

## بررسی پایداری موج شکن های شکل پذیر بر اساس نتایج آزمایشگاهی

پیمان عزآباد<sup>۱</sup>، مهدی شفیعی فر<sup>۲</sup>، ناصر شیریان<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانش آموخته دکترای سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس

### چکیده

در تحقیق حاضر با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، وضعیت نیمرخ تغییر شکل یافته موج شکن های شکل پذیر، در فرآیند برخورد امواج در طول زمان مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا ابتدا ۷ پارامتر مستقل موثر بر پایداری سازه که در مطالعات آزمایشگاهی دستخوش تغییر قرار گرفته اند، شناسایی شده و تاثیر آنها در پارامترهای هندسی معرف پایداری (۶ پارامتر)، بررسی شده است. این ۶ پارامتر وابسته به نحوی انتخاب شده اند که با کمترین تعداد ممکن، هندسه تغییر شکل یافته سازه را به طور کامل تبیین کنند.

در ادامه برای بدست آوردن مقدار این پارامترها، روابطی بر اساس مدل های آماری ارائه شده اند که بر حسب ۷ پارامتر مستقل موثر می باشند. همچنین تلاش های انجام گرفته در جهت افزایش هر چه بیشتر اعتبار و قدرت این روابط نیز نمایش داده شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها با استفاده از نتایج بدست آمده، نرم افزاری به نام IB برنامه ریزی شده که به کمک آن، نتایج این تحقیق با نرم افزار Breakwat و همچنین با نتایج آزمایش های انجام شده مورد مقایسه قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** موج شکن شکل پذیر، پایداری، مطالعات آزمایشگاهی، نرم افزار IB، مدل های آماری

## An Investigation on Stability of Reshaping Breakwaters Using Experimental Data

### Abstract

This paper presents results of an experimental investigation on stability of reshaping breakwaters. Results of 82 test cases have been used to study the reshaped profile condition of such breakwaters during the process of wave attacks.

In this research, first 7 independent parameters having significant effects on structure stability have been identified and their consequence on geometric parameters of stability (6 parameters) have been studied. These 6 dependant parameters are selected so that they show completely the deformed geometry of the structure with the least probable tries. Then, using experimental data and fitting them to various statistical models, some formulae are suggested for estimation of geometrical parameters of reshaped profiles. Also efforts to increase the validity of these experimental formulae are presented.

Finally a software called IB has been developed using results of the present research. Then comparisons have been made between IB and BREAKWAT program. Results show that BREAKWAT fails to predict the reshaped profile in some test cases.

**Keywords:** Reshaping breakwater, Stability, Experimental studies, IB software, Statistical models, Reshaped profile

## ۱- مقدمه

موج‌شکن‌ها سازه‌هایی هستند که برای حفاظت بندرگاه از اثر امواج دریا و همچنین حفاظت سواحل، ساخته می‌شوند. این سازه‌ها که معمولاً بصورت توده سنگی و با سطح مقطع دوزنقه طرح و اجرا می‌گردند، عموماً از سه لایه اصلی تشکیل می‌شوند که عبارتند از: هسته، لایه یا لایه‌های فیلتر و لایه آرمور که وظیفه اصلی مقاومت مستقیم در برابر امواج را به عهده دارد. اجزای تشکیل دهنده لایه آرمور عموماً قطعه سنگهای بزرگ و سنگین هستند که از معادن استخراج شده و به محل حمل می‌گردند. در برخی موارد که امواج دریا بسیار مرتفع بوده و یا سنگهای بزرگ و مقاوم به سهولت در دسترس نباشد، نیاز به استفاده از قطعات بتنی با اشکال مختلف و خاص وجود دارد.

نسل جدید موج شکن های توده سنگی به گونه ای طرح و اجرا می‌شوند که اجازه بروز تغییرشکل در مقطع آنها وجود داشته باشد تا بدینوسیله بتوانند انرژی امواج را به خوبی جذب کرده و علاوه بر آن، نیمرخ برای سازه پدید بیاید که نیروهای هیدرودینامیکی وارده را به حداقل برساند.

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در این راه انجام گرفته که می‌توان به آزمایشهای Van der Meer (۱۹۸۸) اشاره نمود که با استفاده از داده های آزمایشگاهی روابطی برای تخمین هندسه تغییر شکل یافته سازه ارائه نمود و بر اساس این روابط، نرم‌افزاری به نام Breakwat برنامه‌ریزی کرد. او در ارائه این روابط از پارامتر پایداری ( $HoTo$ )، پارامتر سطح آسیب (S)، و نیز عواملی همچون هندسه اولیه سازه (شیب وجه جلویی) و نفوذپذیری سازه نیز استفاده نمود [۹].

در سال ۱۹۹۳ Lamberti و همکاران به اهمیت خاص شرایط عمق آب پای سازه اشاره نمودند و بیان داشتند که در شرایط آب کم عمق که عمده موج-شکن‌های موجود، در این شرایط قرار می‌گیرند؛ ضرایب کاهش تغییرشکل نیمرخ نهایی علاوه بر ارتفاع موج، به عمق شکست، تیزی موج، و شیب کف نیز مربوط می‌باشد [۵].

Sayao (۱۹۹۸) علاوه بر توصیف پایداری موج‌شکن شکل‌پذیر برحسب پارامتر تشابه شکست، دریافت که نفوذپذیری سازه تاثیر بسزایی در پایداری هیدرولیکی آن خواهد داشت. نفوذپذیری زیاد هسته پایداری وجه پشتی سازه را در معرض خطر قرار می‌دهد و در عین حال نفوذناپذیری هسته نیز می‌تواند باعث ناپایداری سنگهای آرمور گردد [۷].

Torum و همکاران (۲۰۰۲) نیز آزمایشهای گسترده‌ای را روی این دسته موج‌شکن‌ها (البته از نوع سکویی) انجام دادند و توانستند رابطه‌ای برای میزان عقب نشینی سکو در حالت تشکیل نیمرخ پایدار نهایی ارائه کنند. آنها در این روابط جملاتی شامل تاثیر ضریب دانه‌بندی و ضریب عمق را نیز به روابط خود اضافه نمودند [۸].

Rao و همکاران (۲۰۰۳)، با انجام آزمایشهایی دریافتند که با کوچک شدن ابعاد سنگها، میزان آسیب وارده به آنها افزایش می‌یابد. این دو با استفاده از پارامتر سطح آسیب (S) و کاهش ۱۰ و ۳۰ درصدی وزن سنگها نشان دادند که یک رابطه نمایی بین افزایش پارامتر پایداری و افزایش سطح آسیب برقرار می‌باشد [۶].

در ایران نیز چند تحقیق در مورد موج شکن های شکل‌پذیر انجام شده است. چگینی و همکاران [۱] تغییرشکل موج‌شکن‌های شکل‌پذیر را در اثر برخورد امواج مورد بررسی قرار دادند. آنها آزمایش‌هایی بر روی مدل هیدرولیکی یک نوع موج‌شکن شکل‌پذیر موسوم به مسلح توده‌ای انجام دادند. همچنین آق‌تومان و همکاران [۲] در مورد اثر پارامترهای مختلف و از جمله ضخامت لایه آرمور موج‌شکن‌های شکل‌پذیر تحقیق نموده‌اند.

در سال ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ شیریان مجموعه آزمایشهای وسیعی روی موج‌شکن شکل‌پذیر فاقد سکو در فلوم موج مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی انجام داد و واکنشهای هیدرولیکی آنها را مورد بررسی قرار داد. آنچه در تحقیق حاضر انجام شده، تحلیلهایی است که روی نتایج بدست آمده از این آزمایشها صورت گرفته است [۳].

رابطه به پایداری موج شکن های شکل پذیر، در تحقیق حاضر این داده های خاص پایداری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

در این بخش، شرایط آزمایشگاهی که روی مدل انجام گرفته و پارامترهای مورد آزمایش به اختصار توضیح داده می شوند.

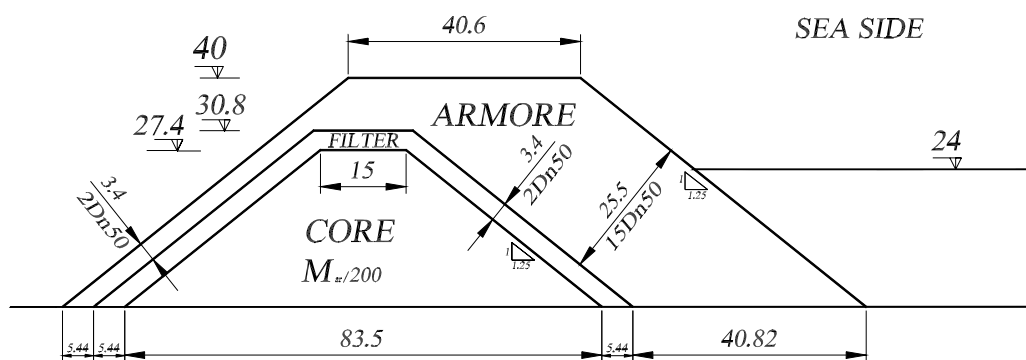
آزمایشها بر روی مدل هیدرولیکی مقطع موج شکن شکل پذیر مطابق شکل (۱) در فلوم موج با ۳۳ متر طول، ۱ متر عرض و ۱ متر ارتفاع انجام شده است. امواج توسط پاروی مولد موج به طول ۵/۵ متر و ارتفاع ۱ متر از نوع پیستونی قائم- که در انتهای فلوم امواج قرار گرفته- تولید می شدند. در تمامی آزمایشها نیمرخ سازه در سمت پارو، قبل از شروع آزمایش و بعد از اصابت امواج، برداشت و ثبت شده است.

در مجموع ۸۲ سری آزمایش در رابطه با پایداری موج شکن های شکل پذیر انجام گرفته است که در آنها ارتفاع موج، پرپود موج، عمق آب، شیب اولیه سازه، ضریب دانه بندی سنگهای آرمور، ضریب نفوذپذیری سازه و تعداد امواج برخوردی متغیر بوده اند. آزمایشها در مقیاس ۱/۵۰ و با  $Dn50$  ثابت انجام گرفته است؛ به گونه ای که عدد پایداری موج شکن ( $N_s$ ) بین ۱/۷۳ تا ۳/۸۳ و تیزی موج (som) بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۷ متغیر باشد. جدولهای ۱ و ۲ حدود تغییرات را نمایش می دهند. شرایط انجام آزمایشها و محدودیتهای آنها در مرجع [۳] بیان گردیده اند.

در تحقیق حاضر با توجه به نتایج آزمایشهای فوق و با استفاده از داده های موجود، سعی شده است تاثیر کلیه پارامترها از جمله: ضریب دانه بندی، فاکتور عمق، فاکتور نفوذپذیری مورد بررسی قرار گیرند. پارامتر سطح آسیب به عنوان معیار اصلی فرسایش مورد توجه بوده و مشخصات موج، هندسه اولیه و نیز تعداد امواج برخوردی که شاخصه اصلی شکل پذیری می باشد نیز بررسی شده اند. در نهایت با توجه به پارامترهای مختلف مستقل و وابسته موثر در تخمین نیمرخ تغییر شکل یافته نهایی موج شکن شکل پذیر و با استفاده از تحلیل های آماری مختلف، مدل های ریاضی جهت بدست آوردن هر پارامتر هندسی معرفی شده است. در پایان نرم افزاری در این راه توسعه داده شده است که به کمک آن می توان نیمرخ تغییر شکل یافته سازه را مشاهده نمود.

## ۲- انجام آزمایشها

همانگونه که اشاره شد شیریان در راستای تحقیق رساله دکتری خود آزمایشهای بسیار گسترده ای جهت بررسی واکنشهای هیدرولیکی موج شکن های شکل پذیر برای نخستین بار در چنین سطحی در داخل کشور انجام داد. ایشان در تحقیق خود صرفاً به بررسی واکنشهای هیدرولیکی پرداخته و راجع به پایداری این نوع موج شکنها بررسی و تحلیل انجام نداده است. با توجه به داده های بسیار ارزشمند تحقیق مذکور در



DIMENSIONS ARE IN Cm

شکل ۱- نمونه مقطع عرضی مدل آزمایشگاهی موج شکن شکل پذیر مورد آزمایش

### ۳- تجزیه و تحلیل آماری داده‌های آزمایشگاهی

برای اینکه بتوان نتایج بدست آمده از آزمایشها را به گونه‌ای ریاضی با پایداری هیدرولیکی موج شکن شکل پذیر ارتباط داد، به تجزیه و تحلیل آماری روی نتایج بدست آمده و نیز ورودیهای آزمایشها نیاز است. برای این امر لازم است پارامترهایی تعریف شوند تا بتوان آزمایشها را بر اساس آنها دسته بندی کرد. این پارامترها در دو نوع پارامتر مستقل و وابسته تقسیم‌بندی می‌گردند:

#### ۳-۱- پارامترهای مستقل

پارامترهای مستقل پارامترهایی هستند که به دلخواه در طول انجام آزمایشها مورد تغییر قرار می‌گیرند. انتخاب این پارامترها باید با دقت مناسبی صورت گیرد تا با کمترین تعداد پارامتر مستقل، بیشترین تنوع نتایج را از آزمایشها بدست آید. مشخصات امواج وارده به سازه به همراه پارامتر و عدد

پایداری و نیز عامل تیزی موج در جدول (۱) آورده شده است. برای تعمیم نتایج از پارامترهای مستقل بدون بعد شده استفاده شده است و به منظور حصول نتایج کاملا معتبر از نوع تاثیر ارتفاع و پریرود موج بر پایداری سازه، دو پارامتر  $H_0T_0$  و  $S_{om}$  به عنوان پارامترهای مستقل اصلی انتخاب شده‌اند تا تاثیر مستقیم و معکوس پریرود موج بر پایداری، به خوبی بررسی شود. سایر متغیرهای مستقل (مجموعاً ۷ پارامتر) عبارتند از:

$$\frac{d}{D_{n50}}, N, \frac{D_{n50}(armor)}{D_{n50}(core)}, \frac{D_{n85}}{D_{n15}}, \cot \alpha$$

مقادیر مختلف این پارامترهای مستقل در هر حالت و تعداد آزمایشهای انجام گرفته در حالات مربوطه در جدول ۲ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است شرایطی که بیشترین تعداد آزمایش، مربوط به هر مقدار پارامتر مستقل در آن انجام شده است، شرایط عمومی آزمایشها نام گرفته است.

جدول ۱- مشخصات امواج وارده به مدل سازه

| متغیر مستقل                                      | تعداد آزمایشها | مقدار حداقل | مقدار حداکثر |
|--|----------------|-------------|--------------|
| ارتفاع موج (Hs)(m)                               | ۸۲             | ۲/۴         | ۴/۸          |
| پریرود موج (Tp)(sec)                             | ۸۲             | ۹/۰         | ۱۴/۰         |
| تیزی موج (Som)                                   | ۸۲             | ۰/۰۱۲۴      | ۰/۰۶۶۱       |
| عدد پایداری (Ns)                                 | ۸۲             | ۱/۷۳        | ۳/۸۳         |
| پارامتر پایداری (H <sub>0</sub> T <sub>0</sub> ) | ۸۲             | ۴۸/۶        | ۱۳۶/۴        |

جدول ۲- مشخصات متغیرهای مستقل محیطی و سازه‌ای و تعداد آزمایشهای مربوطه

| متغیر مستقل                        | حالت ۱ |       | حالت ۲ |       | حالت ۳ |       | حالت ۴ |       |
|------------------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|                                    | تعداد  | مقدار | تعداد  | مقدار | تعداد  | مقدار | تعداد  | مقدار |
| تعداد امواج (N)                    | ۱۴     | ۲۰۰۰  | ۱۶     | ۳۰۰۰  | ۴۷     | ۶۰۰۰  | ۵      |       |
| شیب اولیه (cot)                    | ۶۶     | ۲/۰   | ۷      | ۲/۵   | ۹/۰    |       |        |       |
| عمق نسبی آب (d/Dn50)               | ۶      | ۱۴/۱۲ | ۶۹     | ۱۵/۸۸ | ۷      |       |        |       |
| فاکتور دانه بندی (f <sub>g</sub> ) | ۲      | ۱/۴۴  | ۲      | ۱/۸۲  | ۷۸     |       |        |       |
| فاکتور نفوذپذیری (f <sub>p</sub> ) | ۶      | ۳/۱۵  | ۶      | ۹/۴۴  | ۶۴     | ۵۰    | ۶      |       |

### ۳-۲- پارامترهای وابسته

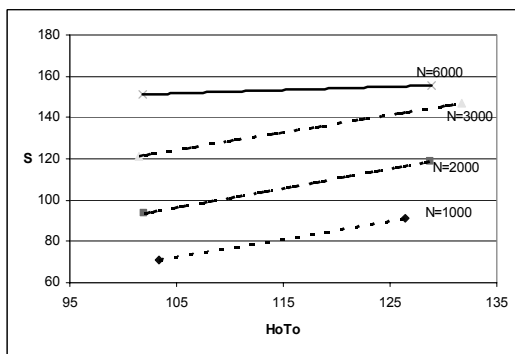
پارامترهایی هستند که در نتیجه آزمایشها تغییر می کنند و عموماً مرتبط با هندسه تغییر شکل یافته سازه انتخاب می شوند تا بتوانند پایداری هیدرولیکی موج شکن شکل پذیر با شیب یکنواخت را تبیین کنند. این پارامترها به گونه ای انتخاب می گردند که هیچ گونه همپوشانی در تعریف هندسه نهایی سازه با یکدیگر نداشته باشند [۷] (شکل ۲). همچنین باید آنها را به نحو مناسبی بدون بعد نمود تا بتوان نتایج را تعمیم داد. به همین خاطر علاوه بر زوایا، از طولهایی استفاده می شود که به کمک پارامتر  $D_{n50}$  ( که در این آزمایشها ثابت نگه داشته شده است) بدون بعد شده اند. لازم به ذکر است انتخاب قطر اسمی سنگ آرمور برای بدون بعد کردن پارامترها، پس از آزمایش کلیه پارامترهای مربوط به این امر بوده است. همچنین پارامتر  $S$  که به صورت  $\frac{Ae}{D_{n50}^2}$  تعریف شده نیز به عنوان پارامتر وابسته مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است چنانچه مساحت های فرسایش یافته و انباشت شده را به صورت چهارضلعی های ساده شده ای (مشخص شده در شکل ۹) در نظر بگیریم،  $A_e$  مساحت دو چهارضلعی است که قاعدتا باید باهم برابر باشند. عمق فرونشینی ( $h_f$ ) نشانگر فاصله محل برخورد ۲ چهارضلعی تا سطح آزاد آب می باشد. شیب میانی ( $\tan \beta$ ) معرف شیب خطی است که از محل عمق فرونشینی سازه عبور کرده و نیمرخ نهایی را تشکیل می دهد. شیب فوقانی، تاثیر زبانه موج بر بخش فوقانی سازه را که بالای تراز آزاد آب قرار می گیرد نشان می دهد و با  $\tan \gamma$  نمایش داده می شود. طول فرسایش تاج و طول انباشت روی پله که به ترتیب با  $L_C$  و  $L_S$  معرفی شده اند فاصله محل عمق فرونشینی را تا بیشترین محل فرسایش روی تاج و قوز تحتانی را نشان می دهند.

در نهایت ۶ پارامتر وابسته به صورت زیر در نظر گرفته می شوند که در شکل (۱) نوع تعریف آنها مشخص شده است:

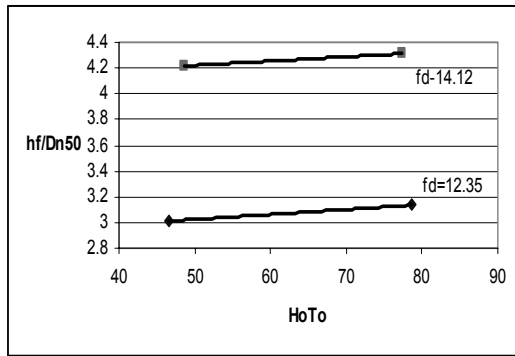
$$\frac{L_C}{D_{n50}}, S, \frac{L_S}{D_{n50}}, \tan \beta, \tan \gamma, \frac{h_f}{D_{n50}}$$

### ۴- نحوه تاثیر پارامترها بر یکدیگر

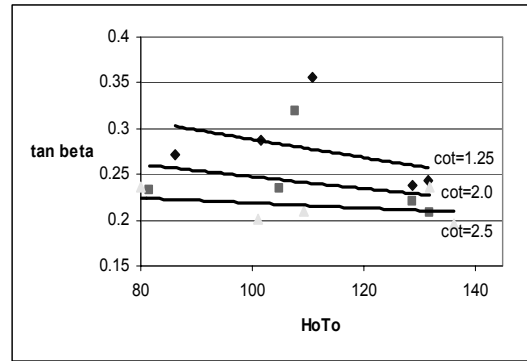
برای حصول اطمینان از نتایج مدل های آماری و نحوه تاثیر هر پارامتر مستقل بر پارامترهای وابسته و همچنین پایداری سازه و آسیب وارده به آن، نمودارهایی تهیه شده است که اهم آنها در شکل های ۳ تا ۸ نمایش داده شده اند. به دلیل تاثیر غیر قابل انکار پارامتر پایداری ( $H_o T_o$ ) بر تغییر شکل سازه شکل پذیر، از این عامل به عنوان محور افقی نمودارها استفاده شده است. محور قائم نمایشگر پارامتر وابسته است و نمودارهای مختلف، مقادیر متفاوت پارامتر مستقل مورد نظر را نشان می دهند. در هر نمودار، از مجموع ۸۲ آزمایش، آن دسته از داده هایی که کلیه شرایط در آنها یکسان بوده و تنها پارامتر مستقل مورد نظر تغییر کرده است مورد مقایسه قرار گرفته اند.



شکل ۳- تاثیر تعداد امواج بر پارامتر سطح آسیب



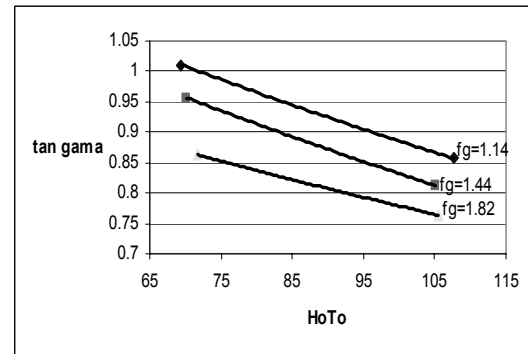
شکل ۸- نمودار تاثیر فاکتور عمق بر عمق فرونشینی



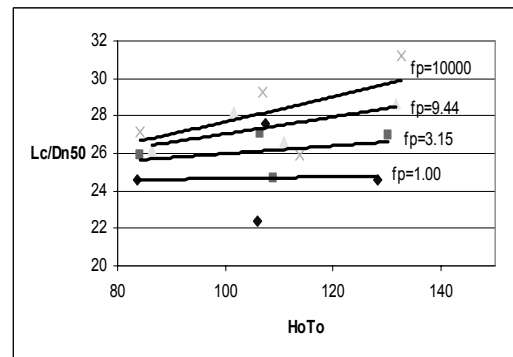
شکل ۴- نمودار تاثیر شیب اولیه سازه بر شیب میانی

### ۵- مدل‌های آماری

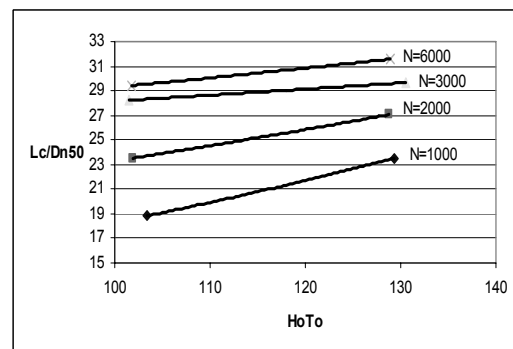
پس از بررسی‌های فراوان آماری روی پارامترهای مستقل و وابسته در حالات توابع لگاریتمی، نمایی، چندجمله‌ای خطی و ... که به کمک نرم‌افزار قوی و جامع SPSS 13 انجام گرفت؛ روابطی بدست آمد که به کمک آنها بتوان مقادیر پارامترهای وابسته را بر حسب پارامترهای مستقل (شرایط حاکم بر سازه پیش از طراحی) با دقت خوبی تخمین زد. برای این امر با استفاده از مدل‌های آماری، روابطی استخراج گردیده‌اند که در ادامه ارائه می‌گردند و بیانگر نحوه نیمرخ تغییر شکل یافته سازه بر اثر تغییر پارامترهای موثر می‌باشند. مشخصات مدل آماری مربوط به هر رابطه بصورت جدول در کنار نتیجه مدل آمده است. این ۶ رابطه به صورت زیر نمایش داده می‌شوند و میزان اعتبار آنها در قالب  $R^2$  مدل آماری، در کنار هر یک نوشته شده است. لازم به یادآوری است، شاخص فوق که به عنوان مجذور ضریب همبستگی شناخته می‌شود نشانگر میزان پراکندگی داده‌ها در کرانه‌های فوقانی و تحتانی مدل ریاضی ارائه شده می‌باشد.



شکل ۵- نمودار تاثیر ضریب دانه‌بندی بر شیب فوقانی



شکل ۶- نمودار تاثیر نفوذپذیری بر طول فرسایش تاج



شکل ۷- نمودار تاثیر تعداد امواج بر طول فرسایش تاج

$$S = \frac{H_o T_o^{2.165} * S_{om}^{1.162} * N^{0.344} * f_g^{0.463} * f_d^{0.444} * f_p^{0.006}}{205 * \cot \alpha^{1.265}} \quad R^2=0.915 \quad (1)$$

جدول ۳- مشخصات مدل رگرسیون تراز سطح آسیب (رابطه ۱)

| Model |            | Sum of Squares | df | Mean Square | F       | Sig.              |
|-------|------------|----------------|----|-------------|---------|-------------------|
| 1     | Regression | 32.929         | 7  | 4.704       | 113.768 | .000 <sup>a</sup> |
|       | Residual   | 3.060          | 74 | .041        |         |                   |
|       | Total      | 35.988         | 81 |             |         |                   |

$$tg \beta = \frac{3.82 * f_g^{0.071} * f_d^{0.353}}{H_o T_o^{0.927} * S_{om}^{0.549} * N^{0.135} * \cot \alpha^{0.22} * f_p^{0.009}} \quad R^2=0.861 \quad (2)$$

جدول ۴- مشخصات مدل رگرسیون شیب میانی (رابطه ۲)

| Model |            | Sum of Squares | df | Mean Square | F      | Sig.              |
|-------|------------|----------------|----|-------------|--------|-------------------|
| 1     | Regression | 7.104          | 7  | 1.015       | 65.458 | .000 <sup>a</sup> |
|       | Residual   | 1.147          | 74 | .016        |        |                   |
|       | Total      | 8.252          | 81 |             |        |                   |

$$tg \gamma = \frac{41.35 * f_p^{0.005}}{H_o T_o^{0.463} * S_{om}^{0.047} * N^{0.077} * f_g^{0.128} * f_d^{0.473} * \cot \alpha^{0.101}} \quad R^2=0.388 \quad (3)$$

جدول ۵- مشخصات مدل رگرسیون شیب فوقانی (رابطه ۳)

| Model |            | Sum of Squares | df | Mean Square | F     | Sig.              |
|-------|------------|----------------|----|-------------|-------|-------------------|
| 1     | Regression | 1.714          | 7  | .245        | 6.695 | .000 <sup>a</sup> |
|       | Residual   | 2.707          | 74 | .037        |       |                   |
|       | Total      | 4.422          | 81 |             |       |                   |

$$\frac{L_c}{D_{n50}} = \frac{1.32 * H_o T_o^{0.658} * S_{om}^{0.265} * N^{0.140} * f_g^{0.214} * \cot \alpha^{0.096} * f_p^{0.002}}{f_d^{0.171}} \quad R^2=0.853 \quad (4)$$

جدول ۶- مشخصات مدل رگرسیون طول فرسایش تاج (رابطه ۴)

| Model |            | Sum of Squares | df | Mean Square | F      | Sig.              |
|-------|------------|----------------|----|-------------|--------|-------------------|
| 1     | Regression | 3.440          | 7  | .491        | 61.136 | .000 <sup>a</sup> |
|       | Residual   | .595           | 74 | .008        |        |                   |
|       | Total      | 4.035          | 81 |             |        |                   |

$$\frac{L_s}{D_{n50}} = (0.136 H_o T_o) + (0.00 N) + (166 S_{om}) + (3.6 f_g) + (0.154 f_d) - (0.529 \cot \alpha) - (0.006 f_p) - 13.77 \quad R^2=0.753 \quad (5)$$

جدول ۷- مشخصات مدل رگرسیون طول انباشت روی پله (رابطه ۵)

| Model |            | Sum of Squares | df | Mean Square | F      | Sig.              |
|-------|------------|----------------|----|-------------|--------|-------------------|
| 1     | Regression | 990.909        | 7  | 141.558     | 32.227 | .000 <sup>a</sup> |
|       | Residual   | 325.051        | 74 | 4.393       |        |                   |
|       | Total      | 1315.959       | 81 |             |        |                   |

$$\frac{h_f}{D_{n50}} = (0.323 f_d) + (0.469 \cot \alpha) - 1.644 \quad R^2=0.362 \quad (6)$$

## ۶- نرم افزار IB

به منظور استفاده آسان و عملی از نتایج این تحقیق، نرم افزاری به نام IB برنامه ریزی شده است که با دریافت پارامترهای ورودی مورد نیاز از جمله پارامترهای مستقل (دارای دیمانسیون) و نیز هندسه سازه و با استفاده از روابط فوق، هندسه تغییر شکل یافته سازه را به طور کامل رسم نموده و نیز میزان عقب نشینی سکوا (Rec) و طول انباشت روی بستر ( $L_0$ ) را بر روی تصویر گرافیکی حک می کند. علاوه بر آن نتایج پایداری سازه را در قالب یک خروجی متنی ارائه می نماید. این نرم افزار در محیط برنامه نویسی MATLAB 7.0 نوشته شده و مشتمل بر بیش از ۵۰۰ خط برنامه می باشد و با استفاده از محیط گرافیکی پیش رفته، قابلیت استفاده برای کاربر را تا حد بسیار زیادی ساده نموده و امکان مقایسه نتایج را با آزمایشها و سایر نرم افزارها فراهم می سازد. برای محاسبه مقدار اولیه قطر اسمی سنگ آرمور، نرم افزار سطح پایداری مورد انتظار طراح را در قالب مقدار  $H_0T_0$  از کاربر سوال نموده و با استفاده از رابطه ۷، مقدار  $D_{n50}$  مورد نیاز را محاسبه می نماید. می دانیم که مقدار ۷۰ برای پارامتر پایداری به عنوان مرز شکل پذیری موج شکن پیشنهاد شده است. در شکل ۹، تصویری شماتیک از نحوه عملکرد این نرم افزار و ترتیب محاسبه پارامترهای مختلف (طولها، زوایا و مساحت فرسایش یافته) مشاهده می شود.

نرم افزار با منطق برابری مساحت نواحی فرسایش یافته و انباشت شده، پاره خط EF در شکل ۹ را رسم می نماید و پس از تکمیل نیمرخ تغییر شکل یافته نهایی، مساحت ناحیه فرسایش یافته در شکل ترسیمی را با مقدار بدست آمده از رابطه (۱) مقایسه می نماید.

## ۷- مقایسه نتایج

به کمک نتایج بدست آمده از نرم افزار IB، مقایسه ای بین نتایج حاصله از آزمایش و نیز نرم افزارهای IB و Breakwat روی ۱۷ عدد از

آزمایشهای صورت گرفته انجام گردید که نتایج مقایسه و درصد خطاهای بدست آمده از هر نرم افزار در جداول ۸ و ۹ قابل مشاهده هستند. مقدار طولهای بدست آمده برای دو پارامتر طول عقب نشینی تاج و طول انباشت روی بستر بر حسب متر از دو نرم افزار بدست آمده و برای نتیجه آزمایش در مقیاس واقعی (۵۰ برابر) تعمیم داده و مقایسه شده است. پیشتر لازم به ذکر است که نرم افزار Breakwat ویژه موج شکن های توده سنگی سنتی توسعه داده شده اما یک بخش مخصوص موج شکن شکل پذیر نیز در آن دیده شده است که در مقایسه های صورت گرفته مورد استفاده واقع شده است.

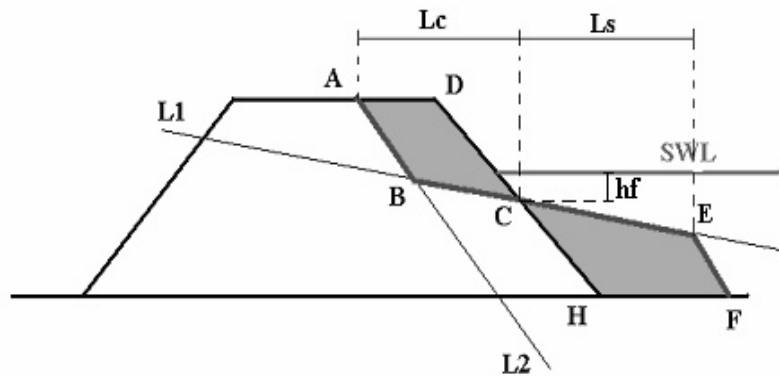
هر چند که شرایط انجام آزمایشها در این تحقیق با آزمایشهای انجام گرفته توسط Van der Meer (۱۹۸۸) متفاوت است، اما دقت بسیار بالا و خطای نرم افزار IB نسبت به Breakwat قابل توجه است. نکته قابل توجه در این نتایج مشاهده حتی خطای ۷۰۰ درصدی در نرم افزار Breakwat می باشد. با توجه به تجاری بودن نرم افزار مذکور، کاربرد آن برای موج شکن های شکل پذیر قابل تامل می باشد.

شکل های ۱۰ تا ۱۴ مقایسه تغییر شکل نهایی مقطع سازه را برای شرایط مختلف هر آزمایش مقدرور می سازد که برای نرم افزار IB به صورت خط چین، نرم افزار Breakwat به صورت خط- نقطه و برای نتیجه حاصل از آزمایش به صورت خط پر نمایش داده شده است.

در مورد آزمایش شماره ۲۰۰۵ که در شرایط عمومی آزمایشها انجام شده است خطای بسیار زیاد Breakwat قابل مشاهده است (شکل ۱۰) و IB تنها در مورد مساحت فرسایش یافته اندکی خطا دارد که ناشی از اعتبار پایین معادله شیب فوقانی می باشد.

شکل ۱۱ نتایج آزمایش شماره ۳۱۰۶ را نشان می دهد که در آن شرایط عمومی ثابت نگه داشته شده و تنها عمق آب پای سازه مورد تغییر قرار گرفته است. در این شکل بار دیگر تطابق منحنی های آزمایش و IB و خطای Breakwat به وضوح به چشم می خورد.





شکل ۹- مراحل ترسیم نیمرخ تقریبی تغییر شکل یافته سازه

جدول ۸- مقایسه مقادیر بدست آمده از آزمایش و نرم افزارها برای طول عقب نشینی تاج و طول انباشت روی بستر

| test NO. | test   |       | Breakwat |       | IB     |        |
|----------|--------|-------|----------|-------|--------|--------|
|          | Rec(m) | Lo(m) | Rec(m)   | Lo(m) | Rec(m) | Lo(m)  |
| 2005     | 2      | 4     | 4.8      | 9.6   | 2.128  | 4.482  |
| 2017     | 5      | 8     | 8        | 21    | 5.793  | 7.344  |
| 2026     | 8      | 11    | 13       | 24    | 8.188  | 11.342 |
| 2031     | 11     | 16    | 15       | 25    | 13.121 | 12.567 |
| 3101     | 4      | 3     | 6.1      | 7.8   | 4.494  | 3.768  |
| 3106     | 4      | 7     | 15.6     | 17.8  | 5.913  | 5.169  |
| 3202     | 3      | 9     | 3.3      | 15.6  | 3.061  | 6.002  |
| 3205     | 1      | 4     | 0.17     | 20    | 0.248  | 3.167  |
| 4002     | 1      | 6     | 0        | 7.5   | 0.86   | 4.638  |
| 4003     | -3     | 1     | 0        | 8     | -1.116 | 1.698  |
| 4107     | 1      | 4     | 4.6      | 12.3  | 1.521  | 5.039  |
| 4108     | -7     | 0     | -10.7    | 0     | -7.962 | 0      |
| 5005     | 5      | 8     | 10.7     | 7.8   | 4.513  | 6.186  |
| 5102     | 9      | 14    | 6.7      | 18.7  | 8.761  | 11.019 |
| 5203     | 5      | 9     | 8        | 20    | 5.632  | 8.322  |
| 6001     | 2      | 7     | 5        | 13    | 2.416  | 5.103  |
| 6202     | 10     | 14    | 11.4     | 21.4  | 12.008 | 17.026 |

جدول ۹- مقایسه درصد خطای نسبی نرم افزارهای IB و Breakwat

| test NO. | Breakwat |     | IB  |    |
|----------|----------|-----|-----|----|
|          | Rec      | Lo  | Rec | Lo |
| 2005     | 140      | 140 | 6   | 12 |
| 2017     | 60       | 163 | 16  | 8  |
| 2026     | 63       | 118 | 2   | 3  |
| 2031     | 36       | 56  | 19  | 21 |
| 3101     | 53       | 160 | 12  | 26 |
| 3106     | 290      | 154 | 48  | 26 |
| 3202     | 10       | 73  | 2   | 33 |
| 3205     | 86       | 400 | 73  | 21 |
| 4002     | 34       | 25  | 12  | 23 |
| 4003     | 100      | 700 | 56  | 70 |
| 4107     | 360      | 208 | 52  | 26 |
| 4108     | 53       | 0   | 14  | 0  |
| 5005     | 114      | 3   | 6   | 23 |
| 5102     | 26       | 34  | 2   | 21 |
| 5203     | 60       | 122 | 13  | 8  |
| 6001     | 150      | 86  | 21  | 27 |
| 6202     | 14       | 53  | 20  | 22 |

ثابت بودن قطر اسمی سنگهای آرمور می‌تواند باعث کاهش دقت نتایج باشد. لازم به ذکر است که اعتبار روابط ارایه شده برای تعیین هندسه نیمرخ تغییر شکل یافته تنها برای محدوده پارامترهایی است که آزمایشها در آن انجام گرفته است و در جداول ۸ و ۹ ذکر شده است. انتخاب صحیح محدوده تغییرات پارامترهای مستقل در طول انجام آزمایشها، می‌تواند مانع بروز بسیاری از خطاهای محتمل گردد؛ این امر حتی می‌تواند برخی پارامترهای بسیار مهم را از مدل آماری حذف کند. مطمئناً آزمایشهایی که با مقیاسهای متفاوت صورت گیرند می‌توانند نتایج گسترده‌تری در اختیار محققان قرار دهد.

### تقدیر و تشکر

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، در قالب یک طرح پژوهشی که مجری آن آقای دکتر وحید چگینی بوده اند در مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی تهیه شده‌اند. نویسندگان مقاله وظیفه خود می‌دانند از آقای دکتر چگینی بخاطر موافقت ایشان برای استفاده از داده‌ها و مشاوره‌های علمی و از مسؤولان محترم مرکز مخصوصاً جناب آقای مهندس آق تومان برای فراهم آوردن امکان انجام آزمایشها تقدیر و تشکر نمایند.

آنچه در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد نتایج حاصل از آزمایش شماره ۴۰۰۲ می‌باشد که در آن شیب اولیه وجه جلویی سازه متغیر بوده است. بطوریکه ملاحظه می‌گردد هر سه نتیجه تا حد بسیار بالا و قابل قبولی بر یکدیگر تطابق دارند و این امر در جدول ۴ و درصد خطاهای تقریباً برابر نرم‌افزارها در این آزمایش نیز پیداست. هرچند که میزان این خطاها به هر حال بالاست و این می‌تواند ناشی از حساسیت نرم‌افزارها به تغییرات شیب اولیه سازه باشد.

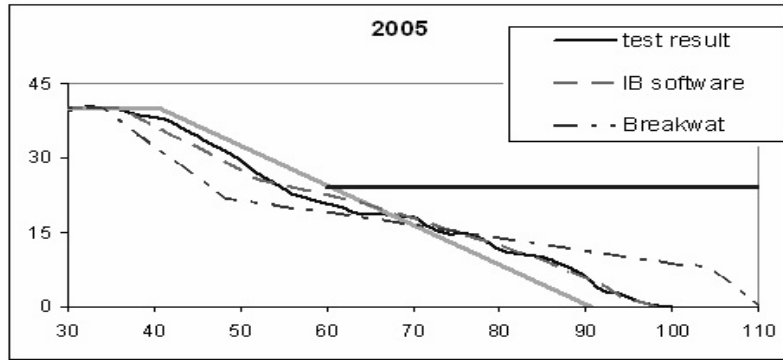
در شکل ۱۳ نیز نیمرخها تطابق خوبی بر یکدیگر داشته‌اند و تنها تفاوت در شیب ناحیه فوقانی و همچنین طول فرسایش تاج می‌باشد. نیمرخ تغییر یافته در این شکل مربوط به آزمایش شماره ۵۰۰۵ می‌باشد و تنها عامل متغیر در آن فاکتور نفوذپذیری بوده است. البته میزان زیاد این تفاوت می‌تواند ناشی از نحوه متفاوت تعریف این فاکتور توسط Van derMeer با آزمایشهای اخیر باشد.

شکل ۱۴ مربوط به آزمایش شماره ۶۰۰۱ است که ضریب دانه‌بندی در آن مورد تغییر قرار گرفته است. در این شکل نیز مجدداً خطای قابل ملاحظه Breakwat در مقایسه با IB به چشم می‌خورد. هر چند که در این مورد مقدار عمق فرونشینی توسط نرم‌افزار IB با خطای بیشتری محاسبه شده است.

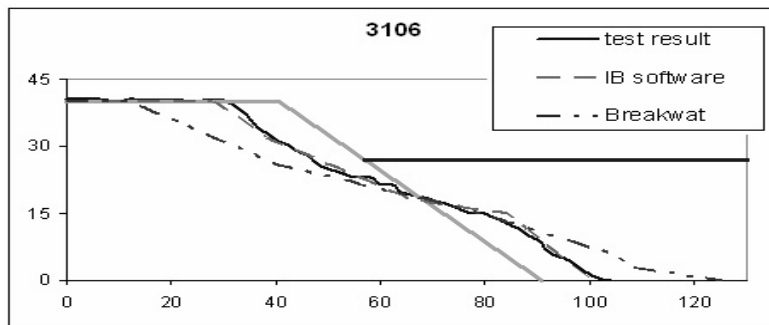
### ۸ - نتیجه‌گیری

در این مقاله بر اساس نتایج آزمایشگاهی، پایداری موج‌شکن‌های شکل‌پذیر و نحوه تغییرات نیمرخ این نوع سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی روابط تجربی برای تعیین هندسه نیمرخ تغییر شکل یافته و از جمله محاسبه عمق فرونشینی (رابطه ۶) پیشنهاد شده است.

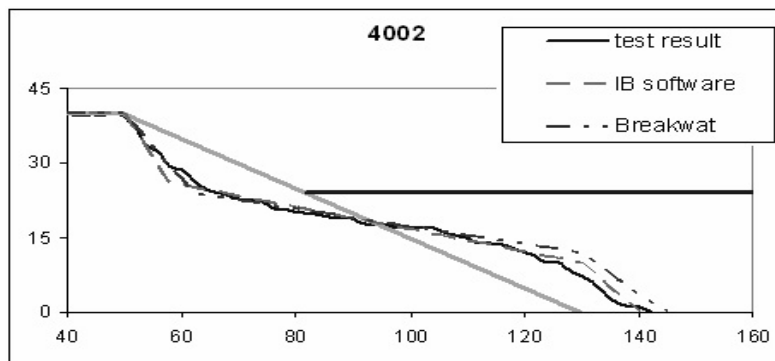
همچنین بر اساس نتایج تحقیق، نرم‌افزار IB توسعه داده شده است که با استفاده از آن می‌توان نتایج را به صورت گرافیکی و متنی نمایش داد. درصد خطای بسیار پایین نرم‌افزار در مقایسه با آزمایشها، نشانگر دقت قابل قبول مدلهای پیشنهاد شده می‌باشد.



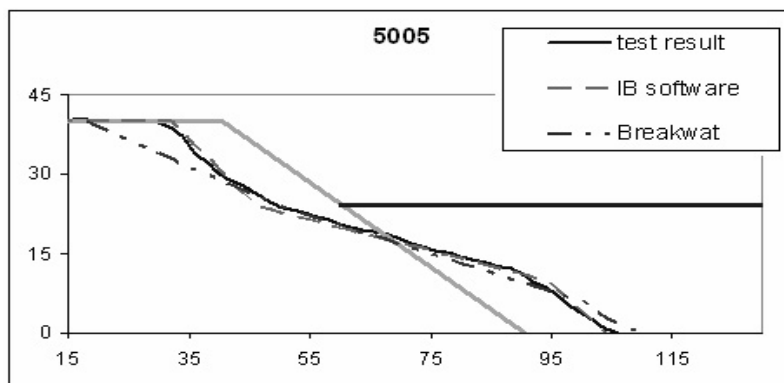
شکل ۱۰- مقایسه نیمرخ نهایی بدست آمده از آزمایش ۲۰۰۵ با تخمین دو نرم افزار از نیمرخ تغییر شکل یافته



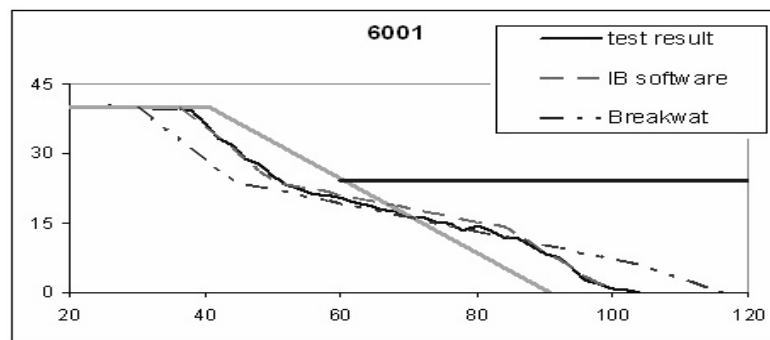
شکل ۱۱- مقایسه نیمرخ نهایی بدست آمده از آزمایش ۳۱۰۶ با تخمین دو نرم افزار از نیمرخ تغییر شکل یافته



شکل ۱۲- مقایسه نیمرخ نهایی بدست آمده از آزمایش ۴۰۰۲ با تخمین دو نرم افزار از نیمرخ تغییر شکل یافته



شکل ۱۳- مقایسه نیمرخ نهایی بدست آمده از آزمایش ۵۰۰۵ با تخمین دو نرم افزار از نیمرخ تغییر شکل یافته



شکل ۱۴- مقایسه نیمرخ نهایی بدست آمده از آزمایش ۶۰۰۱ با تخمین دو نرم افزار از نیمرخ تغییر شکل یافته

condition , Coastal Engineering 1994, chap 97.

6- Rao, S. and Pramod, Ch. & Rao, B. (2003), Technical Note, Stability of berm breakwater with reduced armor stone weight, Ocean Engineering 31 (2004) , PP. 1577 – 1589.

7- Sayao, O. J. (1998), On the profile reshaping of berm breakwaters, Coastal structures` 99.

8- Torum, A. & Kuhnen, F. & Menze, A. (2002), On berm breakwaters. Stability, Scour, Overtopping, Coastal Engineering 49 (2003), PP.209-238.

9- Van derMeer, J.W (1988), Rock slopes and gravel beaches under wave attack, Doctoral Thesis approved by Delft University of Technology.

## ۹- مراجع

۱- چگینی و، آق تومان پ، یثربی ف و حسینی بندرآبادی س م : " بررسی تغییر شکل موج شکن های شکل پذیر" مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، تهران، دانشگاه علم و صنعت، ۱۱ تا ۱۴ آذر ۱۳۷۵، صفحات ۱۱۰-۱۲۳.

۲- آق تومان پیمان، چگینی وحید، شیریان ناصر، حجازی مهدی،

“Design of reshaping breakwater’s Armour layer thickness”.

دومین سمپوزیوم بین المللی سواحل، ISC 2<sup>nd</sup>، هوفن، ایسلند، ۵ تا ۸ ژوئن ۲۰۰۵.

۳- شیریان، ناصر. " مطالعه آزمایشگاهی هیدرولیکی و پایداری موج شکن های شکل پذیر " رساله دکترای رشته سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۴.

4- International Navigation Association (2003), state of the art of designing and constructing Berm breakwaters, Report of working group 40 of the Maritime Navigation commission.

5- Lamberti, A. & Tomasicchio, G. R. & Guiducci, F. (1993), Reshaping breakwaters in deep and shallow water