

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

علی کبیری<sup>۱</sup>، حبیب حکیمزاده<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد سازه های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند؛ a\_kabiri@sut.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، نویسنده مسؤول مقاله؛ hakimzadeh@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۸</p> <p>تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۸</p>	<p>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 دوزنقه و ایجاد انحناء در مقاطع مختلف هستند.</p> <p>در ابتدا صحت سنجی نتایج عددی مدل مینا 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 قرار گرفتند. سرانجام در محدوده پریودهای ذکر شده، هندسه ای با بهترین کارایی و هزینه کمتر برای پروژه های مرتبط پیشنهاد شده است.</p>
<p>کلمات کلیدی:</p> <p>موج شکن شناور</p> <p>ضریب عبور موج</p> <p>شبیه سازی عددی</p> <p>شکل هندسی</p>	

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

Ali Kabiri<sup>1</sup>, Habib Hakimzadeh<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. in Marine Structures, Sahand University of Technology

<sup>2</sup> 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.

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 نسبتاً 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 شکن های شناور در استهلاک امواج می باشد. موج شکن های شناور مشابه سایر موج شکن ها، انرژی موج را با کاهش ارتفاع موج تابشی، کاهش داده و باعث حفاظت محدوده سمت ساحل می شوند. در برخورد موج با سازه، بخشی از موج بازتاب شده، قسمتی در اثر آشفستگی و شکست مستهلک شده و به انواع دیگری از انرژی تبدیل می شود و بخشی نیز از سازه عبور می کند. 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 تعیین کننده عملکرد و راندمان سازه می باشد. 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]. کارور 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 دابل را با استفاده از روش عددی محیط چند منظوره

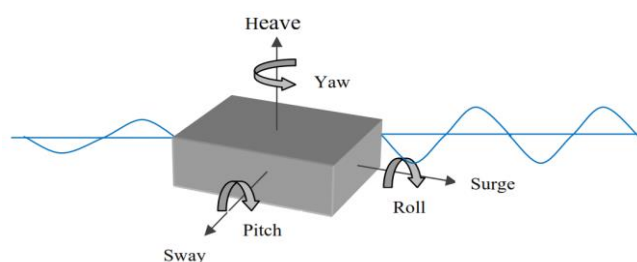
المان مرزی مورد مطالعه قرارداد. وی در پژوهش اول نتایج خوبی را در زمینه سختی و نحوه اتصال مهارها بدست آورد و در پژوهش بعدی بدین نتیجه رسید که بهترین عملکرد موج شکن شناور در فرکانس های بالای موج می باشد [۵]. کاتاندوس و همکاران در سال ۲۰۰۵ میلادی به مطالعه آزمایشگاهی عملکرد موج شکن های شناور جعبه ای تحت 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]. اوزرن 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، پنا 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  $\pi$  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

می‌گردد. اندازه‌گیری 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 می‌کنند. 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:

$$C_t = H_t / H_i \quad (1)$$

## ۲-۲- حرکات موج شکنهای شناور

سازه موج شکن شناور در هنگام مقابله با موج با حرکات پیچیده شامل شش درجه آزادی واکنش نشان می‌دهد. شش درجه حرکت به صورت انتقال شامل Surge, Sway, Heave و دوران شامل Roll, Yaw, Pitch تعریف می‌شوند 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 تماماً 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, و Sway است (حالت دو بعدی) [۱۵]. حرکات موج شکن به ارتفاع و پریود

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  $\pi$  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  $\pi$  شکل، علاوه بر کاهش مقدار مصالح مورد نیاز برای ساخت موج شکن، تأثیر قابل ملاحظه ای بر عملکرد هیدرودینامیکی آن می‌گذارد. همچنین با افزایش گام پله ها عملکرد موج شکن های شناور پله ای بهبود می‌یابد. به علاوه مقایسه عملکرد هیدرودینامیکی موج شکن های شناور دو پله ای و سه پله ای نشان می‌دهد 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 می‌یابد.

همچنین در سال ۱۳۹۳ کاظمی و همکاران با استفاده از نرم افزار انسیس آکوا 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 مومنوم 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 دوزنقه 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.

## ۲-۲- موج شکنهای شناور

### ۲-۱- هیدرودینامیک موج شکنهای شناور

با نگرستن به سطح دریا، طبیعت سه بعدی و نامنظم بودن امواج آن به چشم می‌خورد. سطح آب با زمان تغییر می‌کند 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

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، جونزوپ 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 ۰.۶۳ تا ۱/۲۶ ثانیه در نظر گرفته شده اند [۱۶].

جهت ایجاد طیف موج جونزوپ در نرم افزار باید طیف موج ورودی، در شرایط مرزی بالا دست کانال شبیه سازی شده اعمال شود. با توجه به اینکه انواع مدل های موج در نرم افزار Flow\_3D قابل اعمال هستند؛ از اینرو برای ایجاد شرایط موج جونزوپ در نرم افزار، طول بادخور، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و فاکتور تقویت قله موج (Y) - که از مشخصه های موج جونزوپ هستند و بطور متوسط برابر ۳/۳ در نظر گرفته می شود - 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 جونزوپ در نرم افزار که بدان اشاره شد، تبدیل شوند. طیف موج جونزوپ توسط هاسلمن و همکاران طی گزارشی در سال ۱۹۷۳ ارائه شد [۱۷] و روابطی را بین دوره تناوب و ثابت تعادلی فیلیپ ( $\alpha$ ) 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

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 منتهی 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 در واقع بیان ریاضی مدل های عددی هستند. در این تحقیق از معادلات کامل پیوستگی و مومنوم 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 مقطع 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، مومنوم 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

حقیقت باشد که در تئوری ایری سیال به صورت ویسکوز در نظر گرفته نمی شود در حالیکه در شبیه سازی عددی سیال به صورت ویسکوز در نظر 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

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

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

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

که در آن H<sub>s</sub> ارتفاع موج مشخصه و L<sub>p</sub> طول موج پیک هستند. همچنین در راهنمای حفاظت ساحلی روابطی بصورت مستقل برای ارتفاع موج متوسط (H<sub>m</sub>) و دوره تناوب متوسط (T<sub>m</sub>) بر حسب طول بادخور (F) و سرعت مبنای باد (U<sub>A</sub>) ارائه شده اند [۱۹]:

$$H_m = 1.616 \times 10^2 U_A F^{1/2} \quad (3)$$

$$T_m = 6.238 \times 10^{-1} (U_A F)^{1/3} \quad (4)$$

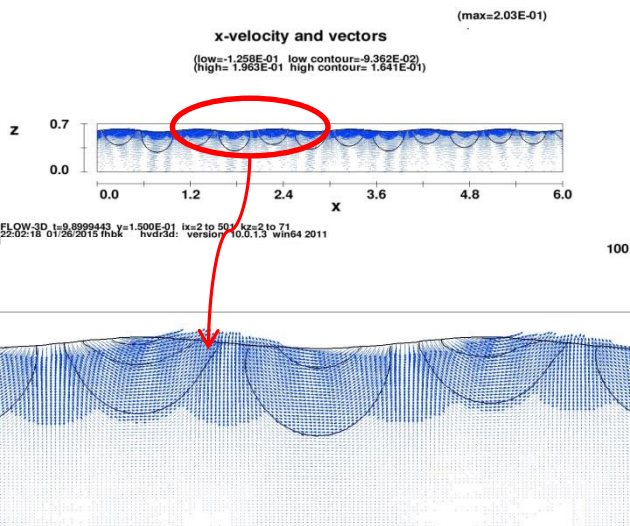
جهت دستیابی به نتایج مناسب برای ورودی نرم افزار از هر دو روش محاسبات استفاده شد. به دلیل تجربی بودن روابط بالا، نتایج حاصله اندکی با هم تفاوت داشتند و در نهایت از روش دوم مقادیر محاسبه و برای ورودی موج نرم افزار مورد استفاده قرار گرفت. همچنین با توجه به در نظر گرفتن زوال موج در لایه مرزی و ارتفاع موج قرائت شده در آزمایشگاه، مقدار ارتفاع موج تابشی در ابتدای کانال (H<sub>i</sub>) 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 ۰/۲۰۶ متر و عمق آب ۰/۶ متر اختیار گردید.

در شکل ۲ بردارهای سرعت جریان ناشی از موج در صفحه ی قائم 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 کمی 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 کمی 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



شکل ۲- نتایج شبیه سازی گرافیکی موج خطی در نرم افزار Flow\_3D

جدول ۲. 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	۴/۳٪
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 شاخص های 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.

$$MPAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - S_i}{O_i} \right| \times 100 \quad (5)$$

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

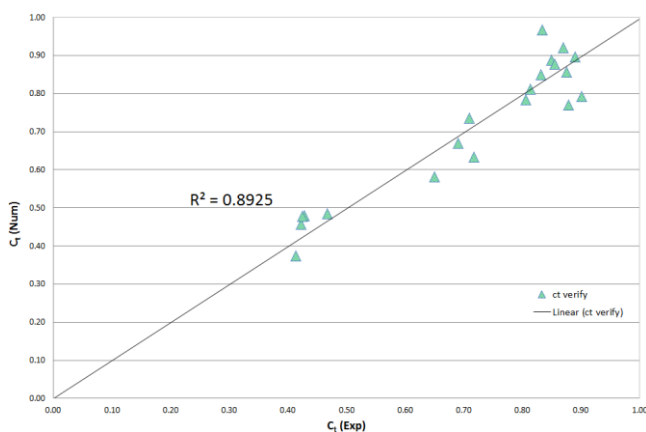
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (6)$$

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 شبیه سازی 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. همان طور که از روی شکل ملاحظه می شود مدل عددی با مقدار  $R^2$  برابر ۰/۸۹ از دقت نسبتاً خوبی برای شبیه سازی 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. همان گونه که مشاهده می شود با توجه تحقیقات عددی گذشته، نتایج عددی در محدوده قابل قبول قرار دارند و مدل عددی ساخته شده قابلیت توسعه با سایر هندسه های موج شکن را داراست.

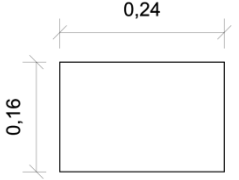
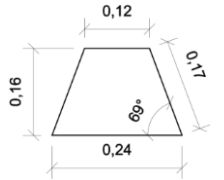
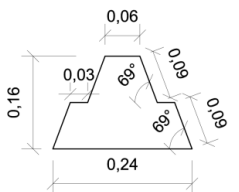
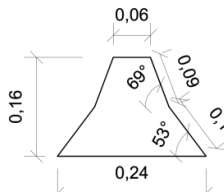
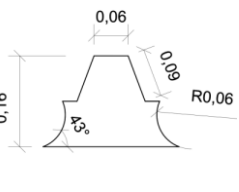
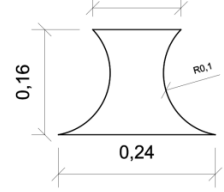
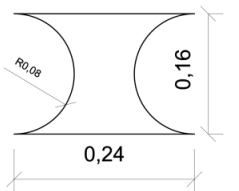
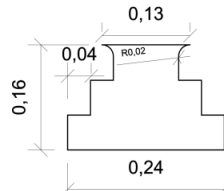
همانگونه که پیش از این بیان گردید تولید موج جونزوپ در بخش بالادست فلوم مدل موج شکن شناور صورت گرفته است و تفکیک ارتفاع امواج تابشی و انعکاسی مستخرج از نرم افزار  $Flow\_3D$ ، توسط نرم افزار ارائه شده بوسیله دپارتمان مهندسی عمران دانشگاه آلبورگ دانمارک (Wave Lab 3.603)، انجام گرفته است. در انتهای فلوم نیز جهت ممانعت از بازتاب موج، سطح شیب داری تعبیه شده است.



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

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 موج شکن شناور و مشخصات فیزیکی آنها

شماره مدل	مدل مینا - جهت مقایسه با مدل آزمایشگاهی	مدل شماره یک
هندسه مدل		
مشخصات مدل	$M=۱۶/۳۲ \text{ Kg}$ $\rho=۵۰۰ \text{ Kg/m}^3$	$M=۱۴/۲۸ \text{ Kg}$ $\rho=۵۸۳/۵ \text{ Kg/m}^3$
شماره مدل	مدل شماره دو	مدل شماره سه
هندسه مدل		
مشخصات مدل	$M=۱۴/۲۸ \text{ Kg}$ $\rho=۷۰۰ \text{ Kg/m}^3$	$M=۱۲/۲۴ \text{ Kg}$ $\rho=۶۶۷ \text{ Kg/m}^3$
شماره مدل	مدل شماره چهار	مدل شماره پنج
هندسه مدل		
مشخصات مدل	$M=۱۲/۰۷ \text{ Kg}$ $\rho=۶۶۴ \text{ Kg/m}^3$	$M=۸/۶۷ \text{ Kg}$ $\rho=۵۷۳ \text{ Kg/m}^3$
شماره مدل	مدل شماره شش	مدل شماره هفت
هندسه مدل		
مشخصات مدل	$M=۷/۷۸ \text{ Kg}$ $\rho=۵۰۰ \text{ Kg/m}^3$	$M=۱۴/۷۱ \text{ Kg}$ $\rho=۶۷۳ \text{ Kg/m}^3$

#### ۴- هندسه های پیشنهادی برای گروه اول با آبخور ثابت

با توجه به گستره عظیم اشکال هندسی، تعداد زیادی از هندسه های قابل طرح در نرم افزارهای سه بعدی می توانست پیشنهاد شود. در عین حال جهت دستیابی به یک روند منطقی در پیشنهاد اشکال هندسی، شکل های 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 گزینه ها مطابق نمونه آبخور نمونه ها ثابت و برابر هشت سانتی متر در نظر گرفته شده است، در نتیجه سطح مقطع و حجم نمونه ها متفاوت خواهد بود. جهت تأمین آبخور مورد نظر در هندسه های متفاوت، جرم 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 دوزنقه ای هستند، یک شکل هندسی ترکیبی (ترکیبی از مثلث و مستطیل)، به عنوان ایده ی اولیه انتخاب دوزنقه با ابعاد نزدیک به پانتون آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت (مدل شماره ۱). پس از آن از طریق تحلیل های عددی ارزیابی عملکرد مدل دوزنقه 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 پله ای یک نمونه موج شکن پله ای که ابعاد آن از نظر طول و عرض و ارتفاع متناسب با سایر نمونه های پیشنهادی بود، برای مقایسه با مدل های پیشنهادی در نرم افزار شبیه سازی شد. در این گروه از شبیه سازی ها 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 نمونه های پیشنهاد شده جهت شبیه سازی با آبخور ثابت در جدول ۳ آورده شده است.

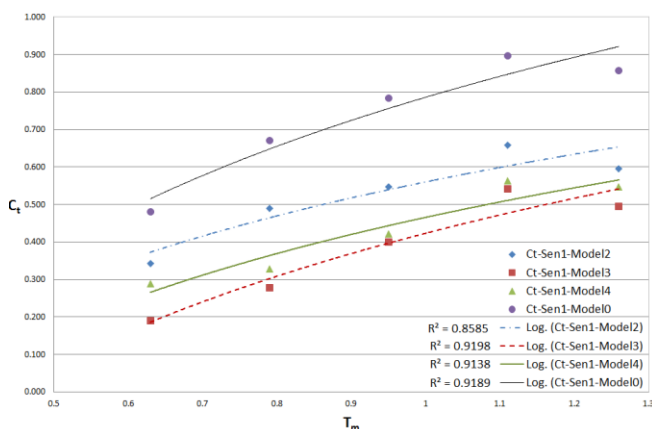
در ادامه جهت انجام شبیه سازی عددی در نرم افزار با توجه به زمان بر بودن محاسبات از هر کدام از دوره های تناوب آزمایشات یک ارتفاع موج انتخاب شد و در شبیه سازی هندسه های مختلف

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 دوزنقه ای با شیب های متفاوت در قسمت آبخور، تأثیر تغییر شیب در هندسه مقطع موج شکن شناور که هندسه پایه ی آن بر مبنای دوزنقه 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 دوزنقه عملکرد بهتری نسبت به نمونه شماره دو دارد، اما عملکرد نمونه شماره چهار که با ایجاد یک هندسه ی ترکیبی، از تقاطع دوزنقه و مقطع کمانی شکل گرفته - تا ضمن کاهش شیب امکان بررسی انحناء نیز وجود داشته باشد - 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.



شکل ۵: 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

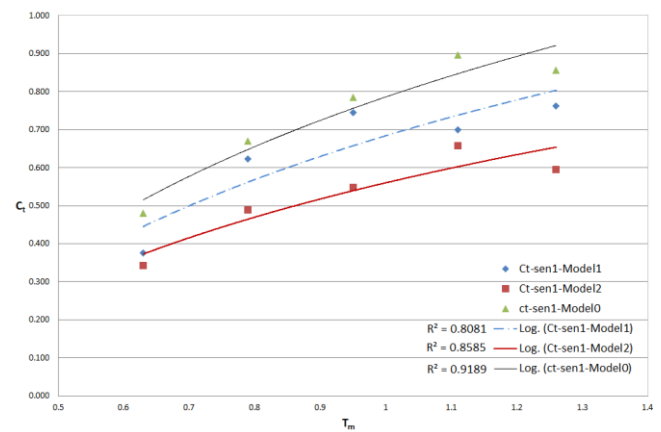
بر این اساس موج های انتخابی برای انجام شبیه سازی مطابق جدول ۴ ارائه شده اند که ارتفاع موج تابشی ( $H_i$ ) قبل از موج شکن در آن مشخص شده است.

جدول ۴: مشخصات آزمایشگاهی انتخابی جهت شبیه سازی هندسه های 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

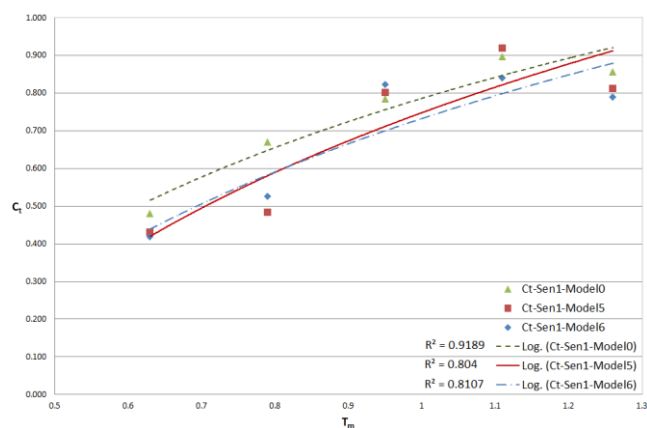
#### ۴-۱- نتایج بررسی صورت پذیرفته در گروه اول

نمونه مبنا و نمونه شماره یک در ابتدا با هم مقایسه شدند و در نهایت مشخص شد عملکرد موج شکن دوزنقه‌ای 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

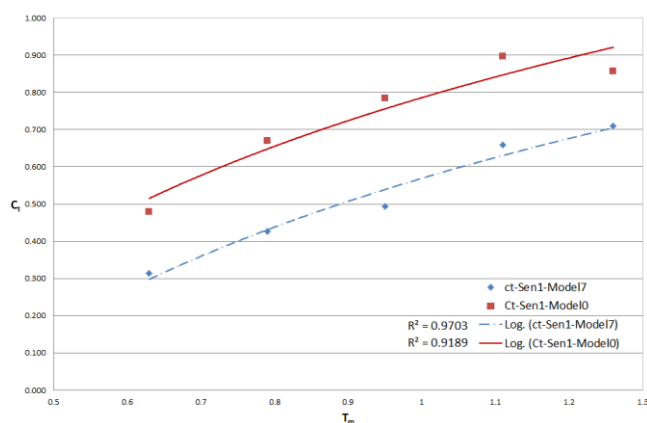


شکل ۶: مقایسه ضریب انتقال در مدل های شماره ۵ و ۶ با مدل مبنا

#### 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 پیرودهای 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 پیرودهای مورد بررسی نزدیک به ۳۰٪ بیشتر از موج شکن با مقطع مستطیلی ساده می‌باشد.



شکل ۷: مقایسه عملکرد موج شکن پله‌ای 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 دوزنقه‌ای و

خود نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نمونه شماره دو از هر دو نمونه دیگر سنگین‌تر هست و انتظار می‌رفت که عملکرد بهتری در مقایسه با نمونه‌های شماره ۳ و ۴ داشته باشد اما با توجه به نتایج حاصله نقش کاهش شیب در بهبود عملکرد این نوع موج شکن‌ها 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 دوزنقه 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

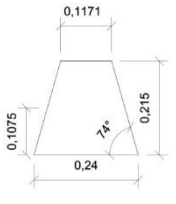
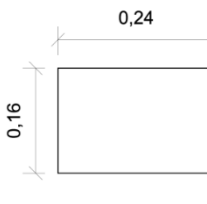
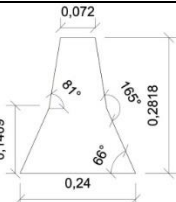
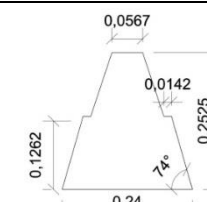
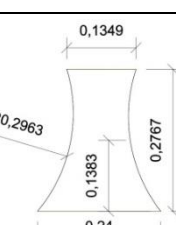
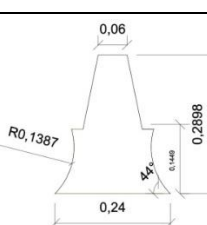
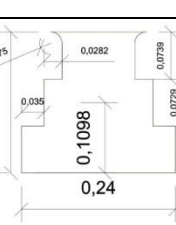
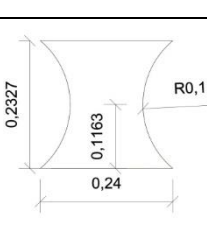
نمونه‌های شماره پنج و شش به عنوان دو نمونه اولیه در این پژوهش مطرح گردید تا عملکرد آنها با موج شکن پانتونی مقایسه شود. در مورد نمونه شماره پنج ایده اولیه از شکل دیوارهای ساحلی الهام گرفته شده است. در نهایت با ساده سازی انجام گرفته مقطعی که توسط قطاعی از دایره با شعاع ۱۰ سانتی‌متر روی شکل پانتون مستطیلی 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 می‌افتد 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 پیرودها امواج کم می‌باشد توصیه می‌شود.

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

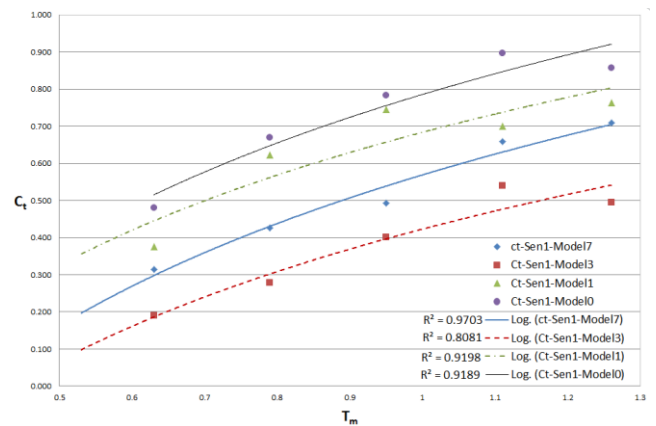
مطابق نمودارهای رسم شده، نمونه پیشنهادی شماره پنج قابلیت استفاده در مناطقی با پیرودها کم را داراست و در پیرودهای بالای یک ثانیه عملکرد نمونه شش بهتر است. از اینرو، در صورت عدم وجود مشکل برای ساخت و تولید این شکل خاص از موج شکن، به علت صرفه اقتصادی در مصرف مصالح، جایگزین مناسبی برای موج شکن پانتونی مستطیلی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

جدول ۵: هندسه‌های پیشنهادی برای شبیه سازی گروه دوم

شماره نمونه	نمونه مبنا - جهت مقایسه با نمونه آزمایشگاهی	شماره نمونه
شماره یک	 <p>D=10.75 Cm</p>	 <p>D=8 Cm</p>
شماره سه	 <p>D=14.09 Cm</p>	 <p>D=12.62 Cm</p>
شماره پنج	 <p>D=13.83 Cm</p>	 <p>D=14.49 Cm</p>
شماره هفت	 <p>D=10.98 Cm</p>	 <p>D=11.63 Cm</p>

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.

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 دوزنقه‌ای با مدل مبنا

مطابق شکل، راندمان موج شکن نمونه هفت از موج شکن دوزنقه‌ای 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 دوزنقه 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- هندسه‌های پیشنهادی برای گروه دوم با جرم ثابت

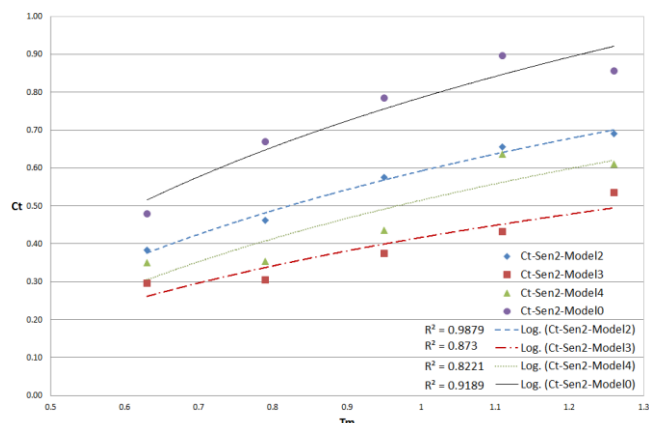
با توجه به انجام شبیه سازی گروه اول این فرضیه شکل گرفت که هندسه‌های متفاوت با سطح مقطع و جرم یکسان چه عملکردی خواهند داشت.

لذا با انجام تغییرات بر روی هندسه‌های پیشنهادی، با حفظ شمای اولیه اشکال به ویژه عرض پایین موج شکن، سطح مقطع در تمام نمونه‌ها 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 شده‌اند.

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.

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 مینا عملکرد بهتری در گذردهی امواج دارد و نمونه شماره چهار نیز دارای ۱۴٪ بهبود عملکرد در محدوده‌ی پیوندهای مورد مطالعه می‌باشد. از دلایل راندمان پایین نمونه شماره 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 در نظر گرفتن سطح و جرم برابر و هندسه‌ی خاص این دو نمونه، لازم است جهت دستیابی به مفروضات مسئله، آبخور این نمونه‌ها زیاده‌تر 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 مینا مشاهده می‌شود. همانگونه که در نمودار قابل مشاهده است کارایی نمونه شماره پنج - با آبخور بیشتر در سطح و جرم برابر و با ترکیب مقطعی از دایره به شعاع ۲۹/۶۳ سانتی‌متر - در کاهش ضریب عبور موج نسبت به نمونه شماره شش - که حاصل ترکیب پانتون و دایره به شعاع ۱۵/۲۲ سانتی‌متر می‌باشد - نزدیک به ۱۳٪ است.

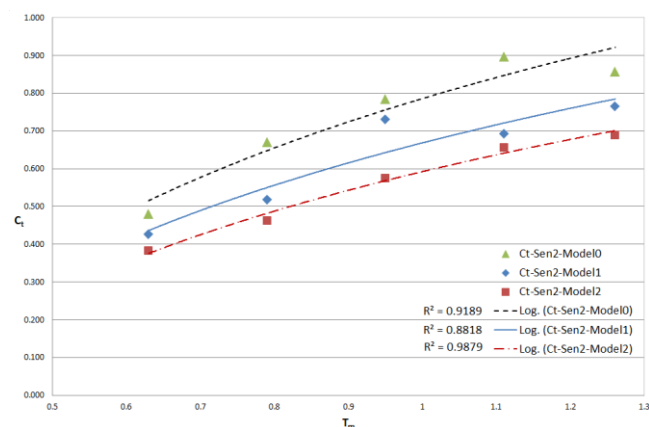
بنابراین در این گروه از شبیه‌سازی صرفه‌جویی در مصالح مورد نظر نبوده و تمرکز بر روی عملکرد و بهبود آن تحت اثر تغییر هندسه می‌باشد.

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

- نمونه‌های مبتنی بر هندسه دوزنقه
- 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

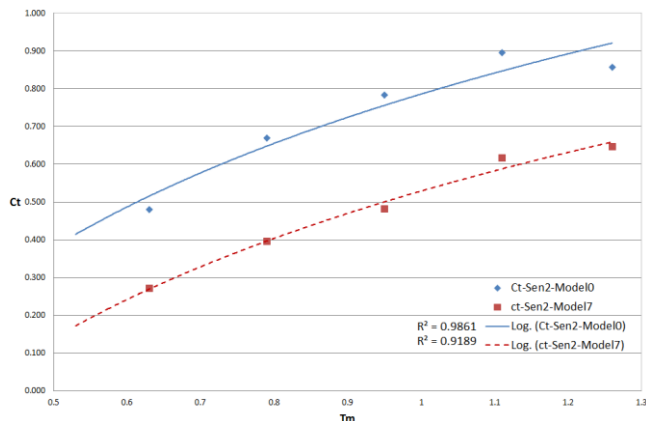
در این بخش علاوه بر ایجاد سکو در موج شکن دوزنقه‌ای و مقایسه آن با نمونه مینا در سطح و جرم ثابت، روند تغییرات ضریب عبور موج در اثر ایجاد تغییرات دیگر در هندسه دوزنقه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مطابق شکل ۹ نمونه دوزنقه‌ای در محدوده‌ی پیوندهای مورد مطالعه نزدیک به ۱۴٪ عملکرد بهتری را نسبت به مدل مینا از خود نشان می‌دهد که این بهبود عملکرد تلفیقی از تغییر هندسه و افزایش آبخور بوده است. همچنین با ایجاد سکو در هندسه 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 مینا با نمونه‌های ۱ و ۲ در حالت سطح و جرم برابر

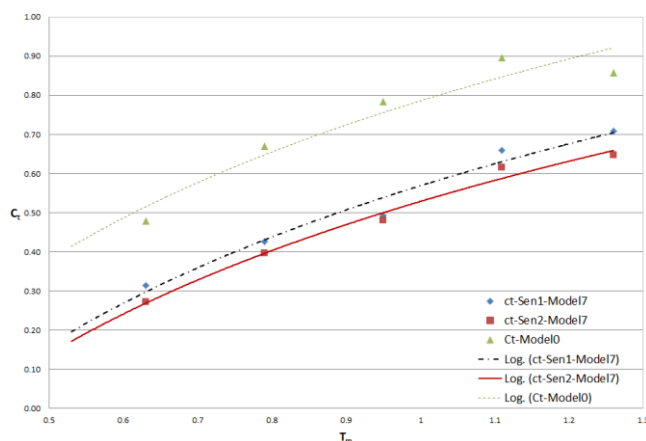
ایجاد تغییرات در شیب یال موج شکن دوزنقه‌ای نمونه‌های سه و چهار را به وجود خواهد آورد. در نمونه‌های یک و دو با توجه به هندسه مورد نظر، شیب یال برابر ۷۴ درجه بوده که نتایج آن با نمونه مینا مقایسه شد، در ادامه نمونه شماره سه با شیب یال پایینی ۶۶ درجه و نمونه شماره چهار که با ترکیب مقطعی از دایره

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.

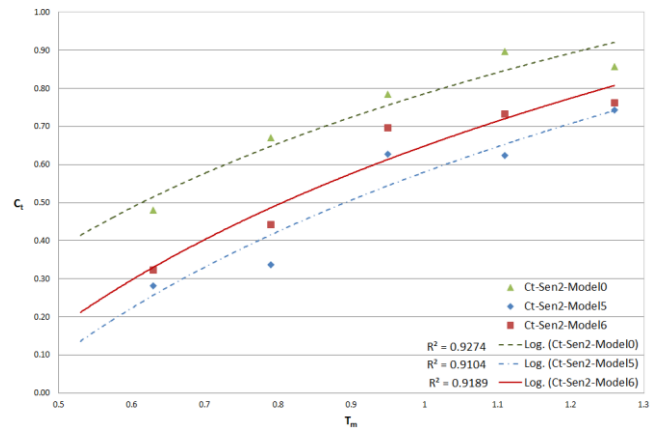


شکل ۱۳: مقایسه عملکرد موج شکن پله‌ای و مدل مبنا در شبیه‌سازی گروه دوم

با مقایسه عملکرد موج شکن پله‌ای در شبیه‌سازی گروه اول و دوم در شکل ۱۴ مشاهده 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 اختلاف کم در عملکرد موج‌شکن‌ها، چگالی بیشتر نمونه در گروه اول می‌باشد (۳۴/۵٪). در نهایت همانند گروه اول نمونه شماره هفت با نمونه دوزنقه‌ای شماره سه که کاراترین نمونه در قسمت اثرات تغییر شیب در عملکرد موج شکن‌ها بوده مورد مقایسه قرار گرفته است.

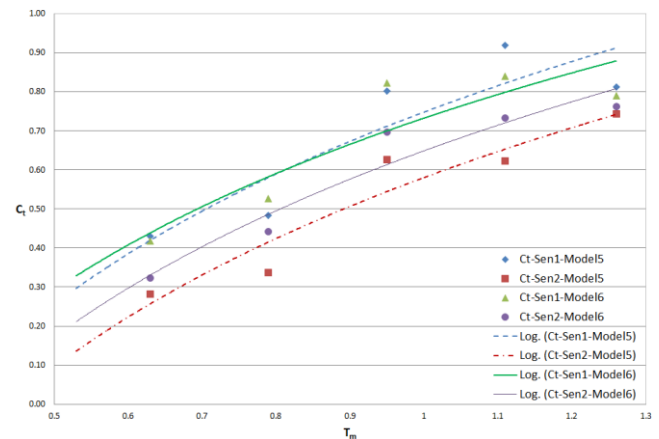


شکل ۱۴: مقایسه عملکرد موج شکن پله‌ای و مبنا در هر دو شبیه‌سازی سرانجام همانگونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود در این مرحله و در پریودهای بالاتر عملکرد نمونه شماره سه بهتر از موج شکن پله‌ای بوده و در کل بطور میانگین نزدیک به ۱۶/۵٪ کارایی این نمونه بهتر از نمونه پله‌ای در این مرحله است.



شکل ۱۱: مقایسه موج شکن‌های با مقطع دارای انحنا 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

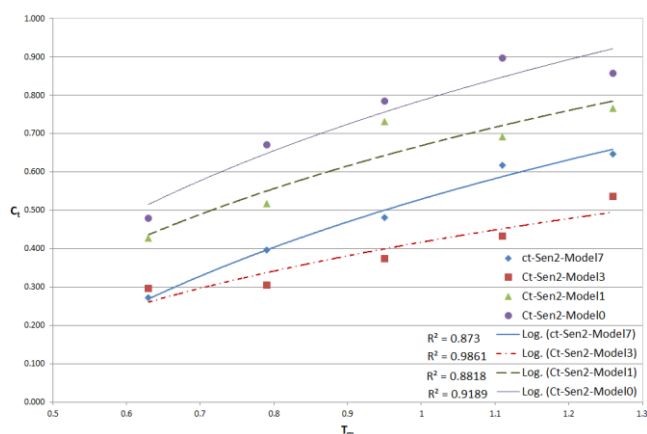
همانگونه که در گروه اول موج شکن پله‌ای با آبخور هشت سانتیمتر با نمونه مبنا مورد مقایسه قرار گرفت این بار نیز نمونه پله‌ای با سطح مقطع، جرم و عرض پایینی برابر با نمونه مبنا مورد مقایسه قرار گرفته است. در این مرحله آبخور موج شکن پله‌ای نزدیک به ۱۱ سانتی‌متر محاسبه شده که ۳۷/۵٪ بیشتر از نمونه شماره هفت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

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 Engineering. 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 Engineering, Elsevier, 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*



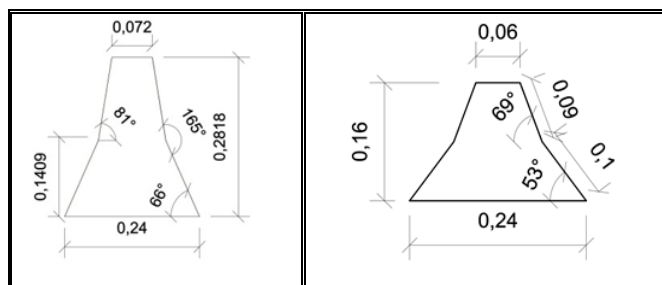
شکل ۱۵: مقایسه مدل پله ای و دوزنقه ای با مدل مبنا در شبیه سازی گروه دوم

## 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، در کنار 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 دوزنقه‌ای 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.

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.
- 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), *Evaluation 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., Sanaiee, 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).