



بررسی عددی اثر موج شکن شناور در میرایی امواج ساحلی با روش هیدرودینامیک ذرات هموار

امیرحسین حجتی^۱، نیما امانی فرد^۲، میراحمد لشته نشایی^۳، سامرا دولتی^۴

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس بین الملل، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۳دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۳۰ بهمن ۱۳۹۴

بازنگری: ۱۱ مهر ۱۳۹۵

پذیرش: ۹ آبان ۱۳۹۵

ارائه آنلاین: ۱۹ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

موج شکن شناور
موج شکن غوطه‌ور
ضریب انتقال موج
هیدرودینامیک ذرات هموار
بررسی عددی

چکیده: پیش‌بینی اثر امواج روی موج‌شکن‌ها، برای طراحی بنادر حیاتی می‌باشد. موج‌شکن‌های شناور قابلیت نصب، جابه‌جایی و استفاده مجدد در شرایط متفاوت، حتی در آب‌های عمیق را دارا هستند. اما واکنش پیچیده آنها در پاسخ دینامیکی به انتقال موج، کاربردهای آنها را برای محدوده دوره تناوبی معینی مناسب می‌سازد. در این تحقیق با بکارگیری روش هیدرودینامیک ذرات هموار غیرقابل تراکم با الگوریتم سه مرحله‌ای، اثرات امواج روی یک جفت موج‌شکن شناور و نیز ترکیب موج‌شکن شناور-غوطه‌ور بررسی شده است. رفتار موج‌شکن شناور مانند سیستم جرم و فنر در نظر گرفته شده و از اثرات سیستم مهارکننده موج‌شکن به کف دریا و از اثرات باد صرف نظر شده است. برای اعتبارسنجی الگوریتم حل، تغییرات دامنه نوسان موج‌شکن‌های شناور با نتایج تجربی مقایسه شد؛ که از تطابق خوبی برخوردار است. موج‌شکن در معرض یک موج سینوسی با دوره تناوب‌های مختلف کمتر از ۳ ثانیه قرار می‌گیرد. معیار کارایی موج‌شکن، ضریب انتقال موج می‌باشد. مطابق نتایج به دست آمده، استفاده از موج‌شکن‌های شناور در محدوده دوره تناوبی کمتر از ۲ ثانیه بهینه می‌باشد و حضور موج‌شکن شناور در مجاورت موج‌شکن غوطه‌ور به تثبیت فشار و کاهش نوسانات کمک می‌کند. همچنین، موج‌شکن‌های شناور با حرکت عمودی نسبت به موج‌شکن‌های مشابه دارای حرکت افقی، کارایی بهتری دارند.

۱- مقدمه

زمان اجرای طولانی این نوع از موج‌شکن‌ها سبب گردیده تمایل بکارگیری نوع دیگری از آنها تحت عنوان موج‌شکن شناور^۲ در حال گسترش باشد؛ خصوصاً زمانی که امواج ساحلی خیلی مرتفع و طولانی نباشد. موج‌شکن‌های شناور قابلیت نصب، جابه‌جایی و یا استفاده مجدد در مکان‌ها و موقعیت‌های مختلف با شرایط موج متفاوت، حتی در آب‌های عمیق را دارا می‌باشند. اما واکنش پیچیده آنها در پاسخ دینامیکی به انتقال موج، آنها را برای محدوده دوره تناوبی معینی مناسب می‌سازد. کارایی موج‌شکن به وسیله ضریب انتقال موج تعریف می‌شود که برابر نسبت ارتفاع موج منتقل شده (ارتفاع موج در سمت ساحل^۳) به ارتفاع موج برخوردی (ارتفاع موج در قسمت جلوی موج‌شکن در سمت دریا^۴) است [۱] و مقدار مطلوب آن معمولاً کمتر از ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود [۲]. لازم است مقدار راندمان موج‌شکن‌های شناور افزایش یابد تا به وسیله آنها بتوان بنادر و لنگرگاه‌های ایمن در برابر شرایط آب و هوایی مختلف ایجاد کرد. اگرچه

مطالعه جریان‌های سطح آزاد در نواحی ساحلی از اهمیت محیطی و صنعتی ویژه‌ای برخوردارند. امواج ساحلی در شرایط آب و هوایی مختلف و جزر و مد دریا متلاطم شده و با برخورد به تأسیسات ساحلی می‌توانند اثرات مخربی ایجاد کنند. بنابراین کنترل آنها از اهمیت بالایی در ایجاد شرایط ایمن در بنادر به منظور حفاظت از تأسیسات ساحلی و نیز ورود مطمئن کشتی‌ها جهت بارگیری و باراندازی برخوردار است. موج‌شکن^۱ سازه‌ای عمدتاً از جنس بتن، سنگ و یا ترکیبی از آنها می‌باشد که برای حفاظت تأسیسات ساحلی از خطر امواج و مقابله با تأثیر آنها ساخته می‌شود. از دیرباز موج‌شکن‌ها به صورت ثابت و متصل به کف دریا از نوع قائم یا شیب‌دار طراحی و اجرا گردیده‌اند. ساخت این سازه‌های آبی دارای فونداسیون، با زیاد شدن عمق آب محدود می‌شود؛ زیرا ایجاد آنها در آب‌های عمیق مقرون به صرفه نبوده و یا غیرعملی می‌باشد. محدودیت‌ها، هزینه‌های زیاد و

²Floating Breakwater

³Lee side

⁴Sea side

¹Breakwater

با توجه به قابلیت روش هیدرودینامیک ذرات هموار در شبیه‌سازی تغییرات زیاد مربوط به سطوح مشترک از جمله پخش‌شدگی و به‌هم پیوستن ذرات و توانایی آن در شبیه‌سازی تعامل سیال-سازه [۱۹-۱۴]، در تحقیق حاضر از این روش عددی جهت شبیه‌سازی موج‌شکن استفاده می‌شود.

یکی از انواع روش‌های هیدرودینامیک ذرات هموار مورد استفاده در تحلیل موج‌شکن‌ها روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر ضعیف اولیه^۲ می‌باشد. تفاوت کلیدی بین این روش و هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر مورد استفاده در اینجا این است که اولی فشار را با استفاده از یک معادله حالت محاسبه می‌کند، در حالی که دومی یک فرمولاسیون تراکم‌ناپذیر سخت را به کار می‌گیرد که در آن فشار یک متغیر ترمودینامیکی صریح نیست، بلکه به طور ضمنی با حل یک معادله پواسون فشار حاصله از ترکیب معادلات بقای جرم و ممنتوم، بدست می‌آید. روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر ضعیف اولیه برای جریان‌های سطح آزاد که تغییرات وسیعی در سطح آزاد آن اتفاق می‌افتد، چندان دقیق نیست. اما در روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر، سطوح آزاد بخوبی و بدون خطای پخش عددی مدل می‌شود.

در هیچ‌یک از کارهای مشابه، از الگوریتم هیدرودینامیک ذرات هموار سه مرحله‌ای غیرقابل تراکم [۲۰] در بررسی رفتار موج‌شکن‌ها استفاده نشده است. در این تحقیق با بکارگیری این الگوریتم، شبیه‌سازی جریان سطح آزاد و موج‌شکن صورت پذیرفته، سپس برخورد امواج ساحلی با یک جفت موج‌شکن شناور در دوره تناوبی موج سینوسی کمتر از ۳ ثانیه شبیه‌سازی و تحلیل شده و کارایی آن در کاهش اثرات موج برخوردی بررسی می‌شود. علاوه بر این رفتار این مدل موج‌شکن با افزودن یک موج‌شکن غوطه‌ور به‌صورت ترکیب موج‌شکن شناور- غوطه‌ور نیز بررسی می‌گردد.

۲- فیزیک موج‌شکن‌ها

قرارگیری موج‌شکن شناور در آب راکد هیچ موجی را تولید نمی‌کند، چنانچه سازه در معرض نیروهای محرک امواج قرار گیرد، عکس‌العمل‌های هیدرودینامیکی رخ داده و می‌توان آن را مانند یک سامانه مکانیکی جرم و فنر در نظر گرفت. در واقع با برخورد امواج به موج‌شکن، به آن نیرو وارد شده و حرکت سازه در دو جهت افقی^۳ و عمودی^۴ به وجود می‌آید. موج تولیدی از سمت دریا با اختلاف فاز نسبت به امواج برخوردی به سمت ساحل انعکاس می‌یابد. این اختلاف فاز به ابعاد سازه، دوره تناوب موج و سختی کابل‌های مهارکننده موج‌شکن بستگی دارد [۲۱].

آبی که جرم شناور در حال نوسان را احاطه می‌کند؛ جرم کل، سختی فنر و میرایی سامانه را تعیین خواهد کرد. جرم کل از مجموع جرم شناور و جرم هیدرودینامیکی حاصل می‌گردد. جرم هیدرودینامیکی یا جرم اضافه

مطالعات زیادی جهت تعیین کارایی موج‌شکن‌های شناور انجام شده است اما هیچ موج‌شکن شناوری که بتواند همه نیازمندی‌های لازم را برآورده کند و در همه جا قابل استفاده باشد، ساخته نشده است. آنچه تاکنون طراحی و ساخته شده، فقط جهت کاهش و تقلیل امواج در مکان‌هایی خاص و با شرایط معمول موج می‌باشد.

مطالعات بسیاری در مورد تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و جریانی بر رفتار موج‌شکن و کارایی آن انجام شده است. کوتاندوس و همکاران [۳] جهت مطالعه و بررسی تقابل هیدرودینامیکی موج‌های منظم و نامنظم در مقابل موج‌شکن‌ها در آب‌های کم‌عمق و نیمه‌عمیق، نمونه‌ای آزمایشگاهی با مقیاس بزرگ ساختند و در آن چندین آزمایش با شکل‌های مختلف موج‌شکن شناور انجام دادند و پارامترهای مختلف موج را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این آزمایشات، ارتباط مابین راندمان موج‌شکن‌ها با نسبت پهنای موج‌شکن به طول موج (W/L) و همچنین نسبت عمق آب به طول قسمت غوطه‌ور موج‌شکن را نشان داد. زیدان [۴] به‌طور تجربی اثرات هیدرودینامیکی برخورد امواج منظم با موج‌شکن‌ها در آب‌های نیمه‌عمیق و عمیق و کارایی آن‌ها را بررسی نمود. نتایج بررسی وی نشان داد که عمق نسبی و پهنای موج‌شکن‌ها بر روی کارایی آن‌ها تأثیرگذار می‌باشد. ضمناً مشخص گردید کارایی موج‌شکن با طول موج و دوره تناوب موج برخوردی ارتباط دارد. سایلترن [۵] نیز به بررسی کارایی موج‌شکن‌ها با مقاطع مختلف پرداخت. وی تغییرات ضریب انتقال موج با نسبت پهنای موج‌شکن به طول موج (W/L) را بررسی نمود. سوتکو و هادن [۶] نشان دادند که موج‌شکن شناور با مقطع مستطیلی نسبت به مقاطع دایروی و مثلثی در کاهش ارتفاع امواج مؤثرتر می‌باشد. کارور [۷] دریافت که پارامتر نسبت عرض موج‌شکن به طول امواج برخوردی، پارامتری تأثیرگذار در عملکرد موج‌شکن‌های شناور می‌باشد. مارتنیلی و همکاران [۸] نیز به‌طور تجربی به بررسی ضریب انتقال موج و نیروهای مهارکننده موج‌شکن شناور در موقعیت‌های مختلف پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش زاویه بین امتداد موج‌شکن شناور و امتداد موج برخوردی به آن، نیروهای مهارکننده و همچنین ضریب انتقال موج افزایش می‌یابد.

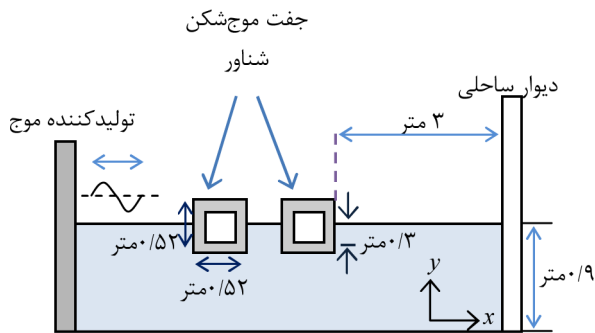
بیشتر تحقیق‌ها در این زمینه به‌صورت تجربی صورت گرفته است، اما به دلیل هزینه‌ها و شرایط دشوار ایجاد موج‌شکن، روش‌های عددی جهت تحلیل موج‌شکن‌ها در شرایط مختلف، روش‌های مؤثری می‌باشند [۹-۱۱]. در بین روش‌های عددی، روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۱ روشی کاملاً لاگرانژی برای شبیه‌سازی جریان سیالات می‌باشد که در آن نیاز به هیچ نوع شبکه‌بندی نیست و بنابراین محدودیت‌های ایجاد مدل هندسی در روش‌های مبتنی بر شبکه و دشواری‌های شبکه‌بندی در مسائل با هندسه پیچیده را ندارد. این روش برای اولین بار توسط لوسی [۱۲] در زمینه مسائل اختر فیزیک بکار گرفته شد. موناگان [۱۳] علاوه بر مسائل اختر فیزیک، از آن برای تحلیل جریان با سطح آزاد استفاده نموده و نتایج قابل قبولی کسب کرد.

²Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics (WCSPH)

³Sway

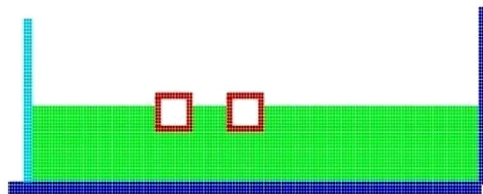
⁴Heave

¹Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)



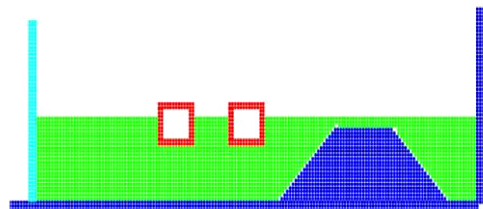
شکل ۱: مدل هندسی دو بعدی یک جفت موج شکن شناور

Fig. 1. Two-dimensional geometric model of a pair of floating breakwater



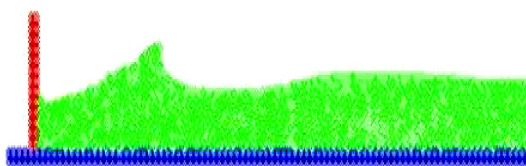
شکل ۲: نمایشی از چیدمان ذرات به روش هیدرودینامیک ذرات هموار، مدل جفت موج شکن شناور

Fig. 2. A view of the particle layout by the smoothed particle hydrodynamics method, Floating breakwater pair model



شکل ۳: نمایشی از چیدمان ذرات به روش هیدرودینامیک ذرات هموار، مدل ترکیب موج شکن شناور- غوطه‌ور

Fig. 3. A view of the particle layout by the smoothed particle hydrodynamics method, Float-submerged breakwater model



شکل ۴: تولید موج سینوسی توسط تولیدکننده موج

Fig. 4. Sine wave production by wave generator

شده (α_{ij}) ، بیانگر مقدار آبی است که موج شکن شناور با خود به حرکت در می‌آورد. این ضریب به مشخصات هندسی سازه و دوره تناوب حرکت بستگی دارد. در تحقیق حاضر، مبنای محاسبه جرم هیدرودینامیکی، نمودارها و چندجمله‌ای‌های وُگت برای سازه‌های مستطیلی با نسبت پهنا به عمق شناوری ۲، ۴ و ۸ می‌باشد [۲۱].

میرایی هیدرودینامیکی (b_{ij}) ، برحسب (kg/s) نیز بیانگر مقاومتی است که جسم شناور هنگام حرکت با آن مواجه می‌شود. به واسطه این میرایی هیدرودینامیکی، انرژی سازه در حال نوسان تلف می‌شود. این ضریب نیز به مشخصات هندسی سازه و دوره تناوب حرکت بستگی دارد. نیرویی که موج شکن شناور را به سمت عقب و موقعیت اولیه آن (بعد از جابه‌جایی اولیه) بر می‌گرداند، اصطلاحاً ضریب فنریت هیدرودینامیکی نامیده می‌شود. این نیرو به وسیله تغییر در فشار آب زیر موج شکن به وجود می‌آید. مطابق این تعریف، سختی فنر هیدرودینامیکی فقط در حرکت‌های عمودی بوده و در حرکت افقی وجود ندارد.

۳- هندسه مسأله و چیدمان ذرات

مدل هندسی دوبعدی مورد بررسی در تحقیق حاضر، شامل یک جفت موج شکن شناور، دیوار ساحلی و دیوار تولیدکننده موج^۱ سینوسی بوده که در شکل ۱ نشان داده شده است. جفت موج شکن شناور شامل دو بدنه با مقطع مربعی شکل توخالی با ابعاد 0.52×0.52 متر و ارتفاع غوطه‌وری 0.37 متر می‌باشد. دیواره سمت راست، نماد دیوار ساحلی بوده و دیواره سمت چپ تولید کننده موج دریا می‌باشد. ترکیب موج شکن شناور- غوطه‌ور نیز با افزودن یک موج شکن غوطه‌ور دوزنقه‌ای شکل به ارتفاع 0.8 متر و زاویه شیب 45 درجه به مدل جفت موج شکن شناور تشریح شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. موج شکن‌های شناور به صورت سامانه جرم و فنر با سختی معادل کابل‌های 50 N/m در نظر گرفته شده‌اند.

شماتیکی از چیدمان ذرات در روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای دو مدل مورد بررسی به ترتیب در شکل ۲ و شکل ۳ آورده شده است. ضمناً نحوه تولید موج سینوسی توسط تولیدکننده موج در شکل ۴ نشان داده شده است. در شبیه‌سازی دوبعدی در فضای (x, y) محور x موازی سطح آب دریا و محور y بیانگر ارتفاع آب از سطح دریا می‌باشد. از آنجایی که سازه سبک است، برآیند نیروهای هیدرودینامیکی در خط مرکزی دوران جسم شناور اعمال شده و حرکت دورانی نادیده گرفته می‌شود. بنابراین شبیه‌سازی به صورت دوبعدی انجام پذیرفته و از اثرات نیروی کشش کابل‌های مهارکننده موج شکن شناور نیز صرف نظر می‌شود.

جهت شبیه‌سازی مدل اصلی در روش هیدرودینامیک ذرات هموار یک جفت موج شکن شناور تعداد 4596 ذره در نظر گرفته شده است. فاصله بین دو موج شکن شناور 0.5 متر، فاصله موج شکن شناور دوم تا دیوار ساحلی 3 متر و عمق آب 0.9 متر می‌باشد.

¹Wave maker

۴- معادلات حاکم

معادلات حاکم برای شبیه‌سازی سطح آزاد در فضای دوبعدی شامل معادلات بقای جرم و بقای مومنتم بوده و به صورت کلی زیر بیان می‌شود:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{g} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (۲)$$

که ρ چگالی، \vec{u} بردار سرعت، P فشار، $\vec{\tau}$ تانسور تنش برشی، \vec{g} شتاب ثقل و t زمان می‌باشد.

۵- فرمولاسیون روش هیدرودینامیک ذرات هموار

در هر روش محاسباتی دینامیک سیالات جهت تقریب کمیت‌ها نیاز به اطلاعات تعداد محدودی از نقاط می‌باشد. در فرمولاسیون هیدرودینامیک ذرات هموار ارائه شده توسط موناگان [۱۸]، این تقریب با درون‌یابی از یک سری از نقاط صورت می‌گیرد. در واقع فضای محاسباتی مسأله به ذراتی تقسیم می‌شود که حامل مشخصه‌های سیال مثل چگالی، سرعت، فشار و دیگر خواص موجود در مسأله می‌باشد. هر ذره بنا به اثراتی که از ذرات مجاور خود بر اساس تئوری درون‌یابی انتگرالی می‌پذیرد، در قالب معادلات پیوستگی و ناویراستوکس در فضای محاسباتی جابه‌جا می‌شود. نقاط مجاور هر کدام با توجه به یک تابع درون‌یابی، سهمی در تخمین مقدار این پارامتر در نقطه مورد نظر دارند [۱۲]. درون‌یاب‌ها توابع تحلیلی هستند که بدون استفاده از شبکه قابل دیفرانسیل‌گیری هستند.

۵-۱- درون‌یابی

توابع درون‌یابی در روش هیدرودینامیک ذرات هموار چگونگی تقریب زدن مقدار یک کمیت و همچنین اندازه ناحیه تحت تأثیر هر ذره را بیان می‌کنند. با استفاده از مفاهیم بیان شده، کمیت هر ذره مرجع i (اسکالر یا برداری) با جمع مستقیم کمیت‌های نسبی ذرات همسایه مجاور j به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\varphi_i(r_i) = \sum_j m_j \frac{\varphi_j(r_j)}{\rho_j(r_j)} W(|r_i - r_j|, h) \quad (۳)$$

که W تابع درون‌یابی کرنل و h طول هموارسازی^۱ می‌باشد. این طول بیان‌کننده ناحیه تأثیر اطراف یک ذره مرکزی است که با ذرات واقع در این ناحیه بر هم کنش دارد و انتگرال‌گیری در کل فضا انجام می‌شود.

۵-۲- کرنل

بکارگیری توابع کرنل مختلف در روش هیدرودینامیک ذرات هموار مشابه استفاده از طرح‌های مختلف در روش‌های تفاضل محدود می‌باشد. با اینکه توابع مختلف می‌توانند کرنل‌های متفاوتی داشته باشند، معمولاً

^۱Smoothing length

کرنل یکسان در سرتاسر فرمولاسیون یک مدل استفاده می‌شود. کرنل تابع اسپیلاین یکی از انتخاب‌های مناسب و متداول در روش هیدرودینامیک ذرات هموار می‌باشد؛ که تابع اسپیلاین مکعبی به عنوان مناسب‌ترین کرنل در درون‌یابی روش هیدرودینامیک ذرات هموار در این بررسی انتخاب شده و شکل نرمال شده آن به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$W(r, h) = \frac{\sigma}{h^v} \times \begin{cases} \left(1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3\right) & q < 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & 1 < q < 2 \\ 0 & q > 2 \end{cases} \quad (۴)$$

که $q=r/h$ و r فاصله بین ذرات است. در معادله (۴)، v تعداد ابعاد مسئله و σ یک ثابت نرمال شده و برای یک، دو و سه بعد به ترتیب دارای مقادیر $۲/۳$ و $۱۰/۷\pi$ و $۱/\pi$ می‌باشد. در اینجا ناحیه تأثیر یک ذره، دایره‌ای با مرکزیت ذره مورد نظر و به شعاع $۲h$ می‌باشد. مشتق دوم این کرنل پیوسته بوده و ترم خطای حاکم در درون‌یاب انتگرال از مرتبه (h^2) می‌باشد.

$$\left(\frac{1}{\rho_i} \nabla_i A\right)_i = \sum_j m_j \left(\frac{A_i}{\rho_i^2} + \frac{A_j}{\rho_j^2}\right) \nabla_i W_{ij} \quad (۵)$$

$$\left(\frac{1}{\rho_i} \nabla_i \cdot B_i\right)_i = \sum_j m_j \left(\frac{B_i}{\rho_i^2} + \frac{B_j}{\rho_j^2}\right) \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (۶)$$

مجموع روی کلیه ذرات پیرامون ذره i بوده و $\nabla_i W_j$ گرادیان کرنل نسبت به موقعیت ذره i می‌باشد. به دلیل اینکه کرنل منطقه محدودی دارد، تنها ذرات همسایه نزدیک به ذره مورد نظر در تعیین پارامتر در محل آن ذره مشارکت دارند.

یک روش ساده برای فرمولاسیون اپراتور لاپلاسیان^۲ در نظر گرفتن آن تحت عنوان ضرب نقطه‌ای اپراتورهای دیورژانس و گرادیان است که با دو بار مشتق‌گیری به دست می‌آید. این رویکرد هنگامی که ذرات پراکنده باشند منجر به ناپایداری در محاسبه فشار و سرعت می‌شود. در این مقاله از راهکار زیر جهت رفع این ناپایداری استفاده شده است [۱۹]:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla A\right)_i = \sum_j m_j \frac{8}{(\rho_i + \rho_j)^2} \frac{A_{ij} \vec{r}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}}{|r_{ij}|^2 + \eta^2} \quad (۷)$$

که $A_{ij} = A_i - A_j$ و $r_{ij} = r_i - r_j$ و η یک مقدار کوچک برای جلوگیری از صفر شدن منخرج معادله (۷) بوده که برابر $0.1h$ می‌باشد.

^۲Laplacian

$$\hat{V} = -\left(\frac{1}{\rho^*} \nabla P\right) \Delta t \quad (14)$$

با ترکیب معادلات فوق، معادله پواسون فشار^۱ به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho^*} \nabla P\right) = \frac{\rho_0 - \rho^*}{\rho_0 \Delta t^2} \quad (15)$$

معادله (۱۵) مطابق معادله (۷) به صورت زیر گسسته می‌شود:

$$P_i = \left(\frac{\rho_0 - \rho_i^*}{\rho_0 \Delta t^2} + \sum_j \frac{8m_j}{(\rho_i^* + \rho_j)^2} \frac{P_j r_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}}{|r_{ij}|^2 + \eta^2} \right) \quad (16)$$

$$\left(\sum_j \frac{8m_j}{(\rho_i^* + \rho_j)^2} \frac{r_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}}{|r_{ij}|^2 + \eta^2} \right)^{-1}$$

با استفاده از معادله (۱۶) برای فشار هر ذره، می‌توان \hat{V} را با استفاده از معادلات (۵) و (۱۴) محاسبه نمود:

$$\hat{V} = -\Delta t \sum_j m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^*} + \frac{P_j}{\rho_j} \right) \nabla_i W_{ij} \quad (17)$$

در نهایت، سرعت هر ذره در انتهای گام زمانی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_{t+\Delta t} = V^{**} + \hat{V} \quad (18)$$

و مکان نهایی ذرات با استفاده از طرح دیفرانسل مرکزی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r_{t+\Delta t} = x_i + \frac{\Delta t}{2} (V_{t+\Delta t} + V_t) \quad (19)$$

بدین ترتیب محاسبات موردنیاز برای یک گام زمانی تکمیل می‌شود. این فرآیند بایستی برای تمام نقاط در هر گام زمانی تکرار شود تا زمان مطلوب حاصل گردد.

۷- اعتبارسنجی حل

به منظور راستی‌آزمایی شبیه‌سازی مدل حاضر با الگوریتم هیدرودینامیک ذرات هموار سه مرحله‌ای تراکم‌ناپذیر، تغییرات دامنه نوسان در حالت دو موج‌شکن شناور با مدل تجربی مشابه مارتینلی و همکاران [۸] در دوره تناوب موج ۱/۳ ثانیه مقایسه شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. حداکثر ارتفاع موج در مدل تجربی ۰/۰۴۵ متر و در مدل عددی تحقیق حاضر ۰/۰۴۵۲ متر به‌دست آمده که نتایج به‌دست آمده مطابقت قابل قبولی دارد.

۶- الگوریتم هیدرودینامیک ذرات هموار غیرقابل تراکم سه مرحله‌ای

در این مقاله یک الگوریتم روش هیدرودینامیک ذرات هموار غیرقابل تراکم سه مرحله‌ای کاملاً صریح استفاده شده است [۲۰]. در مرحله اول این الگوریتم، معادله مومنتم در حضور نیروهای حجمی و با نادیده گرفتن سایر نیروها حل می‌شود. در نتیجه یک سرعت میانی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V^* = V_t + g \Delta t \quad (8)$$

که در آن Δt گام زمانی، V^* سرعت میانی ذرات و g شتاب گرانشی می‌باشد. در مرحله دوم، سرعت‌های میانی محاسبه شده برای به دست آوردن دیورژانس تنش برشی بکار می‌روند. در نگاه کلی، تنش برشی از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau = \mu(|D|)D \quad (9)$$

که در آن $|D| = \sqrt{\sum_{i,j} D_{ij} D_{ij}}$ و $|D| = (\nabla V + \nabla V^T)/2$ می‌باشند و برای سیالات نیوتنی تنش برشی برابر $\tau = 2\mu D$ است. دیورژانس تنش برشی از معادله (۱۰) به دست می‌آید:

$$\left(\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \tau\right)_i = \sum_j m_j \left(\frac{\tau_i}{\rho_i^2} + \frac{\tau_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W(r_{ij}, h) \quad (10)$$

در انتهای مرحله دوم مؤلفه‌های سرعت هر ذره مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V^{**} = V^* + \left(\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \tau\right) \Delta t \quad (11)$$

در این مرحله هر ذره مطابق سرعت میانی دوم خود جابه‌جا می‌شود. این دو گام را مراحل پیش‌بینی می‌نامند. هم‌اکنون چگالی لحظه‌ای هر ذره محاسبه می‌شود زیرا طی این تغییر سرعت، چگالی ذره اندکی تغییر می‌کند؛ بنابراین از معادله پیوستگی کمک گرفته و یک چگالی موقتی برای هر ذره بدست می‌آید:

$$\rho^* = \rho_0 + \left(\sum_j m_j (V_i - V_j) \cdot \nabla W_{ij}\right) \Delta t \quad (12)$$

در معادله فوق ρ^* چگالی لحظه‌ای و ρ_0 چگالی ثابت سیال است. حال میدان سرعت ذره (\hat{u}, \hat{v}) مجدداً محاسبه می‌شود تا چگالی سیال به منظور حفظ بقاء جرم به مقدار اولیه خود اصلاح شود. بدین منظور در مرحله سوم الگوریتم، معادله مومنتم با ترم گرادیان فشار به عنوان عبارت چشمه با معادله (۱) به صورت زیر ترکیب می‌شود:

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\rho_0 - \rho^*}{\Delta t} + \nabla V = 0 \quad (13)$$

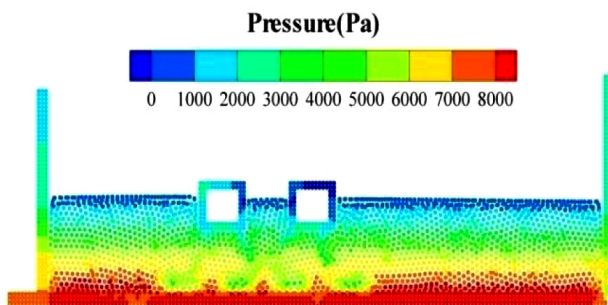
^۱Pressure Poisson equation

$$C_t = H_t / H_i \quad (20)$$

که H_t ارتفاع موج منتقل شده و H_i ارتفاع موج برخوردی می‌باشد. کارایی موج‌شکن برای حرکت‌های افقی و عمودی جفت موج‌شکن شناور در دوره تناوب‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل، ضریب انتقال موج در حرکت افقی با افزایش دوره تناوب موج زیاد می‌شود به طوری که تا $1/75$ ثانیه ضریب انتقال موج حدود $0/45$ بوده و پس از آن افزایش یافته و به سمت ۱ میل می‌کند. در حرکت عمودی، در دوره تناوب‌های کوتاه تا ۳ ثانیه موج‌شکن دارای ضریب انتقال موج تقریباً یکسان و حدود $0/55$ می‌باشد. در نتیجه با در نظر گرفتن هر دو حرکت افقی و عمودی موج‌شکن، تا دوره تناوب ۲ ثانیه شرایط بهینه برقرار می‌باشد و پس از آن کارایی موج‌شکن افقی تا دوره تناوب بحرانی ۳ ثانیه کاهش می‌یابد؛ بنابراین موج‌شکن‌های با حرکت عمودی در محدوده وسیع‌تری از دوره تناوب موج کارایی خود را حفظ می‌کنند.

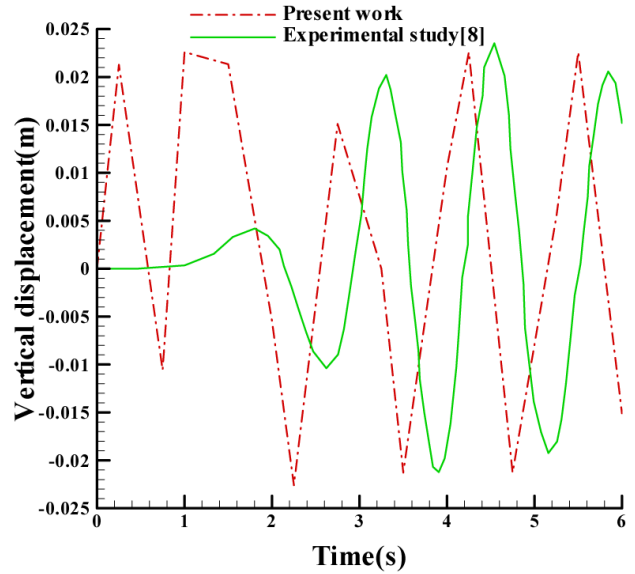
در لحظه آغازین برخورد موج به موج‌شکن در چندین ناحیه زیر موج‌شکن‌های شناور گردابه‌هایی مشاهده می‌شود که با افزایش زمان بزرگتر شده و به تدریج ناپدید می‌گردند. تعداد و قدرت این گردابه‌ها در دوره تناوب‌های پایین موج به علت کم بودن سرعت سازه در این ناحیه کوچک می‌باشد و با افزایش دوره تناوب موج، گردابه‌های بزرگتری مشاهده می‌شود. فشار ذرات سیال در سطح آزاد تقریباً صفر بوده و با افزایش عمق آب، فشار ذرات افزایش می‌یابد، به طوری که حداکثر فشار متعلق به ذرات در لایه‌های زیرین سیال می‌باشد. نمونه‌ای از کانتور فشار در حرکت افقی دو موج‌شکن شناور در شکل ۷ نشان داده شده است.

منحنی تغییر فشار در برابر زمان در مجاورت دیوار ساحلی در دوره تناوب‌های مختلف مختلف موج برای حرکت‌های هارمونیک افقی و عمودی در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. مطابق شکل‌ها، ابتدا فشار تا ۱ ثانیه در لحظه برخورد موج با دیوار ساحلی به علت تغییر جهت میدان سرعت تا میزان فشار 1700 Pa افزایش می‌یابد. سپس با گذشت زمان و با کاهش سرعت ذرات آب تا حدود صفر، مقدار فشار کاهش خواهد یافت.



شکل ۷: کانتور تغییرات فشار در حرکت افقی موج‌شکن در زمان ۴ ثانیه با دوره تناوب موج ۳ ثانیه

Fig. 7. Contour variation of pressure in horizontal motion of a breakwater in 4 seconds with a period of 3 seconds



شکل ۵: نمودار تغییرات ارتفاع موج بر حسب زمان در مدل تجربی و مدل عددی هیدرودینامیک ذرات هموار

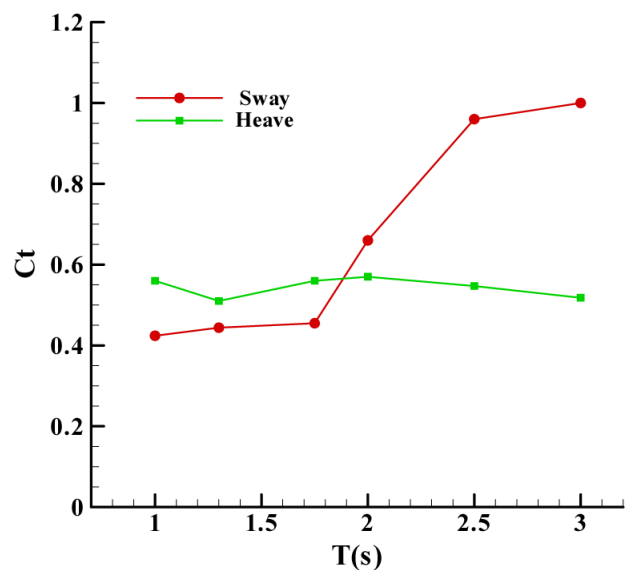
Fig. 5. Wave height variations in time in experimental model and smoothed particle hydrodynamics numerical method

۸- بحث و بررسی نتایج

نتایج در دو بخش یک جفت موج‌شکن شناور و ترکیب این جفت موج‌شکن شناور با یک موج‌شکن غوطه‌ور دوزنقه‌ای شکل ارائه شده است:

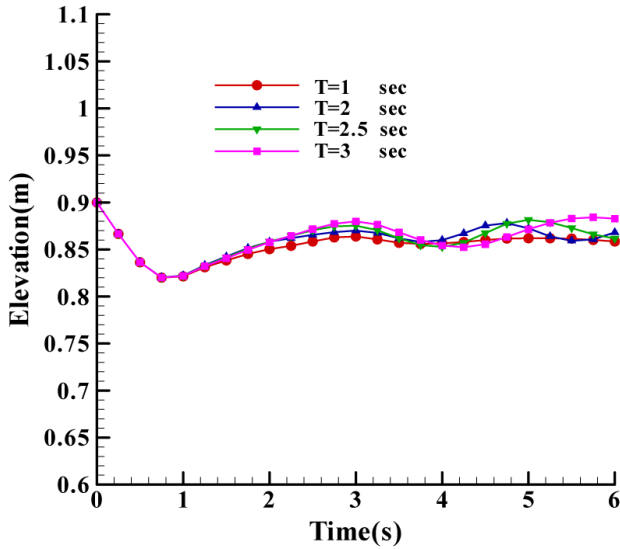
۸-۱- تحلیل دو موج‌شکن شناور

کارایی موج‌شکن با ضریب انتقال موج ارزیابی می‌گردد و با رابطه زیر بیان می‌شود:



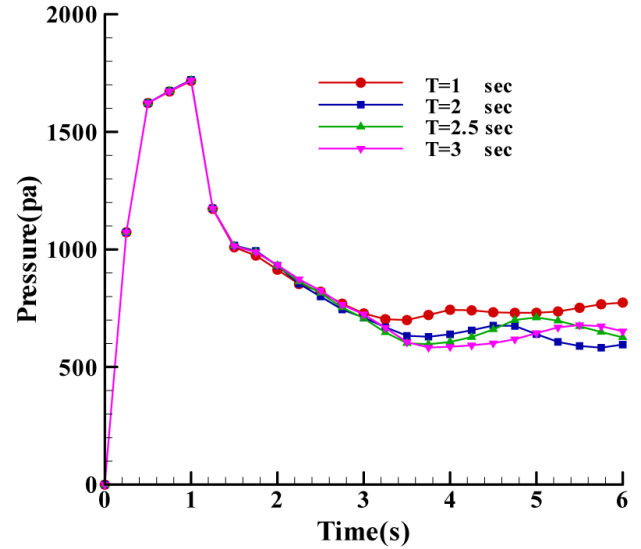
شکل ۶: ضریب انتقال موج بر حسب دوره تناوب موج

Fig. 6. Wave transfer coefficient according to wave frequency period



شکل ۱۰: نمودار تغییرات ارتفاع آب در ناحیه ساحلی برحسب زمان در حرکت افقی موج شکن

Fig. 10. Variations of water pressure in the coastal zone in terms of time in vertical motion of the breakwater

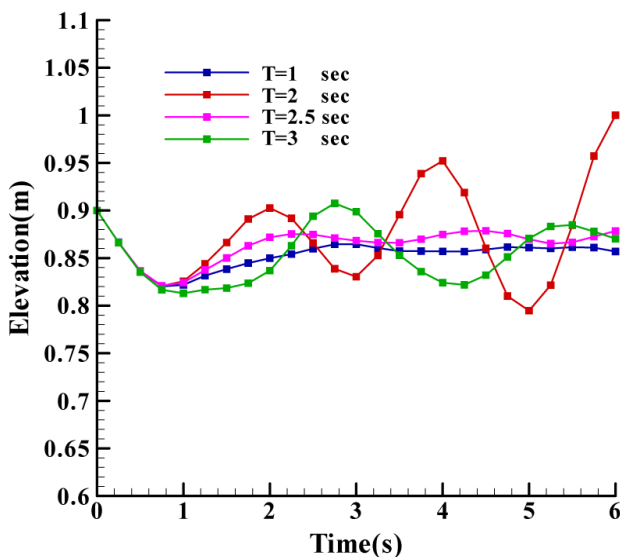


شکل ۸: نمودار تغییرات فشار آب در ناحیه ساحلی برحسب زمان در حرکت افقی موج شکن

Fig. 7. Variations of water pressure in the coastal zone in terms of time in horizontal motion of the breakwater

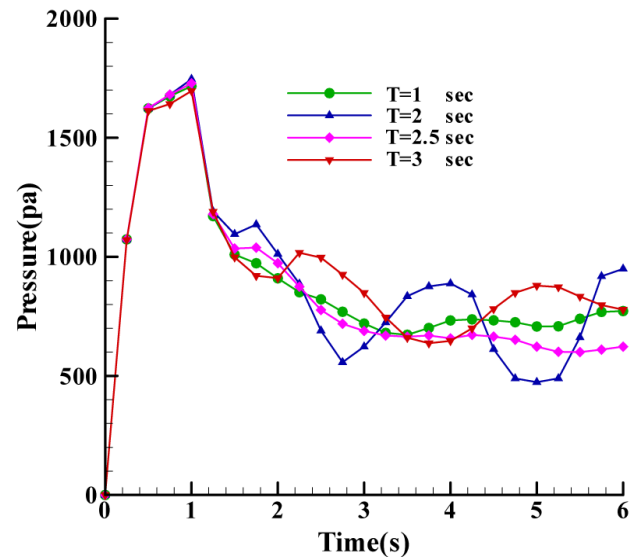
جداگانه برای حرکت‌های هارمونیک افقی و عمودی موج‌شکن‌های شناور در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. مطابق شکل‌ها، ارتفاع سطح آب پس از برخورد موج با دیوار ساحلی تا زمان ۱ ثانیه کاهش و سپس افزایش می‌یابد. با افزایش دوره تناوب موج برخوردی از ۱ ثانیه تا ۲ ثانیه در حرکت عمودی موج‌شکن، به‌علت وقوع تشدید در ۲ ثانیه، تغییرات و نوسانات سطح

در حرکت عمودی موج‌شکن، با افزایش دوره تناوب موج برخوردی از ۱ ثانیه به ۲ ثانیه به علت وقوع تشدید در ۲ ثانیه، تغییرات و نوسانات فشار در مجاورت دیوار افزایش و سپس کاهش می‌یابد که این نوسانات نسبت به حرکت افقی موج‌شکن محسوس‌تر است. منحنی تغییرات ارتفاع سطح آب در مجاورت دیوار ساحلی به صورت



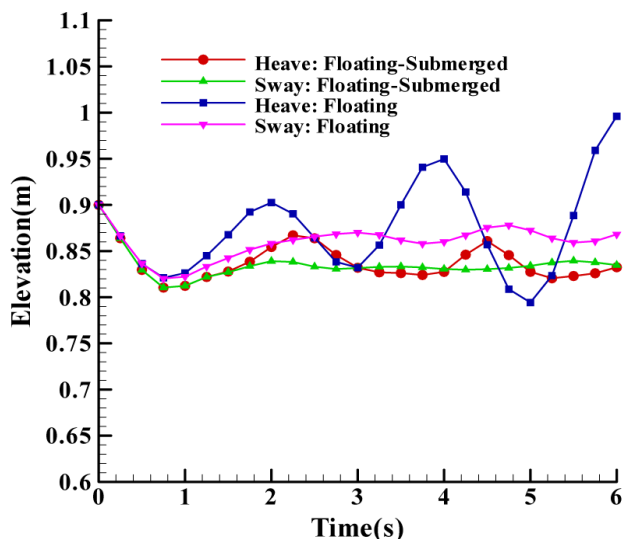
شکل ۱۱: نمودار تغییرات ارتفاع آب در ناحیه ساحلی برحسب زمان در حرکت عمودی موج شکن

Fig. 11. Variations of water height in the coastal zone in terms of time in vertical motion of the breakwater



شکل ۹: نمودار تغییرات فشار آب در ناحیه ساحلی برحسب زمان در حرکت عمودی موج شکن

Fig. 9. Variations of water height in the coastal zone in terms of time in horizontal motion of the breakwater



شکل ۱۳: نمودار تغییرات ارتفاع آب در ناحیه ساحلی در حضور و عدم حضور موج‌شکن غوطه‌ور

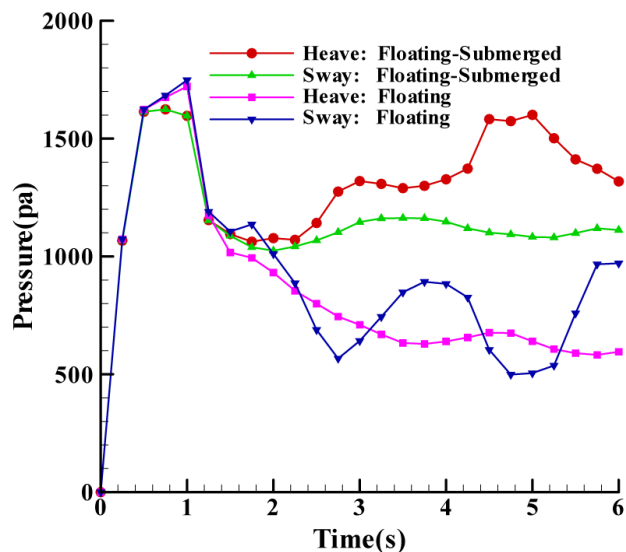
Fig. 13. Water height changes diagram in the coastal area in the presence and absence of submerged breakwater

در محدوده دوره تناوبی مورد بررسی موج‌شکن‌های شناور با حرکت عمودی نسبت به موج‌شکن‌های مشابه با حرکت افقی، دارای کارایی بهتری هستند. از سویی در موج‌شکن‌های با حرکت عمودی در دوره تناوب‌های کوتاه موج، به علت کمتر بودن جرم هیدرودینامیکی نسبت به حرکت افقی، بسامد طبیعی سازه افزایش و احتمال وقوع تشدید بیشتر می‌شود، درحالی‌که در موج‌شکن‌های دارای حرکت افقی به علت زیاد بودن جرم مجازی و میرایی کمتر سامانه، اختلاف بین فرکانس طبیعی سازه و موج افزایش یافته و احتمال وقوع تشدید کاهش می‌یابد.

در دوره تناوب‌های کمتر از ۳ ثانیه، برای حرکت عمودی موج‌شکن، زیاد بودن احتمال تشدید در دوره تناوب‌های کم موج، سبب می‌شود تغییرات و نوسانات فشار و ارتفاع سطح آب در ناحیه نزدیک دیوار ساحلی در لحظه وقوع تشدید ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش یابد که بکارگیری یک موج‌شکن غوطه‌ور در مجاورت آن سبب کاهش تغییرات ناگهانی فشار و ارتفاع سطح آب در نزدیکی سازه‌های ساحلی شود.

مراجع

- [1] M.W. Fousert, Floating breakwater: theoretical study of dynamic wave attenuating system, MSc.Thesis, TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, section Hydraulic Engineering, (2007).
- [2] R. F. Henry, W. Ahn, C.J. Garrison, V. Shepsis, Design and construction of floating breakwaters for the port of Bremerton using physical and computer modeling, ASCE, Section: Waterfront Structures, (2006) 1-10
- [3] E.V. Koutandos, Th.V. Karambas, C.G. Koutitas, Floating



شکل ۱۲: نمودار تغییرات فشار آب در ناحیه ساحلی در حضور و عدم حضور موج‌شکن غوطه‌ور

Fig. 12. Water pressure changes diagram in the coastal area in the presence and absence of submerged breakwater

آب در مجاورت دیوار تا حدود ۱/۰ متر افزایش و سپس کاهش می‌یابد، درحالی‌که در حرکت افقی موج‌شکن با افزایش دوره تناوب موج، نوسانات سطح آب تقریباً سیر صعودی ملائم دارد.

۸-۲- تحلیل موج‌شکن شناور- غوطه‌ور

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمودار تغییرات فشار و ارتفاع سطح آب در مجاورت دیوار ساحلی را برای دو موج‌شکن شناور در حضور و عدم حضور موج‌شکن غوطه‌ور نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود حضور موج‌شکن غوطه‌ور سبب کاهش تغییرات و نوسانات فشار و ارتفاع سطح آب در مجاور دیوار ساحلی در هر دو حرکت افقی و عمودی موج‌شکن می‌شود. این درحالی است که علاوه بر کاهش نوسانات سطح آب، ارتفاع آب نیز با حضور موج‌شکن شناور کاهش می‌یابد. بنابراین در هر دو حالت موج‌شکن شناور با حرکت افقی و عمودی، حضور این موج‌شکن غوطه‌ور تأثیر مثبتی در کنترل امواج و کاهش اثر انتقالی آن‌ها دارد.

۹- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

رفتار هیدرودینامیکی یک جفت موج‌شکن شناور و کارایی آن در کاهش اثرات موج برخوردی، در دوره تناوبی موج سینوسی کمتر از ۳ ثانیه شبیه‌سازی و تحلیل شده است. نتایج به دست آمده از ضریب انتقال موج حاکی از آن دارد که کاربرد موج‌شکن‌های شناور در دوره تناوب‌های موج کمتر از ۲ ثانیه بهینه می‌باشد. علاوه بر این رفتار این جفت موج‌شکن شناور با افزودن یک موج‌شکن غوطه‌ور به صورت ترکیب موج‌شکن شناور- غوطه‌ور نیز بررسی شده است. به‌طور کلی مهم‌ترین نتایج را می‌توان بدین صورت بیان نمود که

- [12] L.B. Lucy, A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, *Astron J.*, 82(12) (1977) 1013–1024.
- [13] J.J. Monaghan, Simulating Free Surface Flows with SPH, *Journal of Computational Physics*, 110(2) (1994) 399-406.
- [14] C. Antoci, M. Gallati, S Sibilla, Numerical simulation of fluid–structure interaction by SPH, *Journal of Computers and Structures* 85(2007) 879–890.
- [15] S.M. Hosseini, N. Amanifard, Presenting a modified SPH algorithm for numerical studies of fluid-structure interaction problems, *IJE Trans B: Applications*, 20(2007) 167-178.
- [16] M.H Farahani., N. Amanifard, Gh. Pouryousefi, Numerical simulation of a pulsatory flow moving through flexible walls using smoothed particle hydrodynamics, To be published in proceeding of World Congress of Engineering, The International Conference of Mechanical Engineering, London, U.K, (2008).
- [17] M.H Farahani., N. Amanifard, H Asadi., M. Mahnama, Fluid structure interaction simulation with free surface flows by smoothed particle hydrodynamics, Abstract accepted for the ASME, International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2008), Boston, MA, USA, (2008)
- [18] J.J. Monaghan, Smoothed particle hydrodynamics, *Ann. Rev. Astron. Astrophys*, 30 (1992) 543–74.
- [19] S.J. Cummins, M. Rudman, An SPH projection method”, *Journal of Computer and Physics*, 152(1999) 584-607.
- [20] S.M. Hosseini, M.T Manzari., S.K Hannani., A fully explicit three step SPH algorithm for simulation of non-Newtonian fluid flow, *J. Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 17(2007) 715– 735.
- [21] J.H. Vugts, PhD thesis, The hydrodynamic forces and ship motions in waves, Delft University of Technology, Netherlands, (1970).
- breakwater response to waves action using a boussineq model coupled with a 2dv elliptic solver, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 130(5) (2004) 243-255.
- [4] A.R. Zidan, O.S. Rageh, T.E Sarhan., M.M. EL-Sharabasy, Wave interaction with single twin pontoon, Sixteenth International Water Technology, Conference, Istanbul, Turkey, IWTC 16, (2012)
- [5] J.A. Syltern, Floating breakwaters, A Literature Survey, Trondheim, (2004).
- [6] A. Sutko, E.L. Haden, The effect of surge, heave and pitch on the performance of a floating breakwater”, *Proceedings of the Floating Breakwater Conference*, Newport, Rhode Island, April 23-25, (1974) 41-53.
- [7] R.D. Carver , Floating breakwater wave attenuation tests for east bay Marina, Olympia harbor, Washington, Technical report HL-79-13, US army engineer waterways station, (1979).
- [8] L. Martinelli, P. Ruol, and B. Zanuttigh, Wave basin experiments on floating breakwaters with different layouts, *Applied ocean research*, 30(3) (2008) 199-207.
- [9] A. Mahmoudi, H. Hakimzadeh, M Ketabdari., 2014, Simulation of wave propagation over coastal structures using WCSPHMethod, *International Journal Of Maritime Technology*, 2(2014) 1-13.
- [10] M. Kolahdoozan, O. Taheri, H. Ghasemi, Hydrodynamic performance evaluation of step floating breakwaters through experiment and artificial intelligence, *Proceedings of the International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering*, Ottawa, Ontario, Canada, May 4 – 5, 293, (2015) 293-1.
- [11] S.G. Patil, S. Mandal, A.V. Hegde, Genetic algorithm based support vector machine regression in predicting wave transmission of horizontally interlaced multilayer moored floating pipe breakwater, *Journal Of Advances in Engineering Software*, 45(1) (2012) 203–212.

Please cite this article using:

A.H. Hojjati, N. Amanifard, M.A.L. Neshaei, S. Dolati, Numerical Investigation of Floating Breakwater Effect on Coastal Waves Attenuation by Smoothed Particle Hydrodynamics Method, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(2) (2019) 427-435.
DOI: 10.22060/mej.2016.789

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

