بررسی عددی تاثیر شکل هندسی موج شکن های شناور با آبخور و جرم یکسان بر راندمان آنها

علی کبیری[۱]، حبیب حکیم زاده[۲*]

[۱] کارشناس ارشد سازه های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند؛ a_kabiri@sut.ac.ir
[۲] استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، نویسنده مسؤول مقاله؛ hakimzadeh@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۸

کلمات کلیدی:
موج شکن شناور
ضریب عبور موج
شبیه سازی عددی
شکل هندسی

چکیده

یکی از مسائل مهم و تأثیر گذار در طراحی موج شکن شناور، شکل هندسی آن است. بررسی عددی تأثیر هندسه موج شکن بر ضریب عبور موج در نرم افزار Flow3D برای پریودهای موج در بازه ۰/۶۳ تا ۱/۲۶ ثانیه، موضوع مقاله حاضر است که عمدتاً این هندسه ها مبتنی بر ذوزنقه و ایجاد انحناء در مقاطع مختلف هستند.

در ابتدا صحت سنجی نتایج عددی مدل مبنا با مدل آزمایشگاهی انجام گرفته و سپس هفت هندسه متفاوت در دو گروه مختلف طراحی شدند. در گروه نخست، عمق آبخور ثابت فرض شده و جهت تأمین این آبخور، مقاطع هندسی پیشنهادی با جرم و چگالی های متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند. در مورد گروه دوم سطح مقطع، جرم و به تبع آنها چگالی هندسه ها ثابت فرض شده و نمونه های پیشنهادی در آبخورهای متفاوت مورد ارزیابی قرارگرفتند. سرانجام در محدوده پریودهای ذکر شده، هندسه‌ایی با بهترین کارایی و هزینه کمتر برای پروژه های مرتبط پیشنهاد شده است.

Numerical Investigation into Effect of Geometries of Floating Breakwaters Having the Same Draft and Mass on their Efficiencies

Ali Kabiri[1], Habib Hakimzadeh[2*]

[1] M.Sc. in Marine Structures, Sahand University of Technology
[2] Professor, Faculty of Civil Eng., Sahand University of Technology

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 17 Apr. 2017
Accepted: 7 Feb. 2018

Keywords:
Floating breakwaters
Wave transmission coefficient
Numerical simulation
Geometric shape

ABSTRACT

One of the major and effectual issues in designing of floating breakwater is its geometry. In this study, effect of geometry of floating breakwater on wave transmission coefficient for the periods ranging from 0.63 to 1.26(s) will be discussed using Flow_3D software, which is mainly based on trapezoidal geometry and curvature in various sections.

First, the numerical results of the base model were verified against the experimental model and then seven various geometries are designed in two groups. For the first group, the draft was assumed to be constant and to provide this particular draft, different geometrical sections were examined, using various masses and densities. In the second group, the cross-sectional area, mass and hence density were assumed to be constant and the proposed models were evaluated at different drafts. Finally, within the range of periods stated, the geometry having the best performance and economical is suggested for the related projects.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]

۱ - مقدمه

موج شکن های شناور به عنوان جایگزینی مناسب برای موج شکن های مرسوم ثابت محسوب می شوند که علاوه بر دارا بودن هدف اصلی حفاظت ساحل در برابر امواج، ارتباط آبی بین دریا و ناحیه حفاظت شده را نیز حفظ می کنند. این سازه ها در مناطق ساحلی که شرایط دریا نسبتا آرام است، کاربرد بیشتری دارند. از این رو اغلب برای حفاظت بنادر تفریحی و قایقهای کوچک کاربرد دارند. موج شکن های شناور در انواع کاربردهای موقت یا دائم عملکرد مناسبی را ارائه می دهند. در واقع، کارایی موج شکن های شناور در حد موج شکن های ثابت مانند موج شکن های سنگریزه ای نیست، اما دارای مزیت هایی از جمله هزینه ساخت پایین، امکان نصب سریع و استفاده از عمق آب نسبتاً زیاد بویژه در محل هایی که شرایط موج شدید اتفاق نمی افتد، است و این موارد بر جذابیت آنها افزوده است. منطبق شدن با تغییرات سطح آب و تغییرات فصلی از دیگر مزیت های این نوع موج شکن هاست. موج شکن شناور بر شرایط محیطی دریا (کیفیت آب، بستر دریا و ...) تأثیر کمی داشته و می توان از آن ها در مکان هایی که بستر دریا ضعیف است، به آسانی استفاده نمود[۱].

کاربرد عمده موج شکن‌های شناور در استهلاک امواج می‌باشد. موج شکن‌های شناور مشابه سایر موج شکن‌ها، انرژی موج را با کاهش ارتفاع موج تابشی، کاهش داده و باعث حفاظت محدوده سمت ساحل می‌شوند. در برخورد موج با سازه، بخشی از موج بازتاب شده، قسمتی در اثر آشفتگی و شکست مستهلک شده و به انواع دیگری از انرژی تبدیل می‌شود و بخشی نیز از سازه عبور می‌کند. ارتفاع موج عبوری به عنوان معیاری برای تخمین عملکرد موج شکن شناور به کار می رود، به این ترتیب که ارتفاع موج عبوری به ارتفاع موج تابشی به پارامتر هیدرودینامیکی ضریب عبور موج معروف بوده و تعیین‌کننده عملکرد و راندمان سازه می‌باشد. در خصوص تأثیر شکل هندسی موج شکن های شناور بر ضریب عبور موج مطالعات بسیاری پس از جنگ جهانی دوم به انجام رسیده است که از جمله ی آنها می توان به موارد زیر اشاره نمود:

ساتکو و هایدن در سال ۱۹۷۴ میلادی نشان دادند که موج شکن شناور با مقطع مستطیلی نسبت به مقاطع دایره ای و مثلثی در کاهش ارتفاع امواج مؤثرتر است[۲]. کاروِر در سال ۱۹۷۹ میلادی نشان داد که نسبت عرض موج شکن به طول امواج برخوردی پارامتری تاثیرگذار در عملکرد موج شکن های شناور می باشد[۳]. مک کارتنی در سال ۱۹۸۵ میلادی به بررسی مزایا و معایب موج شکن های شناور با اشکال مختلف پرداخت[۴]. کی سونگ تای در سال ۲۰۰۵ میلادی طی دو پژوهش جداگانه تاثیر اعضای متخلخل بر اندرکنش موج و سازه و نیز عملکرد موج شکن های شناور متخلخل دوبل را با استفاده از روش عددی محیط چند منظوره المان مرزی مورد مطالعه قرارداد. وی در پژوهش اول نتایج خوبی را در زمینه سختی و نحوه اتصال مهارها بدست آورد و در پژوهش بعدی بدین نتیجه رسید که بهترین عملکرد موج شکن شناور در فرکانس های بالای موج می باشد[۵]. کاتاندوس و همکاران در سال ۲۰۰۵ میلادی به مطالعه آزمایشگاهی عملکرد موج شکن های شناور جعبه ای تحت امواج منظم و نامنظم پرداختند. آنها در مطالعات خود تاثیر ویژگیهای امواج برخوردی و نیز ویژگیهای هندسی سازه مثل عرض سازه و عمق آبخور سازه را بر عملکرد موج شکن های شناور مورد بررسی قرار دادند[۶]. دنگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ میلادی تحقیقات آزمایشگاهی بر روی ضریب انتقال موج شکن های شناور ارائه دادند که در آنها سه نوع موج شکن تکی، دوتایی و توری عرشه ای تحت امواج منظم و در حالات با و بدون جریان مورد آزمایش قرار داده شده و نوع سوم به لحاظ سادگی و اقتصادی مناسب تشخیص داده شد[۷]. اوزِرن در سال ۲۰۰۹ میلادی در یک مطالعه آزمایشگاهی و ارائه پایان نامه دکتری، ضریب عبور، انعکاس و شکست موج را در موج شکن های شناور لوله ای با سیستمهای مختلف مهاربندی مورد مطالعه قرارداد. در تحقیق انجام شده مشخص گردید در صورت استفاده از مهارهای شمعی عبور موج کمتر خواهد بود و در صورت وجود روگذری موج، عبور امواج تیزتر بیشتر خواهد بود و کاهش ارتفاع موج در اثر شکست بیشتر از انعکاس موج خواهد بود[۸]. در ادامه در سال ۲۰۱۰ میلادی ونگ و سان در مورد موج شکن های شناور مشبک تحقیقاتی انجام دادند. سازه مورد نظر آنها از تعدادی بلوک الماسی شکل به گونه ای ساخته شد که ارتفاع موج انتقال یافته و نیروی مهار را کاهش دهد[۹]. علاوه بر آن، پِنا و همکاران در ۲۰۱۱ میلادی نتایج مطالعه آزمایشگاهی عملکرد موج شکن های شناور با چهار هندسه مختلف را ارائه نمودند. مدل اول آنها، مدل فیزیکی موج شکن های شناور اجرا شده در بندر بایونا اسپانیا با مقیاس ۱:۱۵ بوده و در مدلهای بعدی تغییرات عرض، عمق آبخور و استفاده از موج شکن های شناور π شکل (کاتاماران) را مورد بررسی قرار دادند[۱۰]. همچنین ته و همکاران در سال ۲۰۱۱ میلادی به مطالعه آزمایشگاهی موج شکن های نیمه استوانه ای سطحی(SCB) با تخلخل های مختلف پرداختند. آنها ویژگی های هیدرودینامیکی این موج شکن ها را تحت امواج نامنظم مورد بررسی قراردادند[۱۱]. سرانجام، فیصل محمودین و ماساشی کاشیواگی در سال ۲۰۱۴ میلادی نتایج مطالعاتی را ارائه دادند که بر مبنای آن طراحی و آنالیز موج شکن های شناور بهینه با کارایی بالا و هندسه ای خاص در محدوده فرکانس های وسیع بصورت دو بعدی و سه بعدی صورت پذیرفته است. برای این منظور از ترکیب روشهای الگوریتم ژنتیک (GA) و روش المان مرزی (BEM) بعنوان روش اصلی محاسبات عددی استفاده شده است. نتایج

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]

آزمایشگاهی نیز صحت بررسی های عددی را مورد تأکید قرار داده و این نکته را حائز اهمیت دانستند که ترکیب دو روش مزبور برای به دست آوردن مدل بهینه مؤثر است[۱۲].

همچنین در ایران، در سال ۱۳۹۳ کلاهدوزان و همکاران طی تحقیقی با استفاده از روش مدل سازی فیزیکی، به ارزیابی عملکرد هیدرودینامیکی موج شکن های شناور پله ای و نیز مقایسه عملکرد آنها با موج شکن شناور π شکل با عرض و عمق آبخور مشابه پرداختند[۱۳]. نتایج آنها نشان داد که کاربرد موج شکن شناور پله ای به جای موج شکن شناور π شکل، علاوه بر کاهش مقدار مصالح مورد نیاز برای ساخت موج شکن، تأثیر قابل ملاحظه ای بر عملکرد هیدرودینامیکی آن می گذارد. همچنین با افزایش گام پله ها عملکرد موج شکن های شناور پله ای بهبود می یابد. به علاوه مقایسه عملکرد هیدرودینامیکی موج شکن های شناور دو پله ای و سه پله ای نشان می دهد که عملکرد این دو نوع موج شکن به آبخور نسبی موج شکن بستگی دارد اما با افزایش گام پله ها مقدار تفاوت عملکرد آنها کاهش می یابد.

همچنین در سال ۱۳۹۳ کاظمی و همکاران با استفاده از نرم افزار انسیس آکوآ و با تکیه بر فرضیات ساده کننده مانند غیر لزج بودن سیال، غیر چرخشی بودن جریان و با در نظر گرفتن معادله لاپلاس بعنوان معادله حاکم بر حرکت سیال، نتایجی را در خصوص عملکرد هیدرودینامیکی موج شکن های شناور پله ای ارائه دادند [۱۴]. به همین منظور و برای بررسی دقیق تر عملکرد موج شکن شناور در این تحقیق با در نظر گرفتن سیال ویسکوز و نیز آشفتگی جریان، حل معادلات کامل هیدرودینامیک از جمله معادله مومنتوم و معادله پیوستگی مد نظر قرار گرفت. همچنین با توجه به اینکه در غالب تحقیقات عددی گذشته از موج منظم در مدلسازی ها استفاده شده، در این تحقیق اقدام به شبیه سازی موج نامنظم جونزواپ در نرم افزار Flow-3D شده است. در این رابطه تعداد هفت هندسه مختلف برای موج شکن شناور بر پایه شکل ذوزنقه ای و ایجاد انحنا در یالها در دو گروه عمق آبخور ثابت و جرم ثابت شبیه سازی شده و نتایج آنها مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج عددی مدل مبنای پانتون مستطیلی ساده با داده های تجربی مدل آزمایشگاهی مورد صحت سنجی قرار گرفته است.

۲ - موج شکنهای شناور

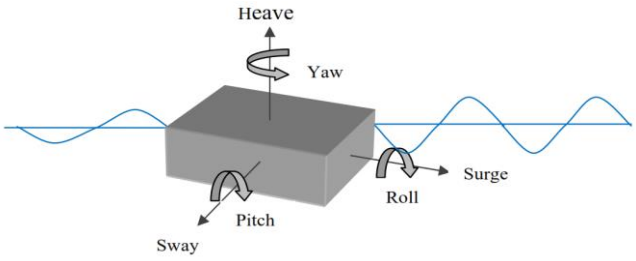
۲ – ۱- هیدرودینامیک موج شکنهای شناور

با نگریستن به سطح دریا، طبیعت سه بعدی و نامنظم بودن امواج آن به چشم می خورد. سطح آب با زمان تغییر می کند و این نشانه غیر دائمی بودن شرایط آن است. بخشی از انرژی موج تابشی پس از برخورد موج با موج شکن شناور منعکس شده، بخش دیگری از آن مستهلک شده و در نهایت بخشی از آن به پشت سازه منتقل می گردد. اندازه گیری ارتفاع موج پشت سازه به منزله سنجش مستقیمی از راندمان موج شکن شناور در کاهش اثر موج است. راندمان موج شکن شناور را عموماً با ضریبی به نام ضریب انتقال مطرح می کنند. ضریب انتقال، نسبت ارتفاع موج عبوری از موج شکن به ارتفاع موج تابشی است. اگر ارتفاع موج تابشی به موج شکن با H_i و موج عبوری از موج شکن با H_t نشان داده شود، ضریب انتقال موج شکن عبارت است از:

$$C_t = H_t / H_i \qquad (۱)$$

۲ -۲- حرکات موج شکنهای شناور

سازه موج شکن شناور در هنگام مقابله با موج با حرکات پیچیده شامل شش درجه آزادی واکنش نشان می دهد. شش درجه حرکت به صورت انتقال شامل Sway، Surge، Heave و دوران شامل Roll، Yaw، Pitch تعریف می شوند این حرکات در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ - تعریف حرکات موج شکن شناور [۱۵]

واکنش موج شکن به پریودهای طبیعی سازه مهارشده برای هر حرکت و پریود موج تابشی بستگی دارد و پریودهای طبیعی موج شکن به وسیله مشخصات فیزیکی موج شکن و سیستم مهار آنها تعیین میشوند، این مشخصات عبارتند از:

- هندسه موج شکن
- جرم موج شکن
- توزیع جرم و گشتاورهای اینرسی موج شکن
- مشخصات سیستم مهار نظیر طول و وزن واحد کابل های مهار

رابطه فاز بین امواج تابشی و امواج ثانویه تولید شده به وسیله حرکت موج شکن تواماً به پریود امواج تابشی و پریود طبیعی موج شکن بستگی دارد؛ هر درجه آزادی حرکت موج شکن دارای پریود طبیعی خاص خود است. این حرکات به مشخصات هیدرودینامیکی موج شکن شناور و سیستم مهار آن حول محور مربوطه بستگی دارد. ساده ترین حرکت موج شکن وقتی است که جهت موج بر محور طولی موج شکن عمود باشد، تحت چنین شرایطی حرکت بطور ایده آل تنها شامل سه درجه آزادی Heave، Roll وSway است (حالت دو بعدی) [۱۵]. حرکات موج شکن به ارتفاع و پریود

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]

امواج، مشخصات فیزیکی موج شکن، سیستم مهار و اجزاء جنبی موج شکن بستگی دارد. حرکت موج شکن در صورت برخورد امواج مورب نسبت به حالت برخورد امواج عمودی پیچیده است، زیرا در آن صورت حرکات منتجه شامل تمامی حرکات آزادی ششگانه می شوند.

۳ – حل معادلات فیزیکی حاکم

روش های حل عددی، مزایای کاهش زمان دست یابی به نتایج با توجه به دقت مورد نظر، حل مسائل پیچیده هندسی، تحلیل شرایط مرزی مختلف و کاهش هزینه ساخت مدل را دارا هستند. همچنین در این روش، اطلاعات کامل با جزئیات بیشتر، از قبیل تغییرات سرعت و فشار در سراسر حوزه مورد نظر را می توان به دست آورد که معمولاً در شرایط آزمایشگاهی، به علت محدودیت های موجود در حسگرها و ابزار سنجش، این امر به سختی امکان پذیر است. روش های عددی مختلف از جمله تفاضل محدود، المان محدود و حجم محدود با تقریب مناسب به حل مسائل مربوطه می پردازند و جواب های تقریبی قابل قبولی ارائه می دهند. توسعه و پیشرفت علوم و تکنولوژی های کامپیوتری، موجب پیدایش دینامیک سیالات محاسباتی جهت حل عددی معادلات دینامیک سیالات گردیده است که به اختصار CFD نامیده شده و به یک روش سریع و کاربردی در این زمینه تبدیل شده است.

برای اعمال شرایط فیزیکی حاکم بر مدل مورد بررسی، از معادلات دیفرانسیلی استفاده می شود که این معادلات درواقع بیان ریاضی مدل های عددی هستند. در این تحقیق از معادلات کامل پیوستگی و مومنتوم در حالت سه بعدی استفاده شده است. معادلات دیفرانسیلی که باید حل شوند در قالب سیستم مختصاتی کارتزین (x, y, z) نوشته می شوند و در این حالت منقطع سازی میدان مطالعاتی توسط شبکه بندی کارتزین از نوع حجم محدود که طبیعت منظم و با ساختاری دارد، بسیار آسان می گردد. معادلات شناخته شده کامل دینامیک جریان و شکل گسسته آنها اکنون به صورت گسترده در مدل های عددی و نرم افزارها مورد استفاده قرار می گیرند و جهت رعایت اختصار آورده نشده اند.

۳ – ۱- شبیه سازی عددی

همانگونه که پیش از این بیان گردید در این تحقیق جهت شبیه سازی عددی از نرم افزار Flow_3D استفاده شده است که یک نرم افزار قوی و پیشرفته در زمینه CFD است. این نرم افزار قابلیت شبیه سازی در فضای سه بعدی را داراست و بر اساس قوانین بنیادی بقای جرم، مومنتم و انرژی پایه گذاری شده است. این نرم افزار از یک شبکه متشکل از سلول های منشوری متعامد استفاده می کند که دارای مزایای بسیاری برای تولید آسان شبکه است و نظم مناسب آن، شبیه سازی عددی را بهبود می بخشد و نیاز به ذخیره حافظه را کاهش می دهد.

معادلات حاکم بر حرکت سیال در این نرم افزار با استفاده از روش حجم محدود گسسته سازی می شوند. یکی از قابلیت های مورد توجه در این نرم افزار، استفاده از روش VOF است که امکان تخمین سطح آزاد آب را میسر ساخته است. همچنین قابلیت استفاده از روش FAVOR برای مدل نمودن مرزهای منحنی است و با توجه به آنکه معمولاً تغییرات پارامترها در مجاورت این نواحی زیاد است، محاسبات با دقت بیشتری صورت می گیرند و از صحت بیشتری برخوردار هستند.

۳ – ۲- مشخصات موج آزمایشگاهی و نحوه شبیه سازی آن

طیف موج آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق فروزنده و همکاران، جونزواپ بوده است که توسط یک پاروی مولد موج از نوع پیستونی قائم تولید شده است؛ این مولد موج دارای ۵/۵ متر طول و یک متر آبخور است و بوسیله یک جک هیدرولیکی حرکت می کند. در تحقیق ایشان تاثیر آبخور موج شکن شناور پانتونی و نیز ارتفاع تیغه آن بر میزان ضرایب انتقال و بازتاب امواج نامنظم دریا با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی در فلوم موج پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه عرض و ارتفاع مدل های مورد آزمایش به ترتیب ۲۴ و ۱۶ سانتی متر بوده و آبخور آنها بین ۸ تا ۱۲ سانتی متر متغیر بوده است. محدوده ارتفاع امواج بین ۲ تا ۱۲ سانتی متر و پریودهای میانگین بین ۶۳/. تا ۱/۲۶ ثانیه در نظر گرفته شده اند [۱۶].

جهت ایجاد طیف موج جونزواپ در نرم افزار باید طیف موج ورودی، در شرایط مرزی بالا دست کانال شبیه سازی شده اعمال شود. با توجه به اینکه انواع مدلهای موج در نرم افزار Flow_3D قابل اعمال هستند؛ از اینرو برای ایجاد شرایط موج جونزواپ در نرم افزار، طول بادخور، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و فاکتور تقویت قله موج (γ) ـ که از مشخصه های موج جونزواپ هستند و بطور متوسط برابر ۳/۳ درنظر گرفته می شود ـ مورد نیاز است.

همچنین با توجه به اینکه نتایج فروزنده و همکاران بصورت دوره تناوب و ارتفاع موج منتشر شده است، لازم بود تا با استفاده از روابطی این اطلاعات به داده های مورد نیاز جهت تولید طیف موج جونزواپ در نرم افزار که بدان اشاره شد، تبدیل شوند. طیف موج جونزواپ توسط هاسلمن و همکاران طی گزارشی در سال ۱۹۷۳ارائه شد[۱۷] و روابطی را بین دوره تناوب و ثابت تعادلی فیلیپ (α) با طول بادخور و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری ارائه داد که مبنای بسیاری از کارهای مهندسی دریا تا به امروز بوده است. جهت تبدیل داده ها به یکدیگر لازم بود تا ثابت تعادلی فیلیپ که در روابط هاسلمن مورد نیاز هست، محاسبه شود. این ضریب با

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]

استفاده از روابط ارائه شده در تحقیق برگدال به صورت رابطه زیر ارائه شده است[۱۸]:

$$\alpha = 16\pi^2 (H_s/4L_p)^2 \quad (۲)$$

که در آن H_s ارتفاع موج مشخصه و L_P طول موج پیک هستند.
همچنین در راهنمای حفاظت ساحلی روابطی بصورت مستقل برای ارتفاع موج متوسط (H_m) و دوره تناوب متوسط (T_m) بر حسب طول بادخور (F) و سرعت مبنای باد (U_A) ارائه شده اند[۱۹]:

$$H_m = 1.616\times10^{2} U_A F^{1/2} \quad (۳)$$

$$T_m = 6.238\times10^{-1} (U_A F)^{1/3} \quad (۴)$$

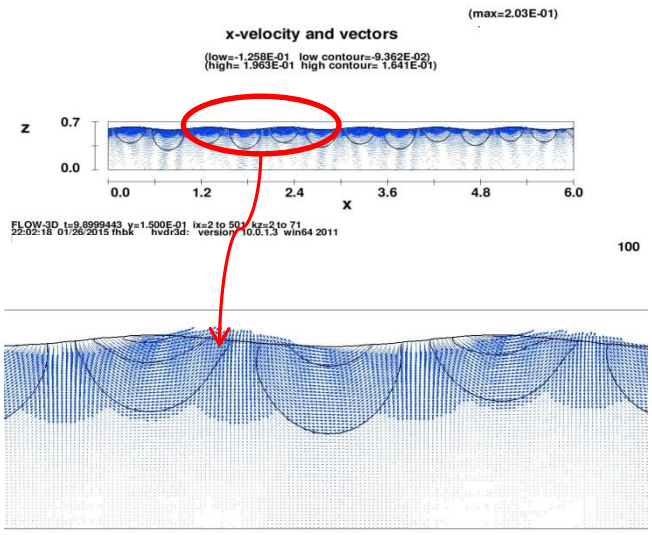
جهت دستیابی به نتایج مناسب برای ورودی نرم افزار از هر دو روش محاسبات استفاده شد. به دلیل تجربی بودن روابط بالا، نتایج حاصله اندکی با هم تفاوت داشتند و در نهایت از روش دوم مقادیر محاسبه و برای ورودی موج نرم افزار مورد استفاده قرار گرفت. همچنین با توجه به در نظر گرفتن زوال موج در لایه مرزی و ارتفاع موج قرائت شده در آزمایشگاه، مقدار ارتفاع موج تابشی در ابتدای کانال (H_i) محاسبه و مقادیر طول بادخور و سرعت مبنای باد بر اساس آن در نرم افزار اعمال شده و نتایج حاصله در جدول ۱ ارائه شده است.

۳ – ۲- واسنجی نتایج نرم افزار

جهت واسنجی نتایج نرم افزار، ابتدا یک کانال با طول ۶ متر و عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۷ متر در نظر گرفته شده است و موج خطی با مشخصات یکی از آزمایشهای انجام شده در آزمایشگاه، به عنوان موج ورودی انتخاب شد که دوره تناوب آن ۰/۷۹ ثانیه و ارتفاع موج ۰/۰۲۰۶ متر و عمق آب ۰/۶ متر اختیار گردید.
در شکل ۲ بردارهای سرعت جریان ناشی از موج در صفحه ی قایم پس از تحلیل نرم افزاری ارائه شده است. از بررسی کیفی این شکل مشاهده می شود که تولید موج خطی در کانال تا حدود زیادی محقق شده و تغییرات سطح آب و بردارهای سرعت بطور نسبی با نتایج متناظر نظریه ایری مطابقت دارند.
همچنین در ادامه نتایج مقادیر شبیه سازی عددی مربوط به ارتفاع موج با نتایج تحلیلی بر اساس تئوری ایری در جدول ۲ مورد مقایسه کمّی قرار گرفته است، مقایسه این نتایج با یکدیگر نشان داد که اختلاف این مقادیر به طور میانگین در مورد مولفه های سرعت در راستای X در حدود ۵ درصد و برای ارتفاع موج داخل فلوم ۳/۴٪ محاسبه شده است. از طرفی مقایسه کمّی نتایج نشان از وجود اختلاف تا حد کمتر از ۱۰ درصدی بین مقادیر شبیه سازی و تحلیلی است. بخش اعظمی از اختلاف حاصله می تواند ناشی از این حقیقت باشد که در تئوری ایری سیال به صورت ویسکوز درنظر گرفته نمی شود در حالیکه در شبیه سازی عددی سیال به صورت ویسکوز درنظر گرفته شده است. در حالت عمومی نتایج حاصل از این مقایسه، نشان دهنده قابلیت مناسب نرم افزار Flow_3D برای شبیه سازی پدیده موج است.

جدول ۱ - مقادیر ورودی موج در نرم افزار با استفاده از روابط راهنمای حفاظت ساحلی و داده های آزمایشگاهی

ردیف و مشخصه های موج	F (Km)	U_{10} (m/s)	T_m (s)	H_i (m)
۱	۰/۳۴۲	۳/۰۱	۰/۶۳	۰/۰۲۸۵
۲	۰/۱۹۱	۵/۳۹	۰/۶۳	۰/۰۳۸۱
۳	۰/۱۹۷	۵/۲۴	۰/۶۳	۰/۰۳۷۶
۴	۰/۱۱۳	۹/۱۵	۰/۶۳	۰/۰۴۹۶
۵	۰/۱۲۵	۸/۲۵	۰/۶۳	۰/۰۴۷
۶	۱/۹۶۰	۱/۰۴	۰/۷۹	۰/۰۲۳۵
۷	۰/۲۱۲	۹/۵۹	۰/۷۹	۰/۰۷۱۴
۸	۰/۱۵۸	۱۲/۸۸	۰/۷۹	۰/۰۸۲۷
۹	۰/۱۷۲	۱۱/۸۲	۰/۷۹	۰/۰۷۹۲
۱۰	۱/۳۵۰	۲/۶۲	۰/۹۵	۰/۰۴۹۲
۱۱	۰/۸۰۶	۴/۳۸	۰/۹۵	۰/۰۶۳۶
۱۲	۰/۴۳۳	۸/۱۵	۰/۹۵	۰/۰۸۶۸
۱۳	۰/۳۸۵	۹/۱۷	۰/۹۵	۰/۰۹۲۰
۱۴	۸/۰۲۸	۰/۷۰	۱/۱۱	۰/۰۳۲۱
۱۵	۱/۸۳۲	۳/۰۸	۱/۱۱	۰/۰۶۷۳
۱۶	۰/۹۶۹	۵/۸۱	۱/۱۱	۰/۰۹۲۵
۱۷	۰/۸۷۵	۶/۴۴	۱/۱۱	۰/۰۹۷۴
۱۸	۱۴/۴۸۸	۰/۵۷	۱/۲۶	۰/۰۳۵۰
۱۹	۲/۱۱۱	۳/۹۰	۱/۲۶	۰/۰۹۱۷
۲۰	۱/۹۲۲	۴/۲۹	۱/۲۶	۰/۰۹۶۱



شکل ۲- نتایج شبیه سازی گرافیکی موج خطی در نرم افزار Flow_3D

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]

جدول۲. مقایسه بین نتایج حل عددی و تحلیلی برای مقادیر حداکثر ارتفاع سطح آب بر حسب متر

ردیف	فاصله از مبدأ (m)	حل عددی	حل تحلیلی	درصد اختلاف
۱	۰/۵	۰/۰۲۲۴	۰/۰۲۰۶	۸/۷٪
۲	۱	۰/۰۲۱۵	۰/۰۲۰۶	۴/۲٪
۳	۱/۵	۰/۰۲۲۶	۰/۰۲۰۶	۹/۶٪
۴	۲	۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۰۶	۲/۴٪
۵	۲/۵	۰/۰۲۱۰	۰/۰۲۰۶	۲/۱٪
۶	۳	۰/۰۲۰۱	۰/۰۲۰۶	۲/۳٪
۷	۳/۵	۰/۰۱۹۵	۰/۰۲۰۶	۵/۳٪
۸	۴	۰/۰۲۰۰	۰/۰۲۰۶	۲/۹٪
۹	۴/۵	۰/۰۲۰۷	۰/۰۲۰۶	۰/۶٪
۱۰	۵	۰/۰۲۰۸	۰/۰۲۰۶	۰/۹٪
۱۱	۵/۵	۰/۰۲۰۸	۰/۰۲۰۶	۰/۹٪
۱۲	۶	۰/۰۲۰۱	۰/۰۲۰۶	۲/۴٪
مجموع				۴۲/۲٪
میانگین درصد اختلاف بین حل عددی و تحلیلی حداکثر ارتفاع سطح آب				۳/۵٪

۳ – ۳- صحت سنجی شبیه سازی عددی

جهت صحت سنجی مدل عددی ساخته شده در نرم افزار، ابتدا تعداد ۲۰ آزمایش صورت گرفته بر روی پانتون ساده با آبخور ۸ سانتیمتر در مرجع [۱۶] ، با دوره تناوب و ارتفاع موج های متفاوت در نرم افزار شبیه سازی شد. در این بررسی به منظور ارزیابی دقت مدل از شاخص‌های ضریب تبیین متوسط R^2 و متوسط درصد خطای مطلق و جذر میانگین مربعات خطا استفاده شد. شاخص درصد خطای مطلق برای اندازه گیری متوسط اختلاف بین نتایج مشاهداتی و شبیه سازی به صورت رابطه (۵) تعریف شده است که در آن O_i مقدار مشاهداتی آزمایشگاهی و S_i نتیجه ی عددی حاصل از شبیه سازی و n تعداد داده های مورد بررسی است.

$$MPAE=\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\left|\frac{O_i-S_i}{O_i}\right|\times 100 \qquad (۵)$$

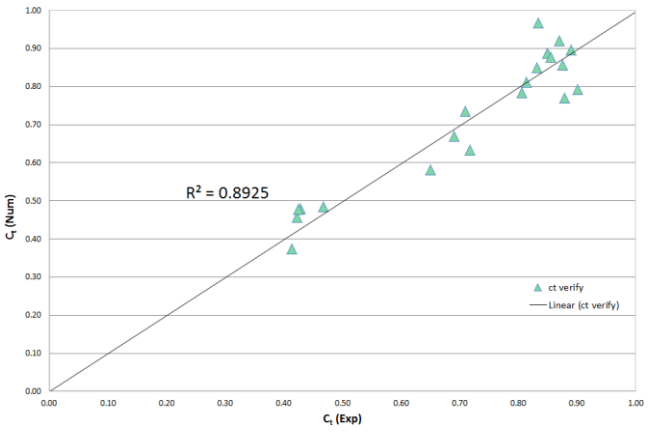
همچنین جذر میانگین مربعات خطاها نیز به صورت رابطه (۶) ارائه شده است.

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-S_i)^2}{n}} \qquad (۶)$$

اندازه سلول های شبکه در پلان به گونه ای انتخاب شده اند که در مجاورت موج شکن مقادیر آنها کوچک بوده و با فاصله گرفتن از سازه مورد نظر مقدار مزبور بزرگتر می گردد. در این خصوص لازم به ذکر است که حساسیت سنجی اندازه سلولها انجام شده و نتایج مناسب ترین اندازه سلول های شبکه در اینجا ارائه شده است. بدین ترتیب که اندازه سلول ها در ابتدا ۱۰ سانتی متر انتخاب شد و سپس با کاهش اندازه آنها به ۰/۵ سانتی متر طی شش مرحله، استقلال نتایج عددی از اندازه سلول ها حاصل شد. نتایج ارزیابی دقت مدل عددی بر اساس شبیه‌سازی هندسه ی موج شکن، پروفیل سطح آب، ارتفاع موج قبل و بعد از موج شکن و در نتیجه محاسبه ضریب انتقال در شرایط آزمایش ارائه شده است. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی با نتایج متناظر شبیه سازی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از روی شکل ملاحظه می‌شود مدل عددی با مقدار R^2 برابر ۰/۸۹ از دقت نسبتاً خوبی برای شبیه‌سازی ضریب انتقال موج از موج شکن پانتونی و پروفیل سطح آب در مدل مورد بررسی برخوردار بوده است.

متوسط درصد اختلاف بین نتایج نمونه های عددی و آزمایشگاهی برای ضریب انتقال در مقادیر محاسبه شده پارامتر MPAE برابر ۷/۸۸ ٪ بوده و خطای جذر میانگین مربعات برابر ۰/۰۶۶۱ است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با توجه تحقیقات عددی گذشته، نتایج عددی در محدوده قابل قبول قراردارند و مدل عددی ساخته شده قابلیت توسعه با سایر هندسه‌های موج شکن را داراست.

همانگونه که پیش از این بیان گردید تولید موج جونزوپ در بخش بالادست فلوم مدل موج شکن شناور صورت گرفته است و تفکیک ارتفاع امواج تابشی و انعکاسی مستخرج از نرم‌افزار Flow_3D ، توسط نرم افزار ارائه شده بوسیله دپارتمان مهندسی عمران دانشگاه آلبورگ دانمارک (Wave Lab 3.603)، انجام گرفته است. در انتهای فلوم نیز جهت ممانعت از بازتاب موج، سطح شیب داری تعبیه شده است.



شکل ۳: مقایسه Ct حاصل از شبیه سازی عددی و مدل آزمایشگاهی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]

۴- هندسه های پیشنهادی برای گروه اول با آبخور ثابت

با توجه به گستره عظیم اشکال هندسی، تعداد زیادی از هندسه‌های قابل طرح در نرم‌افزارهای سه بعدی می‌توانست پیشنهاد شود. در عین حال جهت دستیابی به یک روند منطقی در پیشنهاد اشکال هندسی، شکلهای ارائه شده در جدول ۳ به عنوان نمونه های شبیه سازی عددی تحقیق حاضر پیشنهاد گردید تا در عین قابلیت شبیه سازی نرم افزاری، امکان ساخت و تولید آنها در عمل نیز فراهم باشد. بعد سوم (طول) تمام گزینه‌ها مطابق نمونه آزمایشگاهی برابر ۸۵ سانتی‌متر انتخاب شده و در شبیه سازی آنها، آبخور نمونه ها ثابت و برابر هشت سانتی‌متر در نظر گرفته شده است، در نتیجه سطح مقطع و حجم نمونه‌ها متفاوت خواهد بود. جهت تأمین آبخور مورد نظر در هندسه‌های متفاوت، جرمِ متناسب با حجم و در نهایت چگالی مربوط به هر یک از مدلها محاسبه و در نرم افزار اعمال شده است.

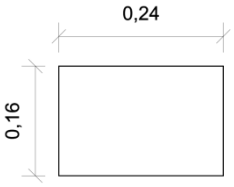
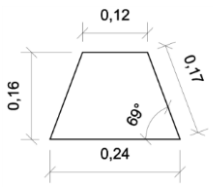
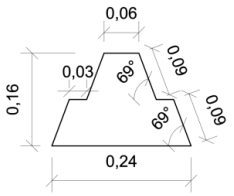
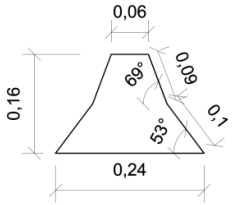
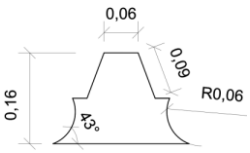
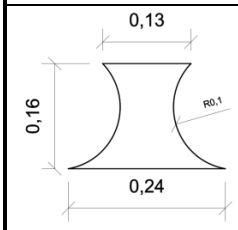
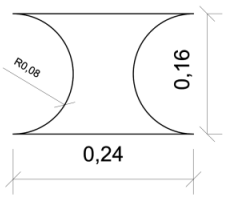
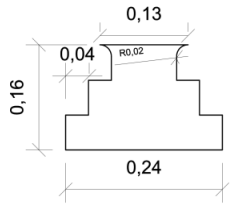
پیشینه تحقیقات، مبنای اولیه ی تصمیم گیری بر روی انتخاب هندسه موج شکن بود، مطابق یافته های قبل واضح بود که استفاده از هندسه های دایروی و مثلثی نتایج مثبتی در عملکرد موج شکن در پی نخواهد داشت. از طرفی عملکرد موج شکن های مستطیلی شکل نیز در منابع مختلف علمی مورد بررسی قرار گرفته است. از اینرو در نهایت با بهره گیری از شکل های شاخص موج شکن های متصل به ساحل و ثابت که عموماً دارای مقطع ذوزنقه ای هستند، یک شکل هندسی ترکیبی (ترکیبی از مثلث و مستطیل)، به عنوان ایده ی اولیه انتخاب ذوزنقه با ابعاد نزدیک به پانتون آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت (مدل شماره ۱). پس از آن از طریق تحلیل های عددی ارزیابی عملکرد مدل ذوزنقه با شیب های مختلف انجام و شیب مناسب دیواره ها در مورد این شکل از مدل ها بدست آمد. همچنین ترکیب پانتون با مقاطع مخروطی جزو ایده های اشکال هندسی مد نظر قرار گرفت که از با الهام گیری از شکل دیوارهای ساحلی ساخته شده بود.

در نهایت با توجه به تحقیقات گسترده سالهای اخیر در خصوص موج شکن شناور پله‌ای یک نمونه موج شکن پله‌ای که ابعاد آن از نظر طول و عرض و ارتفاع متناسب با سایر نمونه‌های پیشنهادی بود، برای مقایسه با مدلهای پیشنهادی در نرم‌افزار شبیه سازی شد. در این گروه از شبیه سازی‌ها با ثابت در نظر گرفتن آبخور موج شکن شناور، عملاً تأثیرات هندسه با همراهی جرم و چگالی در عملکرد موج شکن بررسی شده است.

ابعاد، جرم و چگالی نمونه‌های پیشنهاد شده جهت شبیه سازی با آبخور ثابت در جدول ۳ آورده شده است.

در ادامه جهت انجام شبیه سازی عددی در نرم افزار با توجه به زمان بر بودن محاسبات از هر کدام از دوره های تناوب آزمایشات یک ارتفاع موج انتخاب شد و در شبیه سازی هندسه های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. معیار انتخاب امواج به گونه ای بوده است که امواج گستره ی بیشتری از تیزی های امواج در مدل آزمایشگاهی را در بر گرفته باشند.

جدول ۳: هندسه های پیشنهادی برای ساخت مدل عددی موج‌شکن شناور و مشخصات فیزیکی آنها

شماره مدل	مدل مبنا ـ جهت مقایسه با مدل آزمایشگاهی	مدل شماره یک
هندسه مدل		
مشخصات مدل	M=۱۶/۳۲ Kg ρ=۵۰۰ Kg/m3	M=۱۴/۲۸ Kg ρ =۵۸۳/۵ Kg/m3
شماره مدل	مدل شماره دو	مدل شماره سه
هندسه مدل		
مشخصات مدل	M=۱۴/۲۸ Kg ρ =۷۰۰ Kg/m3	M=۱۲/۲۴ Kg ρ =۶۶۷ Kg/m3
شماره مدل	مدل شماره چهار	مدل شماره پنج
هندسه مدل		
مشخصات مدل	M=۱۲/۰۷ Kg ρ =۶۶۴ Kg/m3	M=۸/۶۷ Kg ρ =۵۷۳ Kg/m3
شماره مدل	مدل شماره شش	مدل شماره هفت
هندسه مدل		
مشخصات مدل	M=۷/۷۸ Kg ρ =۵۰۰Kg/m3	M=۱۴/۷۱ Kg ρ =۶۷۳ Kg/m3

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]

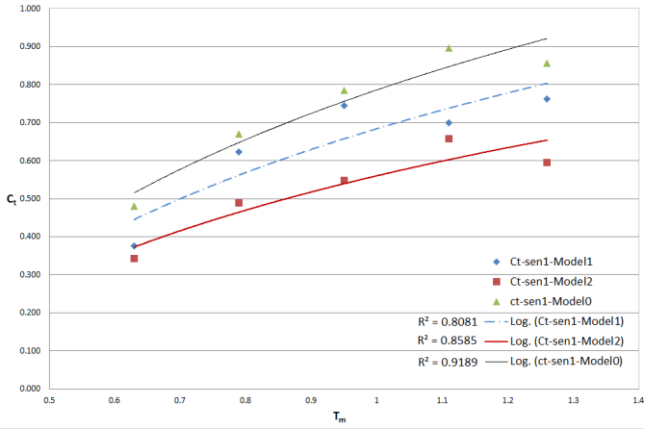
بر این اساس موج های انتخابی برای انجام شبیه سازی مطابق جدول ۴ ارائه شده اند که ارتفاع موج تابشی (Hi) قبل از موج‌شکن در آن مشخص شده است.

جدول ۴: مشخصات آزمایشگاهی انتخابی جهت شبیه سازی هندسه‌های مختلف

شماره و مشخصه های موج	H_i(Exp) (m)	T_m(m)	S_{om}(Exp)	H_i(Num) (m)
۳	۰/۰۳۶۴	۰/۶۳	۰/۰۵۹	۰/۰۳۰۲
۷	۰/۰۶۸۸	۰/۷۹	۰/۰۷۱	۰/۰۶۵۴
۱۳	۰/۰۸۸۵	۰/۹۵	۰/۰۶۳	۰/۰۵۵۷
۱۷	۰/۰۹۳۶	۱/۱۱	۰/۰۴۹	۰/۰۶۸۳
۱۹	۰/۰۷۶۷	۱/۲۶	۰/۰۳۱	۰/۰۸۸۸

۴-۱- نتایج بررسی صورت پذیرفته در گروه اول

نمونه مبنا و نمونه شماره یک در ابتدا با هم مقایسه شدند و در نهایت مشخص شد عملکرد موج شکن ذوزنقه‌ای در انتقال موج نزدیک به ۱۳٪ در پریودهای مورد مطالعه بهبود یافته است. در شکل ۴ ابتدا عملکرد دو نمونه شماره یک و دو با یکدیگر مقایسه شده که در عین تفاوت در هندسه در قیاس با مدل مبنا به یک میزان در مصالح آنها صرفه جویی شده و تنها تفاوت این دو پله‌ای بودن نمونه شماره دو هست.



شکل ۴: مقایسه ضریب انتقال در مدل های شماره ۱ و ۲ با مدل مبنا

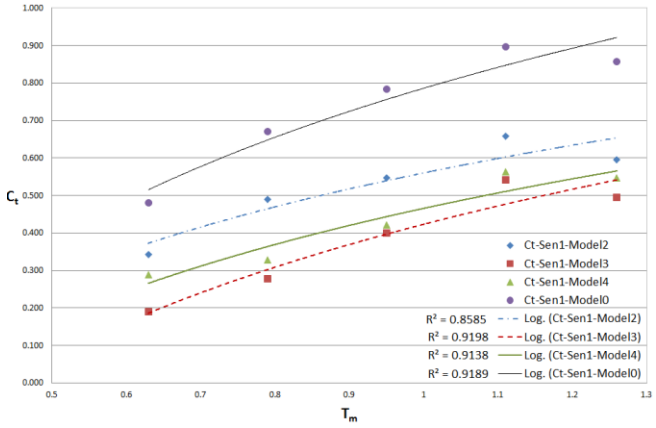
با توجه به اینکه آبخور در هر دو نمونه یکسان بوده لذا عمده‌ی صرفه جویی مصالح در نمونه شماره یک صرف تأمین آبخور و کم کردن چگالی آن در مقایسه با نمونه شماره ۲ شده است، بطوری که این تغییر در هندسه و متعاقب آن افزایش جرم در قسمت آبخور (جهت حفظ آبخور)، به میزان ۱۷٪ ضرایب عبور موج را در مجموعه پریودهای مورد آزمایش کاهش می‌دهد.

در ادامه با در نظر گرفتن نمونه‌های ذوزنقه ای با شیب های متفاوت در قسمت آبخور، تأثیر تغییر شیب در هندسه مقطع موج شکن شناور که هندسه پایه ی آن بر مبنای ذوزنقه شکل گرفته است، بررسی شده است.

جهت این منظور هندسه ی نمونه های دو، سه و چهار در معرض پنج موج انتخابی به ترتیب با پریودهای ۰/۶۳، ۰/۷۹، ۰/۹۵، ۱/۱۱ و ۱/۲۶ ثانیه قرار گرفته و عملکرد آنها در گذردهی موج با هم مقایسه شده است. نمونه شماره دو که مبتنی بر نمونه شماره یک می باشد به لحاظ شیب با آن یکسان بوده و یالهای آنها با شیب ۶۹ درجه مدل شده است، در ادامه با تغییر در شیب یال پایینی نمونه شماره دو و کاهش آن تا ۵۳ درجه، نمونه شماره سه ایجاد شده و در نهایت با ترکیب مقطعی از دایره با نمونه شماره دو شیب ۴۳ درجه حاصل گردیده است.

نتایج مربوط به عملکرد این سه موج شکن در شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که از روند نمودارها پیداست نمونه شماره سه با کاهش شیب یال ذوزنقه عملکرد بهتری نسبت به نمونه شماره دو دارد، اما عملکرد نمونه شماره چهار که با ایجاد یک هندسه ی ترکیبی، از تقاطع ذوزنقه و مقطع کمانی شکل گرفته ـ تا ضمن کاهش شیب امکان بررسی انحناء نیز وجود داشته باشد ـ اندکی متفاوت است.

یکی از دلایل این موضوع می تواند به جرم و چگالی کمتر نمونه شماره چهار مربوط گردد که سبب شده ضرایب عبور موج در این نمونه نزدیک ۱۸٪ نسبت به نمونه شماره سه افزایش یابد.



شکل۵: مقایسه ضریب انتقال در مدل های شماره ۲، ۳ و ۴ با مدل مبنا

ولی با توجه به کاهش اندک مقادیر جرم و چگالی نمونه شماره چهار، به نظر نمی رسد که این دو عامل چندان موثر باشند.

همچنین در محدوده پریودهای مطالعاتی این پژوهش، نمونه شماره سه در مقایسه با نمونه شماره دو نزدیک به ۳۰٪ عملکرد بهتری از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]

خود نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نمونه شماره دو از هر دو نمونه دیگر سنگین‌تر هست و انتظار می رفت که عملکرد بهتری در مقایسه با نمونه های شماره ۳ و ۴ داشته باشد اما با توجه به نتایج حاصله نقش کاهش شیب در بهبود عملکرد این نوع موج شکن ها کاملاً مشهود است، البته در صورتی که با ثابت نگاه داشتن عرض موج شکن نسبت به کاهش شیب اقدام شود در نهایت ناچار به یک نمونه مثلثی و یا ذوزنقه با ارتفاع کوتاهتر خواهیم رسید که عملاً کارایی موج شکن را دوباره کاهش خواهد داد.

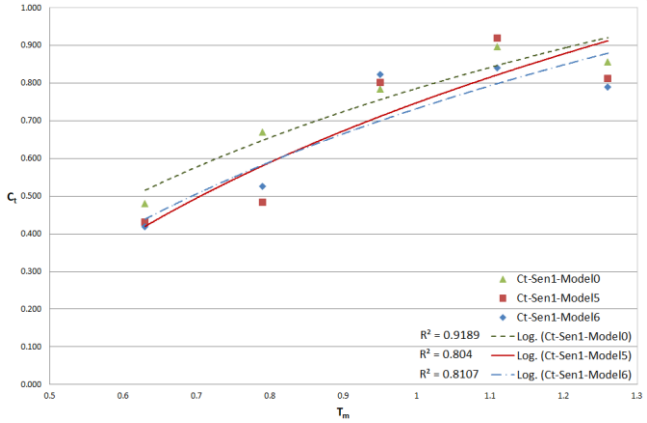
۴-۲- تأثیر ترکیب سطح مقطع پانتون و مقاطع منحنی شکل

نمونه‌های شماره پنج و شش به عنوان دو نمونه اولیه در این پژوهش مطرح گردید تا عملکرد آنها با موج شکن پانتونی مقایسه شود. در مورد نمونه شماره پنج ایده اولیه از شکل دیوارهای ساحلی الهام گرفته شده است. درنهایت با ساده سازی انجام گرفته مقطعی که توسط قطاعی از دایره با شعاع ۱۰ سانتی‌متر روی شکل پانتون مستطیلی زده شد، منجر به ایجاد نمونه شماره پنج گردید، همچنین در نمونه شماره شش، از هر طرف پانتون یک نیم دایره به قطر ارتفاع پانتون از سطح مقطع آن کاسته شده است.

با توجه به ثابت بودن آبخور در این سری از شبیه سازی‌ها، عملاً به علت یکی بودن چگالی نمونه شش با پانتون مستطیلی و به علت اینکه سطح مقطع نمونه، ۵۲/۴٪ نسبت به پانتون کمتر می‌باشد، در نتیجه موج شکن با کاهش شدید وزن و افت کارایی مواجه می‌شود. همین اتفاق بطور اولی برای نمونه شماره پنج نیز می افتد ولی در عین حال عملکرد و راندمان این دو نمونه در محدوده موج شکن پانتون مستطیلی باقی می‌ماند و با توجه به کاهش حدود ۵۰ درصدی استفاده از مصالح، برای مناطقی که پریود امواج کم می‌باشد توصیه می‌شود.

در شکل ۶ نمودار مربوط به عملکرد این دو نمونه در مقایسه با نمونه مبنا ارائه شده است.

مطابق نمودارهای رسم شده، نمونه پیشنهادی شماره پنج قابلیت استفاده در مناطقی با پریود موج کم را داراست و در پریودهای بالای یک ثانیه عملکرد نمونه شش بهتر است. از اینرو، در صورت عدم وجود مشکل برای ساخت و تولید این شکل خاص از موج شکن، به علت صرفه اقتصادی در مصرف مصالح، جایگزین مناسبی برای موج شکن پانتونی مستطیلی در محدوده پریودهای کمتر از یک ثانیه خواهد بود. راندمان این موج شکن‌ها در این محدوده از پریودهای انتخابی، ۸٪ بیشتر از موج شکن پانتونی برآورد می‌شود.

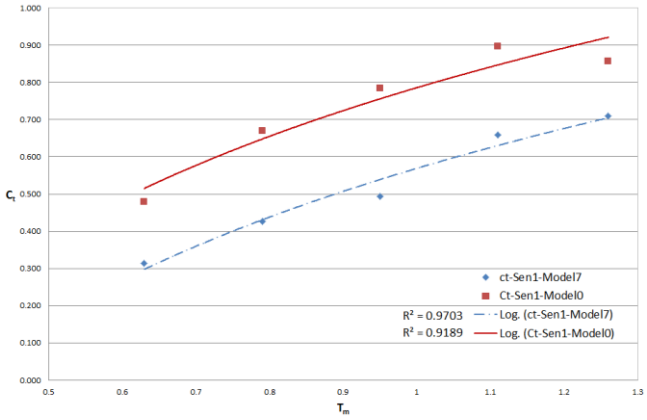


شکل ۶: مقایسه ضریب انتقال در مدل های شماره ۵ و ۶ با مدل مبنا

۴-۳- مقایسه نمونه پانتون پله‌ای با سایر نمونه‌های کارآمد و نمونه مبنا

در سالهای اخیر تحقیقات زیادی در زمینه‌ی پله‌ای کردن موج شکن پانتونی به انجام رسیده و تمامی آنها بر بهبود کارایی موج شکن شناور با ایجاد این تغییر شکل تأکید دارند، در عین حال جهت بررسی و مقایسه هندسه‌های پیشنهادی با یک نمونه کارا، ابتدا هندسه موج شکن پله‌ای بر اساس نمونه مبنای این تحقیق در نرم‌افزار اتوکد مدل شده و به محیط نرم‌افزار منتقل گردید تا در محدوده‌ی پریودهای پیشنهادی شبیه‌سازی شود.

شکل ۷ نمودار عملکرد موج شکن پله‌ای را در مقایسه با پانتون معمولی نشان می‌دهد، مطابق نمودار کارایی پانتون پله‌ای در محدوده پریودهای مورد بررسی نزدیک به ۳۰٪ بیشتر از موج شکن با مقطع مستطیلی ساده می‌باشد.



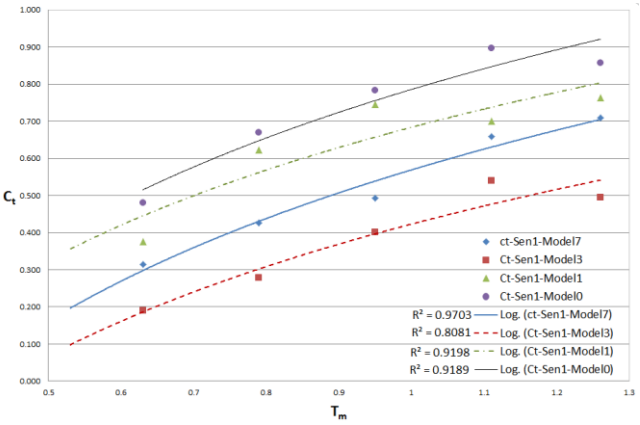
شکل ۷: مقایسه عملکرد موج شکن پله ای و مدل مبنا

با توجه به اینکه جرم این نمونه و میزان مصالح مصرفی ۱۰٪ کمتر از پانتون معمولی است، دستیابی به این کارایی نشان می‌دهد یکی از هندسه‌های بسیار خوب جهت کم کردن ضریب عبور موج همین نوع موج شکن می‌باشد، سرانجام در شکل ۸ عملکرد نمونه شماره هفت با عملکرد نمونه شماره یک به عنوان نمونه پایه‌ی ذوزنقه‌ای و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]

نمونه شماره سه که بهترین راندمان را در بین شیب‌های مختلف دارا بود، مورد مقایسه قرار گرفته تا راندمان نمونه‌های پیشنهادی این تحقیق با یک نمونه کارا مورد قیاس قرار گیرد.



شکل ۸: مقایسه عملکرد مدل های پله ای و ذوزنقه‌ای با مدل مبنا

مطابق شکل، راندمان موج شکن نمونه هفت از موج شکن ذوزنقه‌ای معمولی با شیب یال ۶۹ درجه بهتر است و عملکرد نمونه شماره سه با شیب یال ۵۳ درجه که عملاً بهترین گزینه در بین نمونه‌های مبتنی بر ذوزنقه نیز هست با ۲۸٪ اختلاف نسبت به موج شکن پله‌ای در محدوده پریودهای تعریف شده برای این پروژه، به‌عنوان کاراترین نمونه معرفی می‌شود. همچنین اهمیت بسیار زیاد موضوع در این نکته هست که میزان صرفه جویی در مصالح برای ساخت نمونه شماره سه نزدیک به ۲/۵ برابر نمونه شماره هفت خواهد بود.

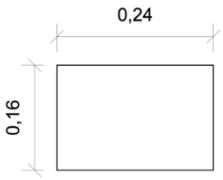
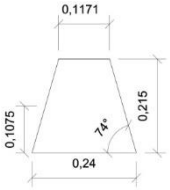
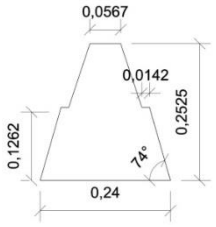
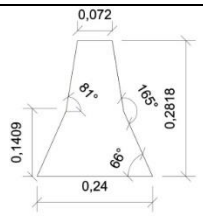
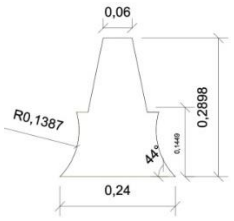
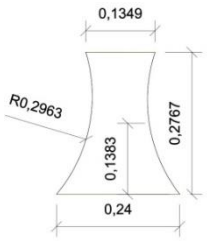
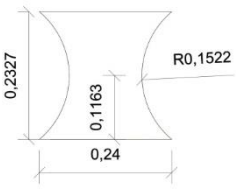
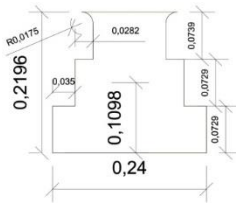
۵- هندسه های پیشنهادی برای گروه دوم با جرم ثابت

با توجه به انجام شبیه سازی گروه اول این فرضیه شکل گرفت که هندسه‌های متفاوت با سطح مقطع و جرم یکسان چه عملکردی خواهند داشت.

لذا با انجام تغییرات بر روی هندسه‌های پیشنهادی، با حفظ شمای اولیه اشکال به ویژه عرض پایین موج شکن، سطح مقطع در تمام نمونه ها برابر انتخاب شده و در نهایت با اتخاذ جرم مساوی، تمامی هندسه‌ها در این گروه از چگالی یکسانی برخوردار شده‌اند، در نتیجه‌ی این تغییرات، آبخور نمونه‌ها در شبیه‌سازی‌های گروه دوم دچار تغییر گردیده و عملاً در این بخش عملکرد نمونه‌ها در تفاوت هندسه‌ها با همراهی تغییرات آبخور مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۵ تغییرات ایجاد شده در هندسه‌ها و مشخصات جدید بیان شده اند.

سطح مقطع تمامی این نمونه‌ها ۳۸۴ سانتی‌مترمربع، جرم نمونه‌ها ۱۶/۳۲ کیلوگرم و چگالی تمامی نمونه‌ها ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و برابر با نمونه‌ی مبنا انتخاب شده است.

جدول ۵: هندسه‌های پیشنهادی برای شبیه سازی گروه دوم

شماره نمونه	نمونه مبنا ـ جهت مقایسه با نمونه آزمایشگاهی	نمونه شماره یک
هندسه نمونه		
مشخصات نمونه (آبخور)	D=8 Cm	D=10.75 Cm
شماره نمونه	نمونه شماره دو	نمونه شماره سه
هندسه نمونه		
مشخصات نمونه (آبخور)	D=12.62 Cm	D=14.09 Cm
شماره نمونه	نمونه شماره چهار	نمونه شماره پنج
هندسه نمونه		
مشخصات نمونه (آبخور)	D=14.49 Cm	D=13.83 Cm
شماره نمونه	نمونه شماره شش	نمونه شماره هفت
هندسه نمونه		
مشخصات نمونه (آبخور)	D=11.63 Cm	D=10.98 Cm

در تمامی نمونه‌ها عرض پایینی مقطع ۲۴ سانتیمتر و برابر نمونه مبنا بوده و تغییرات هندسی رخ داده در ارتفاع منجر به تغییر آبخور در نمونه‌ها گردیده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]

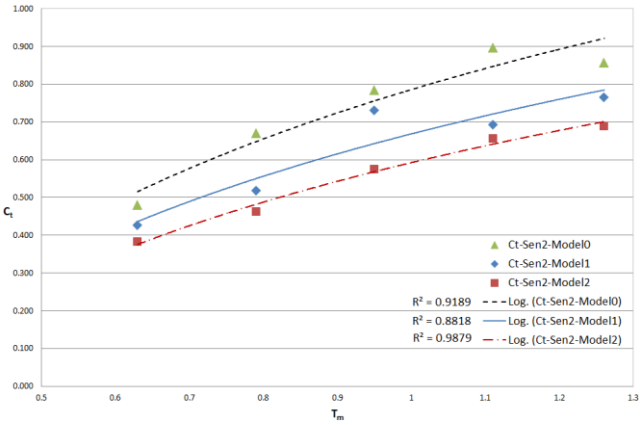
بنابراین در این گروه از شبیه سازی صرفه‌جویی در مصالح مورد نظر نبوده و تمرکز بر روی عملکرد و بهبود آن تحت اثر تغییر هندسه می‌باشد.

بررسی نمونه‌های پیشنهادی، همانند گروه اول در سه بخش انجام خواهد شد:

- نمونه‌های مبتنی بر هندسه ذوزنقه
- نمونه‌های مبتنی بر پانتون مستطیلی و ترکیب آن با مقاطع مخروطی که از آن کسر شده است.
- نمونه پانتون پله‌ای که جهت مقایسه با دو سری نمونه فوق ارائه شده است.

۵- ۱- نتایج بررسی صورت پذیرفته در گروه دوم

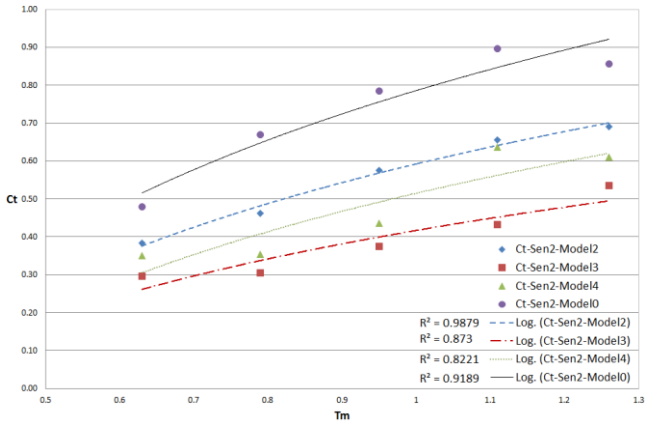
در این بخش علاوه بر ایجاد سکو در موج شکن ذوزنقه‌ای و مقایسه آن با نمونه مبنا در سطح و جرم ثابت، روند تغییرات ضریب عبور موج در اثر ایجاد تغییرات دیگر در هندسه ذوزنقه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مطابق شکل ۹ نمونه ذوزنقه‌ای در محدوده‌ی پریودهای مورد مطالعه نزدیک به ۱۴٪ عملکرد بهتری را نسبت به مدل مبنا از خود نشان می‌دهد که این بهبود عملکرد تلفیقی از تغییر هندسه و افزایش آبخور بوده است. همچنین با ایجاد سکو درهندسه مقطع، موج شکن شناور با افزایش آبخور جهت حفظ مقدار سطح مواجه شده و عملکرد نزدیک به ۱۱٪ درصد بهتر خواهد شد.



شکل ۹ : مقایسه عملکرد نمونه مبنا با نمونه های ۱ و ۲ در حالت سطح و جرم برابر

ایجاد تغییرات در شیب یال موج شکن ذوزنقه‌ای نمونه‌های سه و چهار را به وجود خواهد آورد. در نمونه‌های یک و دو با توجه به هندسه مورد نظر، شیب یال برابر ۷۴درجه بوده که نتایج آن با نمونه مبنا مقایسه شد، در ادامه نمونه شماره سه با شیب یال پایینی ۶۶ درجه و نمونه شماره چهار که با ترکیب مقطعی از دایره و یال موج شکن نمونه دو، شیبی معادل ۴۴ درجه را ایجاد نموده، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

نتایج این بررسی در نمودار شکل ۱۰ مشخص شده است که نمونه شماره سه نزدیک به ۲۹٪ نسبت به نمونه مبنا عملکرد بهتری در گذردهی امواج دارد و نمونه شماره چهار نیز دارای ۱۴٪ بهبود عملکرد در محدوده‌ی پریودهای مورد مطالعه می‌باشد. از دلایل راندمان پایین نمونه‌شماره چهار نسبت به نمونه شماره سه علیرغم آبخور تقریباً برابر، می‌توان به اختلاف شیب اشاره داشت.



شکل ۱۰ :تأثیرات شیب در عملکرد موج شکن‌ها در حالت سطح و جرم برابر

۵- ۲- تأثیر ترکیب سطح مقطع پانتون و مقاطع منحنی شکل

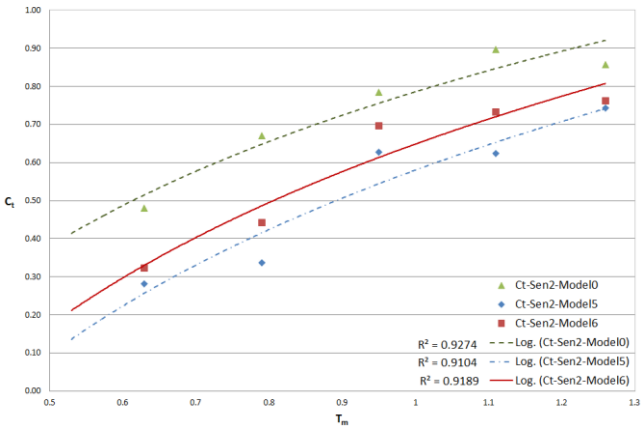
همانگونه که قبلاً اشاره شد این نمونه‌ها به عنوان ایده‌های اولیه‌ی این پژوهش مد نظر قرار گرفتند و در نهایت نمونه‌های پنج و شش با نمونه پانتون ساده مورد مقایسه واقع شد.

در شبیه‌سازی گروه دوم با توجه به درنظر گرفتن سطح و جرم برابر و هندسه‌ی خاص این دو نمونه، لازم است جهت دستیابی به مفروضات مسئله، آبخور این نمونه‌ها زیادتر شود به طوری که آبخور نمونه شماره پنج نزدیک ۱۴ سانتی‌متر و آبخور نمونه شش نزدیک ۱۲ سانتی‌متر به دست آمده که در مقایسه با نمونه‌های شبیه سازی اول به ترتیب ۷۵٪ و ۵۰٪ رشد داشته است.

در شکل ۱۱ نمودار مربوط به مقایسه عملکرد این دو نمونه در حالت سطح مقطع ثابت و جرم ثابت با نمونه مبنا مشاهده می‌شود. همانگونه که در نمودار قابل مشاهده است کارایی نمونه شماره پنج ـ با آبخور بیشتر در سطح و جرم برابر و با ترکیب مقطعی از دایره به شعاع ۲۹/۶۳ سانتی‌متر ـ در کاهش ضریب عبور موج نسبت به نمونه شماره شش ـ که حاصل ترکیب پانتون و دایره به شعاع ۱۵/۲۲ سانتی‌متر می‌باشد ـ نزدیک به ۱۳٪ است.

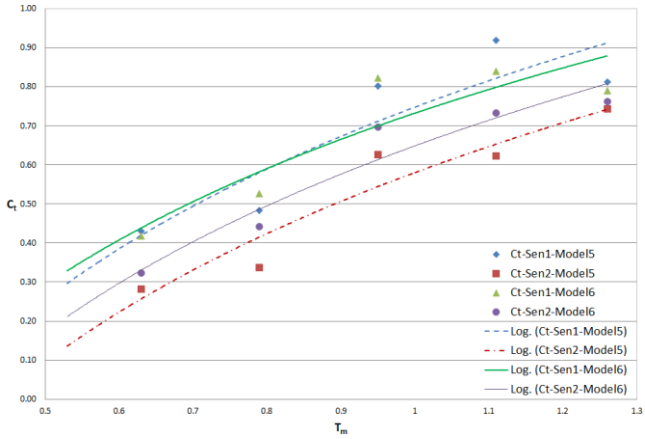
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]



شکل ۱۱ : مقایسه موج شکن‌های با مقطع دارای انحناء با نمونه مبنا در شبیه‌سازی گروه دوم

در ادامه و در شکل ۱۲ مقایسه‌ای بین عملکرد این دو نمونه در هر دو شبیه‌سازی بعمل آمده است.



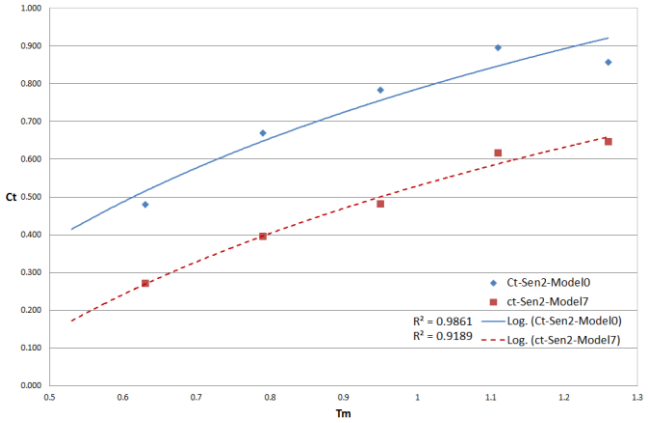
شکل ۱۲ : مقایسه عملکرد نمونه‌های ۵ و ۶ در هر دو شبیه‌سازی

بطور کاملاً محسوسی نتایج نشان دهنده ی تأثیر مستقیم جرم و آبخور بیشتر در شبیه سازی های گروه دوم نسبت به گروه اول می باشد که تأکیدی بر تحقیقات گذشته در خصوص مشخصات عمومی موج شکن هاست.

۵- ۳- مقایسه نمونه پانتون پله‌ای با سایر نمونه‌های کارآمد و نمونه مبنا

همانگونه که در گروه اول موج شکن پله‌ای با آبخور هشت سانتیمتر با نمونه مبنا مورد مقایسه قرار گرفت این‌بار نیز نمونه پله‌ای با سطح مقطع، جرم و عرض پایینی برابر با نمونه مبنا مورد مقایسه قرار گرفته است. در این مرحله آبخور موج شکن پله‌ای نزدیک به ۱۱ سانتی‌متر محاسبه شده که ۳۷/۵٪ بیشتر از نمونه شماره هفت در شبیه‌سازی گروه اول است.

شکل ۱۳ نمودار حاصل از مقایسه عملکرد این دو نمونه را نشان می‌دهد. در پریودهای مورد مطالعه، عملکرد نمونه شماره هفت نزدیک به ۳۵/۵٪ بهتر از نمونه مبنا می‌باشد.

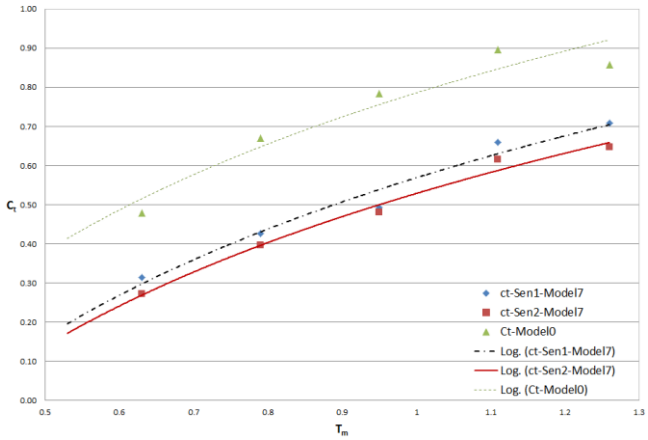


شکل ۱۳ : مقایسه عملکرد موج شکن پله ای و مدل مبنا در شبیه‌سازی گروه دوم

با مقایسه عملکرد موج شکن پله‌ای در شبیـــه‌سازی گروه اول و دوم در شکـل ۱۴ مشـــاهده می‌شود عملکرد موج شکن پله‌ای در گروه دوم نزدیک ۷٪ بهتر از گروه اول است.

با توجه به اینکه در گروه دوم آبخور بیشتری (۳۷/۵٪) وجود دارد یکی از دلایل این اختلافِ کم در عملکرد موج‌شکن‌ها، چگالی بیشتر نمونه در گروه اول می‌باشد (۳۴/۵٪).

در نهایت همانند گروه اول نمونه شماره هفت با نمونه ذوزنقه‌ای شماره سه که کاراترین نمونه در قسمت اثرات تغییر شیب در عملکرد موج شکن‌ها بوده مورد مقایسه قرار گرفته است.

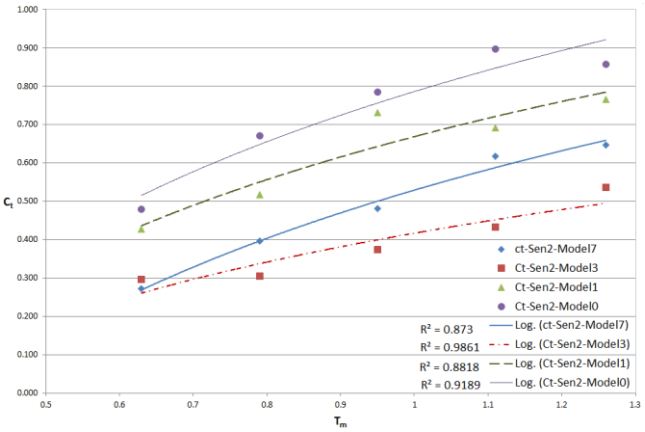


شکل ۱۴ : مقایسه عملکرد موج شکن پله‌ای و مبنا در هر دو شبیه سازی

سرانجام همانگونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود در این مرحله و در پریودهای بالاتر عملکرد نمونه شماره سه بهتر از موج شکن پله-ای بوده و در کل بطور میانگین نزدیک به ۱۶/۵٪ کارایی این نمونه بهتر از نمونه پله‌ای در این مرحله است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]



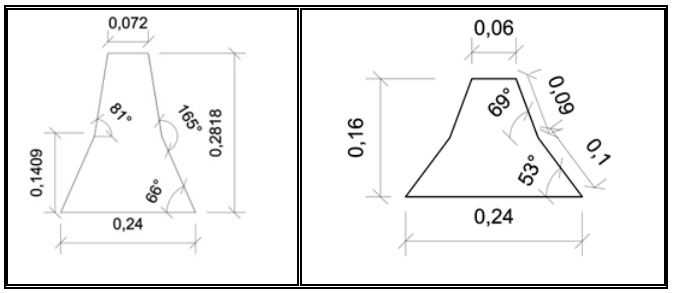
شکل ۱۵ : مقایسه مدل پله ای و ذوزنقه ای با مدل مبنا در شبیه سازی گروه دوم

۶- نتیجه گیری

تغییرات هندسه موج شکن شناور تأثیرات عمده‌ای در عملکرد هیدرودینامیکی آنها خواهد داشت در نتیجه انتخاب یک هندسه مناسب که ضمن حفظ آبخور، درکنار افزایش راندمان عملکرد موج شکن، سبب صرفه‌جویی در استفاده از مصالح نیز شود، حائز اهمیت است. با توجه به اینکه عمده موج شکن‌های شناور از جنس بتن آرمه توخالی که با مصالح سبک پر شده‌اند ، ساخته شده و در شرایط محیطی خورنده دریا به کار گرفته می‌شوند، بدیهی است کم شدن مصالح بکار رفته علاوه بر صرفه اقتصادی در تولید موج شکن، اثرات زیست محیطی مثبتی نیز به همراه خواهد داشت.

در تحقیق حاضر و پس از بررسی نمونه‌های پیشنهادی در دو گروه شبیه سازی، نمونه شماره سه از هر دو گروه که با ایجاد شیب بیشتر در یال ذوزنقه‌ی نمونه شماره دو و حذف پله، شکل گرفته است به عنوان گزینه مناسب و مقرون به صرفه مطرح گردید، که در جدول ۶ این نمونه‌ها مشخص شده‌اند.

جدول ۶: نمونه‌های پیشنهادی تحقیق حاضر



نمونه شماره سه در گروه اول نزدیک به ۵۰ درصد بهبود عملکرد و در گروه دوم نزدیک به ۳۰ درصد بهبود عملکرد نسبت به نمونه مبنا را دارا هستند. همچنین از مقایسه نتایج حاصله می‌توان دریافت که تأثیر تغییرات عمق آبخور نسبی در افزایش راندمان موج شکن شناور بیشتر از تأثیرات تغییر جرم است.

همچنین نمونه‌های پله‌ای که طی پژوهش‌های پیش‌تر نیز استفاده از آنها توصیه شده، به عنوان نمونه‌هایی با کارایی مناسب توصیه می‌شود.

در عین حال این نمونه‌ها مبنایی برای مقایسه عملکرد هندسه‌های پیشنهادی بوده که در نهایت نمونه شماره سه به عنوان هندسه‌ای با کارایی مناسب در محدوده پریودهای این تحقیق معرفی شده است.

۷- مراجع

1. Tsinker, G.P., (1995), *Marine Structures Engineering: Specialized Application*, Chapman & Hall.
2. Sutko, A., and Hayden, A.L., (1974), *The effect of surge, heave and pitch on the performance of a floating breakwater*, Proceeding of Floating Breakwater Conference, Rhode Island, pp. 41-53.
3. Carver, R.D.,(1979), *Floating Breakwater Wave-Attenuation Tests for East Bay Marina, Olympia Harbor*, Washington, Hydraulic Model Investigation. DTIC Document.
4. McCartney, B.L., (1985), *Floating breakwater design*, J. Waterway, port, coastal and Ocean Enging, ASCE, 111(2):304–18.
5.Kee, S.T., (2005), *Performance evaluation of submerged dual buoy/porous-membrane breakwaters*, KSCE J Civil Engineeing. Springer, 9(4):279–87.
6. Koutandos, E.V, Karambas, T.V, Koutitas, C.G., (2004), *Floating breakwater response to waves action using a Boussinesq model coupled with a 2DV elliptic solver*, J Waterway, port, coastal and Ocean Engineering. ASCE, 130(5):243–55.
7. Dong, G.H, Zheng Y.N, Li, Y.C., Teng, B., Guan, C.T. Lin, D.F., (2008), *Experimentes on wave transmission coefficients of floating breakwater*, Ocean Engineeing, Elesvier, 35(8):931–8.
8. Ozeren, Y., (2009), *Experimental and Numerical Investigations of Floating Breakwater Performance*, The University of Mississippi, USA.
9. Wang, H.Y, Sun, Z.C., (2010), *Experimental study of a porous floating breakwater*, Ocean Engineering, Elsevier, 37(5):520–7.
10. Peña, E, Ferreras, J and Sanchez-Tembleque, F., (2011), *Experimental study on wave transmission coefficient, mooring lines and module connector forces with different designs of floating breakwaters*, Ocean Engineering, Elsevier, 38(10):1150–60.
11. Teh, H.M, Venugopal, V. and Bruce T., (2012), *Hydrodynamic Characteristics of a Free-Surface Semicircular Breakwater Exposed to Irregular Waves*, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. ASCE, 138(2):149–63.
12. Mahmuddin, F and Kashiwagi M., (2014), *Performance Evaluation of an Optimized Floating Breakwater in Oblique Waves with a Higher-Order*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]

Boundary Element Method, Makara Journal of Technology, 18(1):41–50.

13. Taheri, O., Kolahdoozan, M. and Bali, M., (2014), *Experimental evaluation of energy transmission coefficient for step floating breakwaters*, Journal of Marine Engineering, Vol. 10, No. 19, pp. 47-58, (In Persian).

14. Kazemi, H., Soleimani, A. and Qarahjanlou, S., (2014), *Evalution of cross-shape of floating breakwaters in their hydrodynamic performances using numerical modelling*, Proceedings of 16th Marine Industries Conference, Bandar Abbas, (In Persian).

15. Rezaei Mazik, A., Sanaiei, M., Najafi Jailani, A., Shafeeifar, M. and Panahi, R., (2011), *Numerical Study of Transmission Coefficient in the Pontoon and Catamaran Floating Breakwaters*, Proceedings of 13th Marine Industries Conference, Kish Island, (In Persian).

16. Forouzandeh, N., Hakimzadeh, H., Aghtouman, P. and Karami Khaniki, A., (2011), *Experimental Investigation on Effect of Draught, Mass and Sheet Height in Pontoon Floating Sheet Breakwaters on Transmission and Reflection Coefficients Subject to Irregular Waves*, Journal of Marine Engineering, Volume 7, No. 13, pp. 17-28, (in Persian).

17. Hasselmann, K, Barnett T.P, Bouws, E, Carlson, H, Cartwright, D.E, Enke, K, et al., (1973), *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*, Deutsches Hydrographisches Institute, Hamburg.

18. Bergdahl, L., (2009), *Comparison of measured shallow-water wave spectra with theoretical spectra*, Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, pp. 100-105.

19. Anonymus, A., (1984), Shore Protection Manual, Volumes 1 and 2, 1, USACE.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.3.0]