سبب بوجود آمدن امواج ایستا شوند که در نهایت باعث بوجود آمدن رفتارهای غیر فیزیکی در مرزها شده و نتیجه آن بهم خوردن میدان محاسباتی فلوام موج خواهد بود. در این تحقیق به منظور مستهلک کردن موج در مرزها از روش لایه اسفنجی که Xu در سال ۲۰۱۰ پیشنهاد داده است، استفاده شده است [۲۳].

همچنین در مرز ورودی از نوعی شرط مرزی موج‌ساز جذب کننده^۱ پیشنهادی توسط Liu و همکارانش در سال ۲۰۰۳

گرفته می‌شود که در نتیجه سبب می‌شود برای تعیین فشار به جای استفاده از یک معادله دیفرانسیل اضافه، از معادله حالت استفاده کرد.

تغییرات چگالی سیال با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b u_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (4)$$

با توجه به مطالب فوق، در فرم استاندارد SPH، سیال بصورت تراکم پذیری 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 است. Monaghan در سال ۱۹۹۴ رابطه بین فشار و چگالی را بصورت زیر فرض کردند که در واقع معادله حالت Tait است [۲۰].

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (5)$$

در رابطه بالا، پارامتر $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$ ، 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 پلی‌تروپیک است و معمولاً بین ۱ تا ۷ است، c_0 سرعت صوت در چگالی مرجع (سطح آزاد سیال) است. جمله گرادیان فشار در مدل SPH به فرم متقارن بصورت زیر بیان می‌شود:

$$-\frac{1}{\rho} \nabla P = -\sum_b m_b \left(\frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_a W_{ab} \quad (6)$$

ترم تنش‌های خطی توسط Shao و Lo در سال ۲۰۰۲ بصورت رابطه زیر ساده شده‌اند [۲۱]:

$$(v_0 \nabla^2 \tilde{u}) = \sum_b m_b \left(\frac{4v_0 \tilde{r}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b) |\tilde{r}_{ab}|^2} \right) \tilde{u}_{ab}^r \quad (7)$$

معمول‌ترین مدل SPS برای مدل‌سازی τ_{ij} بصورت زیر نوشته می‌شود [۲۲]:

$$\frac{\tau_{ij}}{\bar{\rho}} = 2v_i \tilde{S}_{ij} - \frac{2}{3} \tilde{S}_{kk} \delta_{ij} - \frac{2}{3} C_I \Delta l^2 \delta_{ij} |\tilde{S}_{ij}|^2 \quad (8)$$

$$\tilde{S}_{ij} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

^۱Absorbing Wave Maker Boundary Condition

Liu و همکارانش در سال ۲۰۰۳ بعد از بدست آوردن پارامتر مجهول A_p ، و انجام پاره‌ای عملیات ریاضی سرعت ذرات موج‌ساز را به صورت زیر بدست آوردند:

$$u(t) = \frac{dX}{dt} = \frac{\omega}{C_0} [2\eta_p - \eta_m + D.X(t)] \quad (22)$$

در معادله فوق η_p پروفیل سطح آب ایجاد شده در اثر X_p ، η_m پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده در جلوی موج‌ساز و $D = \sum_{n=1}^{\infty} C_n$ است.

در این مدل‌سازی پروفیل سطح آب دقیقاً در جلوی موج‌ساز در هر گام زمانی اندازه‌گیری شده و سرعت حرکت موج‌ساز بر اساس رابطه (۲۲) اصلاح می‌شود و موقعیت و جابه‌جایی حرکت موج‌ساز با انتگرال‌گیری از سرعت موج‌ساز در هر گام زمانی بدست می‌آید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شبیه‌سازی پیشروی موج تنها بر روی دیوار ساحلی شیب‌دار

در این بخش به منظور شبیه‌سازی پیشروی موج تنها بر روی دیوار ساحلی شیب‌دار از نتایج آزمایشگاهی (Li and Raichlen, 2001) که بر روی دیوار ساحلی شیب‌دار با زاویه ($\beta \approx 26^\circ$) انجام گرفته بود، استفاده شده است [۲۵]. در این شبیه‌سازی، ابتدا یک موج تنها به وسیله یک موج‌ساز پیستونی تولید شده و سپس این موج بر روی یک دیوار ساحلی شیب‌دار ($\beta \approx 26^\circ$) مطابق شکل (۱) پیشروی می‌کند. به منظور بررسی پیشروی موج، ابتدا لازم است صحت موج تولیدی به وسیله موج‌ساز پیستونی مورد بررسی قرار گیرد. پروفیل موج تنها به صورت تحلیلی و بر اساس تابعی از مکان x و زمان t با استفاده معادله (۲۳) بدست آمده است. مقایسه بین پروفیل موج تنها تولید شده حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج تحلیلی با نسبت ارتفاع موج اولیه به عمق متوسط $H_0/h_0 = 0.35$ در شکل (۲) نشان داده شده است. این شکل تطابق خوبی را میان نتایج تحلیلی و نتایج عددی مدل WCSPH نشان می‌دهد و در نتیجه اعتبار امواج تنها تولیدی بوسیله موج‌ساز پیستونی تایید

استفاده شده است. با اعمال این شرط ضمن تولید موج موردنظر، می‌توان انعکاس‌های ثانویه^۱ از موج‌ساز را نیز جذب نمود تا از برهم‌نهی و تداخل امواج ورودی و منعکس شده جلوگیری شود که در ادامه بطور مختصر این شرط مرزی موج‌ساز توضیح داده شده است

بر اساس تئوری خطی موج‌ساز، یک موج‌ساز پیستونی با حرکت هارمونیک ساده با دامنه A_p و فرکانس زاویه‌ای ω می‌تواند یک موج خطی با پروفیل سطح آب η در داخل یک فلووم موج ایجاد کند:

$$\eta = A_p C_0 \cos(kx - \omega t) + A_p \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-k_n x} \sin(\omega t) \quad (13)$$

$$C_0 = \frac{2[\cosh(2kh) - 1]}{\sinh(2kh) + 2kh} \quad (14)$$

$$C_n = \frac{2[\cos(2k_n h) - 1]}{\sin(2k_n h) + 2k_n h} \quad (15)$$

در معادلات فوق h عمق آب و x فاصله از موج‌ساز است. عدد موج k ، براساس رابطه زیر بدست می‌آید:

$$k g \cdot \tanh(kd) - \omega^2 = 0 \quad (16)$$

و همچنین k_n ریشه n ام معادله زیر است:

$$k_n g \cdot \tan(k_n d) + \omega^2 = 0 \quad (17)$$

به منظور جذب انعکاس‌های ثانویه از موج‌ساز، یک جابه‌جایی اضافی X_a به جابه‌جایی اصلی موج‌ساز X_p ، اضافه شده و فرض می‌شود که موج ایجاد شده در اثر جابه‌جایی X_a می‌تواند عیناً موج‌های انعکاسی ثانویه از موج‌ساز را خنثی کند. بنابراین جابه‌جایی موج‌ساز جذب‌کننده^۲، بصورت زیر خواهد بود:

$$X = X_p + X_a \quad (18)$$

$$X_p = A_p \sin(\omega t) \quad (19)$$

$$X_a = A_a \sin(\omega t + \phi) \quad (20)$$

در رابطه فوق ϕ ، اختلاف فاز^۳ است. بنابراین سرعت ذرات موج‌ساز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u(t) = \frac{dX}{dt} \quad (21)$$

$$u(t) = \omega [A_p \cos(\omega t) + A_a \cos(\omega t + \phi)]$$

³Phase Difference

¹Secondary Reflected Waves

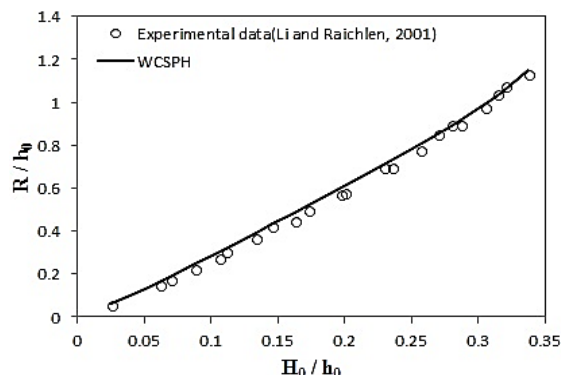
²Absorbing Wave Maker

همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج مدل عددی حاضر مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان داده است.

۲-۳- شبیه‌سازی پیشروی امواج منظم بر روی موج‌شکن مستغرق

در این بخش آزمایشهای عددی انتخاب شده، مشابه با آزمایشهای فیزیکی است که توسط Ohyama و همکارانش در سال ۱۹۹۵ انجام گرفت. این آزمایشها در یک فلوم موج به طول ۶۵ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۱/۶ متر انجام گرفت. یک موج‌شکن مستغرق مطابق شکل (۵) به صورتی در این کانال قرار داده شد که فاصله مرکز مانع از ابتدای کانال ۲۸/۳ متر و عمق آب ساکن در کانال ۰/۵ متر بوده است. در این آزمایش شش موج با مشخصات متفاوت توسط Ohyama و همکارانش در سال ۱۹۹۵ تجربه شده بود که از بین آنها یک نمونه در این مطالعه مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است. در این آزمایش $h_0 = 0.5m$ و $H_0/h_0 = 0.1$ و $T_0\sqrt{g/h_0} = 11.88$ و T_0 پریود موج، H_0 ارتفاع موج و h_0 عمق آب در کانال است.

در هر آزمایش پروفیل سطح آب در موقعیت ۳ و ۴ اندازه‌گیری شده است [۲۶]. در مدل عددی حاضر مطابق شکل (۶) به منظور کاهش حجم محاسبات ناحیه‌ای به طول ۱۲ متر و ارتفاع ۱ متر در نظر گرفته شد که موقعیت موج‌شکن مورد نظر در فاصله بین $x=4.0m$ و $x=6.9m$ بود. در این شبیه‌سازی فاصله بین ذرات $dx = dz = 0.01m$ بوده و از فیلتر چگالی MLS استفاده شد.



شکل (۳) مقایسه حداکثر بالاروی موج تنها توسط مدل عددی WCSPH و نتایج آزمایشگاهی [۲۵] بر روی دیوار ساحلی شیب‌دار.

می‌شود. پروفیل موج تنها به صورت تحلیلی و بر اساس تابعی از مکان x و زمان t به صورت زیر تعریف می‌شود:

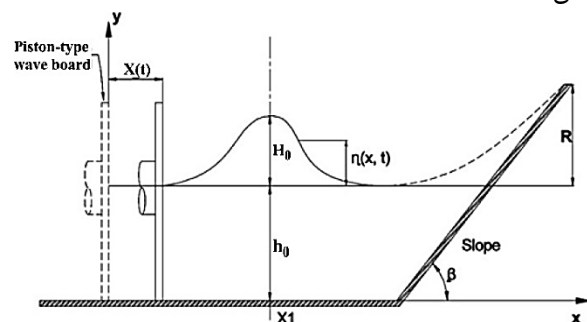
$$\eta(x,t) = H_0 \operatorname{sech}^2 [n(x - Ct)] \quad (23)$$

در رابطه بالا، C سرعت موج تنها و H_0 ارتفاع اولیه موج تنها است. n و C بر اساس روابط زیر تعریف می‌شوند:

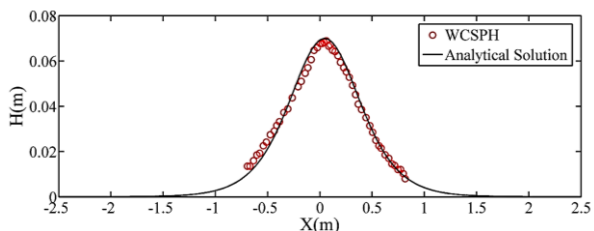
$$n = \sqrt{\frac{3H_0}{4h_0^2(h_0 + H_0)}} \quad (24)$$

$$C = \sqrt{g(H_0 + h_0)} \quad (25)$$

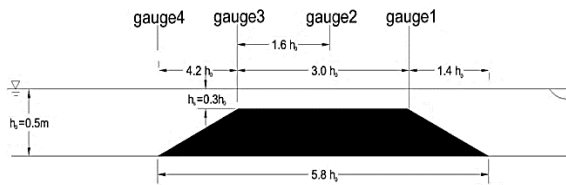
در رابطه، h_0 عمق آب قبل از شیب ساحلی یا همان عمق متوسط آب است. ماکزیمم بالاروی موج تنها بر روی دیوار ساحلی شیب‌دار برای ارتفاع موج‌های مختلف مورد محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در این مدل‌سازی عمق اولیه آب (h_0) ثابت و برابر با 0.21 m در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شد، نتایج مدل عددی WCSPH، مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان داده است. همچنین مقایسه نتایج مدل عددی پروفیل سطح آب با نتایج آزمایشگاهی (Li and Raichlen, 2001) برای موج تنها در پیشروی بر روی دیوار ساحلی شیب‌دار ($\beta \approx 26^\circ$) در زمان‌های مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است



شکل (۱) دامنه محاسباتی آزمایش تولید و پیشروی موج تنها بر روی دیوار ساحلی [۲۵].

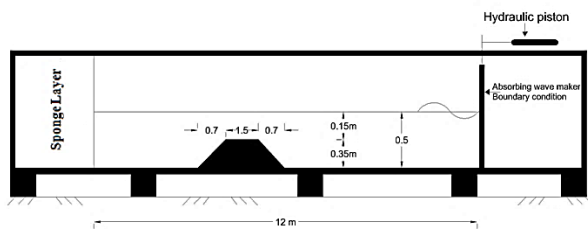


شکل (۲) مقایسه پروفیل موج تنها شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی WCSPH و نتایج مدل تحلیلی.

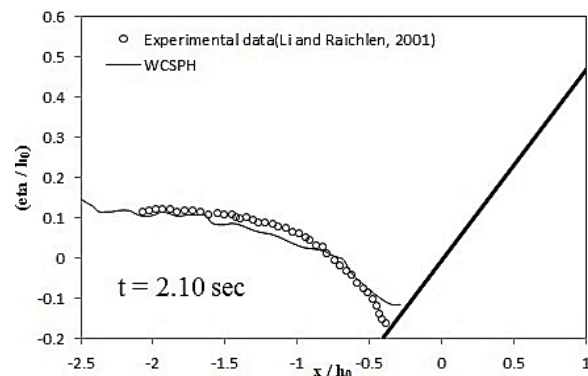
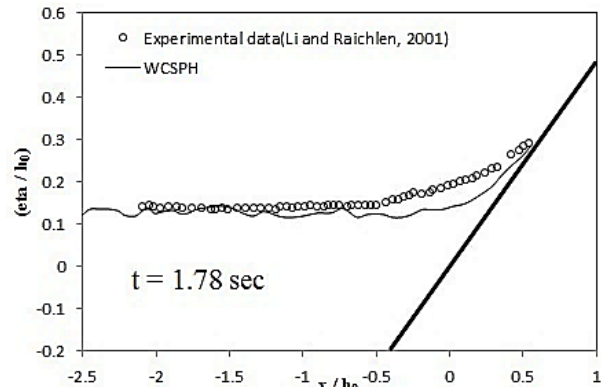
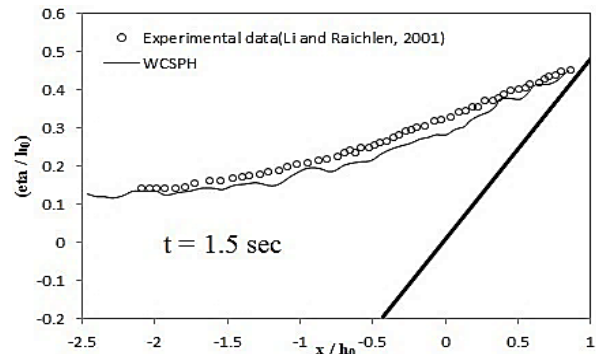
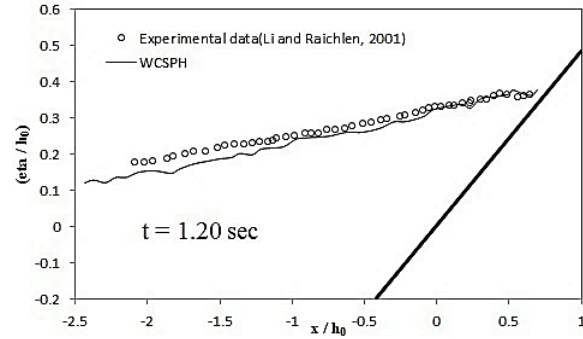


شکل (۵) طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی [۲۶].

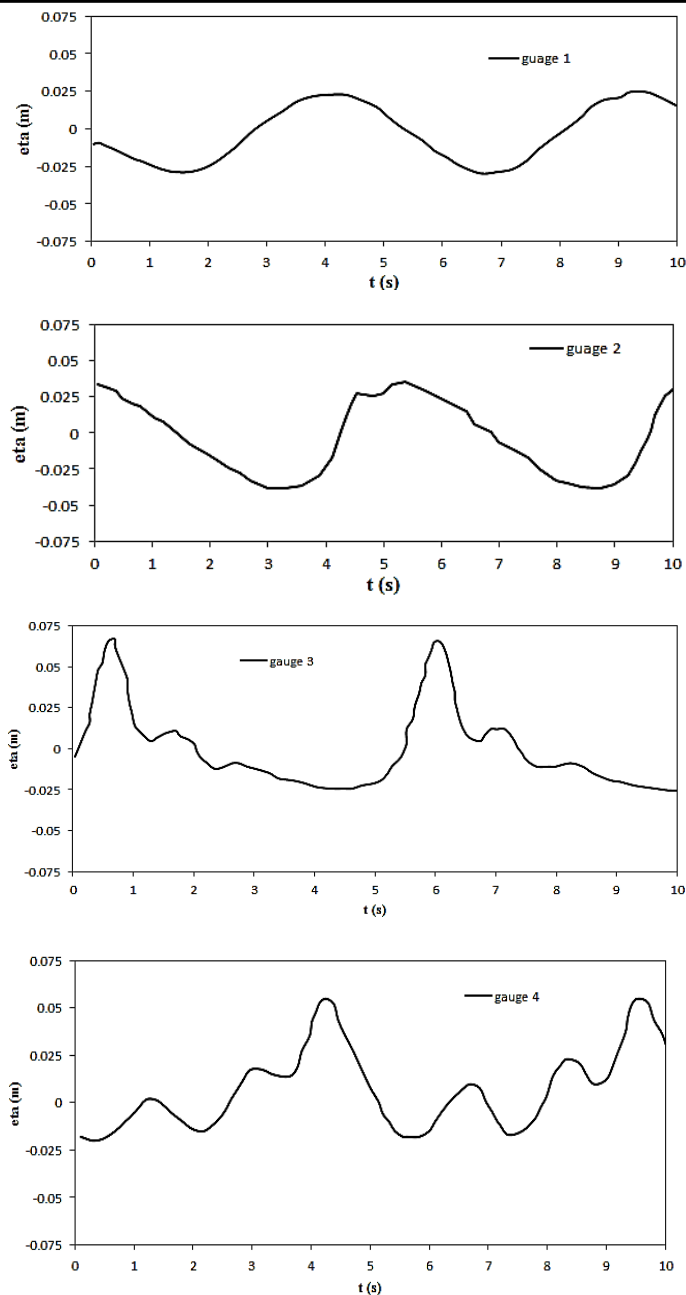
Shen و همکارانش در سال ۲۰۰۴ با استفاده از معادلات ناویر استوکس، پیشروی و انتشار یک موج پرپدیویدیک را بر روی یک مانع دوزنقه‌ای مستغرق مورد بررسی قرار دادند. این محققین برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ استفاده کرده و همچنین برای مدل‌سازی سطح آب از روش VOF استفاده کردند [۲۷]. در شکل (۷) تغییرات زمانی سطح آب اخذ شده از مدل عددی حاضر، در حین پیشروی از روی موج شکن مستغرق در ایستگاه‌های مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با پیشروی موج منظم بر روی موج شکن مستغرق، تیزی موج به دلیل اثرات کاهش عمق و پدیده پشته کردن موج، افزایش می‌یابد که نهایتاً می‌تواند منجر به شکست موج شود. در شکل (۸) نیز تغییرات زمانی سطح آب اخذ شده از مدل عددی حاضر، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و مدل عددی ارائه شده توسط Shen و همکارانش در محل gauge 3, 4 مقایسه شده است. همانطور که در این اشکال مشاهده می‌شود نتایج عددی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی دارند. در شکل (۸) حتی بخش‌هایی از مدل موجود نسبت به مدل عددی Shen و همکارانش مطابقت بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. این تطابق نشان دهنده صحت و دقت و توانایی مدل حاضر در شبیه‌سازی جریان سیال از روی موج شکن مستغرق است.



شکل (۶) طرح شماتیک فلوم عددی به منظور مدل‌سازی پیشروی موج منظم بر روی موج شکن مستغرق.



شکل (۴) مقایسه نتایج مدل عددی پروفیل سطح آب با نتایج آزمایشگاهی برای موج تنها [۲۵] در پیشروی بر روی دیوار ساحلی شیب‌دار در زمان‌های مختلف.

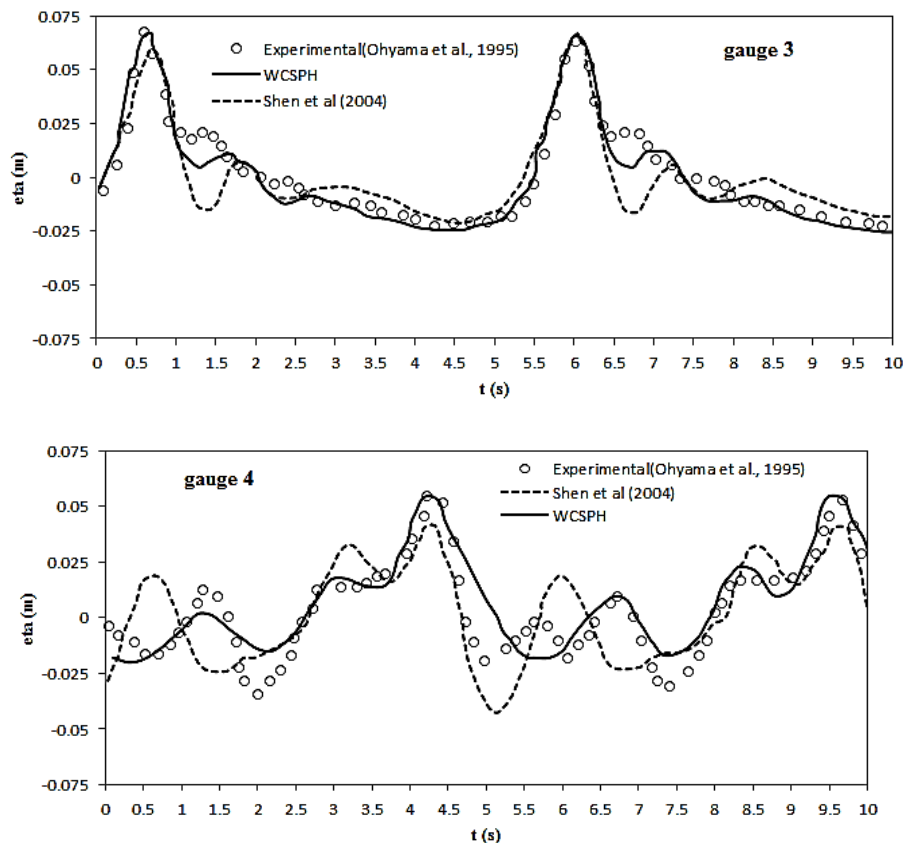


شکل (۷) پروفیل سطح آب در حین پیشروی موج منظم بر روی موج شکن مستغرق در موقعیت های مختلف.

۴- نتیجه گیری

گردید. نتایج ارائه شده نشان می‌دهند که روش پیشنهادی WCSPH قادر است تا با دقتی بهتر از برخی از روشهای عددی پیشین در حالت دو بعدی پدیده عبور موج، پیشروی موج بر روی دیوارهای ساحلی و موج شکن مستغرق نفوذناپذیر را شبیه سازی نماید.

در این تحقیق با استفاده از روش WCSPH و مدل آسفنگی LES به بررسی پیشروی موج تنها بر روی دیوار ساحلی شیب دار پرداخته شده است. همچنین پیشروی امواج منظم متناوب بر روی موج شکن مستغرق دوزنقه‌ای به دقت بررسی



شکل (۸): مقایسه تغییرات زمانی سطح آب بدست آمده از مدل عددی حاضر و مدل‌های آزمایشگاهی [۲۶] و عددی پیشین [۲۷]

Engineering Mathematics, Vol.70, pp.129-136, 2010.

- [6] Hajivalie, F., Yeganeh-Bakhtiary, A., Bricker, J., "Numerical Study of the Effect of Submerged Vertical Breakwater Dimension on Wave Hydrodynamics and Vortex Generation". Coastal Engineering Journal, Vol.57, No.3, 2015.
- [7] Jia, Q., Dong, Sh., Luo, X., Soares, C.G., "Wave Transformation over Submerged Breakwaters by the Constrained Interpolation Profile Method", Ocean Engineering, Vol.136, pp.294-303, 2017.
- [8] Yueh, C.Y., Chuang, S.H., Wen, C.C., "Bragg Reflection of Water Waves due to Submerged Wavy Plate Breakwater", Journal of Hydro-environment Research, Vol.21, p.52-59, 2018.
- [9] Wang, J., He, G., You, R., Liu, P., "Numerical Study on Interaction of a Solitary Wave with the Submerged Obstacle", Ocean Engineering, Vol.158, pp.1-14, 2018.
- [10] Shao, S., "Incompressible SPH Simulation of Wave Breaking and Overtopping with Turbulence Modeling", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.50, pp.597-621, 2006.
- [11] Crespo, A.J.C., Gomez Gesteira, M., Dalrymple, R.A., "3D SPH Simulation of Large Waves

۵- منابع

- [1] Christou, M., Swan, C., Gudmestad, O.T., "The Interaction of Surface Water Waves with Submerged Breakwaters", Coastal Engineering, Vol.55, pp.945-958, 2008.
- [2] Carević, D., Pršić, M., Ocvirk, E., "Modelling of Wave Interaction with Submerged Breakwater Using MIKE 21 BW", International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ohrid/Macedonia, 2009.
- [3] Cao, Y.G., Jiang, Ch.B., Bai, Y.Ch., "Numerical Study on Flow Structure near Two Impermeable Trapezoid Submerged Breakwaters on Slope Bottoms", Journal of Hydrodynamics, 9th International Conference on Hydrodynamics October 11-15, Shanghai, China, 2010.
- [4] Jie, Ch., Changbo, J., Shixiong, U., Wenwei, H., "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, 2010.
- [5] Wiryanto, L. H., "Wave Propagation Passing over a Submerged Porous Breakwater", Journal of

- [24] Liu S.X., Wang X.T., Li M.G., Guo M.Y., "Active Absorption Wave Maker System for Irregular Waves", *China Ocean Engineering*, Vol.17, No.2, pp.203-214, 2003.
- [25] Li, Y. Raichlen, F., "Solitary Wave Run-up on Plane Slopes", *Journal of Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol.127, pp.33-44, 2001.
- [26] Ohyama, T., Kioka, W., Tada, A., "Applicability of Numerical Models to Nonlinear Dispersive Waves", *Coastal Engineering*, Vol.24, pp.297-313, 1995.
- [27] Shen, Y.M., Ng, C.O., Zheng, Y.H., "Simulation of Wave Propagation over a Submerged bar using the VOF Method with a Two-Equation $k - \varepsilon$ turbulence modeling", *Ocean Engineering*, Vol.31, pp.87-95, 2004.
- Mitigation with a Dike", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.45, No.5, pp.631-642, 2007.
- [12] Shao, S, "Incompressible SPH Flow Model for Wave Interactions with Porous Media", *Coastal Engineering*, Vol.57, pp.304-316, 2010.
- [13] Kim, N.H., Kim, S.R., Ko, H.S., "Numerical Simulation of Wave Transmission over a Submerged Breakwater in Wave Flume by using SPH Method", *The 2010 KSCE Annual Conference Journal*, pp.2289-2292, Incheon, Korea, 2010.
- [14] Liu, X., Xu, H., Shao, S., Lin, P., "An Improved Incompressible SPH Model for Simulation of Wave-Structure Interaction", *Computers & Fluids*, Vol.71, pp.113-123, 2013.
- [15] Mahmoudi, A., Hakimzadeh, H., Ketabdari, M. J., "Simulation of Wave Propagation over a Submerged Breakwater on a Sloped Bed by SPH Method", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.23, No.4, pp.286-291, 2013.
- [16] Mansouri, A., Aminnejad, B., "Interaction of Submerged Breakwater by a Solitary Wave Using WCSPH Method", *Modelling and Simulation in Engineering*, Vol.2014, Article ID 524824, 2014.
- [17] Mahmoudi, A., Hakimzade, H., Ketabdari, M.J., Etemad-Shahidi, A., Cartwright, N., Abyn, H., "Weakly-Compressible SPH and Experimental Modeling of Periodic Wave Breaking on a Plane Slope", *International Journal of Maritime Technolog*, Vol.5, pp.63-76, 2016.
- [18] Yeganeh-Bakhtiary, A., Houshang, H., Hajivalie, F., Abolfathi, S., "A Numerical Study on Hydrodynamics of Standing Waves in Front of Caisson Breakwaters with WCSPH Model", *Coastal Engineering Journal*, Vol.59, No.1, 2017.
- [19] Wendland, H., "Piecewise Polynomial, Positive Definite and Compactly Supported Radial Functions of Minimal degree", *Advances in computational Mathematics*, Vol.4, p.389-396, 1995.
- [20] Monaghan, J. J., "Simulating Free Surface Flows with SPH", *Journal Computational Physics*, Vol.110, pp.399-406, 1994.
- [21] Lo, E., Shao, S., "Simulation of Near-Shore Solitary Wave Mechanics by an Incompressible SPH Method", *Applied Ocean Research*, Vol.24, pp.275-286, 2002.
- [22] Dalrymple, R. A., Rogers, B., "Numerical Modeling of Water Waves with the SPH Method", *Coastal Engineering*, Vol.53, pp.141-147, 2006.
- [23] Xu, R., "An Improved Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics Method and its Application in Free-Surface Simulations", PhD Dissertation, University of Manchester, UK. 2010.