

# مطالعه آزمایشگاهی تاثیر تاریخچه بارگذاری امواج نامنظم بر روند فرسایش نیمرخ موج شکن های سکویی شکل پذیر تغییر شکل یافته

امیر ارسلان کرمی متین<sup>۱</sup>، مهدی شفیعی فر<sup>۲\*</sup>، حسن اکبری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ a.karamimatin@modares.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد سازه های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ shafiee@modares.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار سازه های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ Akbari.h@modares.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

موج شکن های سکویی دسته ای از موج شکن های شکل پذیر هستند که بر اثر برخورد امواج، نیمرخ سمت دریای آنها دچار تغییر شکل شده و نهایتاً شکل پایداری به خود می گیرند. یکی از مهم ترین معیارهای کنترل پایداری این موج شکن ها، عرض فرسایش یافته سکوی سازه است. در اغلب مطالعات، عرض فرسایش یافته تحت اثر یک موج طرح مشخص و بر مبنای فرض عدم تغییر شکل اولیه موج شکن حاصل می گردد. حال اینکه در شرایط واقعی ممکن است موج شکن پیش از اعمال موج طرح، موج هایی با دوره بازگشت های کمتر را نیز تجربه کرده باشد که در میزان تغییر شکل نهایی آن موثر باشد. از اینرو تحقیق حاضر با استفاده از مدل های آزمایشگاهی دو بعدی در فلووم موج آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس با هدف بررسی تاثیر شرایط امواج بر میزان فرسایش نیمرخ تغییر شکل یافته سازه انجام شده و نتایج آن با آزمایش های مبتنی بر فرض عدم تغییر شکل نیمرخ اولیه مقایسه شده است. در مجموع ۳۰ آزمایش در این تحقیق انجام شده است که امواج برخوردی به سازه از نوع امواج نامنظم و طیف انرژی استفاده شده، طیف JONSWAP با  $\gamma$  برابر ۳/۳ بوده است. همچنین در تحقیق حاضر از قطر اسمی سنگدانه آرمور ۲ سانتی متر و ضریب دانه بندی ۱/۶ استفاده شده است. از نتایج مهم این دسته از آزمایش ها می توان به این امر اشاره نمود که در شرایط محیطی و سازه ای آزمایش های تحقیق حاضر، در موج شکن های سکویی پایدار استاتیکی و پایدار دینامیکی، هر چه ترکیب ارتفاع و پرود موج بزرگتر باشد، تاثیر امواج برخوردی قبلی در ایجاد تغییر شکل روی مقطع تغییر شکل یافته کمتر می شود.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۸

کلمات کلیدی:

موج شکن سکویی شکل پذیر

نیمرخ تغییر شکل یافته

امواج نامنظم

مدل آزمایشگاهی

عرض فرسایش یافته سکو

## Experimental Study Effects of Irregular Wave Parameters on Berm Recession of deformed profile Berm Breakwaters

Amir Arsalan Karami Matine<sup>1</sup>, Mehdi Shafieefar<sup>2\*</sup>, Hassan Akbari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. of Civil Engineering, Department of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

<sup>2</sup> Professor of Civil Engineering, Department of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

<sup>3</sup> Assistant Professor of Civil Engineering, Department of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

### ARTICLE INFO

Article History:

Received: 6 Nov. 2018

Accepted: 17 Feb. 2019

Keywords:

Reshaping Berm Breakwater

Deformed profile

Irregular Waves

Experimental Modeling

Berm Recession

### ABSTRACT

Berm breakwater is a type of reshaping rubble mound breakwaters that its seaside profile can be reshaped under severe wave attack. The final berm recession is an important criterion to check the berm width as well as the stability of these breakwaters. Berm recession due to a design wave is usually determined by means of empirical equations derived from experiments. Initial sections with no recession have been assumed in most of these experiments. However, in a real condition, a berm breakwater may experience many of waves before experiencing a design wave condition. The wave history and possible recessions before a stormy condition may affect the final reshaped profile. This subject is therefore investigated in the present study by means of performing 2D tests in the hydraulics laboratory at Tarbiat Modares University. In addition, the effects of wave parameters on the hydrodynamic response of berm breakwaters are evaluated performing 30 tests in the wave flume. In all experiments, irregular waves have been generated based on JONSWAP spectrum wave with  $\gamma$  factor of 3.3 and the median stone diameter and gradation are selected as 2 cm & 1.6 respectively. Based on the measurements, the berm recession (in both statically and dynamically stable berm breakwaters) increases by increasing the wave height and wave period. In addition, once the design wave height rises and exceeds a threshold level, the impact of previous waves on the final reshaped profile will be decreased.

۱ - مقدمه

موج‌شکن‌ها سازه‌هایی هستند که جهت ایجاد آرامش در بندرگاه‌ها، تامین ورود مطمئن کشتی‌ها به آبراهه‌ها و بنادر، و کاهش انرژی ناشی از امواج و حفاظت از سواحل در مقابل امواج احداث می‌شوند. با توجه به پر هزینه بودن ساخت یک موج‌شکن، طراحی صحیح و بهینه این سازه‌ها هم از نظر پایداری و هم از نظر اقتصادی مسئله‌ای کاملاً ضروری به نظر می‌رسد. موج‌شکن‌ها از دیدگاه‌های مختلف از جمله شکل هندسی، مصالح بکار برده شده و موقعیت قرارگیری به انواع مختلف تقسیم بندی می‌شوند. موج‌شکن‌های توده سنگی از نظر پایداری به دو دسته پایدار ایستا و پایدار دینامیکی (شکل پذیر) تقسیم بندی می‌شوند. در موج‌شکن‌های پایدار ایستا، تغییر شکل سازه مجاز نیست، اما در موج‌شکن‌های پایدار شکل پذیر به سازه اجازه تغییر شکل تا رسیدن به یک نیمرخ پایدار داده می‌شود که به آنها موج‌شکن‌های S شکل نیز گفته می‌شود. پس از ظهور تفکر قبول شکل پذیری در موج‌شکن‌ها، این سازه‌ها با ابعاد بزرگتر در مقطع و سنگ‌های کوچکتر طراحی شده و مورد آزمایش قرار گرفتند که عموماً این نوع موج‌شکن‌ها به صورت مقطع دوزنقه ای شکل طراحی می‌شدند. اما با گذشت زمان قسمت فوقانی از مقطع سازه که بار زیادی به آن وارد نمی‌شد، از نیمرخ حذف گردید، تا در نهایت لایه سنگی در جلوی مقطع دوزنقه که شبیه به یک سکو بود و سطح همواری را در سمت رو به دریای موج‌شکن به وجود می‌آورد، باقی ماند. تراز این سطح کمی بالاتر از تراز ایستایی قرار می‌گرفت. در حقیقت سکو یک جسم توده سنگی متخلخل و حجیم بوده، که انرژی امواج را تا حد زیادی به خود جذب می‌کند تا آسیب جدی به دیگر بخش‌های موج‌شکن وارد نشود. این نوع سازه‌ها موج‌شکن‌های سکویی شکل پذیر نامیده می‌شوند [۱].

معمولاً موج‌شکن بر اساس عدد بدون بعدی به نام عدد پایداری ( $H_0$ ) دسته بندی می‌شوند که به شکل زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$H_0 = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \quad (1)$$

که در آن  $H_s$  ارتفاع موج مشخصه بر اساس تحلیل فرکانسی (در دوردست) ( $m$ )،  $\Delta$  چگالی شناوری نسبی قطعات آرمور است که به صورت  $\Delta = \frac{\rho_a}{\rho_w} - 1$  تعریف می‌شود که در آن  $\rho_a$  چگالی اشباع با سطح خشک سنگ ( $\frac{kg}{m^3}$ ) و  $\rho_w$  چگالی آب ( $\frac{kg}{m^3}$ ) است.  $D_{n50}$  قطر اسمی سنگدانه‌های آرمور ( $m$ ) است. از آنجا که پریود موج در پایداری موج‌شکن‌های سکویی تاثیر به سزایی داشته و تاثیر این پارامتر در عدد پایداری در نظر گرفته نشده است، لذا فن در میر [۲] پارامتر بدون بعد  $H_0 T_0$  که شاخص پایداری نامیده می‌شود و اثر پریود موج را نیز در نظر می‌گیرد، به صورت رابطه (۲) ارائه نموده است:

$$H_0 T_0 = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \times T_m \sqrt{\frac{g}{D_{n50}}} \quad (2)$$

که در آن  $T_0$  پارامتر بدون بعد شده پریود موج،  $T_m$  پریود میانگین موج و  $g$  شتاب ثقل است. پارامتر  $H_0 T_0$  توسط فن در میر [۲] با مفهوم این که اثر ارتفاع و پریود موج روی سازه دارای مرتبه یکسان هستند، ارائه گردیده است. برای ترکیب پارامترهای ارتفاع و پریود موج در سازه‌های شکل پذیر از پارامترهایی مثل تیزی موج ( $S_{om}$ ) و پارامتر ( $H_0 T_0$ ) (Stability Index) می‌توان استفاده کرد که پارامتر اول با در نظر گرفتن نسبت مستقیم ارتفاع موج و نسبت معکوس پریود موج در قالب طول موج، تاثیر احتمالی پریود را در نظر گرفته و پارامتر دوم با تاثیر مستقیم ارتفاع و پریود موج، بحث انرژی وارده از سوی موج را مورد بررسی قرار داده است. طبق بررسی‌های صورت گرفته توسط مقیم و همکاران پارامتر بدون بعد جدیدی ( $H_0 \sqrt{T_0}$ ) معرفی شده است. مقیم و همکاران پارامتر  $H_0 \sqrt{T_0}$  را برای لحاظ کردن مناسب اثر توام پارامتر ارتفاع و پریود امواج در موج‌شکن‌های توده سنگی شکل پذیر پیشنهاد نمودند. از این پارامتر می‌توان نتیجه گرفت که اثر ارتفاع امواج یک مرتبه بیشتر از پریود موج است. همچنین با به کارگیری این پارامتر جدید، شاخص‌های ارزیابی مناسبی برای نتایج به دست آمده در برابر داده‌های آزمایشگاهی مقیم و همکاران [۳] و نتایج تحقیق لیک اندرسن [۱] به دست آمده است. در موج‌شکن‌ها از متغیرهای مختلفی برای توصیف رفتار سازه استفاده می‌شود. در سازه‌های پایدار ایستا، بررسی رفتار سازه و توصیف آن با معیار آسیب انجام می‌شود که این معیار ممکن است جابه جایی دیواره تاج سازه یا تعداد سنگ‌های جابه‌جا شده باشد. اما در سازه‌های پایدار دینامیکی مانند موج‌شکن‌های سکویی شکل پذیر از معیارهای متفاوتی نسبت به سازه‌های پایدار ایستا مانند نیمرخ تغییر شکل یافته، عرض فرسایش یافته سکو ( $Rec$ )، طول پنجه تغییر یافته ( $\Delta R$ ) و عمق فرسایش یافته ( $h_f$ ) برای توصیف رفتار سازه استفاده می‌گردد. در بین پارامترهای گفته شده، عرض فرسایش یافته سکو مهم‌ترین پارامتر برای بررسی پایداری سازه به شمار می‌رود. اگر مقدار فرسایش سکو از عرض موجود بزرگتر باشد ( $Rec > B$ )، خرابی در سازه اتفاق می‌افتد. به همین دلیل معیار کنترل کننده پایداری این سازه‌ها فرسایش عرض سکو بوده و تخمین فرسایش عرض سکوی موج‌شکن سکویی از اهمیت بالایی برخوردار است. شکل ۱ پارامترهای مورد استفاده در توصیف رفتار موج‌شکن‌های سکویی شکل پذیر را نشان می‌دهد [۴].

دانه بندی بین ۲/۴۶ تا ۴/۴، شیب تغییرات عرض فرسایش یافته سکو کاهش می یابد.

سیگوردارسون و همکاران [۸] با انجام مطالعات آزمایشگاهی روی موج شکن سکویی ایسلندی، رابطه‌ای برای تخمین فرسایش عرض سکو پیشنهاد نمودند. نتایج این تحقیق نشان دهنده تاثیر بسیار کم ضریب دانه بندی آرمور و عمق آب روی فرسایش عرض سکو است. از محدودیت های این تحقیق می توان به عدم در نظر گرفتن تعدادی از پارامترهای محیطی و سازه‌ای موثر در پایداری موج شکن سکویی اشاره نمود.

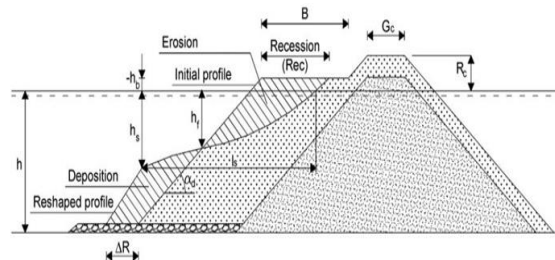
مقیم و همکاران [۳] با انجام مطالعات آزمایشگاهی روی موج شکن های سکویی شکل پذیر دو هدف را در تحقیق خود دنبال نمودند. یکی از اهداف این تحقیق، بررسی اثرات ارتفاع و تعداد امواج، پر بود امواج، عمق آب، عرض سکو و تراز سکو از سطح ایستایی روی فرسایش عرض موج شکن سکویی و هدف دیگر مطالعه پدیده تغییر شکل موج شکن سکویی شکل پذیر و تحلیل مکانیزم این سازه قبل و بعد از تغییر شکل و شناخت جریان های ایجاد شده در اثر اندرکنش موج و سازه بوده است.

شکاری و شفییعی فر [۹] در یک تحقیق آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای مختلف محیطی و سازه‌ای بر پایداری موج شکن سکویی شکل پذیر را بررسی نمودند. از نتایج مهم این آزمایش ها می توان به تاثیر پارامتر عرض سکو موج شکن سکویی در دانه بندی های متنوع در کاهش میزان فرسایش عرض سکو موج شکن است. همچنین با استفاده از مشاهده های به دست آمده از این آزمایش ها، پارامترهای کلیدی نیمرخ تغییر شکل یافته سمت دریا شامل ارتفاع و طول پله ناحیه ترسیب شده، عمق نقطه تقاطع نیمرخ های اولیه و تغییر شکل یافته و ارتفاع انتقال بررسی شده اند.

لیک اندرسن و بورخارد [۱۲] آزمایش هایی روی مدل موج شکن های سکویی همگن انجام دادند و بر اساس پارامترهای مهمی که برای توصیف تغییر شکل به کار می روند، یک رابطه نیمه تجربی ارائه نمودند. این رابطه با تعدادی از داده های آزمایشگاهی سازه های پایدار استاتیکی و دینامیکی کالیبره و صحت سنجی شد.

مطلبی [۱۳] با انجام مطالعه آزمایشگاهی به بررسی اثر قطر اسمی سنگدانه های آرمور در پایداری موج شکن های سکویی پرداخته است. نتایج نشان داد که عرض سکو یکی از عوامل تاثیرگذار در فرسایش عرض به شمار می رود و تقریبا همان اثر قطر اسمی سنگدانه را داشته و می توان با کاهش ۲۰٪ در قطر اسمی و افزایش ۲۰٪ در عرض سکو همان درصد فرسایش را از سازه انتظار داشت

لیک اندرسن و همکاران [۱۴] رابطه ای که توسط لیک اندرسن و بورخارد [۱۲] ارائه شده بود، با تغییرات کمی اصلاح نمودند و رابطه جدید بر اساس پارامترهای سازه ای و محیطی مختلف از جمله ضریب



شکل ۱- نمایش پارامترهای مختلف مورد استفاده در توصیف رفتار موج شکن سکویی [۴]

محققین مختلفی تا کنون روی تغییر شکل و پایداری موج شکن های سکویی شکل پذیر تحقیق کرده اند و روابط تجربی مختلفی برای محاسبه فرسایش عرض سکو موج شکن سکویی ارائه نموده اند. از تحقیقات این پژوهشگران می توان به مقیم و همکاران [۳]، هال و کائو [۵]، فن در میر [۶]، لایسو و داسکالوف [۷]، سیگوردارسون و همکاران [۸]، شکاری و شفییعی فر [۹]، سیگوردارسون و فن در میر [۱۰] و مقیم و علیزاده [۱۱] اشاره نمود. لازم به ذکر است که در تحقیقاتی که تا کنون روی فرسایش موج شکن های سکویی صورت گرفته است (مانند مواردی که اشاره شد)، مقطع اولیه مدل موج شکن بدون تغییر شکل و فرسایش بوده و عرض فرسایش یافته سکو سازه با فرض عدم تغییر شکل مقطع اندازه گیری شده است. در حالی که در نمونه ای اصلی (پروتوتیپ) ممکن است سازه، قبل از موج های با دوره بازگشت طولانی، موج هایی با دوره بازگشت کوتاه تر تجربه کرده (در نیمرخ سازه تحت تاثیر امواج با دوره بازگشت کوتاه تر تغییر شکل هایی رخ داده باشد) و در واقع ادامه تغییر شکل نیمرخ سازه با شرایط دریایی متفاوتی روبرو شده باشد.

هال و کائو [۵] با انجام آزمایش هایی روی موج شکن سکویی همگن، تاثیر سنگ های گردگوشه و ضریب دانه بندی لایه آرمور را روی عرض فرسایش یافته مورد مطالعه قرار دادند. یکی از نتایج تحقیقات این دو محقق این بود که با افزایش ضریب دانه بندی آرمور و درصد سنگ های گردگوشه، میزان فرسایش عرض سکو افزایش می یابد. فن در میر [۶] با انجام تحقیقات آزمایشگاهی به بررسی تاثیر قطر اسمی سنگ آرمور روی فرسایش عرض موج شکن سکویی پرداخت. در این آزمایش ها ۴ قطر متفاوت برای سنگدانه ها در نظر گرفت و مشاهده نمود که با افزایش قطر اسمی سنگدانه های آرمور، مقدار فرسایش عرض موج شکن کاهش می یابد.

لایسو و داسکالوف [۷] مطالعه آزمایشگاهی روی نیمرخ فرسایش یافته موج شکن سکویی همگن با ضرایب دانه بندی مختلف آرمور انجام دادند و مشاهده نمودند که دانه بندی آرمور تاثیر قابل توجهی در پایداری و تغییر شکل سکو موج شکن سکویی دارد. طبق نتایج این تحقیق، کمترین مقدار فرسایش عرض سکو در ضریب دانه بندی ۱/۲ و بیشترین آن در ضریب دانه بندی ۲/۴۶ اتفاق افتاده است. از دیگر نتایج مهم این مطالعه، این بوده است که در محدوده ضریب

تراز بندی، تراز سکو از سطح ایستابی، پارمتر پایداری، عمق آب، تعداد امواج، جهت برخورد موج و زاویه شیب جلوی سازه است. مقیم و لیک اندرسن [۱۵] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی لیک اندرسن [۱] به بررسی تاثیر پارامترهای محیطی و سازه‌ای بر پایداری موج‌شکن‌های سکویی سخت شکل‌پذیر پرداختند و برای تخمین سطح فرسایش یافته سازه نسبت به نیمرخ اولیه، یک فرمول تجربی جدید بر اساس حداکثر شار تکانه موج برخوردی به سازه ارائه نمودند. بزرگترین مزیت این رابطه نسبت به سایر روابط قبل، این است که برگرفته از رابطه بین نیروی موج با حداکثر شار تکانه موج است. مروری بر پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که مطالعاتی که در زمینه فرسایش موج‌شکن‌های سکویی صورت گرفته، تحت اثر یک موج طرح مشخص و با فرض عدم تغییر شکل اولیه سازه بوده است؛ در حالی که ممکن است در نمونه‌های اصلی، قبل از موج طرح، سازه موج‌شکن موج‌هایی با دوره بازگشت کوتاه‌تر (شرایط امواج متفاوت) را تجربه کرده باشد که این مسئله می‌تواند باعث تغییر در عرض فرسایش یافته و تغییر شکل نیمرخ موج‌شکن‌های سکویی شود. لذا با توجه به اینکه تاکنون تحقیقی در این زمینه انجام نشده است، به نظر می‌رسد تحقیق و بررسی در این زمینه ضرورت دارد. هدف از انجام مطالعه آزمایشگاهی حاضر، مطالعه تاثیر شرایط امواج نامنظم (ارتفاع موج، پریود موج و مدت طوفان) بر فرسایش نیمرخ تغییرشکل یافته موج‌شکن‌های سکویی شکل پذیر و مقایسه نتایج آن با فرسایش حاصل از آزمایش‌های مبتنی بر فرض عدم تغییر شکل نیمرخ ابتدایی سازه است.

### ۳- حدود تغییرات پارامترهای سازه‌ای و محیطی و پارامترهای بدون بعد

مطالعه آزمایشگاهی تحقیق حاضر با هدف بررسی تاثیر شرایط امواج نامنظم بر پایداری نیمرخ تغییر شکل یافته موج‌شکن سکویی که شامل سه پارامتر تعداد امواج، ارتفاع موج و پریود موج است، انجام شده است. به منظور تعیین محدوده پریود و ارتفاع امواج باید به صورت هم زمان چند پارامتر را کنترل نمود. بنابراین باید در خصوص انتخاب محدوده ارتفاع و پریود امواج دقت و بررسی ویژه‌ای داشت. یکی از مسایل قابل توجه در انتخاب پریود و ارتفاع امواج، محدوده تیزی امواج است. ارتفاع و پریود موج باید به گونه‌ای در نظر گرفته شوند که تیزی امواج حاصل از ترکیب این دو پارامتر، در محدوده پیشنهادی فن در میر [۲]، یعنی  $0.07 < S_{op} < 0.015$ ، قرار بگیرند. اندرسن و بورخارد [۱۲] پیشنهاد کردند که ارتفاع و پریود امواج طوری تنظیم شوند که تیزی امواج در محدوده بین  $0.1$  تا  $0.54$  قرار بگیرد. مطلبی و شفیی فر در مطالعه آزمایشگاهی خود ارتفاع امواج را در محدوده  $5/7$  تا  $9/1$  سانتی متر و بازه پریود امواج را در بازه  $1/26$  تا  $1/37$  ثانیه انتخاب نمودند. مقیم و همکاران نیز ارتفاع امواج را در بازه  $4/5$  تا  $10/8$  سانتی متر و پریود امواج را در محدوده  $1/27$  تا  $1/98$  ثانیه انتخاب کردند.

ارتفاع امواج انتخابی بهتر است که در محدوده  $4$  تا  $12$  سانتی متر باشد؛ چون در امواج با کمتر از  $4$  سانتی متر احتمال به وجود آمدن اثرات مقیاس وجود دارد و در امواج با ارتفاع زیاد در محل پاروی مولد موج به دلیل به وجود آمدن تغییر مکان‌های بزرگ، آشفتگی در سطح امواج تولید شده ایجاد می‌شود و می‌تواند داده‌های برداشت شده را فاقد اعتبار نماید.

انتخاب این دو پارامتر باید به گونه‌ای صورت بگیرد که در پریودهای موجود، با حداقل تعداد ارتفاع موج بتوان هم محدوده پیشنهادی تیزی موج و هم بیشترین  $H_0 T_0$ ،  $H_0$  را پوشش داد. با توجه به آن که عدد پایداری برای موج‌شکن‌های سکویی شکل پذیر در محدوده بین  $1/5$  تا  $4$  و  $60 < H_0 T_0 < 100$  است، ارتفاع و پریود موج طوری در نظر گرفته شوند که علاوه بر پوشش دادن گستره

دانه بندی، تراز سکو از سطح ایستابی، پارمتر پایداری، عمق آب، تعداد امواج، جهت برخورد موج و زاویه شیب جلوی سازه است. مقیم و لیک اندرسن [۱۵] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی لیک اندرسن [۱] به بررسی تاثیر پارامترهای محیطی و سازه‌ای بر پایداری موج‌شکن‌های سکویی سخت شکل‌پذیر پرداختند و برای تخمین سطح فرسایش یافته سازه نسبت به نیمرخ اولیه، یک فرمول تجربی جدید بر اساس حداکثر شار تکانه موج برخوردی به سازه ارائه نمودند. بزرگترین مزیت این رابطه نسبت به سایر روابط قبل، این است که برگرفته از رابطه بین نیروی موج با حداکثر شار تکانه موج است. مروری بر پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که مطالعاتی که در زمینه فرسایش موج‌شکن‌های سکویی صورت گرفته، تحت اثر یک موج طرح مشخص و با فرض عدم تغییر شکل اولیه سازه بوده است؛ در حالی که ممکن است در نمونه‌های اصلی، قبل از موج طرح، سازه موج‌شکن موج‌هایی با دوره بازگشت کوتاه‌تر (شرایط امواج متفاوت) را تجربه کرده باشد که این مسئله می‌تواند باعث تغییر در عرض فرسایش یافته و تغییر شکل نیمرخ موج‌شکن‌های سکویی شود. لذا با توجه به اینکه تاکنون تحقیقی در این زمینه انجام نشده است، به نظر می‌رسد تحقیق و بررسی در این زمینه ضرورت دارد. هدف از انجام مطالعه آزمایشگاهی حاضر، مطالعه تاثیر شرایط امواج نامنظم (ارتفاع موج، پریود موج و مدت طوفان) بر فرسایش نیمرخ تغییرشکل یافته موج‌شکن‌های سکویی شکل پذیر و مقایسه نتایج آن با فرسایش حاصل از آزمایش‌های مبتنی بر فرض عدم تغییر شکل نیمرخ ابتدایی سازه است.

### ۲- مدل‌سازی آزمایشگاهی و روش انجام کار

مطالعه آزمایشگاهی حاضر به بررسی پایداری و فرسایش نیمرخ تغییر شکل یافته موج‌شکن‌های سکویی شکل پذیر با استفاده از مدل آزمایشگاهی دو بعدی پرداخته است. آزمایش‌ها در فلوم موج آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. این فلوم دارای  $16$  متر طول، یک متر عرض و یک متر عمق است. سامانه مولد موج آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس از نوع پیستونی است. این سامانه موج ساز پیستونی، توانایی تولید امواج منظم و نامنظم با طیف‌های مختلف را دارد. در این تحقیق، امواج تابشی به مقطع سازه در تمام آزمایش‌ها از نوع امواج نامنظم با طیف انرژی JONSWAP است. شکل (۲) تصویری شماتیک از فلوم موج را نمایش داده است. در طول کانال  $4$  حسگر ارتفاع سنج نوع مقاومتی استفاده شده است که می‌تواند تغییر ارتفاع سطح آب را با فرکانس  $10$  هرتز و دقت یک میلی‌متر ثبت کنند که چیدمان آنها بر اساس روش Mansard بوده است.

برای نصب تجهیزات روی فلوم یک جفت ریل ثابت در امتداد طولی و بالای فلوم قرار گرفته است و برای عملیات نیمرخ برداری از یک

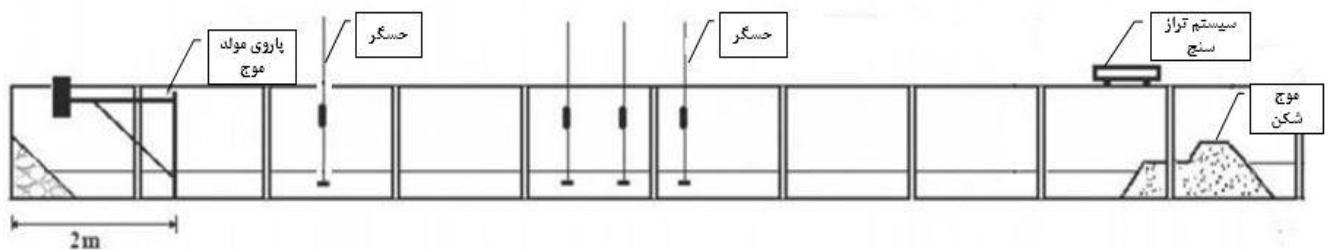
اگر این رابطه برای شرایط محیطی و سازه ای صدق نماید، اثر لزجت به حداقل می‌رسد. بر اساس تحقیقاتی که فن در میر [۲] انجام داد، برای عدد رینولدز در محدوده ذکر شده، اثرات مقیاس تقریباً بی اثر است و یا به حداقل می‌رسد. همچنین ژنسن و کلینتینگ [۱۶] نتیجه گرفتند که اگر عدد رینولدز از ۷۰۰۰ بیشتر شود، اثرات مقیاس بی تاثیر است. در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، مقدار عدد رینولدز بین  $1.56 \times 10^4$  تا  $2 \times 10^4$  قرار گرفته است. به همین دلیل در تحقیق آزمایشگاهی حاضر، اثرات مقیاس ناشی از لزجت قابل صرف نظر کردن است.

اگرچه امواج نامنظم بوده و لزوماً از تئوری غیرخطی خاصی تبعیت نمی‌کنند، لیکن با فرض ارتفاع مشخصه موج، عدد اورسل  $(6.49 < u_T = \frac{HL^2}{d^3} < 29.6)$  قابل ارزیابی است که با توجه به محدوده  $\frac{d}{L_0}$ ، تئوری استوکس بر موج منظم معادل تک فرکانسی حاکم است. بدیهی است اگر در محل موج ساز، موج خطی تک فرکانس ساخته شود، در طی انتشار با توجه به پارامترهای هیدرودینامیکی با شرایط واقعی و غیرخطی تطبیق می‌یابد [۴]. لیکن بر اساس طیف موج، امواج نامنظم در آزمایشگاه در محل موج ساز تولید می‌شوند و طی انتشار تا پای سازه، سطح آب با هندسه واقعی تطبیق پیدا می‌کند و در واقع پایداری موج شکن تحت امواج غیر خطی نامنظم بررسی و مدل سازی شده است.

پیشنهادی تیزی موج، اعداد بدون بعد ذکر شده نیز پوشش داده شوند. البته به منظور حصول بازه‌های ذکر شده باید قطر اسمی سنگدانه‌ها را نیز مد نظر قرار داد.

کاهش بیش از حد عمق آب منجر به شکست موج قبل از رسیدن به پای سازه شده و ممکن است حداکثر ارتفاع موج در نظر گرفته شده نتواند خود را به پای سازه برساند. به همین دلیل و همچنین در نظر گرفتن محدوده تیزی امواج، عمق آب ۲۵ سانتی متر انتخاب شد. حداکثر ارتفاع مشخصه موج مدل سازی شده ۱۰/۱ سانتی متر است که با توجه به ضریب شکست (نسبت ارتفاع موج در حال شکست به عمق آب) حدود ۰٫۶، برای موج نامنظم، این موج در عمق ۲۵ سانتی متری، بصورت نشکسته است. لازم به توضیح است که به هرحال با توجه به نامنظم و تصادفی بودن امواج تولید شده، امکان شکل گیری امواجی بزرگتر از موج مشخصه و یا پروفیل‌های ناپایدار در سری امواج، و متعاقباً شکست موج بصورت مقطعی وجود دارد. از طرف دیگر، از آنجایی که ارتفاع سایر امواج مدل شده کمتر از مقادیر فوق‌الذکر است، احتمال شکست این امواج نیز کم تر خواهد بود.

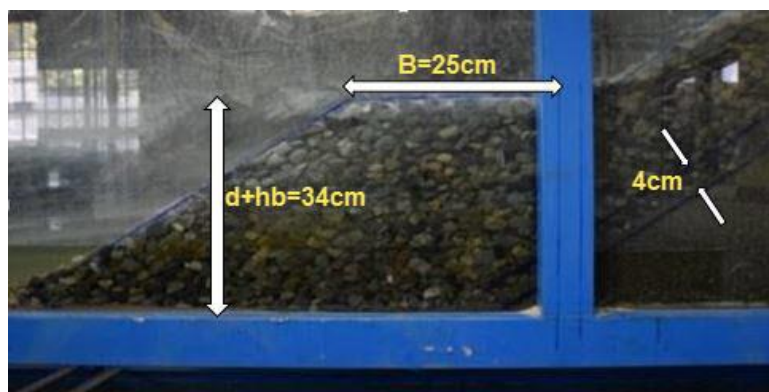
برای به حداقل رساندن اثر لزجت (گرانروی) بر اساس توصیه فن در میر [۲] عدد رینولدز  $Re = \frac{D_{n50} \sqrt{gH_s}}{\nu}$  (قطر اسمی مصالح آرمور است) در محدوده  $10^4 < Re < 4 \times 10^4$  در نظر گرفته شده است. در این رابطه، عبارت دوم در صورت کسر معرف سرعت جریان است.



شکل ۲- تصویری شماتیک از فلوم موج آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس



شکل ۳- تصویری از دستگاه تراز سنج



شکل ۴- مقطعی از مدل آزمایشگاهی اجرا شده از موج‌شکن سکویی داخل فلوم موج

جدول ۱- مشخصات و ویژگی‌های مصالح مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی موج‌شکن سکویی

مشخصه	لایه آرمور	لایه فیلتر	لایه هسته
قطر اسمی سنگدانه [m]	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۱۸
ضریب منحنی دانه بندی [-]	۱/۶	۱/۷۵	ماسه شسته شده
جرم مخصوص [kg/m <sup>3</sup> ]	۲۵۵۰	۲۵۵۰	۱۸۰۰

در جداول ۲ و ۳ حدود تغییرات پارامترهای با بعد و بدون بعد شده مورد استفاده در تحقیق آزمایشگاهی حاضر ارائه گردیده است.

#### ۴- بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

در این قسمت نخست به بررسی تاثیر پارامترهای تعداد امواج (مدت طوفان)، ارتفاع موج و پریود موج بر پایداری موج‌شکن‌های سکویی پرداخته و سپس به مطالعه تاثیر شرایط امواج نامنظم بر فرسایش نیمرخ تغییر شکل یافته که شامل ارتفاع موج، پریود موج و مدت طوفان است، پرداخته خواهد شد و نتایج آن با آزمایش‌های تغییر شکل مستقیم به دست آمده از نیمرخ اولیه (آزمایش‌های اثر مدت طوفان، ارتفاع و پریود موج روی پایداری و تغییر شکل سازه) مقایسه شده است.

#### ۴-۱- تاثیر پارامتر تعداد امواج (مدت طوفان)

یکی از عواملی که تاثیر قابل توجهی بر پایداری موج‌شکن‌های شکل پذیر دارد، مدت طوفان است. این عامل به صورت پارامتر بدون بعد شده تعداد امواج بیان شده است. اصولاً فلسفه طراحی یک موج‌شکن شکل پذیر، تغییر شکل آن در اثر طوفان طرح به صورت یک نیمرخ S شکل و حفظ پایداری این نیمرخ پس از طوفان طرح است.

برای تعیین مدت زمان تعادل مقطع سازه شش آزمایش در یک شرایط ثابت ارتفاع و پریود موج انجام شده که نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. تعداد امواج برخوردی به سازه بین ۵۰۰ تا ۶۰۰۰ انتخاب شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد امواج برخوردی به سازه، میزان فرسایش عرض سکو افزایش یافته اما با گذشت زمان از سرعت آن کاسته شده و مقطع سازه در نهایت به یک تعادل نسبی می‌رسد که در آن نرخ

تغییر فرسایش بسیار کم می‌شود. نکته حائز اهمیت در اینجا این است که هیچگاه نمی‌توان ادعا نمود که پس از رسیدن به حالت تعادل، نرخ تغییرات فرسایش در سازه به صفر رسیده و دیگر تغییر شکل و فرسایش در سازه رخ نمی‌دهد. لذا هر چه تعداد امواج تابیده شده به سازه بیشتر شود، باز هم تغییرات محدودی در تغییر شکل سازه مشاهده خواهد شد. ملاکی که برای تعیین مدت زمان آزمایش یا مدت زمان تعادل سازه در نظر گرفته شده، رسیدن به ۹۰ درصد تغییر شکل نهایی است. به این منظور مقطع سازه را تحت برخورد امواجی با تعداد بین ۵۰۰ تا ۶۰۰۰ قرار داده و بعد از هر برخورد، نیمرخ تغییر شکل یافته را برداشت نموده و این عمل تا زمانی که دو عرض فرسایش یافته متوالی تفاوت ناچیزی داشته باشند ادامه می‌یابد. سپس با توجه به عرض فرسایش یافته نهایی، تعداد امواجی که باعث ۹۰ درصد فرسایش و تغییر شکل نهایی شده، به عنوان مدت زمان تعادل مقطع سازه در نظر گرفته می‌شوند.

با توجه به شکل ۵ بیشترین تغییر شکل در ۵۰۰ موج اولیه اتفاق افتاده و میزان فرسایش عرض سکو تا ۳۰۰۰ موج افزایش یافته و پس از آن نرخ رشد فرسایش بین ۳۰۰۰ موج تا ۴۰۰۰ موج بسیار کاهش یافته و بین ۴۰۰۰ و ۶۰۰۰ موج، فرسایش عرض سکو اختلاف بسیار ناچیزی دارد. بنابراین با توجه به تفاوت بسیار کم فرسایش عرض سکو بین ۴۰۰۰ و ۶۰۰۰ موج، فرسایش ناشی از برخورد ۶۰۰۰ موج به عنوان حد نهایی تغییر شکل در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در برخورد ۳۰۰۰ موج به مقطع سازه، تغییر شکل و فرسایش سازه به بیش از ۹۰ درصد حد نهایی (که همان ۶۰۰۰ موج است) می‌رسد، ۳۰۰۰ موج به عنوان مدت زمان تعادل در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۲- پارامتر ارتفاع موج

شکل ۷ مقدار عرض فرسایش یافته سکوی سازه را در ارتفاعهای مختلف با دو پرپود اوجی ۱/۲۵ و ۱/۵ ثانیه نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها عرض سکو ۲۵ سانتی‌متر، ارتفاع سکو از سطح ایستابی ۹ سانتی‌متر، عمق آب پای سازه ۲۵ سانتی‌متر، قطر اسمی مصالح آرمور ۲ سانتی‌متر و تعداد امواج برخوردی ۳۰۰۰ بوده است. نتایج شکل ۷ نشان دهنده‌ی این است که ارتفاع موج برخورد کننده پارامتر بسیار موثری در پایداری موج‌شکن‌های سکویی است. به طوری که در یک پرپود ثابت با افزایش پارامتر ارتفاع موج، مقدار فرسایش عرض سکو افزایش می‌یابد. با ثابت ماندن پرپود موج، هر چه ارتفاع موج برخوردی بزرگتر باشد، انرژی امواج که با توان دوم ارتفاع موج رابطه مستقیم داشته افزایش می‌یابد. لذا با افزایش انرژی موج که معرف قدرت و توانایی موج برای جابجایی سنگدانه‌ها و تخریب سازه موج‌شکن است، مقدار عرض فرسایش یافته بیشتر می‌شود.

شکل ۸ نیمرخ‌های تغییر شکل یافته موج‌شکن سکویی با سه ارتفاع موج مختلف و یک پرپود ثابت را نمایش می‌دهد. در این سه آزمایش پرپود اوجی موج برابر ۱/۲۵ ثانیه است. با توجه به نیمرخ‌های ترسیم شده مشاهده می‌شود که ارتفاع موج پارامتر بسیار موثری در میزان تغییر شکل موج‌شکن‌های سکویی است و با افزایش ارتفاع موج مقدار عرض فرسایش یافته سکو و مقدار مساحت فرسایش یافته افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل ۵، بیش از ۵۰ درصد تغییر شکل مقطع مدل موج شکن سکویی شکل پذیر در ۵۰۰ موج اول رخ داده است. پس از تغییر شکل مقطع سازه در ۵۰۰ موج اول، شیب مصالح سنگی نیمرخ موج‌شکن سکویی در روند امواج برخوردی بعدی، تغییر یافته و ملایم‌تر می‌گردد. این تغییر شیب به مرور زمان باعث می‌شود توده سنگی مصالح به سمت جلو حرکت نماید و در واقع مقطع فرسایش یافته، توده طویل‌تری برای جذب انرژی امواج برخوردی فراهم کند. این امر باعث می‌شود که زوال انرژی امواج بیشتر شده و در نهایت ضریب انعکاس سازه کاهش می‌یابد. در واقع ضریب انعکاس سازه در روند برخورد موج تغییر یافته و با افزایش تعداد امواج برخوردی کاهش می‌یابد. متوسط ضریب انعکاس اندازه گیری شده از مقطع در حال فرسایش، در آزمایش‌های تحقیق حاضر بین ۱۰ تا ۳۰ درصد بوده است.

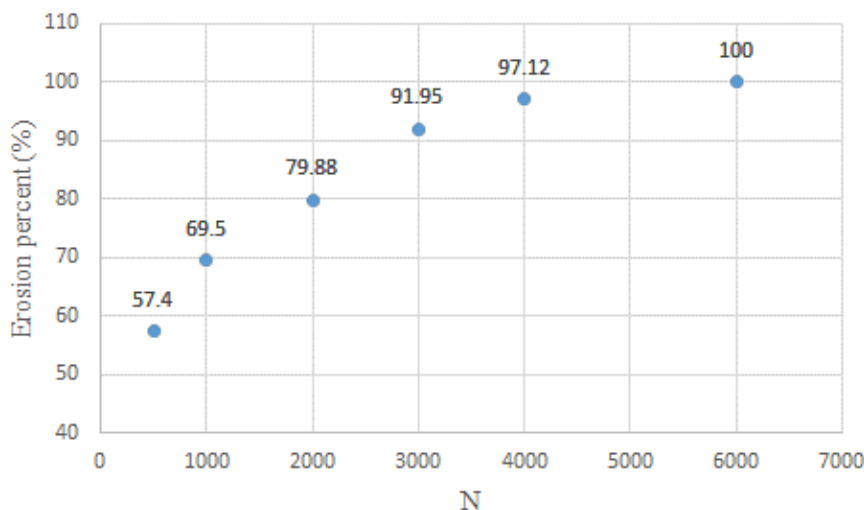
شکل ۶ مقایسه‌ای بین نیمرخ‌های تغییر شکل یافته تحت تاثیر تعداد امواج برخوردی مختلف برای یک ترکیب ثابت ارتفاع و پرپود موج را نشان می‌دهد. در این شکل نیمرخ‌های تغییر شکل یافته موج‌شکن سکویی برای ۶ آزمایش که در آن تعداد امواج مختلف است، رسم شده‌اند. نکته‌ای که از این شکل می‌توان دریافت، این است که بیشترین میزان تغییر شکل در اوایل طوفان و برخورد ۵۰۰ موج ابتدایی اتفاق می‌افتد. بنابراین می‌توان گفت ظرفیت فرسایش پذیری سازه در برخورد چند صد موج اول زیاد است.

جدول ۲- حدود تغییرات پارامترهای محیطی و سازه‌ای مدل آزمایشگاهی موج‌شکن مورد مطالعه

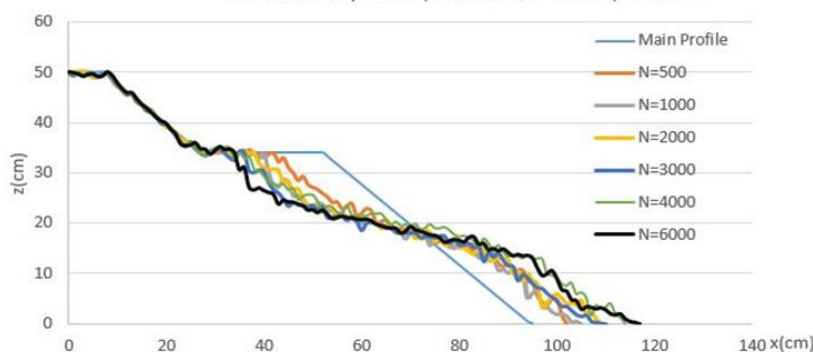
پارامتر	نماد	محدوده تغییرات
ارتفاع موج	$H_s$	۶/۱ تا ۱۰/۱ سانتی‌متر
پرپود اوجی موج	$T_p$	۱ تا ۱/۵ ثانیه
عرض اولیه‌ی سکوی موج‌شکن	B	۲۵ سانتی‌متر
عمق آب پای سازه	d	۲۵ سانتی‌متر
قطر اسمی سنگدانه آرمور	$D_{n50}$	۲ سانتی‌متر
تعداد امواج	N	۵۰۰ تا ۶۰۰۰
شیب جلوی سازه در بالا و پایین سکو	-	۱:۱/۲۵

جدول ۳- حدود تغییرات پارامترهای بدون بعد

پارامتر	حدود تغییرات
$H_0$	۱/۹۷ تا ۳/۲۵
$T_0$	۱۷/۴۴ تا ۲۶/۳۸
$H_0 T_0$	۳۴/۳۵ تا ۸۵/۷۳
$S_{op}$	۰/۰۶۶ تا ۰/۰۲۸
$Re(\div 10000)$	۱/۵۶ تا ۲



شکل ۵- درصد فرسایش عرض سکو در هر تعداد موج نسبت به حالت نهایی برای یک ترکیب ثابت ارتفاع و پرپود موج



شکل ۶- مقایسه نیمرخ تغییر شکل یافته موج‌شکن سکویی تحت اثر تعداد امواج مختلف

#### ۴-۴- تاثیر شرایط امواج روی فرسایش نیمرخ تغییر شکل یافته

در قسمت‌های قبل تاثیر پارامترهای مختلف محیطی و سازه‌ای بر پایداری و تغییر شکل نیمرخ موج‌شکن‌های سکویی بررسی گردید. در این قسمت به منظور بررسی تاثیر شرایط امواج نامنظم بر فرسایش نیمرخ تغییر شکل یافته که شامل ارتفاع موج، پرپود موج و مدت طوفان است، پرداخته خواهد شد. به عبارت دیگر در این دسته از آزمایش‌ها پس از برخورد موج با یک ارتفاع و پرپود مشخص و تعداد ۳۰۰۰ موج، نیمرخ تغییر شکل یافته را برداشت نموده و سپس ادامه تغییر شکل نیمرخ با شرایط دریایی دیگر که دارای یک ارتفاع و پرپود موج متفاوت و تعداد ۳۰۰۰ موج بوده است، به دست آمده است. ۹ آزمایش به منظور بررسی تاثیر شرایط امواج روی فرسایش نیمرخ تغییر شکل یافته سازه انجام شده و نتایج آن با آزمایش‌های تغییر شکل مستقیم به دست آمده از اعمال موج به نیمرخ اولیه (آزمایش‌های اثر ارتفاع و پرپود موج روی تغییر شکل سازه) مقایسه شده است.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مقایسه‌ی بین نیمرخ تغییر شکل یافته مستقیم از مقطع اولیه سازه و نیمرخ‌هایی که موج با یک شرایط دریایی متفاوت بر مقطع تغییر شکل یافته تابیده شده است را نشان می‌دهد.

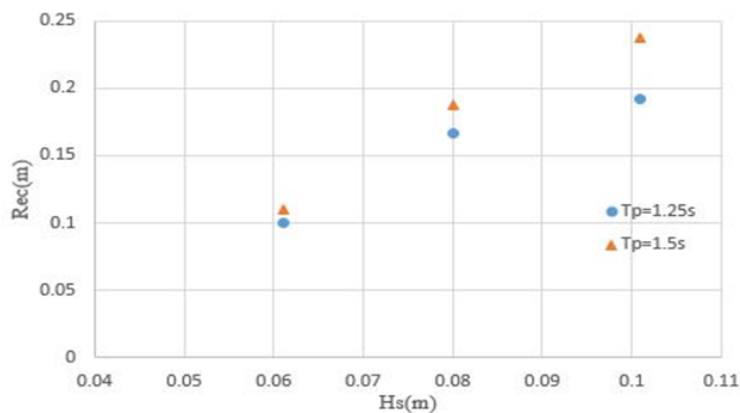
#### ۴-۳- پارامتر پرپود امواج

شکل ۹ مقدار عرض فرسایش یافته سکوی موج‌شکن سکویی برای ارتفاع و پرپودهای مختلف امواج را نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها عمق آب پای سازه ۲۵ سانتی‌متر، عرض سکوی سازه ۲۵ سانتی‌متر، تراز سکو از سطح ایستایی ۹ سانتی‌متر و تعداد امواج تابیده شده به سازه ۳۰۰۰ موج است. آنچه از شکل پیداست پرپود موج پارامتر بسیار تاثیرگذاری در پایداری و تغییر شکل موج‌شکن‌های سکویی است. با توجه به شکل ۹ می‌توان دریافت که در یک ارتفاع ثابت موج، با افزایش پرپود موج مقدار عرض فرسایش یافته سکو افزایش می‌یابد. با افزایش پرپود موج در یک ارتفاع ثابت، انرژی موج برخوردی و طول موج افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان گفت که با افزایش پرپود موج، نیروی ناشی از موج در مدت زمان طولانی‌تری به سازه وارد می‌شود و این مسئله باعث افزایش تغییر شکل و فرسایش سکو می‌شود.

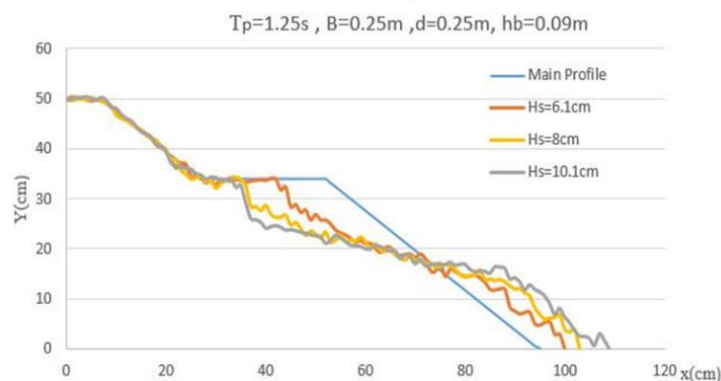
شکل ۱۰ نیمرخ‌های تغییر شکل یافته موج‌شکن سکویی تحت اثر امواج با ارتفاع یکسان ۸ سانتی‌متر و سه پرپود اوجی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نیمرخ‌های ترسیم شده مشاهده می‌گردد که پرپود موج پارامتر بسیار تاثیرگذاری در میزان فرسایش و تغییر شکل سکوی موج‌شکن سکویی است و در یک ارتفاع ثابت موج با افزایش پرپود موج مقدار فرسایش عرض سکو افزایش می‌یابد.

مستقیم به دست آمده در اثر برخورد موج به مقطع اولیه سازه از فرسایش حالتی که موج روی نیمرخ تغییر شکل یافته تابیده شده است، به مراتب کمتر است. در نمودار ۳ شکل ۱۲،  $(0.08m, T=1.25s)$ - $(0.061m, T=1.25s)$  به این مفهوم است که ابتدا موجی با ارتفاع  $0.061$  سانتی متر و پریود  $1/25$  ثانیه برخورد نموده و سپس روی نیمرخ تغییر شکل یافته تحت اثر همین موج، موجی با ارتفاع  $0.08$  متر و پریود  $1/25$  ثانیه به تعداد  $3000$  موج تابیده شده و پس از آن موجی با ارتفاع  $0.101$  متر و پریود  $1/25$  ثانیه به تعداد  $3000$  موج روی نیمرخ تغییر شکل یافته که تحت اثر ارتفاع  $0.08$  متر و پریود  $1/25$  ثانیه بوده است، برخورد کرده است. در واقع در این حالت به مقطع سازه  $9000$  موج تابیده شده است. در آزمایش های مربوط به نمودارهای ۴ و ۵ نیز ترتیب برخورد امواج از ارتفاع موج کم به زیاد است. با توجه به نیمرخ های شکل ۱۲ می توان دریافت که در موج شکن های پایدار دینامیکی میزان فرسایش مستقیم ایجاد شده در اثر برخورد موج به مقطع اولیه مدل موج شکن سکویی از فرسایش حالتی که موج روی نیمرخ تغییر شکل یافته تابیده شده است، به مراتب کمتر می باشد. مشاهده شد که این مسئله در موج شکن های پایدار استاتیکی نیز صادق است.

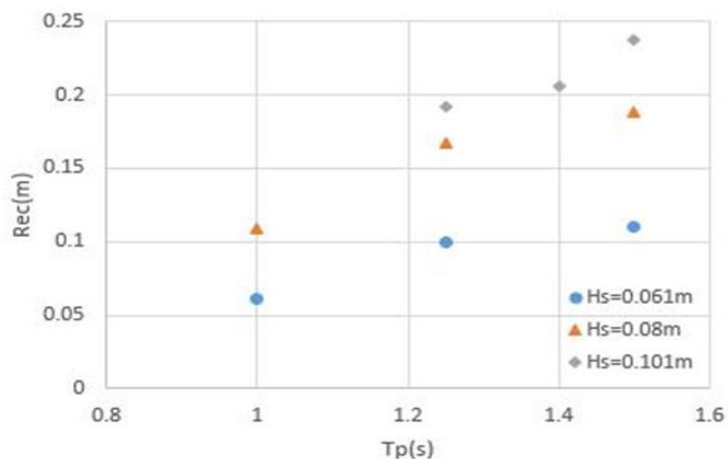
شکل ۱۱ مربوط به نیمرخ های موج شکن های پایدار استاتیکی  $(H_0T_0 < 70)$  و شکل ۱۲ مربوط به نیمرخ های موج شکن های پایدار دینامیکی  $(H_0T_0 > 70)$  است. برای انجام آزمایش ها سه پریود اوجی ۱،  $1/25$  و  $1/5$  ثانیه و سه ارتفاع موج  $6/1$ ،  $8$  و  $10/1$  سانتی متر در نظر گرفته شده است. تعداد امواج در هر آزمایش  $3000$  متر، عمق آب پای سازه  $25$  سانتی متر، عرض سکو  $25$  سانتی متر، تراز سکو از سطح ایستایی آب  $9$  سانتی متر و قطر اسمی سنگدانه ها برابر  $2$  سانتی متر بوده است. در نمودار ۱،  $(0.061m, T=1s)$ - $(0.08m, T=1s)$  به این مفهوم است که ابتدا موجی با ارتفاع  $0.061$  سانتی متر و پریود  $1$  ثانیه برخورد نموده و سپس روی نیمرخ تغییر شکل یافته تحت اثر همین موج، موجی با ارتفاع  $0.08$  متر و پریود  $1$  ثانیه به تعداد  $3000$  موج تابیده شده است. در نمودار ۲ به این صورت  $(0.061m, T=1.25s)$ - $(0.08m, T=1.25s)$  است که موجی به ارتفاع  $0.061$  متر و پریود  $1/25$  ثانیه به مقطع سازه برخورد نموده و سپس روی نیمرخ تغییر شکل یافته تحت اثر همین موج، موجی دیگر با ارتفاع  $0.08$  متر و پریود  $1/25$  ثانیه به تعداد  $3000$  موج برخورد کرده است. نمودارهای ۱ و ۲ در شکل ۱۱ نشان می دهند که در موج شکن های پایدار استاتیکی، میزان فرسایش



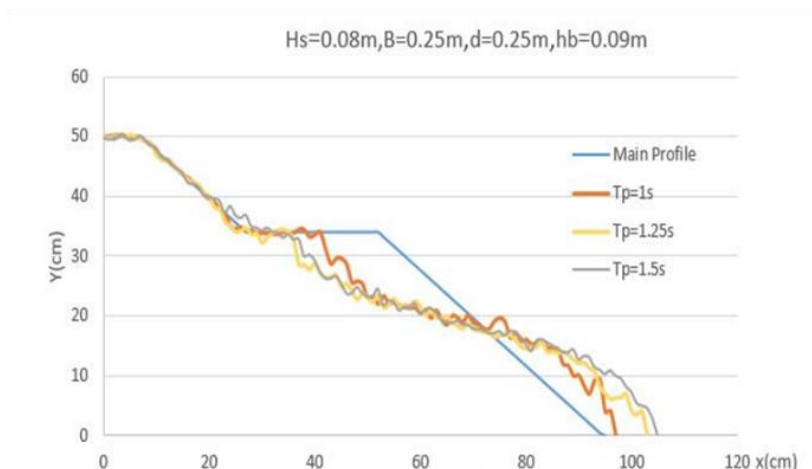
شکل ۷- تاثیر ارتفاع موج بر عرض فرسایش یافته سکو برای دو پریود اوجی متفاوت



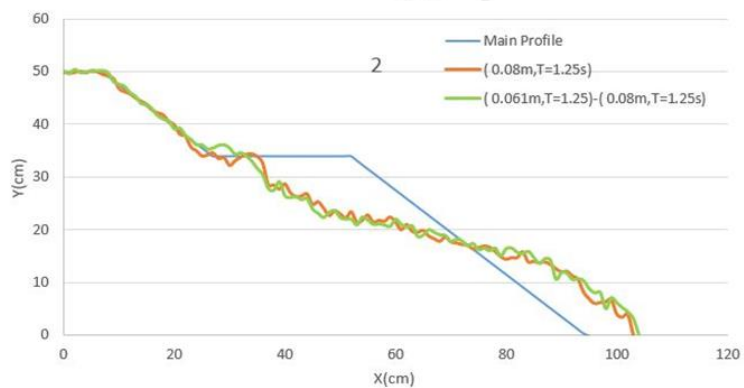
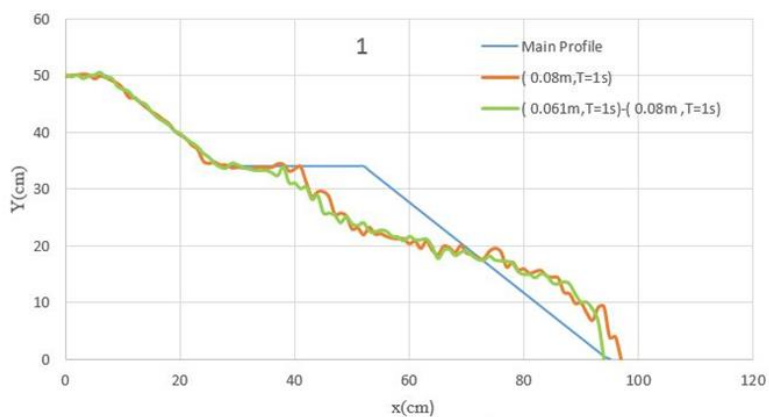
شکل ۸- تاثیر ارتفاع موج بر نیمرخ تغییر شکل یافته تحت اثر پریود یکسان



شکل ۹- تاثیر پریود موج بر عرض فرسایش یافته سکو برای ارتفاع‌های مختلف موج



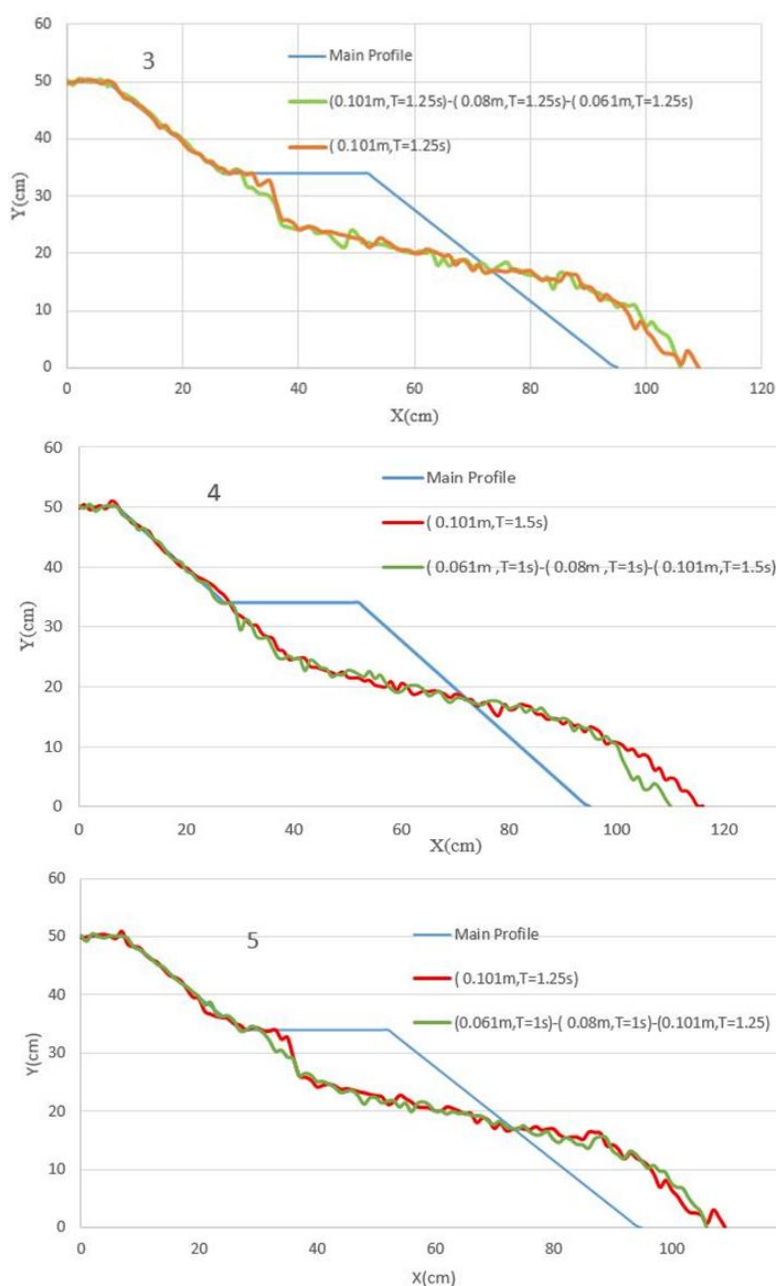
شکل ۱۰- تاثیر پریود موج بر نیمرخ تغییر شکل یافته تحت اثر ارتفاع موج یکسان



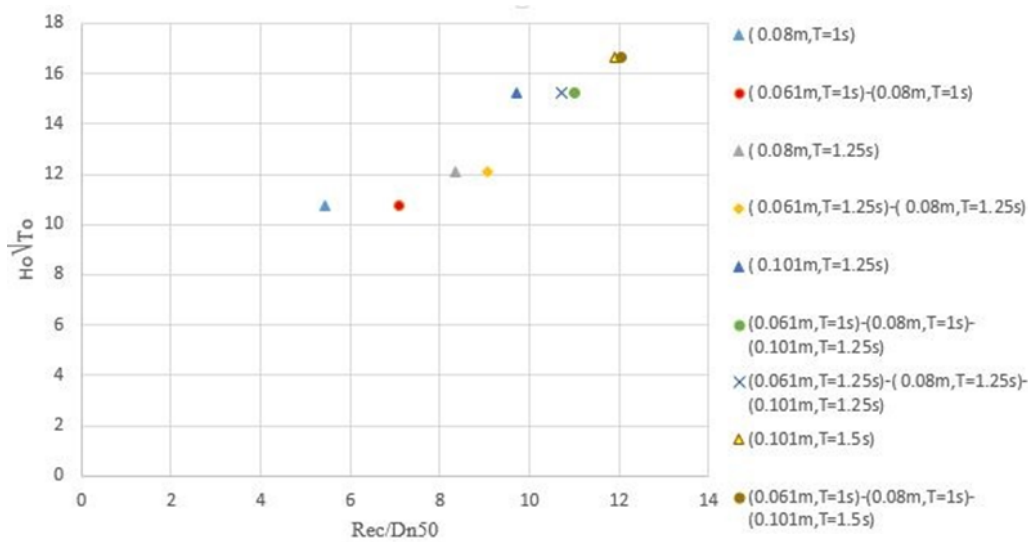
شکل ۱۱- مقایسه نیمرخ تغییر شکل یافته از مقطع اولیه و نیمرخ حاصل از برخورد موج بر مقطع تغییر شکل یافته برای موج‌شکن‌های پایدار استاتیکی

شکل ۱۳ تغییرات عرض فرسایش یافته بدون بعد شده را برای دو حالت تغییر شکل مستقیم سازه و تغییر شکل ناشی از برخورد موج روی مقطع تغییر شکل یافته را نسبت به  $H_0\sqrt{T_0}$  در موج شکن‌های پایدار استاتیکی و پایدار دینامیکی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود در موج شکن‌های پایدار استاتیکی ( $H_0\sqrt{T_0} < 14.5$ ) و در موج شکن‌های پایدار دینامیکی ( $H_0\sqrt{T_0} > 14.5$ ) افزایش  $H_0\sqrt{T_0}$ ، اختلاف مقدار فرسایش عرض سکو برای دو حالت تغییر شکل مستقیم سازه و تغییر شکل ناشی از برخورد موج روی مقطع تغییر شکل یافته کم می‌شود و در موج شکن‌های پایدار استاتیکی نرخ کاهش فرسایش بیشتر است. در حالت اول قبل از برخورد موج دو حالت وجود دارد. در حالت اول قبل از برخورد موج ترکیب موج  $(0.101m, T=1.25s)$  و  $(0.061m, T=1s)$  به مقطع سازه تابیده شده است. در حالت دوم قبل از برخورد موج  $(0.101m, T=1.25s)$ ، دو ترکیب موج  $(0.08m, T=1.25s)$  و  $(0.061m, T=1.25s)$  به سازه برخورد نموده است و این دو حالت با تغییر شکل مستقیم سازه تحت اثر برخورد  $(0.101m, T=1.25s)$  مقایسه شده است. میزان اختلاف فرسایش سکو برای حالت دوم با فرسایش مستقیم سازه کمتر از حالت اول است. در واقع در موج شکن‌های پایدار دینامیکی، نیمرخ‌هایی که امواج قبلی برخوردی دارای  $H_0\sqrt{T_0}$  بیشتری هستند، فرسایش کمتری توسط امواج بزرگتر بعدی در آنها ایجاد می‌شود. شکل ۱۴ نسبت بدون بعد فرسایش به دست آمده از تغییر شکل ناشی از برخورد موج روی مقطع تغییر شکل یافته و تغییر شکل مستقیم سازه را نسبت به  $H_0\sqrt{T_0}$  نشان می‌دهد.

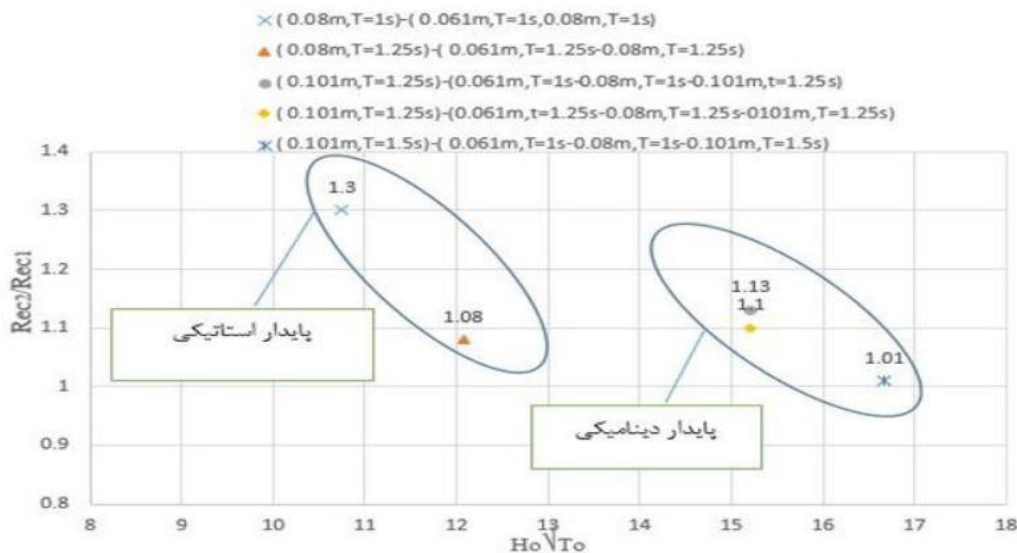
شکل ۱۲- مقایسه نیمرخ تغییر شکل یافته از مقطع اولیه و نیمرخ حاصل از برخورد موج بر مقطع تغییر شکل یافته برای موج شکن‌های پایدار دینامیکی



شکل ۱۲- مقایسه نیمرخ تغییر شکل یافته از مقطع اولیه و نیمرخ حاصل از برخورد موج بر مقطع تغییر شکل یافته برای موج شکن‌های پایدار دینامیکی



شکل ۱۳- نسبت بدون بعد فرسایش به دست آمده از تغییر شکل ناشی از برخورد موج روی مقطع تغییر شکل یافته و تغییر شکل مستقیم سازه نسبت به  $H_0\sqrt{T_0}$



شکل ۱۴- نسبت بدون بعد فرسایش به دست آمده از تغییر شکل ناشی از برخورد موج روی مقطع تغییر شکل یافته و تغییر شکل مستقیم سازه نسبت به  $H_0\sqrt{T_0}$

سکو برای دو حالت ذکر شده، ۱۲ درصد کاهش یافته است. به عبارت دیگر می‌توان گفت در موج‌شکن‌های پایدار استاتیکی و پایدار دینامیکی، هر چه ترکیب ارتفاع و پریود موج بزرگتر باشد (هرچه  $H_0\sqrt{T_0}$  بزرگتر باشد)، تاثیر امواج برخوردی قبلی در ایجاد تغییر شکل روی مقطع تغییر شکل یافته کمتر می‌شود. نکته دیگری که می‌توان از شکل برداشت نمود این است که نسبت فرسایش عرض سکو برای بیشترین مقدار  $H_0\sqrt{T_0}$  برابر  $1/0.1$  است که این تساوی به این معنا است که در موج‌شکن‌های پایدار دینامیکی برای  $H_0\sqrt{T_0} > 16$  تغییر شکل نهایی تنها تابعی از حداکثر موج وارده بوده و تاریخچه زمانی موج‌های قبلی تاثیر چندانی در عملکرد نهایی سازه نخواهد داشت. به بیان دیگر در این شرایط، مشخصه ارتفاع و پریود موج به گونه‌ای است که تاثیر اعمال  $3000$  موج روی سازه

در شکل ۱۴ فرسایش به دست آمده از تغییر شکل ناشی از برخورد موج روی مقطع تغییر شکل یافته با  $Rec_2$  و فرسایش مستقیم به دست آمده با  $Rec_1$  نمایش داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود در موج‌شکن‌های پایدار استاتیکی و دینامیکی، با افزایش  $H_0\sqrt{T_0}$  اختلاف مقدار فرسایش عرض سکو برای دو حالت تغییر شکل مستقیم سازه و تغییر شکل ناشی از برخورد موج روی مقطع تغییر شکل یافته کم می‌شود. به گونه‌ای که در موج‌شکن‌های پایدار استاتیکی با ۱۲ درصد افزایش  $H_0\sqrt{T_0}$ ، اختلاف مقدار فرسایش عرض سکو برای دو حالت تغییر شکل مستقیم سازه و تغییر شکل ناشی از برخورد موج روی مقطع تغییر شکل یافته، تقریباً ۲۲ درصد کاهش یافته است. همچنین در موج‌شکن‌های پایدار دینامیکی با حدود ۱۰ درصد افزایش  $H_0\sqrt{T_0}$ ، اختلاف مقدار فرسایش عرض

۴- در موج‌شکن‌های پایدار دینامیکی برای  $H_0\sqrt{T_0} > 16$ ، مدت طوفان تاثیر کمتری در میزان فرسایش دارد؛ لذا تاثیر امواج برخوردی قبلی در ایجاد تغییر شکل روی مقطع تغییر شکل یافته ناچیز است. در این ترکیب موج، تغییر شکل نهایی سازه را می‌توان با دقت خوبی با اعمال ۳۰۰۰ موج محاسبه نمود و نیازی به منظور نمودن تاریخچه تغییر شکل سازه نیست. از طرف دیگر به منظور محاسبه تغییر شکل نهایی در شرایط  $H_0\sqrt{T_0} < 16$  باید شرایط تغییر شکل یافته سازه به عنوان شرایط اولیه منظور گردد تا مقادیر تغییر شکل، دور از واقع و در خلاف جهت اطمینان حاصل نشود.

#### ۶- مراجع

- 1- Lykke Andersen T. Hydraulic Response of Rubble Mound Breakwaters: scale effects-berm breakwaters. Aalborg University report 27, ISSN 0909-4296, Dissertation. 2006.
- 2- Van Der Meer JW. Rock slopes and gravel beaches under wave attack: Delft hydraulics; 1988.
- 3- Moghim MN, Shafieefar M, Tørum A, Chegini V. A new formula for the sea state and structural parameters influencing the stability of homogeneous reshaping berm breakwaters. Coastal Engineering. 2011 Aug 31;58(8):706-21.
- 4- PIANC MarCom WG 40, 2003. State-of-the-Art of Designing and Constructing Berm Breakwaters. PIANC, Brussels.
- 5- Hall K, Kao JS. A study of the stability of dynamically stable breakwaters. Canadian Journal of Civil Engineering. 1991;18(6):916-25.
- 6- Van der Meer JW. Stability of the seaward slope of berm breakwaters. Coastal Engineering. 1992;16(2):205-34.
- 7- Lissev N, Daskalov K, editors. Berm type breakwater—an alternative solution for new east breakwater for Port of Burgas. Varna conference; 2000.
- 8- Sigurdarson S, Van Der Meer JW, Burcharth HF, Sørensen JD, editors. Optimum safety levels and design rules for the Icelandic-type berm breakwater. The International Conference of Coastal Structures; 2007.
- 9- Shekari MR, Shafieefar M. An experimental study on the reshaping of berm breakwaters under irregular wave attacks. Applied Ocean Research. 2013 Aug 31;42:16-23.
- 10- Sigurdarson S, Van der Meer JW. Design of berm breakwaters, recession, overtopping and reflection. Proceedings of Coasts, Marine Structures and Breakwaters. 2013:18-20.
- 11- Moghim MN, Alizadeh F. Hydraulic stability of reshaping berm breakwaters using the wave momentum flux parameter. Coastal Engineering. 2014 Jan 31;83:56-64.

تغییر شکل نیافته با تاثیر اعمال این امواج روی سازه تغییر شکل یافته یکسان می‌باشد. در این شرایط می‌توان پیش بینی نمود که مدت طوفان تاثیر کمتری بر میزان فرسایش نهایی خواهد داشت. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر بر اساس شرایط محیطی و سازه‌ای در نظر گرفته شده برای آزمایش‌های صورت گرفته، دارای اعتبار بوده و قابل کاربرد است که به صورت زیر ارایه می‌گردد:

$$8.21 < H_0\sqrt{T_0} < 17.77$$

$$500 < N < 6000$$

$$\frac{h_b}{D_{n50}} = 4.5 \quad (3)$$

$$\frac{d}{D_{n50}} = 12.5$$

$$\frac{B}{D_{n50}} = 12.5$$

#### ۵- نتیجه گیری

مطالعه آزمایشگاهی تحقیق حاضر در فلولم موج با استفاده از مدل آزمایشگاهی دو بعدی به منظور بررسی تاثیر شرایط امواج نامنظم (شامل ارتفاع موج، پرپود موج و مدت طوفان است) بر فرسایش نیمرخ تغییر شکل یافته موج‌شکن‌های سکویی، صورت گرفته است. نتایج حاصل شده از این تحقیق به شرح زیر است:

۱- ارتفاع موج، پرپود موج و مدت طوفان عوامل بسیار تاثیرگذاری در پایداری موج‌شکن‌های سکویی هستند و با افزایش هر سه پارامتر، میزان فرسایش عرض سکوی سازه زیاد می‌شود.

۲- موج‌شکن‌های پایدار استاتیکی ( $H_0\sqrt{T_0} < 14.5$ ) و موج‌شکن‌های پایدار دینامیکی ( $H_0\sqrt{T_0} > 14.5$ ) هرچه ترکیب ارتفاع و پرپود موج بزرگتر باشد، تاثیر امواج برخوردی قبلی در ایجاد تغییر شکل روی مقطع تغییر شکل یافته کاهش می‌یابد و در واقع اختلاف مقدار فرسایش عرض سکو برای دو حالت تغییر شکل مستقیم سازه و تغییر شکل ناشی از برخورد موج روی مقطع تغییر شکل یافته کم می‌شود و در موج‌شکن‌های پایدار استاتیکی نرخ کاهش فرسایش بیشتر است. به گونه‌ای که در موج‌شکن‌های پایدار استاتیکی با ۱۲ درصد افزایش  $H_0\sqrt{T_0}$ ، اختلاف مقدار فرسایش عرض سکو برای دو حالت تغییر شکل مستقیم سازه و تغییر شکل ناشی از برخورد موج روی مقطع تغییر شکل یافته، تقریباً ۲۲ درصد کاهش یافته است. همچنین در موج‌شکن‌های پایدار دینامیکی با حدود ۱۰ درصد افزایش  $H_0\sqrt{T_0}$ ، اختلاف مقدار فرسایش عرض سکو برای دو حالت ذکر شده، ۱۲ درصد کاهش یافته است.

۳- در موج‌شکن‌های پایدار دینامیکی، نیمرخ‌هایی که امواج قبلی برخوردی دارای  $H_0\sqrt{T_0}$  بیشتری هستند، فرسایش کمتری توسط امواج بزرگتر بعدی در آنها ایجاد می‌شود.

Coastal Engineering Proceedings. 2014 Oct 28;1(34):53  
15- Moghim MN, Andersen TL. Armor stability of hardly (or partly) reshaping berm breakwaters. Coastal Engineering. 2015 Oct 31;104:1-2.s  
16- Jensen OJ, Klinting P. Evaluation of scale effects in hydraulic models by analysis of laminar and turbulent flows. Coastal engineering. 1983;7(4):319-29.

12- Andersen TL, Burcharth HF. A new formula for front slope recession of berm breakwaters. Coastal Engineering. 2010;57(4):359-74.  
13- Motalebi A. Experimental study of investigating the influence of armor stone size in stability of berm breakwaters (Doctoral dissertation, Master thesis, Tarbiat modares University).  
14- Andersen TL, Moghim MN, Burcharth HF. Revised recession of reshaping berm breakwaters.