

## شبیه سازی موج شکن نیمه استوانه ای در حالت غیر یکنواخت در آب کم عمق

بابک احمدپور<sup>۱</sup>، محمد احمدزاده طلائی<sup>۲\*</sup>، محمدرضا نگهداری<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۳۱	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۲۷	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
موج شکن،	موج شکن‌ها سازه‌های ساحلی و فراساحلی هستند که از بنادر و سواحل در برابر امواج و جریان‌های ساحلی محافظت می‌کنند. موج شکن‌ها با کاهش ارتفاع موج و در نتیجه، انرژی موج، نیروی موج را قبل از رسیدن به سواحل یا بنادر کاهش می‌دهند. ارتفاع موج در نزدیکی سواحل و در آب کم عمق نسبت به آب عمیق بیشتر است. در این مطالعه، با توجه به پرهزینه بودن آزمایش یک نمونه موج شکن، نحوه‌ی شبیه‌سازی به وسیله نرم‌افزار استار مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، موج شکن نیمه استوانه‌ای در سه حالت بدون سرعت جریان برای مدل، با سرعت جریان برای مدل و با سرعت جریان برای نمونه اصلی شبیه‌سازی می‌شود. فضای شبیه‌سازی در شرایط غیر یکنواخت، آب با عمق متوسط، خط آب بالاتر از سازه و با استفاده از حل کننده RANS است. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج عددی و آزمایشگاهی گذشته صحت سنجی و مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی دارای همخوانی خوبی با نتایج عددی و آزمایشگاهی است. در نتیجه، از مدل‌های فیزیکی و حوزه شبیه‌سازی مدل شده می‌توان برای شبیه‌سازی سازه‌های ثابت دریایی استفاده کرد. استفاده از موج شکن نیمه استوانه‌ای در آب‌های عمیق، با مشکلاتی همچون افزایش فضا و مصالح مصرفی روبه‌رو می‌شود که برای رفع این مشکل، موج شکن نیمه استوانه‌ای مرکب، مدل و مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده، درگ وارد بر این سازه نسبت به سازه اولیه افزایش یافته است، اما با توجه به طراحی، سازه فضای کمتری را اشغال کرده، مناسب استفاده در آب‌های عمیق نیز هست.

### ۱- مقدمه

[۱].  
به‌طور کلی، از نظر موقعیت قرارگیری، موج شکن‌ها به دو دسته جدا از ساحل و متصل به ساحل تقسیم می‌شوند. موج شکن‌ها را از نظر ساختمانی می‌توان به موج شکن‌های شناور، توده سنگی، با وجه قائم، مستغرق یا ریف و مرکب تقسیم‌بندی کرد. متداول‌ترین موج شکن استفاده‌شده، موج شکن توده سنگی است [۱].  
این سازه با کاستن انرژی امواج، ارتفاع و انرژی آن‌ها را در بندر کاهش می‌دهد و منطقه حفاظت شده‌ای برای

سازه‌های آبی شامل انواع سازه‌های دریایی، هیدرولیکی، سدها، موج شکن‌ها و... هستند. موج شکن‌ها، سازه‌هایی‌اند که از بنادر و سواحل در مقابل امواج و جریان‌های ساحلی محافظت می‌کنند. از مزایای موج شکن‌ها می‌توان حفاظت کانال‌های دسترسی، حفاظت سواحل و بنادر، حفاظت از امواج سونامی و کاستن انرژی امواج دریا و اقیانوس‌ها را نام برد. علاوه بر این مزایا، می‌توان معایبی مانند امکان خوردگی مصالح و آثار مخرب زیست‌محیطی را نیز ذکر کرد

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m\_ahmadzade56@yahoo.com

۱. کارشناس ارشد مهندسی دریا (هیدرودینامیک)، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران  
۲. استادیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران  
۳. استادیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران

خی در سال ۱۹۹۹ روشی جدید برای به دست آوردن نیروهای امواج وارد بر موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای مغروق ارائه داد و با نتایج آزمایش‌های مدل‌های فیزیکی مربوط تأیید کرد و در مدل‌سازی خور جنوبی اسکله یانگ تسه (رودخانه ای در چین) به تصویب رساند. خی با تنظیم ضریب اصلاح فاز و تعریف فشار موج روی محیط گنبد موج‌شکن، روشی جدید برای محاسبه نیروی موج بر موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای مغروق ارائه داد [۱۰].

جیا، روی نیروی موج بر موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای با استفاده از روش المان مرزی مطالعه کرده است. هرچند در مدل جیا، شکست امواج در نظر گرفته نشده است [۱۱].

با توجه به گزارش خی در سال ۲۰۰۱، موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای به طول ۵۲۷ متر در سال ۱۹۹۷ در بندرگاه تیانجین چین ساخته شد و پس از آن در سال ۲۰۰۰ فاز اول پروژه بهبود کانال عمیق دهانه رودخانه یانگ تسه به طول ۱۸ کیلومتر به بهره‌برداری رسید [۱۲].

ایساکسون و همکاران و چوانگ و همکاران، راه‌حل‌های تحلیلی مبتنی بر روش ویژه تابع همسان را برای مطالعات نیروهای افقی، به‌جز در خصوص مدل‌های تجربی، توسعه دادند [۱۳-۱۵].

نیروهای عمودی، تأثیر اندکی بر موج‌شکن کیسونی دارند. نیروهای بالابرنده این امواج روی سازه‌های سنتی در ساحل توسط چنگ، مورد مطالعه قرار گرفته است؛ اما برای شکل‌های جدید کیسون‌های حفره‌دار، نیروی عمودی واردشده از امواج ناشی از نیروی بال برنده یا لیفت و نیروی امواج مؤثر بر قسمت کف موج‌شکن، به‌ندرت مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۶]. علاوه بر این، چن و همکاران، نیروی افقی روی این نوع موج‌شکن را با استفاده از روش تفاضل محدود محاسبه کردند [۱۷].

لی و همکاران با استفاده از مدل آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های میدانی، امواج ناشی از نیروهای لیفت بر این موج‌شکن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در همین سال، کل نیروهای افقی و عمودی امواج منظم بر موج‌شکن کیسونی تا حدی حفره‌دار را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که اختلاف فاز آشکاری بین مقدار کل نیروی موج افقی و عمودی وجود دارد [۱۸].

پهلویی و مهار کشتی‌ها و بارگیری و باراندازی آن‌ها و دیگر تأسیسات بندر به وجود می‌آورد. در نتیجه، استفاده از موج‌شکن‌ها در خطوط ساحلی که دارای انرژی امواج بالایی هستند لازم است. ساده‌ترین روش برای عدم نفوذ آب به بندر و سواحل، ایجاد دیواره‌ای قائم در برابر امواج است. در نتیجه، مطالعه روی موج‌شکن‌های قائم یا کیسونی از اهمیت بالایی برخوردار است.

کیسون یا صندوق عبارت است از صندوقچه‌های حجیم بتنی که در حوضچه‌های خشک به صورت پیش‌ساخته تهیه شده، در آب دریا غرق و در کنار یکدیگر در محل استقرار موج‌شکن به صورت زنجیروار قرار داده می‌شوند. کیسون‌ها می‌توانند در شکل‌های مختلفی مانند مکعبی، استوانه‌ای یا نیمه‌استوانه‌ای باشند [۲]. در این میان، موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای به دلیل نوع عملکرد و قابلیت‌های آن، مورد توجه بسیاری از مهندسان و محققان در دهه‌های اخیر قرار گرفته است.

موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای که به اختصار (SBW)<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، ترکیبی از یک کیسون نیمه‌استوانه‌ای است که روی تپه‌ای از سنگ مستقر شده است. عملکرد این موج‌شکن به گونه‌ای است که با کاهش ارتفاع موج، انرژی موج بر خوردی را کاهش می‌دهد. بررسی اسناد منتشرشده در این موضوع نشان می‌دهد که کارهای متعددی درباره نیروهای وارد بر سازه‌های دریایی، مخصوصاً موج‌شکن‌ها گزارش شده است [۳-۵].

به گزارش تانیوتو و تاکاهاشی در سال ۱۹۹۴، موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای اولین بار در اوایل سال ۱۹۹۰ ساخته شد. نمونه اولیه این موج‌شکن با طول ۳۶ متر در سال ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۳ در لنگرگاه میازاکی در ژاپن به بهره‌برداری رسید [۷].

ساساجیما و همکاران نتایج به‌دست‌آمده درباره نیروها و فشار اندازه‌گیری‌شده روی موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای در سایت میازاکی<sup>۲</sup> در ژاپن را در قالب گزارشی ارائه دادند [۸]. اندازه‌گیری‌های مختلف، مانند بیشترین فشار موج یک‌سوم، فشار در زمان نیروی حداکثر و حداکثر فشار موج به‌منظور تغییر روابط تئوری در ارتفاع‌های مختلف دیوار توسط گودا و سوزوکی مورد مقایسه قرار گرفت [۹].

<sup>2</sup> Miyazaki

<sup>1</sup> Semicircular BreakWater

- از آنجایی که بتن‌ریزی ساختمان موج‌شکن در محل نصب انجام نمی‌شود، تا زمانی که ساختار از پیش ساخته موج‌شکن در محل نصب نشده باشد، در برابر امواج و آسیب دیدگی مصون است. بنابراین این نوع موج‌شکن برای استفاده در دریا‌های خشن بسیار مناسب است.
- شکل و پیکربندی قله این موج‌شکن، دارای ظاهری مناسب و جذاب است [۱۹].

با وجود مطالعات درباره مدل‌سازی عددی پارامترهای مختلف وارد بر موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای، کمتر در خصوص شبیه‌سازی و مدل‌سازی نرم‌افزاری این سازه تحقیقات انجام شده و با توجه به اینکه این شبیه‌سازی سازه می‌تواند از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت باشد، در این مقاله به شبیه‌سازی این موج‌شکن با استفاده از حل‌کننده RANS<sup>۲</sup> در فضای نرم‌افزار STAR CCM+ پرداخته شده است. بدین منظور در بخش دوم مقاله به ارائه مسائل تئوری و داده‌های فیزیکی موج‌شکن و موج وارد بر آن، در بخش سوم به تشریح روش شبیه‌سازی نرم‌افزاری و در بخش چهارم به بررسی و صحت‌سنجی نتایج پرداخته می‌شود.

## ۲- تئوری حاکم بر مسئله

امواج، نمادی از نیروهای اعمال شده روی سیال هستند که منجر به تغییر شکل آن در مقابل عملکرد نیروهای وزن و کشش سطحی می‌شوند. بنابراین برای ایجاد موج، به نیرویی مانند نیروی باد نیاز است. بسته به اندازه نیروی وارد شده، شکل و اندازه امواج متفاوت است.

تئوری‌های امواج تحلیلی برای عمق‌های ثابت بسط داده می‌شوند. هدف یک تئوری موج، نشان دادن روابط میان پریود و طول موج با حرکت ذرات سیال است. رابطه پراکندگی<sup>۳</sup>، بیانگر رابطه میان پریود موج، طول موج و ارتفاع موج در عمق آب داده شده است [۲۰].

ساده‌ترین تئوری موج هنگامی که ارتفاع موج بسیار کوچک تر از طول موج و عمق آب باشد، به دست می‌آید. این تئوری به‌عنوان تئوری امواج دامنه کوتاه، تئوری خطی موج، تئوری موج سینوسی یا تئوری ایری<sup>۴</sup> معرفی می‌شود. در این امواج، ارتفاع سطح به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۲۰]:

یوان و تاوو در سال ۲۰۰۳ روی نیروی امواج وارد بر موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای، با استفاده از دو روش المان مرزی و تفاضل محدود، مطالعاتی را انجام داده، نتایج حاصل از داده‌های عددی را با نتایج آزمایشگاهی موجود در مؤسسه مهندسی بندرگاه تیانجین مقایسه کردند. فرمول تجربی برای محاسبه نیروی امواج وارد بر موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای توسط تانیموتو و تاکاهاشی در سال ۱۹۹۴ معرفی شد که به‌طور کلی در ژاپن مورد استفاده قرار گرفت. این فرمول بر اساس فرمول گودا<sup>۱</sup> برای موج‌شکن‌های عمودی و تنها برای موج‌شکن‌هایی که ارتفاع آن‌ها از سطح آب بیشتر باشد، معتبر است. در فرمول تانیموتو و تاکاهاشی برای به دست آوردن نیروی موج، ضریب اصلاح فاز و زاویه، درون فرمول گودا تعریف شده‌اند [۱۹].

در سال ۲۰۰۳ یوان و تاوو به‌منظور محاسبه نیروی امواج بر موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای، یک مدل عددی ارائه دادند که شکست امواج را نیز در نظر می‌گرفت و به هم‌خوانی خوبی بین نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی دست یافتند.

کیسون‌ها سازه‌هایی از پیش ساخته‌اند که این امر موجب می‌شود حمل‌ونقل، کنترل و جانمایی در محل آسان شود. علاوه بر این موارد، دارای ویژگی‌های هیدرولیکی بسیار عالی در مقایسه با موج‌شکن‌های مشابه است. یکی از انواع موج‌شکن‌های کیسون، موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای است که در سال‌های اخیر، تحقیقاتی روی آن انجام شده است. از مزایای مهم این نوع موج‌شکن، می‌توان موارد زیر را نام برد:

- فشار موج روی سطح نیمه‌استوانه از مرکز دایره عبور می‌کند؛ در نتیجه، مومنتوم واژگون‌کننده ناشی از فشار موج وجود ندارد.

- نیروی عرضی موج اعمال شده بر این موج‌شکن در مقایسه با نمونه عمودی با ارتفاع برابر، کمتر است؛ بنابراین هم پایداری در برابر لغزش، افزایش و هم هزینه ساخت و ساز کاهش می‌یابد.

- موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای دارای ساختاری توخالی بوده، نیروی عمودی بر بستر خاک دارای مقداری کوچک و با توزیعی تقریباً یکنواخت است؛ در نتیجه، از این موج‌شکن می‌توان برای بستر با خاک نرم نیز استفاده کرد.

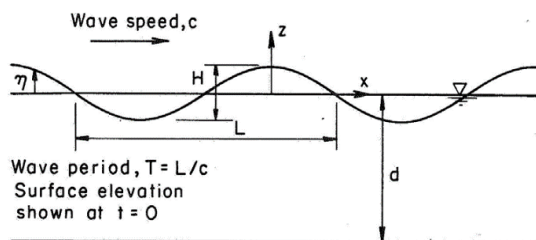
<sup>3</sup> Dispersion Relation

<sup>4</sup> Airy

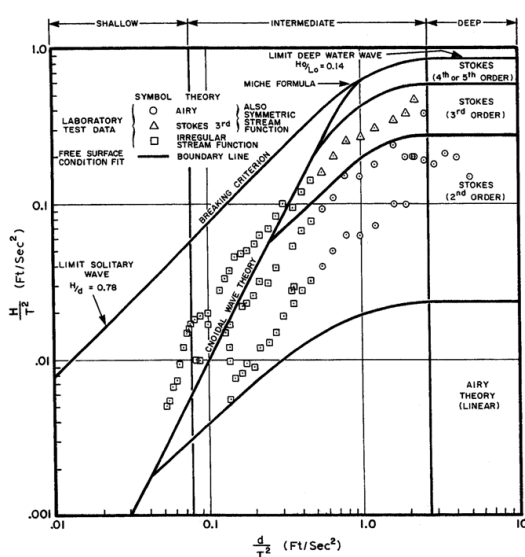
<sup>1</sup> Goda's formula

<sup>2</sup> Reynolds Average Navier Stock's

در روابط فوق،  $S$  پارامتر شیب موج،  $\mu_n$  پارامتر آب کم عمق و  $U_R$  عدد اورسل است. شکل (۱) پارامترهای کل موج و شکل (۲) محدوده تئوری امواج مختلف را که به وسیله پارامترهای فوق مشخص می‌شود، نشان می‌دهد.



شکل ۱: پارامترهای کلی موج [۲۰]



شکل ۲: نمودار محدوده تئوری‌های امواج [۲۰]

### ۳- پارامترهای طراحی

یوان و تاوو در سال ۲۰۰۲ نیروهای وارد بر موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای را به صورت عددی مطالعه کردند و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود در مؤسسه مهندسی بندرگاه تیانجین<sup>۱</sup> و دانشگاه تکنولوژی دالیان تطبیق دادند. در این آزمایش‌ها، مدل مورد آزمایش با پنج مقطع عرضی مختلف و هر مقطع عرضی نیز در خط آب‌های متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته، نتایج حاصل این آزمایش‌ها به صورت نمودار و جدول ارائه شد [۱۹].

موج‌شکن شبیه‌سازی شده در این مقاله برگرفته از مقاله یوان و تاوو است که با استفاده از پارامترهای هندسی یکی از مقاطع استفاده شده، موج‌شکن طراحی و مراحل شبیه‌سازی شرح داده می‌شود. سپس نتایج حاصل از

$$\eta(x, y, t) = \frac{H}{2} \cos \theta \quad (1)$$

که در این رابطه،  $\theta$  فاز و برابر  $\theta = k(x \cos \beta + y \sin \beta) - \omega t$  و  $\beta$  راستای انتشار است. رابطه پراکندگی، بیانگر رابطه میان پریود و طول موج و عمق آب است که برای امواج خطی برابر است با [۲۰]:

$$T = \left[ \frac{g}{2\pi\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \right]^{-1/2} \quad (2)$$

در این رابطه،  $T$  پریود موج،  $\lambda$  طول موج،  $H$  ارتفاع موج،  $g$  شتاب جاذبه زمین و  $d$  عمق آب است.

رابطه پراکندگی را می‌توان در ترم فرکانس زاویه‌ای  $(\omega = 2\pi/T)$  و عدد موج  $(k = 2\pi/\lambda)$  به صورت زیر بیان کرد [۲۰]:

$$\omega = [gk \tanh(kd)]^{1/2} \quad (3)$$

با استفاده از رابطه زیر می‌توان طول موج را به عنوان تابعی از پریود موج با تقریب دقیقی به دست آورد [۲۰]:

$$\lambda = T(gd)^{1/2} \left( \frac{f(\omega)}{1 + \omega f(\omega)} \right)^{1/2} \quad (4)$$

که  $\omega = (4\pi^2 d)/(gT^2)$ ،  $f(\omega) = 1 + \sum_{n=1}^4 \alpha_n \omega^n$  و  $\alpha_1 = 0.666$ ،  $\alpha_2 = 0.445$ ،  $\alpha_3 = -0.105$ ،  $\alpha_4 = 0.272$  است. برای امواج خطی، سرعت فازی تنها وابسته به طول موج و مستقل از دامنه موج بوده، برابر است با [۲۰]:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} \quad (5)$$

با استفاده از سه پارامتر پریود موج، ارتفاع موج و عمق آب می‌توان محدوده اعمال تئوری‌های مختلف موج را مشخص کرد. این پارامترها برای تعریف پارامترهای بی‌بعد زیر استفاده می‌شوند که به وسیله آن‌ها می‌توان محدوده اعتبار تئوری‌های مختلف موج را تعیین کرد [۲۰].

$$S = 2\pi \frac{H}{gT^2} = \frac{H}{\lambda_0} \quad (6)$$

$$\mu_n = 2\pi \frac{d}{gT^2} = \frac{d}{\lambda_0} \quad (7)$$

$$U_R = \frac{H\lambda^2}{d^3} \quad (8)$$

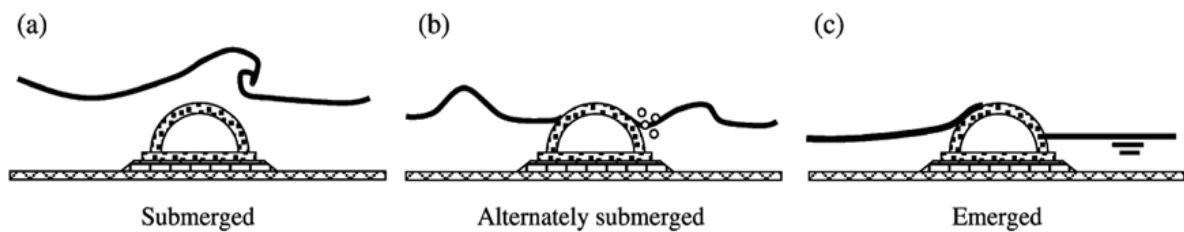
<sup>۱</sup>. Tianjin Port Engineering Institute .1998

موج شکن در آب کم عمق است، تنها حالت کاملاً مغروق به روش های متفاوت شبیه سازی می شود و نتایج آن مورد بررسی قرار می گیرد.

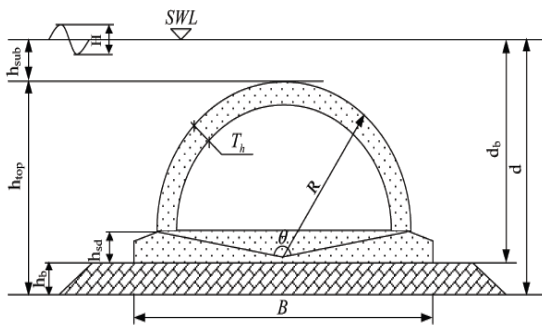
در شکل (۴)، پارامترهای هندسی نمونه اصلی موج شکن مشخص گردیده و مقادیر عددی آن ها در شکل (۵) قرار داده شده است. برای سهولت در طراحی و همچنین کاهش زمان محاسبات و اجرای شبیه سازی، سازه ها را با استفاده از قانون تشابه مقیاس زده، مدل را شبیه سازی می کنند. اگر تمام پارامترهای بی بعد مربوط به مدل و نمونه اصلی یکسان باشند، شرایط جریان برای آزمایش مدل کاملاً مشابه است. در نتیجه، برای مدل سازی باید تشابه هندسی، دینامیک و سینماتیکی برقرار باشد. برای برقراری تشابه هندسی، باید نسبت ابعادی طولی مدل و نمونه اصلی در تمام نقاط سازه یکسان باشد. در این مقاله، به منظور اثبات کاربرد قانون تشابه، نمونه اصلی موج شکن و همچنین مدل سازه با مقیاس ۰/۱ شبیه سازی می شود.

شبیه سازی با نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود، مورد صحت سنجی قرار می گیرد.

هنگامی که از موج شکن نیمه استوانه ای استفاده می شود، سطح آب مدل سازی می تواند بالاتر، پایین تر یا هم تراز بالاترین نقطه موج شکن باشد. هر سه نمونه حالت های هیدرودینامیکی در شکل (۳) نشان داده شده است. در حالت اول، موج شکن کاملاً درون آب قرار می گیرد و امواج در نزدیکی موج شکن تغییر شکل پیدا می کنند. در حالت دوم، موج شکن طوری شبیه سازی می شود که با توجه به ارتفاع امواج، هم می تواند کاملاً در آب مغروق و هم به صورت نیمه مغروق باشد. در این حالت، امواج با برخورد به موج شکن، شکسته شده، از بین می روند. در حالت سوم، ارتفاع موج شکن به گونه ای مدل سازی می شود که ارتفاع موج از آن کمتر بوده، همیشه حالت نیمه مغروق داشته باشد. در این حالت نیز امواج با برخورد به موج شکن از بین می روند. با توجه به اینکه هدف این مقاله، شبیه سازی



شکل ۳: حالت های مختلف هیدرودینامیک موج شکن: (a) مغروق، (b) نیمه مغروق متناوب، (c) نیمه مغروق [۱۹]



شکل ۴: نمای موج شکن و پارامترهای هندسی آن [۱۹]

#### ۴- شبیه سازی موج شکن

نرم افزار مورد استفاده برای شبیه سازی، نرم افزار STAR CCM+ است که تمام فضای طراحی، مش بندی، آنالیز و به طور کلی تمام فضاها را در یک محیط یکپارچه جای داده است و این امر باعث سهولت در انجام شبیه سازی می شود. به منظور به دست آوردن فشار در مقاطع مختلف موج شکن

برای برقراری تشابه سینماتیک، علاوه بر برابری نسبت بعد طولی، باید تشابه زمان و در نتیجه، سرعت در هر دو برقرار باشد. برای برابری تشابه دینامیک، علاوه بر تشابه طولی و سرعت، نیروها و اعداد بی بعد میان مدل و نمونه اصلی باید برابر باشند. با استفاده از قانون تشابه و برابری اعداد فرود، رینولدز و اولر مدل و نمونه اصلی، رابطه میان زمان، سرعت و فشار مدل و نمونه اصلی برابر می شود با:

$$I. \quad v_m = 0.316 v_p$$

$$II. \quad t_m = 0.316 t_p$$

$$III. \quad p_m = 10 p_p$$

در این روابط،  $v$  سرعت،  $t$  زمان،  $P$  فشار،  $p$  زیرنویس  $p$  نماد نمونه اصلی و  $m$  زیرنویس  $m$  نماد مدل است. تمام اعداد موجود در جدول ۱ مربوط به شبیه سازی نمونه اصلی است و برای شبیه سازی مدل، باید اعداد با استفاده از قانون تشابه مقیاس زده شوند.

طول موج، فاصله مرز خروجی تا موج‌شکن سه برابر طول موج، ارتفاع تانک دو برابر عمق آب و به دلیل متقارن بودن موج‌شکن در جهت طولی، عرض حوزه شبیه‌سازی برابر یک متر در نظر گرفته می‌شود. این مقادیر بدین علت اعمال می‌شوند که از هر گونه جریان معکوس از مرزها جلوگیری شود تا نتایج دچار خطا نشوند. همچنین در مرز خروجی با استفاده از تحقیقات یون و چوی در سال ۲۰۰۹ از میرایی موج به اندازه طول موج نیز استفاده می‌گردد [۲۳].

تولید شبکه حول اجسام، یکی از اساسی‌ترین مشکلات تحلیل جریان حول آن‌هاست. نرم‌افزار استار دارای دو مش باسازمان و بی‌سازمان است. مش‌بندی بی‌سازمان شامل چندوجهی<sup>۲</sup> و چهاروجهی<sup>۳</sup> است که از این مدل‌های مش‌بندی برای اجسام پیچیده استفاده می‌شود. مش‌بندی باسازمان که شامل مدل مش‌بندی سلول‌های مرتب<sup>۴</sup> است، به دلیل بالا بودن کیفیت سلولی دارای مزیت‌های ویژه‌ای به‌خصوص در جریان‌های لزج است؛ اما مدل‌سازی اجسام پیچیده با این مدل مش‌بندی به‌آسانی انجام نمی‌شود. با این توضیحات، به دلیل سادگی سازه موج‌شکن و همچنین لزج بودن جریان مورد مطالعه، از مدل مش‌بندی تریم سل استفاده می‌گردد. به‌منظور مش‌بندی در نرم‌افزار استار، مش‌بندی اتوماتیک انتخاب و از مدل‌های مش سطحی برای مش‌بندی سطحی، مش تریم سل برای مش‌بندی حجمی و لایه‌های منشوری برای مش لایه مرزی استفاده شده، سپس مش حوزه شبیه‌سازی پالایش می‌شود. برای پالایش مش در ناحیه اطراف موج‌شکن و ناحیه سطح آزاد موج، باید بلاک‌هایی را با اندازه‌های مناسب ایجاد کرد. ابعاد بلاک برای سطح آزاد موج باید به گونه‌ای باشد که تمام قله‌ها و قعرهای موجود در کل حوزه شبیه‌سازی را شامل شده، برای دقت بیشتر ۱۰ درصد فضای بیشتر نیز در نظر گرفته شود. عرض موج‌شکن باید یک متر باشد که این مقدار برای مدل‌سازی، بسیار کم است و باعث انعکاس امواج از دیواره‌های کناری می‌شود. برای جلوگیری از این موضوع، عرض سازه ۵ متر مدل‌سازی شده، در نهایت مقادیر به‌دست آمده تطبیق داده می‌شود. به‌منظور پالایش مش اولیه، از راهنمایی‌های موجود در ITTC 2014 برای مش‌بندی سطح آزاد استفاده می‌شود [۲۶].

با توجه به شکل (۵)، سازه به ۱۱ مقطع تقسیم می‌شود.

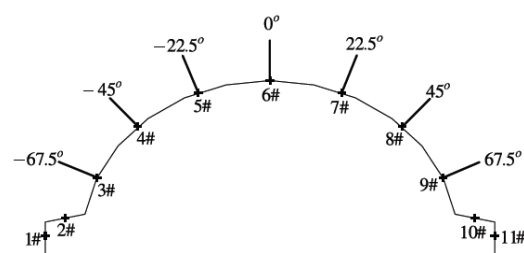
جدول ۱: پارامترهای هندسی موج‌شکن و موج نمونه اصلی

پارامترهای موج‌شکن		پارامترهای موج			
R(m)	۴	موج	d(m)	H(m)	T(s)
$\theta(^{\circ})$	۱۶۲/۷۴۶	Design high	۷/۰۲	۳/۹۲	۷/۵۲
$h_{sd}$ (m)	۱/۱				
B (m)	۹/۶				
$h_b$ (m)	۰/۵				
$T_h$ (m)	۰/۷۵				

#### ۴-۱- مش‌بندی

برای ایجاد و مش‌بندی حوزه شبیه‌سازی، ابتدا باید یک تانک با ابعاد مناسب ایجاد و سپس موج‌شکن را از آن کسر کرد<sup>۱</sup>. این عمل به‌منظور کاهش تعداد مش و زمان مش‌بندی انجام می‌گیرد. طول کلی موج‌شکن، یک متر است که برای کاهش زمان محاسبات، تنها نیمی از موج‌شکن، شبیه‌سازی و سپس نتایج به‌دست‌آمده، در دو ضرب می‌شود.

برای ایجاد تانک، از دستورالعمل International Twin Tank Conference, 2004 استفاده می‌شود. این دستورالعمل بیان می‌کند که برای شبیه‌سازی امواج، فاصله مرز ورودی تا جسم مورد نظر باید در حدود یک تا دو برابر طول جسم یا طول موج (هرکدام که بزرگ‌تر است) و فاصله مرز خروجی تا جسم در حدود سه تا پنج برابر طول جسم یا طول موج باشد [۲۱].



شکل ۵: تقسیم‌بندی موج‌شکن [۱۹]

در این شبیه‌سازی، با توجه به اینکه طول موج بزرگ‌تر از طول موج‌شکن است، همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، فاصله مرز ورودی تا موج‌شکن یک تا دو برابر

<sup>3</sup>. Tetrahedral

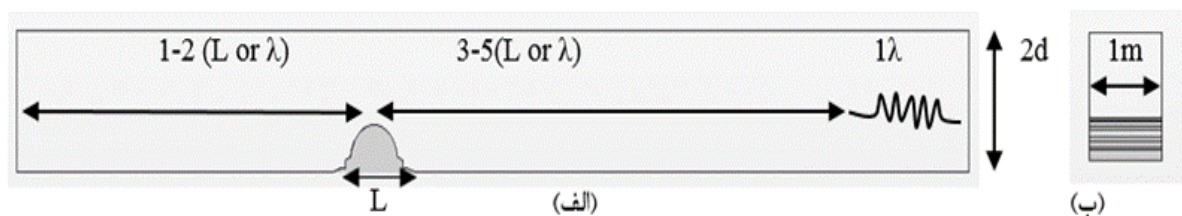
<sup>4</sup>. Trimmed Cell

<sup>1</sup>. Subtract

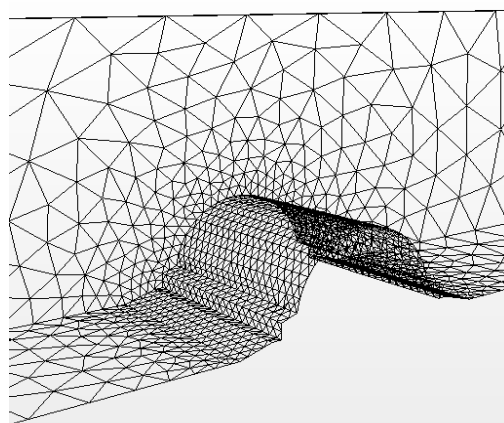
<sup>2</sup>. Polyhedral

راستای عمودی باید یک‌بیستم ارتفاع موج باشد. شکل (۷) نمایی از مش‌بندی سطحی، شکل (۸) دو نمای روبه‌رو و کناری از سطح مقطع مش‌بندی حجمی و شکل (۹) نمای کلی از مش‌بندی حجمی حوزه شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در انتهای عملیات مش‌بندی، تعداد کل سلول‌ها برابر ۱۱۲۲۰۴۹ می‌شود.

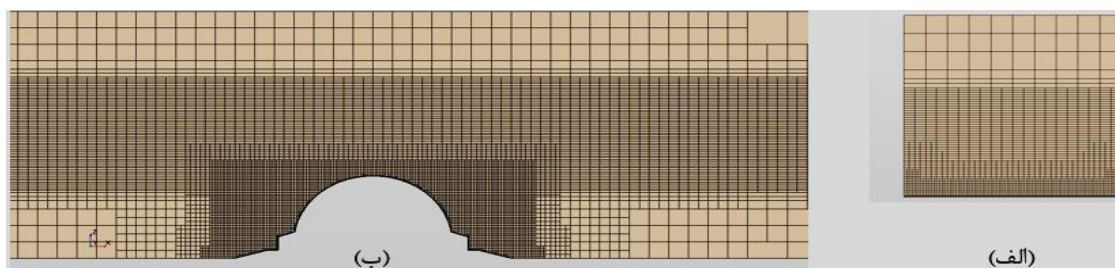
بر اساس این پیشنهادها، حداقل اندازه سلول‌های مش در راستای جریان موج، باید یک‌هشتماد طول موج باشد. همچنین با توجه به تحقیقات کیم و لی در سال ۲۰۱۱ به منظور دریافت کامل جزئیات جریان و موج در اطرف بدنه جسم مورد نظر، اندازه سلول‌های مش باید یک‌صدوپنجاهم طول موج باشد. علاوه بر این، اندازه سلول‌های مش در



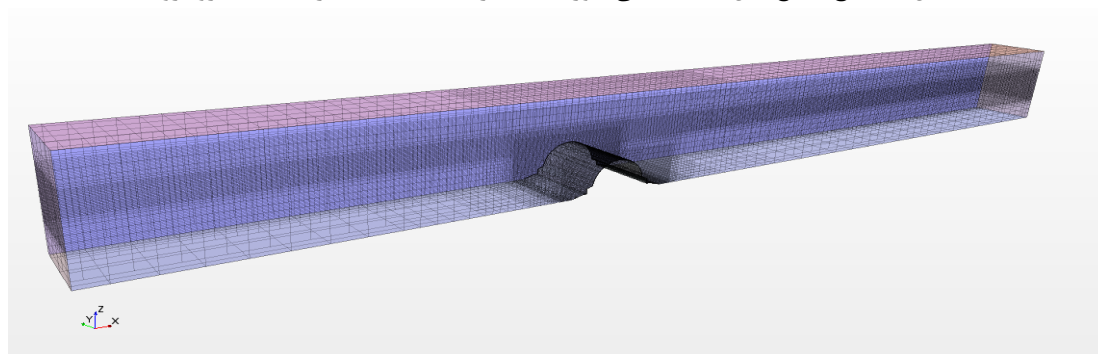
شکل ۶: ابعاد حوزه شبیه‌سازی: الف) نمای روبه‌رو، ب) نمای کنار



شکل ۷: مش‌بندی سطحی موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای



شکل ۸: سطح مقطع مش‌بندی حجمی حوزه شبیه‌سازی: الف) نمای کنار، ب) نمای روبه‌رو



شکل ۹: نمای کلی مش‌بندی حجمی حوزه شبیه‌سازی

## ۴-۲- مدل‌های فیزیکی

برای مدل کردن جریان سیال، حل‌کننده به کار برده شده از روش حجم محدود استفاده می‌کند. این مدل از فرم انتگرالی معادله بقا استفاده و دامنه محاسباتی را به تعدادی حجم کنترل محدود تقسیم می‌کند. علاوه بر این، حل‌کننده RANS برای پیوند میان معادلات مومنتوم و پیوستگی به کار برده می‌شود. دقت بالای این معادلات سبب می‌شود که نتایج عددی حاصل از آن کاملاً قابل رقابت با نتایج آزمایشگاهی حوضچه کشش باشد. معادلات RANS حاکم بر میدان جریان به ترتیب، معادلات پیوستگی، معادله ناویر-استوکس و معادلات مربوط به آشفتگی موجود در جریان هستند [۲۴].

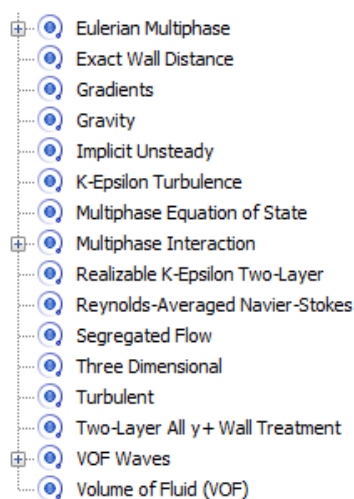
مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  Realizable از جمله جدیدترین و پیشرفته‌ترین روش‌های مدل کردن آشفتگی است که اولین بار توسط شی و همکاران ارائه شد [۲۵]. در این روش،  $k$  به همان روش استاندارد و  $\epsilon$  به روشی اصلاح شده به دست می‌آید. این مدل از نظر سرعت هم‌گرایی و دقت، از مدل‌های آشفتگی دیگر بهتر بوده، صحت پاسخ‌های آن در بسیاری از مسائل کاملاً قابل اعتماد است.

با توجه به ریز بودن سلول‌های مش در نزدیکی دیوار و استفاده از لایه منشوری در مرز موج‌شکن، استفاده از مدل دولایه، دقتی بالاتر را در مدل‌سازی می‌دهد. در نتیجه، از مدل Two-Layers All  $y^+$  Wall Treatment که دارای دقت بالایی در مش‌بندی و مدل‌سازی لایه‌ی مرزی است، استفاده شده است.

به‌منظور مدل کردن امواج مورد نظر، از مدل فیزیکی نسبت حجمی سیال<sup>۱</sup> یا VOF Wave که یک روش تسخیر سطح آزاد است و در جریان‌های دوفازی به کار می‌رود، استفاده شده است. با فعال کردن این مدل، می‌توان امواج را با استفاده از تئوری‌های موجود، مانند: امواج مرتبه اول و پنجم استوکس، تمام مرتبه‌های تئوری سینویدال، امواج صاف، امواج سوپریوزیشن و تئوری امواج نامنظم مدل سازی کرد [۲۱].

با استفاده از داده‌های موجود مربوط به امواج مد نظر، عدد اورسل و پارامتر آب کم‌عمق و شکل مربوط به محدوده تئوری امواج، مشخص می‌شود که امواج مورد نظر در محدوده تئوری امواج سینویدال هستند؛ اما نکته قابل توجه

این است که موجی را که عمق آب آن بیشتر از سطح موج‌شکن مدل‌سازی شده است، نمی‌توان با استفاده از این تئوری مدل‌سازی کرد؛ زیرا امواجی که نسبت طول موج به عمق آب آن‌ها کمتر از ۱۰ باشد، نرم‌افزار را با خطا مواجه می‌کند. در نتیجه، برای مدل‌سازی این موج از تئوری موج درجه اول استوکس که نماینده تمام امواج خطی است استفاده می‌شود. برای مدل کردن موج، از دو حالت موج با سرعت صفر (Zero-Velocity) و موج دارای سرعت جریان استفاده می‌گردد. برای این منظور در حالت موج با سرعت جریان، سرعت جریان برای نمونه اصلی برابر با  $6\text{ m/s}$  و برای مدل با توجه به قانون تشابه برابر  $1/9\text{ m/s}$  در نظر گرفته می‌شود. سه حالت نام‌برده، سرعت جریان صفر برای مدل، همراه با سرعت جریان برای نمونه اصلی و مدل، در بخش بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۱۰) مدل‌های فیزیکی انتخاب‌شده در نرم‌افزار استار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: مدل‌های فیزیکی انتخاب‌شده برای شبیه‌سازی

## ۴-۳- شرایط مرزی

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در شبیه‌سازی، تعیین شرایط مرزی است. در حقیقت، شرایط مرزی تعیین‌کننده روند شبیه‌سازی است. را ستای ورود موج، جهت مثبت  $x$  و از مرز سمت چپ است. در شبیه‌سازی امواج، بهترین نوع مرز برای ورودی، ورودی سرعت (Velocity Inlet) و خروجی، خروجی فشار (Pressure Outlet) است [۲۶].

در حالتی که جریان معکوس زیادی وجود داشته و میرایی موج هم نتواند این جریانات معکوس را از بین ببرد، می‌توان مرز خروجی را روی حالت خروجی جریان (Outlet) نیز قرار

<sup>۱</sup>. Volume of Fluid



ضمنی، گام زمانی با استفاده از خصوصیات جریان به جای عدد کورانت تعیین می‌شود.

بر اساس پیشنهاد ITTC, 2014، برای تعیین گام زمانی، پیروی موج بر حداقل عدد ۱۰۰ تقسیم می‌شود. همچنین بر اساس راهنمایی‌های موجود در نرم‌افزار استار، برای تعیین گام زمانی می‌توان از رابطه  $time - step = \frac{P}{2.4n}$  استفاده

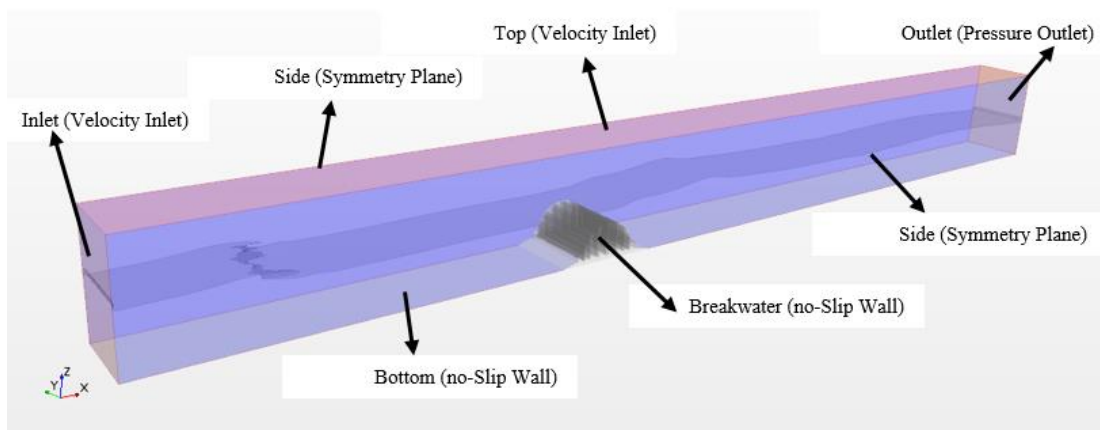
کرد که در آن،  $p$  پیروی موج و  $n$  عددی است که در مش‌بندی سطح آزاد، طول موج بر آن تقسیم شده است. بر همین اساس، با  $T = 7.52s$ ،  $n = 100$  که در پالایش مش سطح آزاد، طول موج بر این عدد تقسیم شده، گام زمانی برای نمونه اصلی تقریباً  $0.07s$  و برای مدل تقریباً  $0.1s$  در نظر گرفته می‌شود [۲۶]. برای تعیین معیار توقف، از دو معیار تکرار داخلی برابر با ۱۰ و زمان فیزیکی ۳۰ ثانیه برای نمونه اصلی و ۱۰ ثانیه برای مدل استفاده شده است. با اجرای شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که زمان فیزیکی تعیین شده برای هم‌گرا شدن راه‌حل کافی است.

داد. با توجه به متقارن بودن هندسه و فیزیک مسئله در مرزهای کناری و همچنین برای کاهش میزان محاسبات، مرزهای کناری روی حالت متقارن (Symmetry Plane) قرار می‌گیرند. مرز بالا روی سرعت ورودی و مرز کف نیز با توجه به کم‌عمق بودن آب و برای تداعی کردن کف دریا روی حالت دیوار غیرلغزشی (No-Slip Wall) قرار می‌گیرند [۲۱].

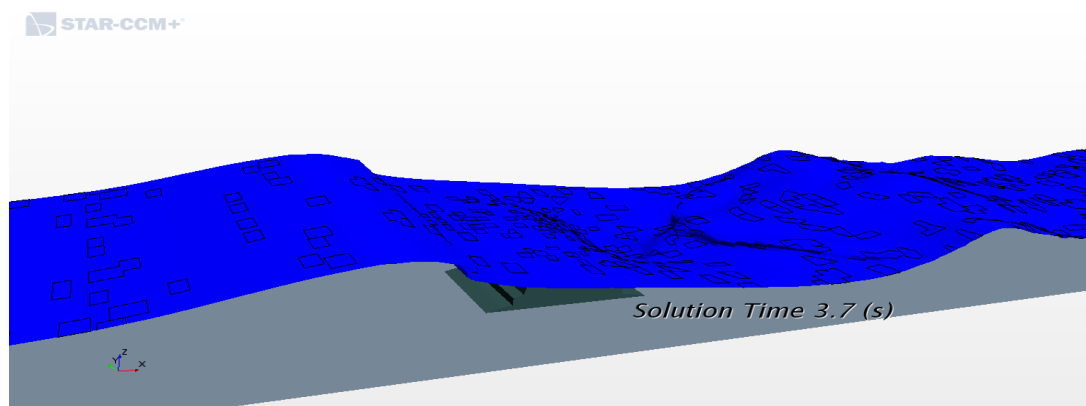
انتخاب شرایط مرزی ورودی سرعت برای مرز بالا، نشان‌دهنده شرایط هوایی نامحدود است. همچنین موج‌شکن نیز به‌عنوان یک جسم کاملاً ثابت و صلب، به عنوان مرز دیوار غیرلغزشی انتخاب می‌شود. شکل (۱۱) شرایط مرزی در حوزه شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

#### ۴-۴- تعیین گام زمانی و معیار توقف

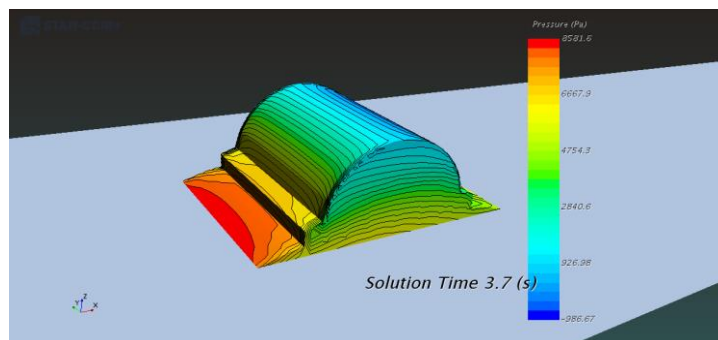
عدد کورانت یک عدد مناسب برای تعیین گام زمانی است. این مقدار نشان‌دهنده حرکت سیال در یک سلول در هر گام زمانی است. البته اغلب در شبیه‌سازی‌های غیریکنواخت



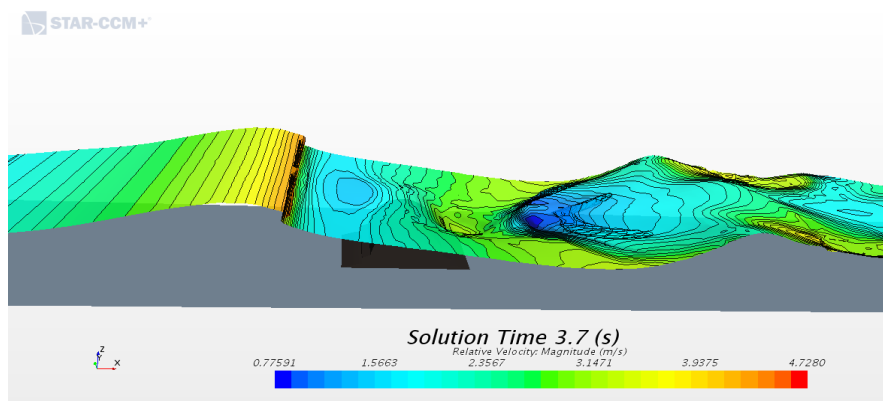
شکل ۱۱: شرایط مرزی اعمال شده روی حوزه شبیه‌سازی



شکل ۱۲: نمایش سطح آزاد موج در گام زمانی مشخص



شکل ۱۳: فشار وارد بر موج‌شکن در گام زمانی مشخص

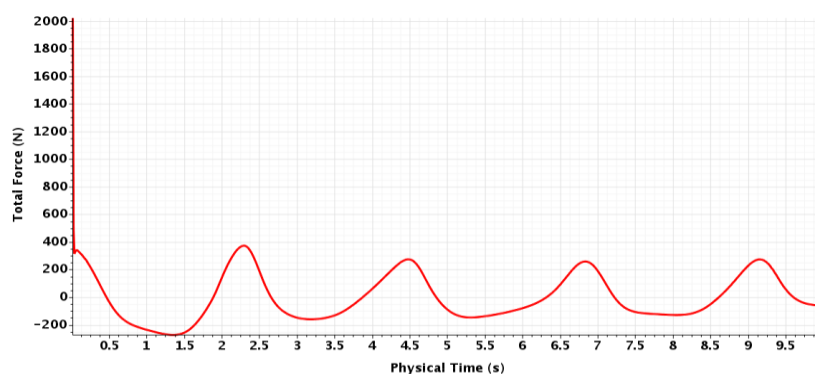


شکل ۱۴: تغییرات سرعت در سطح آزاد موج در گام زمانی مشخص

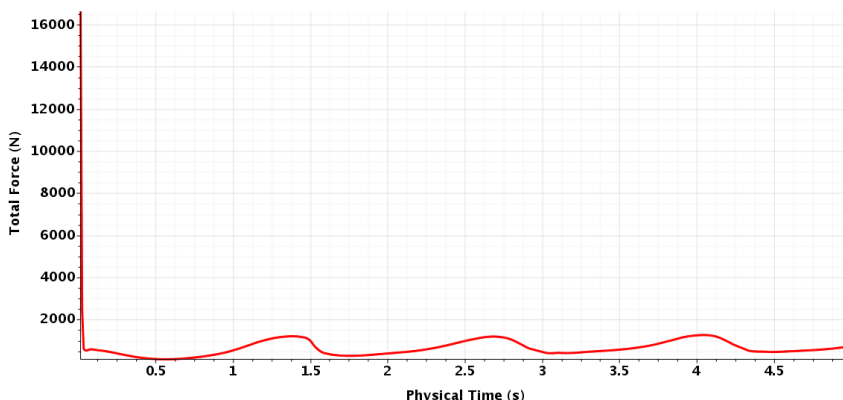
### ۵- بررسی نتایج

پس از اتمام زمان در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی و بررسی هم‌گرا بودن نمودارها، نتایج، مورد بررسی و صحت‌سنجی قرار می‌گیرد. به‌منظور درک عملکرد موج‌شکن، صفحه نمایش‌هایی در نرم‌افزار ایجاد می‌شود که فشار وارد بر سازه و همچنین تغییرات سرعت در سطح آزاد موج را نشان دهد. با ذخیره‌سازی تصاویر صفحه نمایش‌های ایجاد شده، می‌توان از شبیه‌سازی موج‌شکن انیمیشن تهیه کرد.

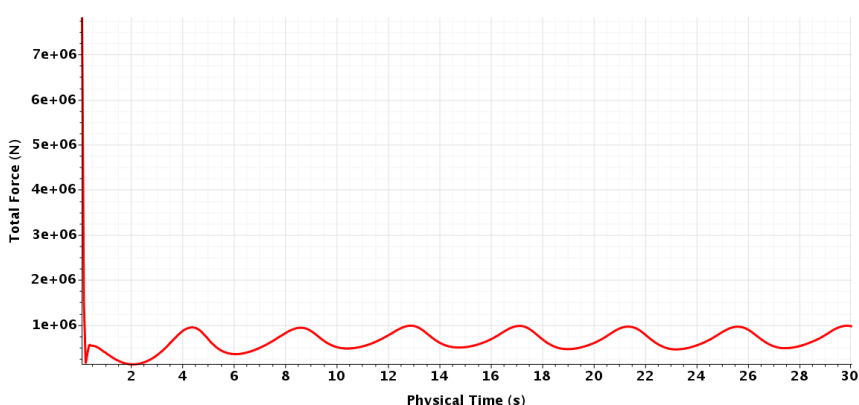
شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) به‌ترتیب نشان‌دهنده صفحه نمایش سطح آزاد، فشار وارد بر موج‌شکن و تغییرات سرعت در سطح آزاد در گام زمانی مشخص هستند. به‌منظور بررسی نیروهای وارد بر موج‌شکن، از دو نمودار نیروی درگ وارد بر کل سازه و فشار افقی وارد بر مقاطع انتخاب‌شده برای هر سه حالت شبیه‌سازی استفاده می‌شود. شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) به‌ترتیب نشان‌دهنده نمودار نیروی کل وارد بر سازه در حالت شبیه‌سازی با سرعت صفر برای مدل، شبیه‌سازی دارای سرعت جریان برای مدل و شبیه‌سازی با سرعت جریان برای نمونه اصلی هستند.



شکل ۱۵: نمودار نیروی کل وارد بر کل سازه موج‌شکن در حالت سرعت جریان صفر برای مدل



شکل ۱۶: نمودار نیروی کل وارد بر کل سازه موج شکن در دارای سرعت جریان برای مدل

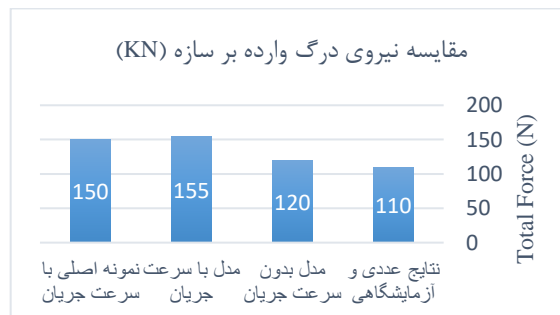


شکل ۱۷: نمودار نیروی کل وارد بر کل سازه موج شکن در دارای سرعت جریان برای نمونه اصلی

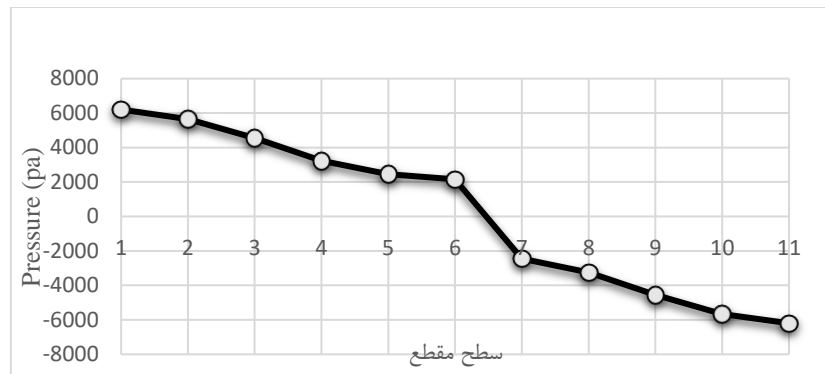
با توجه به شکل (۱۸)، نیروی وارد بر موج شکن در حالت بدون سرعت جریان، بسیار به نتایج عددی و آزمایشگاهی نزدیک و دارای خطای نسبی تقریباً ۸ درصد است که این اختلاف اندک می تواند نشان دهنده صحت شبیه سازی انجام شده باشد. همچنین، همان گونه که مشاهده می شود، در حالت دارای سرعت جریان، درگ وارد بر سازه افزایش پیدا کرده که این امر بر اثر افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش نیروی وارد شده بر موج شکن است. مقادیر به دست آمده برای مدل و نمونه بسیار به هم نزدیک و با خطای نسبی تقریباً ۳ درصد بوده که نشان دهنده کاربرد قانون تشابه در امر شبیه سازی است.

شکل های (۱۹) تا (۲۱) به ترتیب نشان دهنده نمودار فشار وارد بر ۱۱ مقطع تعیین شده در شبیه سازی سازه در حالت بدون سرعت جریان مدل، دارای سرعت جریان مدل و دارای سرعت جریان نمونه اصلی است.

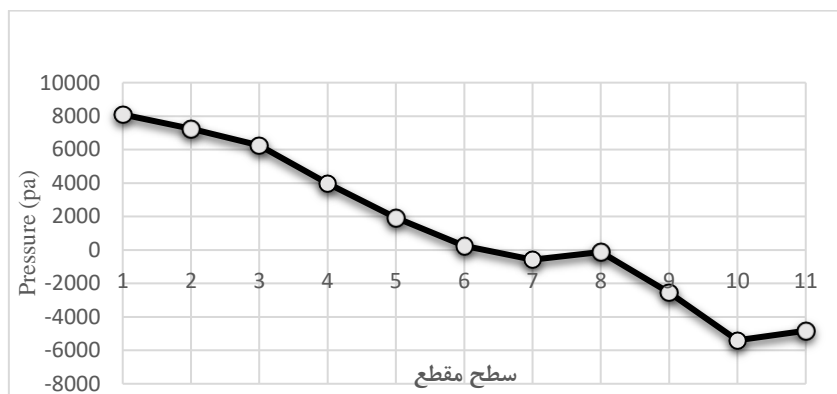
در شکل های (۱۵) تا (۱۷)، سه ثانیه ابتدای شکل نمودار دارای نوسان بوده، پس از آن در یک بازه زمانی شکل نمودار تکرار می شود. با تکرار شکل نمودار در بازه زمانی مشخص، در زمان فیزیکی تعیین شده به هم گرایی رسیده، برای به دست آوردن مقدار نمودار می توان از آن میانگین گرفت. مقادیر مربوط به نمودارهای (۱۵) تا (۱۷) در شکل (۱۸) قابل مشاهده است.



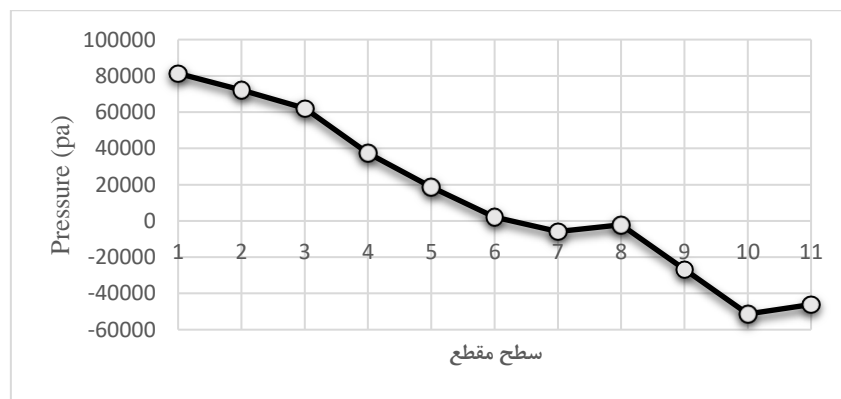
شکل ۱۸: مقایسه نیروی درگ کل وارد بر سازه در حالت های مختلف شبیه سازی و نتایج عددی و آزمایشگاهی [۱۹]



شکل ۱۹: نمودار فشار وارد بر مقاطع انتخاب‌شده در حالت سرعت جریان صفر برای مدل



شکل ۲۰: نمودار فشار وارد بر مقاطع انتخاب‌شده در حالت دارای سرعت جریان برای مدل

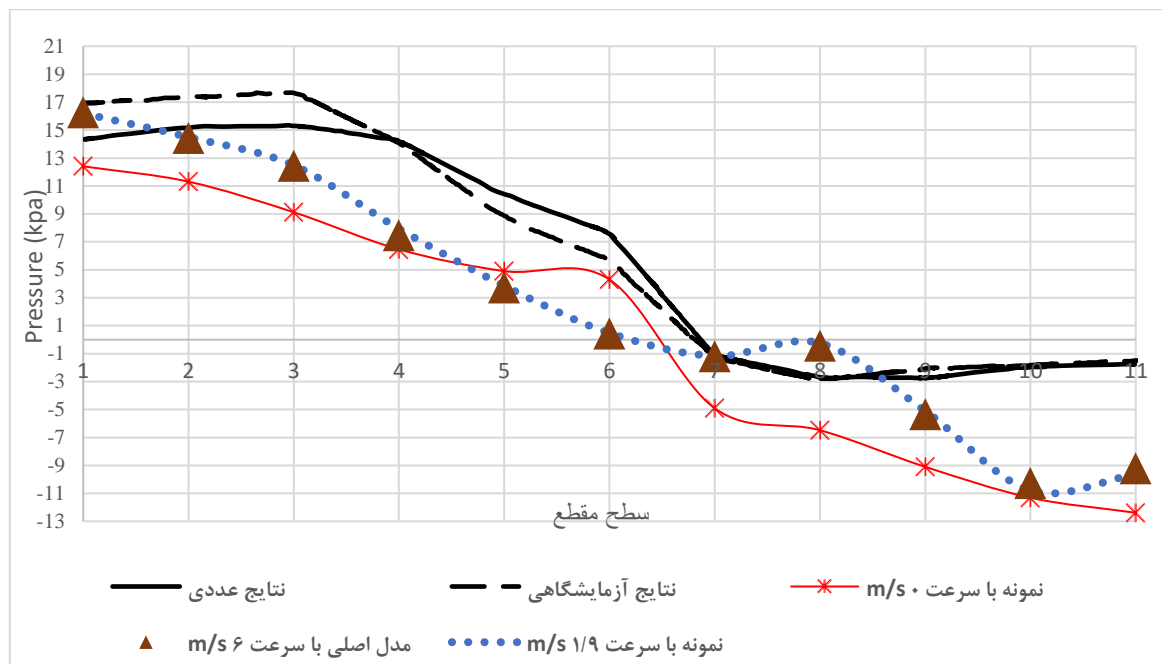


شکل ۲۱: نمودار فشار وارد بر مقاطع انتخاب‌شده در حالت دارای سرعت جریان برای نمونه اصلی

انجام‌شده در این تحقیق و نتایج عددی و آزمایشگاهی انجام شده توسط یوان و تاوو را نشان می‌دهد. همان گونه که در بخش (۳-۱) گفته شد، برای جلوگیری از انعکاس امواج از دیواره‌های کناری، عرض سازه برابر ۵ متر در حالت نمونه اصلی و ۰/۵ متر در حالت مدل در نظر گرفته شده، تمام نتایج بر این اساس حاصل شده‌اند؛ اما با توجه به مقاله مرجع که برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نتایج برای یک متر از سازه مورد نیاز است. در نتیجه، برای صحت‌سنجی نتایج، نتایج به‌دست‌آمده برای

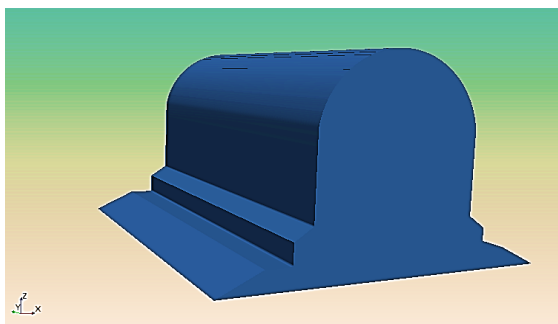
مقادیر دو شکل (۲۰) و (۲۱) که نتایج فشار وارد در حالت دارای سرعت جریان برای مدل و نمونه اصلی را نشان می‌دهند، بسیار به هم نزدیک هستند که این امر نشان‌دهنده صحت استفاده از قانون تشابه است. فشار واردشده در شبیه‌سازی دارای سرعت جریان از فشار واردشده در حالت بدون سرعت جریان، اندکی بالاتر است که این امر نیز به دلیل مقدار سرعتی است که در حالت دارای جریان وجود دارد که باعث افزایش نیرو و در نتیجه، فشار وارد بر سازه می‌شود. نمودار (۲۲) مقدار فشار وارده در تمام حالات شبیه‌سازی

مقدار یک متر انطباق داده می‌شوند.



شکل ۲۲: مقایسه فشار وارد بر مقاطع انتخاب شده در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی و نتایج عددی و آزمایشگاهی [۱۹]

در این بخش، دو دیواره کاملاً عمودی به موج‌شکن نیمه استوانه‌ای اضافه شده، نیروهای وارد بر آن بررسی می‌شود و با حالت نیمه‌استوانه مورد مقایسه قرار می‌گیرد. با اضافه شدن دو دیواره عمودی به سازه نیمه‌استوانه‌ای، سازه ترکیبی از موج‌شکن کیسونی نیمه‌استوانه‌ای و صندوقچه‌ای می‌شود. در شکل (۲۳) نمونه طراحی شده در نرم‌افزار مشاهده می‌شود که به موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای مدل دو دیواره با ارتفاع ۰/۲ متر در جلو و پشت سازه اضافه شده و در نتیجه، ارتفاع سازه افزایش یافته است.



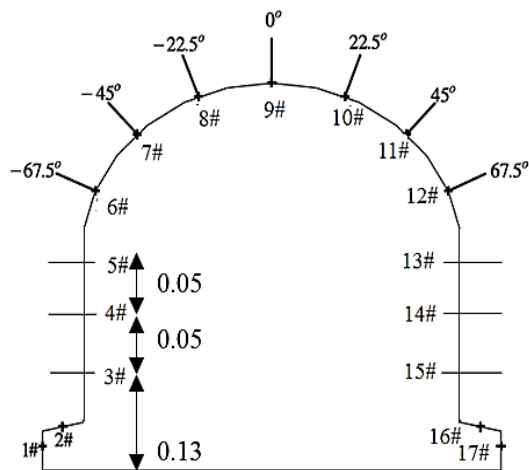
شکل ۲۳: موج‌شکن مرکب طراحی شده در نرم‌افزار

همان گونه که مشاهده می‌شود، بدون تغییر شعاع موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای و تنها با اضافه کردن دو دیواره عمودی، سازه قابل استفاده در عمق‌های بیشتر نیز هست که این امر علاوه

با توجه به نمودار (۲۲)، نتایج در حالت دارای سرعت جریان روی هم منطبق و نتایج شبیه‌سازی بسیار به نتایج عددی و آزمایشگاهی نزدیک است. علت اختلاف به وجود آمده، خصوصاً در پشت موج‌شکن نیز به علت شبیه‌سازی روی سطح صاف است؛ بدین صورت که آزمایش انجام شده روی موج‌شکن با کف دریای دارای شیب انجام شده که در نتیجه، عمق آب در پشت موج‌شکن کمتر است و با توجه به در دسترس نبودن شیب انجام شده، شبیه‌سازی روی سطح صاف صورت گرفته، همان گونه که مشاهده می‌شود نتایج نیز از صحت بسیار خوبی برخوردار هستند.

#### ۶- بررسی موج‌شکن مرکب نیمه‌استوانه‌ای

با توجه به شکل هندسی سازه، برای استفاده در عمق‌های زیاد باید شعاع نیمه‌استوانه افزایش پیدا کند. با افزایش شعاع نیمه‌استوانه، عرض سازه نیز به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و در نتیجه، فضا و مصالح بیشتری مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور استفاده از این موج‌شکن در عمق زیاد، برای بهبود کارایی سازه و کاهش مصالح مصرفی، باید تغییراتی در هندسه سازه ایجاد شود. به نظر می‌رسد، ساده‌ترین ایده برای رفع این مشکل، افزایش ارتفاع سازه به جای افزایش شعاع است.



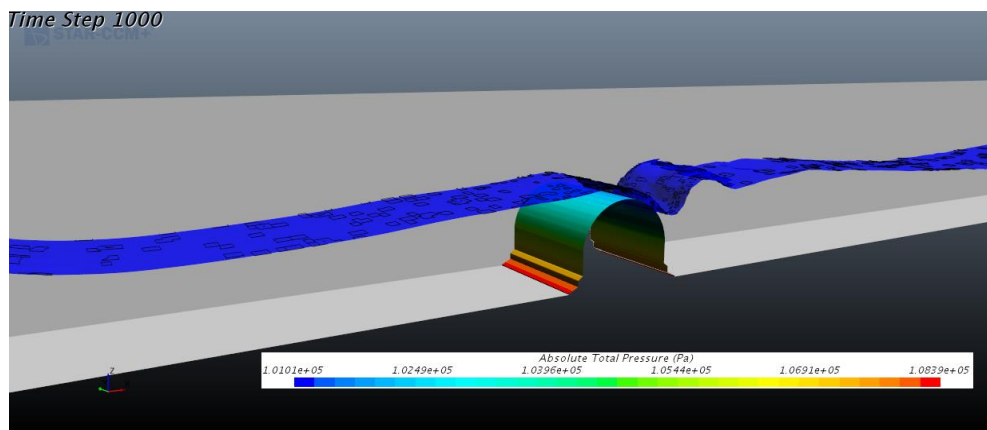
شکل ۲۴: محل مقاطع تعیین شده بر روی سطح سازه

بر کاهش مصالح مصرفی، مقدار فضای اشغال شده را نیز افزایش می‌دهد.

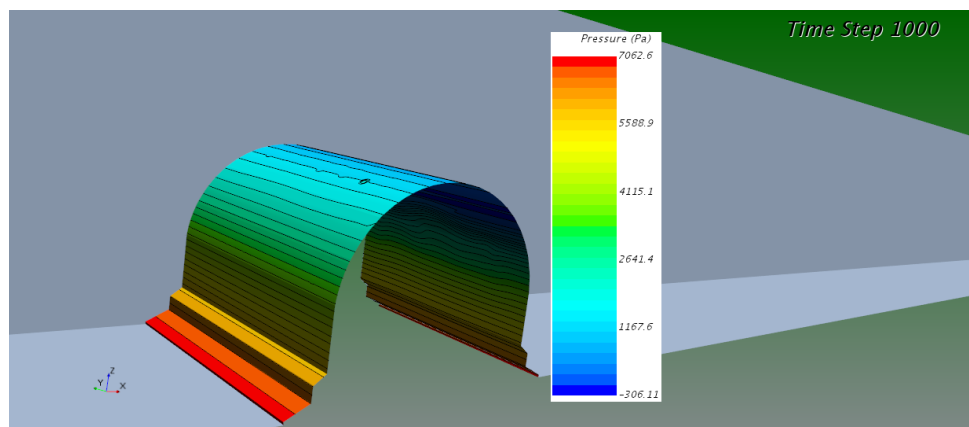
سازه مرکب طراحی شده، در همان فضای شبیه‌سازی طراحی شده برای موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای مدل‌سازی می‌شود. شکل (۲۴) تقسیم‌بندی موج‌شکن برای بررسی نیرو و فشار وارد بر مقاطع مختلف را نشان می‌دهد.

موج‌شکن مرکب طراحی شده در حالت مدل با مقیاس ۰/۱، سرعت صفر و عمق آب مشابه با عمق آب طراحی شده برای موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای، مدل‌سازی شده است.

شکل (۲۵) تا (۲۷) به ترتیب نشان‌دهنده صفحه نمایش سطح آزاد، فشار وارد بر موج‌شکن و تغییرات سرعت در سطح آزاد در گام زمانی مشخص هستند.



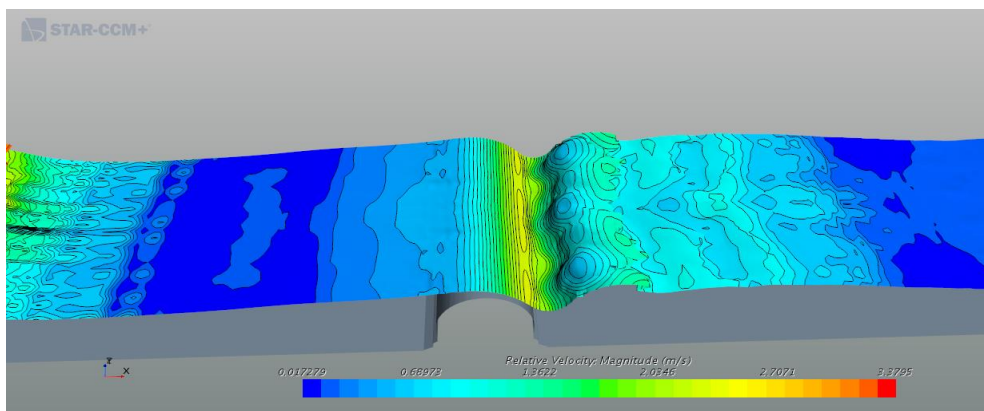
شکل ۲۵: نمایش سطح آزاد موج در گام زمانی مشخص



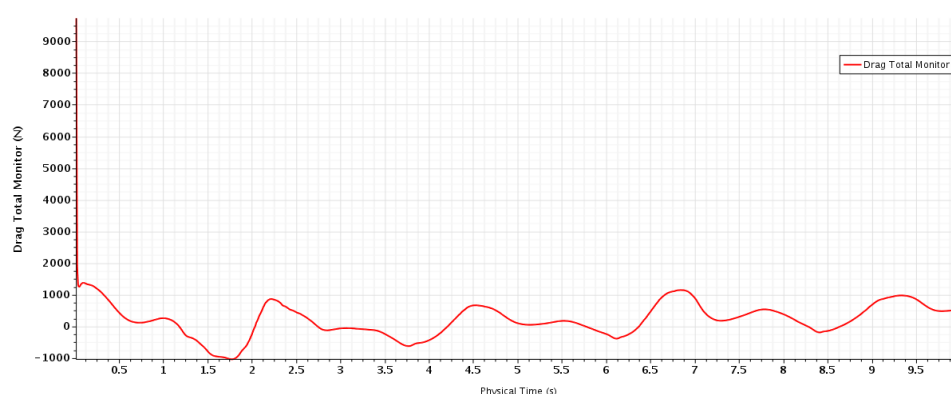
شکل ۲۶: فشار وارد بر موج‌شکن در گام زمانی مشخص

شکن نیمه‌استوانه‌ای است و از آنجایی که این حوزه در بخش قبل مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است، نتایج به‌دست‌آمده برای موج‌شکن مرکب به صحت‌سنجی نیاز ندارد.

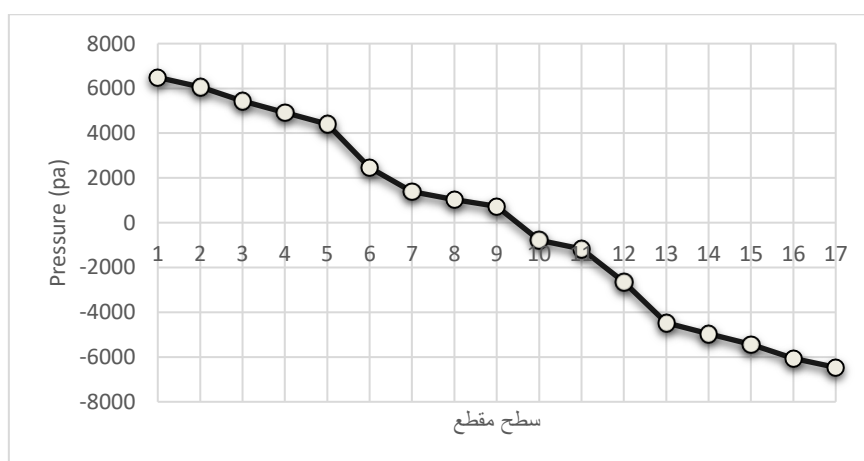
شکل (۲۸) نمودار نیروی کل وارد بر کل سازه و شکل (۲۹) نمودار فشار وارد بر مقاطع تعیین شده را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه حوزه شبیه‌سازی استفاده شده برای مدل‌سازی موج‌شکن مرکب، کاملاً مشابه حوزه شبیه‌سازی موج



شکل ۲۷: تغییرات سرعت در سطح آزاد موج در گام زمانی مشخص



شکل ۲۸: نمودار نیروی کل وارد بر کل سازه موج شکن مرگب در حالت سرعت جریان صفر برای مدل



شکل ۲۹: نمودار فشار وارد بر مقاطع انتخاب شده در حالت سرعت جریان صفر برای مدل

انتخاب شده، به عمق آب بستگی دارد و از بیشترین مقدار در پاشنه تا کمترین مقدار در قله سازه تغییر می کند. همان گونه که در این دو نمودار مشاهده می شود، در عمق های یکسان، مقدار فشار وارد بر سازه مقداری تقریباً برابر دارد. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش ارتفاع سازه (به جای افزایش شعاع)، از میزان مصالح و همچنین مقدار فضای اشغال شده کاسته می شود؛ اما با توجه به اینکه دو

با اضافه شدن دو دیواره عمودی به مساحت و ارتفاع ۰/۲ متر، ارتفاع و سطح خیس سازه افزایش می یابد. در نتیجه، انتظار می رود فشار وارد بر سازه نیز افزایش پیدا کند. با توجه به شکل (۲۸)، نیروی کل وارد بر سازه نسبت به حالت نیمه استوانه ای، تقریباً سه برابر افزایش یافته، به مقدار تقریبی ۳۸۰/۷۴ نیوتن رسیده است. همچنین با مقایسه نمودار (۱۹) و (۲۹) می توان دریافت که فشار وارد بر مقاطع

عددی و آزمایشگاهی حاصل شد که صحت شبیه‌سازی انجام‌شده را ثابت می‌کند. همچنین فشار وارد بر مقاطع تعیین‌شده نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل از شبیه‌سازی به نتایج عددی و آزمایشگاهی نزدیک و دارای صحت قابل قبولی بودند. این نتایج برای مدل و نمونه اصلی در حالت دارای سرعت جریان کاملاً یکسان به دست آمد که نشان‌دهنده صحت قانون تشابه به‌کاررفته است. در نتیجه، با استفاده از مدل ارائه‌شده در این تحقیق می‌توان سازه‌های ثابت دریایی را با درصد خطای بسیار کم نسبت به نتایج عددی و آزمایشگاهی شبیه‌سازی و از انجام تست های آزمایشگاهی بسیار پرهزینه اجتناب کرد.

برای استفاده از موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای در آب‌های عمیق، باید ارتفاع سازه افزایش یابد که این امر باعث افزایش هم‌زمان عرض سازه و در نتیجه، افزایش فضای اشغال‌شده و مصالح مصرفی می‌شود. برای رفع این مشکل، در بخش پایانی مقاله با اضافه کردن دو دیواره مسطح به سازه، به بررسی نیرو و فشار وارد بر موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای مرکب پرداخته شد که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقدار درگ وارد به این سازه نسبت به سازه اولیه افزایش می‌یابد؛ اما فشارهای وارد بر مقاطع انتخابی در مقایسه با حالت نیمه‌استوانه‌ای بازه‌ای تقریباً برابر دارد. در نتیجه، اضافه کردن دیواره‌های عمودی، ارتفاع سازه را افزایش داده، در مقایسه با نمونه نیمه‌استوانه‌ای، در مقاطع هم‌ارتفاع، مقدار فشاری برابر بر هر دو سازه وارد می‌شود. همچنین سازه مرکب، فضا و مصالح کمتری را مصرف می‌کند.

دیواره کاملاً عمودی در مقابل موج قرار گرفته است، مقدار نیروی وارد بر سازه افزایش چشمگیری پیدا می‌کند.

## ۶- نتیجه‌گیری

به‌منظور شبیه‌سازی موج‌شکن نیمه‌استوانه‌ای، از موج‌شکن مورد مطالعه قرار گرفته توسط یوان و تاوو در سال ۲۰۰۲ استفاده شد و پارامترهای هندسی و فیزیکی این سازه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به هدف این تحقیق، شبیه‌سازی سازه موج‌شکن در بخش‌های مرتبط کاملاً تشریح گردید. در بخش مش‌بندی و شرایط مرزی از پیشنهادهای ارائه‌شده در ITTC که یک مرجع کامل در مبحث دریایی است، استفاده شد. مدل فیزیکی استفاده‌شده در این شبیه‌سازی، مدل حل‌کننده RANS بوده که یک حل‌کننده دومعادله ای با دقت بالاست، به گونه‌ای که نتایج حاصل از این حل‌کننده بسیار به نتایج آزمایشگاهی نزدیک است. با توجه به عدم ذکر شیب کف دریا و سرعت جریان در تحقیقات یوان و تاوو، شبیه‌سازی روی کف مسطح و با دو نمونه بدون سرعت جریان و با سرعت جریان انجام گرفت و با مقایسه نتایج حاصل، صحت و نزدیکی نتایج شبیه‌سازی به نتایج آزمایشگاهی و عددی کاملاً مشهود بود که نشان‌دهنده کارایی شبیه‌سازی نرم‌افزاری و لزوم استفاده از این روش برای مدل‌سازی سازه‌ها به جای تست آزمایشگاهی است. همچنین در این تحقیق، نتایج در دو حالت نمونه اصلی و مدل نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. درگ وارد بر سازه در حالت جریان بدون سرعت در شبیه‌سازی نرم‌افزاری با درصد خطای بسیار کم نسبت به نتایج

## مراجع

- [۱] سعید ذوالفقاری فر و فرشاد تورنگ، «مروری بر تاریخچه موج‌شکن‌ها و انواع آن»، همایش سراسری فناوری و تکنولوژی مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک، ۱۷ آذر ۱۳۹۵.
- [۲] میثم کوزه‌گر و فرهود آذر سینا، «تأثیر دامنه موج، ارتفاع موج و طول محفظه هوا در ضریب بازتاب موج در موج‌شکن‌های کیسونی»، شانزدهمین همایش صنایع دریایی، ۱۱ و ۱۲ آذر ۱۳۹۳.
- [۳] محسن‌علی شایان‌فر، مصطفی خان‌زاده، محمد مهدی معمارپور و مهرداد کیمیایی، «برآورد مقاومت نهایی سکوه‌های ثابت فولادی با استفاده از تحلیل بار افزون استاتیکی و دینامیکی تحت بارگذاری امواج»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۸، شماره ۲۱، تابستان ۱۳۸۹، صفحه ۱-۱۴.
- [۴] معصومه بهرامی و رضا آقایاری، «بررسی رفتار و شکل‌پذیری برشی تیرهای عمیق بتن مسلح تقویت‌شده با FRP»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۲۱۳-۲۲۶.



- [۵] محمدرضا معرفزاده، «یک مدل استوکستیکی خوردگی سازه‌های فولادی در معرض آب دریا»، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۶۷-۸۱.
- [۶] میثم کوزه‌گر، فرهود آذرسینا و آرمین ره‌پیک، «محاسبه تأثیر دامنه موج، ارتفاع موج و طول محفظه هوا در ضریب بازتاب موج در موج‌شکن‌های کیسونی»، شانزدهمین همایش صنایع دریایی، ۱۱ و ۱۲ آذر ۱۳۹۳.
- [7] K. Tanimoto, S. Takahashi, "Japanese Experiences on Composite Breakwaters", Workshop on Wave Barriers in Deep Waters, Port and Harbour Research Institute, Yokosuka, Japan, 1994, pp. 1-22.
- [8] H. Sasajim, T. Koizuka, and H. Sasyama, "Field Demonstration Test of a Semicircular Breakwater", Proceeding of HYDROPORT 94", International Conference on Hydro- Technical Engineering for Port and Harbor Construction, port Harbour Research Institute, Yokosuka, Japan, 1994, pp. 593-610.
- [9] Y. Goda and Y. Suzuki, "Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments", Coastal Engineering Proceedings, Hawaii, 1976, pp. 828-845.
- [10] S. Xie, "Wave Forces on Submerged Semi-circular Breakwater and Similar Structures", China Ocean Engineering, Vol. 13, 1999, pp. 63-72.
- [11] D.H. Jia, "Numerical Model for the Semi-Circular Breakwater", Navigation Engineering. Ministry of Communication of China (in Chinese), 1999.
- [12] S. Xie, "Design of Semi-circular Breakwaters and Estuary", Tsinghua University Press, Beijing, 2001, pp. 90-95.
- [13] M. Isaacson, J. Baldwin, N. Allyn and S. Cowdell, "Wave Interactions with Perforated Breakwater", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 126, No. 5, 2000, pp. 229-235.
- [14] A.T. Chwang and T.L. Yip, "Perforated Wall Breakwater with Internal Horizontal Plate", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, No. 5, 2000, pp. 533-538.
- [15] B. Teng, X.T. Zhang and D.Z. Ning, "Interaction of Oblique Waves with Infinite Number of Perforated Caissons", Ocean Engineering, Vol. 31, 2004, pp. 615-632.
- [16] D.S. Jeng, "Wave-induced Sea Floor Dynamics", ASME Vol. 56, No. 4, 2003, pp. 407-429.
- [17] X.F. Chen, Y.C. Li and B. Teng, "Numerical and Simplified Methods for the Calculation of the Total Horizontal Wave Force on a Perforated Caisson with a Top Cover", Coastal Engineering, Vol. 54, 2007, pp. 67-75.
- [18] Y. Liu, Y. Li and B. Teng, "Wave Interaction with a Perforated Wall Breakwater with a Submerged Horizontal Porous Plate", Ocean Engineering, Vol. 34, 2007, pp. 2364-2373.
- [19] D. Yuan and J. Tao, "Wave Forces on Submerged, Alternately Submerged, and Emerged Semicircular Breakwaters", Coastal Engineering, Vol. 48, 2003, pp. 75-93.
- [20] Recommended Practice Det Norske Veritas DNV-RP-C205, Environmental Condition and Environmental Loads, October 2010.
- [21] T. Tezdogan, A. Incecik and O. Turan, "Full-scale Unsteady RANS Simulations of Vertical Ship Motions in Shallow Water", Ocean Engineering, Vol. 123, 2016, pp. 131-145.
- [22] J.C. Date and S.R. Turnock, "A Study into the Technique Needed to Accurately Predict Skin Friction Using RANS Solver with Validation Against Froudes Historical Flat Plate Experimental Data", Southampton, UK, University of Southampton, 1999.
- [23] J. Choi and Y. Sung, "Numerical Simulations Using Momentum Source Wave-maker Applied to RANS Equation Model", Coastal Engineering, Vol. 56, 2009, pp. 1043-1060.
- [24] L. Larsson, F. Stern and M. Visonneau, "CFD in Ship Hydrodynamics- Results of the Gothenburg 2010 Workshop", Computational Methods in Marine Engineering IV (MARINE 2011), 2011, pp. 17-36.
- [25] S.H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang and J.Z. Zhu, "A New k-ε Eddy-viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation", Computers Fluids, Vol. 24, 1995, pp.227-238.
- [26] International Towing Tank Conference (ITTC), Ocean Engineering Committee, Final report and recommendation to the 27th ITTC. In: Proceedings of the 27<sup>th</sup> ITTC, Copenhagen, 2014.