

بررسی تأثیر تغییرات مشخصات سازه‌ای بر میزان عبور امواج دریا از بدنه موج‌شکن‌های شکل‌پذیر

ناصر شیریان^۱، مهدی شفیع‌فر^{۲*}، پیمان آق‌تومان^۳، وحید چگینی^۴

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت‌مدرس

۲- استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، وزارت جهاد کشاورزی

۴- عضو هیأت علمی مرکز ملی اقیانوس‌شناسی

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

Shafiee@modares.ac.ir

چکیده- در این تحقیق تأثیر امواج نامنظم دریا بر میزان عبور امواج از بدنه موج‌شکن‌های توده سنگی شکل‌پذیر، مطالعه شده است. موج شکن شکل‌پذیر، نوعی موج شکن است که نیم‌رخ اولیه آن بر اثر برخورد امواج، تغییر شکل پیدا می‌کند. پژوهش حاضر با استفاده از مدل آزمایشگاهی در فلوم موج انجام شده است. امواج تابیده به مدل مقطع موج شکن، نامنظم و طیف انرژی موج مورد استفاده، طیف JONSWAP بوده است. برای بررسی واکنش هیدرولیکی میزان عبور امواج، تأثیر تغییرات مشخصات امواج (ارتفاع، پریود و مدت توفان)، تغییرات مشخصات سازه‌ای (شیب اولیه و دانه‌بندی) و تغییرات مشخصات شاخص نفوذپذیری مصالح سازه بر روی این پدیده بررسی شده است. در مجموع یکصد آزمایش در این تحقیق با مقیاس ۱:۵۰ انجام شده است. نتایج آزمایشگاهی در مرحله اول، به صورت نمودارها و روابط ضرایب عبور امواج بر حسب یک پارامتر تجربی جدید ارائه شده و سپس در مرحله دوم به کمک روشهای برازش خطی چندگانه، رابطه‌ای دقیق‌تر برای تعیین ضرایب عبور موج C_1 در موج شکن‌های شکل‌پذیر، بر اساس داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده است.

کلید واژگان: امواج نامنظم، عبور امواج، مدل آزمایشگاهی، موج‌شکن‌های توده سنگی شکل‌پذیر.

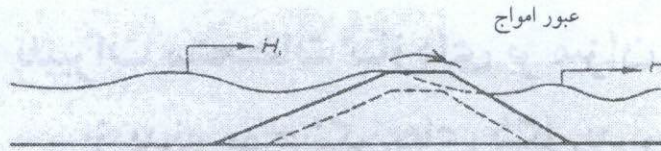
۱- مقدمه

می‌سازد. در موج‌شکن‌های با سطوح تاج نسبتاً کوتاه، این امکان وجود دارد که امواج سرریز شده در پشت سازه، تولید موج کنند و منطقه آرام پشت سازه مغشوش شود. برای موج‌شکن نسبتاً نفوذپذیر امواج با پریود بلند امکان عبور از سازه را یافته و انتشار انرژی موج از درون سازه به سمت دیگر را سبب می‌شوند (Van der Meer, et al., 1994).

در برخی از موارد دو واکنش فوق ممکن است تلفیق شده و همزمان روی دهند.

واکنشهای هیدرولیکی یکی از عوامل تعیین کننده انتخاب نوع و مشخصات هندسی سازه‌های ساحلی هستند. یکی از مهمترین واکنشهای هیدرولیکی، عبور امواج از درون بدنه موج شکن است. این واکنش در شکل ۱ به صورت طرحواره‌ای نشان داده شده است.

انرژی امواج پس از عبور از روی تاج و درون بدنه سازه موج‌شکن، کاهش پیدا کرده و پدیده عبور امواج را به صورت نوسانات سطح آب در محیط پشت سازه آشکار



شکل ۱ واکنش هیدرولیکی عبور امواج در سازه ساحلی (CIRIA/CUR, 1991,1993)

استفاده از پارامترهای H_s و T_m یا T_p در معادله (۲)، به ترتیب S_{op} و S_{om} را نتیجه می‌دهد.

همان‌طور که ذکر شد بعضی سازه‌های ساحلی، مانند موج‌شکن‌هایی که با سطح تاج کوتاه ساخته می‌شوند، عبور انتشار انرژی موج به ناحیه پشت سازه را سبب می‌شوند. عملکرد عبور موج در موج‌شکن‌های با تاج کوتاه به هندسه سازه و مخصوصاً ارتفاع آزاد (باد خور) سازه، عمق آب در پای سازه، نفوذپذیری و شرایط امواج، بخصوص پریرود امواج، بستگی دارد.

تاکنون تحقیقات محدودی توسط (Seelig (1980), Postma & Allsop (1985), Ahrens (1987), Daemen (1991), Lissev (1991), Van Gent (1995), Juhl and Sloth (1998) بر روی ضرایب عبور امواج از موج‌شکن‌های توده‌سنگی سستی و سکویی شکل‌پذیر انجام و روابط تجربی مختلفی در این زمینه ارائه شده است.

همچنین نتایج آزمایشهای مدل هیدرولیکی که توسط (Seelig (1980), Allsop & Powell (1985), Ahrens (1987), Daemrich and Kahleand (1985) و (Van der Meer (1988) انجام شده، در سالهای اخیر توسط (Van der Meer (1991, 1993, 1994) مورد بازبینی و تحلیل قرار گرفته است تا روشی واحد به دست آید. در این روش ضریب عبور امواج، C_t را به R_c/H_s (نسبت ارتفاع آزاد تاج سازه، R_c به ارتفاع موج تابشی، H_s) ارتباط می‌دهند. اطلاعات مورد استفاده در شکل ۲ ترسیم شده است. روابط معادلات تخمینی توصیف‌کننده این اطلاعات را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

محاسبه مقدار عبور موج از سازه‌ها، برای طراحی موج‌شکن‌ها و دیوارهای ساحلی با ارتفاع تاج کوتاه که به منظور حفاظت از محیط آرام بندر یا خط ساحلی احداث می‌شود حائز اهمیت بسیار است. در طراحی موج‌شکن‌های بنادر نیز عبور موج می‌تواند موجب به حرکت درآمدن کشتی‌ها یا سایر شناورها شود. از این رو برآورد میزان عبور موج از سازه موج‌شکن، اهمیت زیادی دارد.

دو نوع عبور موج در سازه‌های توده‌سنگی مطرح است: نخست عبور موج در اثر سرریزی سازه و دوم عبور امواج از میان بدنه سازه نفوذپذیر؛ البته در برخی از حالات هر دو واکنش ترکیب می‌شوند. در تحقیق حاضر صرفاً به بررسی عبور امواج از بدنه موج‌شکن شکل‌پذیر پرداخته شده و در تمامی آزمایشها مقاطع غیر سرریز شونده طراحی شده‌اند. شدت عبور موج به وسیله ضریب عبور موج C_t بیان می‌شود، که عبارت است از:

$$C_t = H_t/H_i = (E_t/E_i)^{1/2} \quad (1)$$

که H_i و H_t به ترتیب ارتفاع موجهای تابشی و عبوری و E_i و E_t به ترتیب انرژیهای کل موج تابشی و موج عبوری است.

در بررسی مشخصات امواج، شرایط موج بیشتر توسط ارتفاع موج تابشی H_i (معمولاً ارتفاع مشخصه موج برای امواج نامنظم H_s)، پریرود میانگین T_m یا پریرود اوج (پیک) T_p ، عمق آب در جلوی سازه d و طول موج ژرفاب L_0 مشخص می‌شوند. تأثیر پریرود موج معمولاً با استفاده از رابطه بدون بعد تیزی موج ژرفاب، مدلسازی می‌شود.

$$s_0 = H_{si}/L_0 = 2\pi H_{si}/gT^2 \quad (2)$$

آرمور، B عرض تاج و s_{op} تیزی موج است. استفاده از رابطه Daemen در زمانی که لایه‌های آرمور توسط تزریق آسفالت به صورت توده‌ای یکپارچه کار کند یا از دیوارهای یکپارچه بر روی تاج سازه استفاده شود، عملاً امکانپذیر نیست.

در بیشتر مراجع ذکر شده روابط و نمودارها برای تخمین ضرایب عبور امواج در موج‌شکن‌های سستی، کاربرد دارد و استفاده از آنها برای موج‌شکن‌های شکل پذیر، مقادیر ضرایب را غیر واقعی به دست می دهد. از طرفی مراجعی که به طور خاص بر روی موج‌شکن‌های شکل پذیر، کارهای آزمایشگاهی انجام داده‌اند، بیشتر بررسیها را به پایداری لایه آرمور موج شکن شکل پذیر معطوف ساخته (CIRIA/CUR, 1991, 1995, Juhl, Sloth, 1998, Lissev, 1993, Van der Meer, 1993) و برای واکنش هیدرولیکی عبور امواج روابطی توصیه نکرده‌اند (PIANC, MarCom, 2003). لذا در تحقیق حاضر (با توجه به اینکه روابط خاصی برای تخمین عبور موج از موج‌شکنهای شکل‌پذیر وجود ندارد)، تلاش شده تا بر اطلاعات آزمایشگاهی به دست آمده روابطی برآزش داده شود تا به عنوان تخمین اولیه مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مدلسازی آزمایشگاهی

در آزمایشهای مربوط به مدلسازی سازه‌های ساحلی، نیروی غالب، نیروی وزن یا گرانش است. از این رو معیار مناسب برای مدلسازی، معیار فرود بوده و نوع جریان نیز باید کاملاً آشفته در نظر گرفته شود تا بتوان از اثر لزجت صرف نظر کرد. کنترل اثر لزجت به وسیله کنترل معیار رینولدز (Re) امکان‌پذیر است که طبق توصیه Van der Meer (1988) باید در محدوده زیر قرار گیرد:

$$R_e = D_{n50} \sqrt{g H_s} / \nu \geq (1-4) \times 10^4 \quad (9)$$

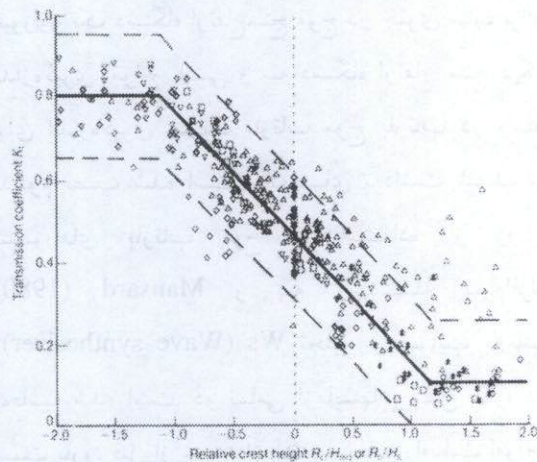
که در آن D_{n50} قطر اسمی مصالح است. در رابطه (۹) از مقادیر مورد استفاده در مدل استفاده می‌شود. برای ایجاد

$$C_t = 0.8 \quad -2.0 < R_c / H_s < -1.13 \quad (3)$$

$$C_t = 0.46 - 0.3(R_c / H_s) \quad -1.13 < R_c / H_s < 1.2 \quad (4)$$

$$C_t = 0.1 \quad 1.2 < R_c / H_s < 2.0 \quad (5)$$

قابل ذکر است که R_c منفی از لحاظ فیزیکی، دلالت بر نوعی موج شکن توده سنگی سستی دارد که رقوم تاج آن پایین تر از سطح ایستابی در دریا قرار می گیرد.



شکل ۲ عبور موج از روی تاج و از میان سازه‌های تاج کوتاه (Van der Meer, et al., 1994)

در گزارشهای USACE (1984) CIRIA/CUR (1991,1995) و PIANC (2003) نیز روابطی به منظور تخمین ضرایب عبور امواج توصیه شده است.

(1991) Daemen در پایان‌نامه خود رابطه دیگری را پیشنهاد کرد که در آن C_t برحسب R_c/D_{n50A} به دست آمده است. این رابطه برای موج‌شکن‌های تاج کوتاه سستی کاربرد دارد:

$$C_t = a(R_c/D_{n50A}) + b \quad (6)$$

a, b ضرایبی هستند که از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$a = 0.031(H_i/D_{n50A}) - 0.24 \quad (7)$$

$$b = -5.42s_{op} + 0.0323(H_i/D_{n50A}) - 0.0017(B/D_{n50A})^{7.84} + 0.51 \quad (8)$$

C_t ضریب عبور موج، H_{si} ارتفاع مشخصه موج تابشی، H_{st} ارتفاع مشخصه موج عبوری، D_{n50A} قطر اسمی لایه

موج مذکور ۳۳ متر طول، ۱ متر عرض و ۱ متر ارتفاع دارد (شکل ۴).

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 می‌شوند. ثبت نوسانات سطح آب توسط پنج دستگاه ارتفاع سنج موج در حین انجام آزمایش صورت گرفته و نتایج در رایانه ذخیره شده است. یک دستگاه ارتفاع سنج موج در پشت سازه برای ثبت امواج عبوری، یک دستگاه ارتفاع سنج موج در جلوی سازه برای اندازه‌گیری امواج تابشی و سه دستگاه ارتفاع سنج دیگر برای اندازه‌گیری ضریب بازتاب موج بازتاب در وسط فلوم نصب شده است. داده‌های برداشت شده از روش سنسورهای بازتاب موج، با استفاده از روش Mansard (1980) و به وسیله نرم‌افزار Ws (Wave synthesizer) تحلیل و ضرایب بازتاب محاسبه شده است. در تمامی آزمایشها پروفیل سازه در سمت پارو، قبل از شروع آزمایش و بعد از اصابت امواج، برداشت و ثبت شده است. دامنه تغییرات پارامترهای مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

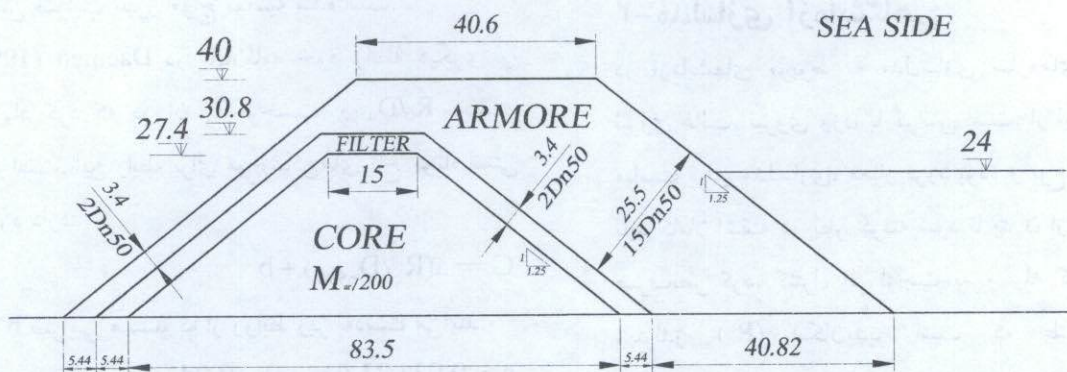
تشابه دینامیکی در مدل سازی مصالح، از رابطه (۱۰) که نسبت عدد پایداری در نمونه واقعی و مدل می‌باشد استفاده شده است (Hughes, 1993).

$$\frac{W_M}{W_P} = \frac{1}{\lambda^3} \times \frac{\rho_{am}}{\rho_{ap}} \times \frac{(\rho_{ssdp}/\rho_{wp} - 1)^3}{(\rho_{ssdm}/\rho_{wm} - 1)^3} \quad (10)$$

که در آن ρ_{ssdp} چگالی اشباع با سطح خشک واحد آرمور در نمونه واقعی، ρ_{ssdm} چگالی اشباع با سطح خشک واحد آرمور در مدل، ρ_{wp} چگالی آب در نمونه واقعی، ρ_{wm} چگالی آب در مدل، ρ_{ap} چگالی مصالح در نمونه واقعی و ρ_{am} چگالی مصالح در مدل است. به منظور انتخاب معیارهای شبیه‌سازی و استفاده از برخی قوانین مدل آزمایشگاهی، از تحقیقات Hughes (1993) استفاده شده است. با رعایت این معیارها و قابل اغماض بودن اثر مقیاس، مقیاس ۱:۵۰ ($\lambda=50$) برای آزمایشها انتخاب شده است.

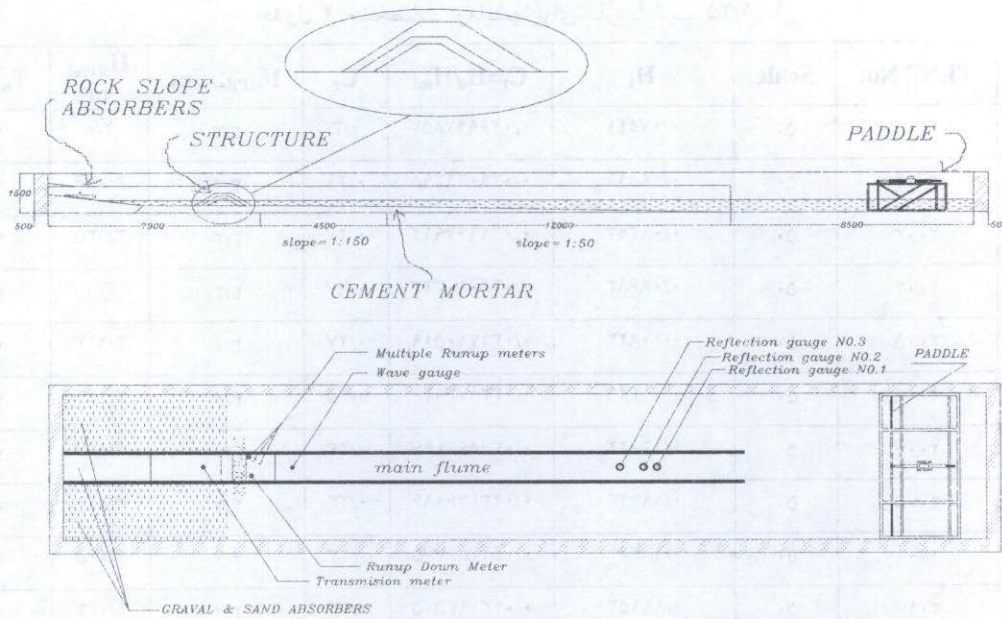
۳- برپایی مدل و شرح آزمایشها

آزمایشهای مدل بر روی مقطع موج‌شکن شکل پذیر (شکل ۳) در فلوم موج پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی انجام شده است. فلوم



(ابعاد بر حسب سانتیمتر)

شکل ۳ نمونه مقطع عرضی مدل آزمایشگاهی موج‌شکن شکل‌پذیر مورد آزمایش با شیب



شکل ۴ مقطع عرضی و پلان فلوم موج و نحوه استقرار سازه، پاروی مولد موج و سنسورها

جدول ۱ محدوده پارامترهای مورد مطالعه در مدل آزمایشگاهی موج شکن های شکل پذیر

متغیر	نماد	دامنه تغییرات
ارتفاع موج	H_s	(۳ تا ۱۴) سانتی متر
میانگین پریود موج	T_m	(۰/۹ تا ۱/۷) ثانیه
تیزی موج	S_{om}	(۰/۰۱ تا ۰/۰۷)
تعداد امواج	N	۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۶۰۰۰
قطر اسمی مصالح آرمور در مدل	D_{n50}	(۱/۷) سانتی متر
دانه بندی مصالح آرمور	D_{n85A} / D_{n15A}	(۱/۱۴ و ۱/۴۴ و ۱/۸۲)
شاخص نفوذپذیری مصالح P_e	D_{n50A} / D_{n50C}	$1 \leq P_e \leq 5$ و $P_e > 5$
عمق آب	d_i	(۲۱ تا ۳۰) سانتی متر
ارتفاع آزاد تاج سازه به ارتفاع موج	R_c / H_{si}	۱ تا ۳
شیب اولیه	$\cot \alpha$	۱/۲۵ تا ۲/۵
پارامتر بدون بعد ارتفاع موج یا عدد پایداری N_s	$H_s / \Delta D_{n50}$	۱/۷ تا ۵
مقیاس	λ	۵۰

ضریب بازتاب امواج، $HS(P)_{i+r}$ مجموع ارتفاع موج تابشی و بازتابی و $HS(P)_{oi}$ ارتفاع موج تابشی می باشند.

همچنین مشخصات آزمایشها برای سازه ای با شیب ۱: ۱/۲۵ در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول C_r

جدول ۲ مشخصات آزمایشها برای سازه با شیب ۱/۲۵ :

No:	TEST No:	Scale	H_t	$C_t=H_t/H_{soi}$	C_r	$H_{s(P)I+R}$ m	$H_{s(P)oi}$ m	$T_{m(P)}$ sec
۱	۲۰۰۱	۵۰	۰/۰۷۵۴۴	۰/۰۲۶۹۴۲۸۵۷	۰/۳	۳/۳	۲/۸	۷/۰۹۰
۲	۲۰۰۲	۵۰	۰/۰۸۸۱۱	۰/۰۲۹۰۲۲۳۹۸	۰/۲۹	۳/۳	۳/۰۳۶	۷/۰۹۰
۳	۲۰۰۳	۵۰	۰/۰۹۳۹۴	۰/۰۲۹۹۶۴۹۱۲	۰/۲۷	۳/۳	۳/۱۳۵	۷/۰۹۰
۴	۲۰۰۴	۵۰	۰/۰۸۶۸۳	۰/۰۲۸۰۱۰۳۲۳	۰/۲۷	۳/۳	۳/۱	۷/۰۹۰
۵	۲۰۰۵	۵۰	۰/۱۰۸۲۳	۰/۰۳۱۷۱۰۵۱۹	۰/۲۷	۳/۶	۳/۴۱۳	۷/۰۹۰
۶	۲۰۰۶	۵۰	۰/۱۱۳۴۹	۰/۰۳۳۱۷۳۹۲۶	۰/۲۵	۳/۶	۳/۴۲۱	۷/۰۹۰
۷	۲۰۰۷	۵۰	۰/۱۴۶۲۲	۰/۰۳۶۸۶۰۰۹۶	۰/۲۳	۴	۳/۹۶۷	۷/۰۹۰
۸	۲۰۰۸	۵۰	۰/۱۹۴۲۳	۰/۰۴۳۰۴۶۹۸۶	۰/۲۳	۴/۴	۴/۵۱۲	۷/۰۹۰
۹	۲۰۰۹	۵۰	۰/۱۸۶۴۴	۰/۰۴۱۷۵۶۷۷۵	۰/۲۳	۴/۴	۴/۴۶۵	۷/۰۹۰
۱۰	۲۰۱۰	۵۰	۰/۱۹۱۵۲	۰/۰۴۳۱۹۳۵۰۵	۰/۲۳	۴/۴	۴/۴۳۴	۷/۰۹۰
۱۱	۲۰۱۱	۵۰	۰/۲۳۲۳۱	۰/۰۴۷۷۷۰۵۱۲	۰/۲۱	۴/۸	۴/۸۶۳	۷/۰۹۰
۱۳	۲۰۱۳	۵۰	۰/۲۳۷۰۳	۰/۰۴۷۶۵۳۳۹۸	۰/۲۲	۴/۸	۴/۹۷۴	۷/۰۹۰
۱۴	۲۰۱۴	۵۰	۰/۱۴۳۴۴	۰/۰۴۱۰۴۲۶۳۲	۰/۳۹	۳/۴	۳/۴۹۵	۹/۰۶۰
۱۵	۲۰۱۵	۵۰	۰/۱۵۰۳۹	۰/۰۴۲۳۸۷۸۲۴	۰/۳۹	۳/۴	۳/۵۴۸	۹/۰۶۰
۱۶	۲۰۱۶	۵۰	۰/۱۸۷۸۰	۰/۰۴۶۵۶۵۸۳۲	۰/۳۶	۳/۸	۴/۰۳۳	۹/۰۶۰
۱۷	۲۰۱۷	۵۰	۰/۱۹۹۵۳	۰/۰۴۷۸۸۲۸۸۹	۰/۳۳	۴/۲	۴/۱۶۷	۹/۰۶۰
۱۸	۲۰۱۸	۵۰	۰/۲۵۱۲۵	۰/۰۵۳۸۵۸۰۹۲	۰/۳۴	۴/۸	۴/۶۶۵	۹/۰۶۰
۱۹	۲۰۱۹	۵۰	۰/۲۴۱۳۲	۰/۰۵۲۴۶۰۸۷	۰/۳۱	۴/۸	۴/۶	۹/۰۶۰
۲۰	۲۰۲۰	۵۰	۰/۲۷۰۹۶	۰/۰۵۹۱۴۸۶۵۷	۰/۳	۴/۸	۴/۵۸۱	۹/۰۶۰
۲۱	۲۰۲۱	۵۰	۰/۲۹۳۳۹	۰/۰۶۳۸۷۸۰۷۵	۰/۲۸	۴/۸	۴/۵۹۳	۹/۰۶۰
۲۲	۲۰۲۲	۵۰	۰/۱۶۸۸۱	۰/۰۵۲۱۹۷۸۹۷	۰/۴۶	۳/۲	۳/۲۳۴	۱۱/۰۲۰
۲۳	۲۰۲۳	۵۰	۰/۱۷۱۳۷	۰/۰۵۴۳۹۸۷۳	۰/۴۷	۳/۲	۳/۱۵	۱۱/۰۲۰
۲۴	۲۰۲۴	۵۰	۰/۱۱۸۱۵	۰/۰۵۰۴۴۷۴۸۱	۰/۵	۲/۴	۲/۳۴۲	۱۱/۰۲۰
۲۵	۲۰۲۵	۵۰	۰/۲۵۸۶۴	۰/۰۶۲۸۳۶۷۳۵	۰/۳۹	۴	۴/۱۱۶	۱۱/۰۲۰
۲۶	۲۰۲۶	۵۰	۰/۲۹۸۸۱	۰/۰۶۷۰۱۲۲۳۲	۰/۳۵	۴/۴	۴/۴۵۹	۱۱/۰۲۰
۲۷	۲۰۲۷	۵۰	۰/۳۲۵۷۸	۰/۰۶۹۴۳۲۲۲۵	۰/۳۸	۴/۸	۴/۶۹۲	۱۱/۰۲۰
۲۸	۲۰۲۸	۵۰	۰/۳۳۵۲۲	۰/۰۷۰۱۵۹۹	۰/۳۴	۴/۸	۴/۷۷۸	۱۱/۰۲۰
۲۹	۲۰۲۹	۵۰	۰/۳۶۴۰۷	۰/۰۷۴۴۹۷۲۳۸	۰/۳۳	۴/۸	۴/۸۸۷	۱۱/۰۲۰
۳۰	۲۰۳۰	۵۰	۰/۳۵۵۲۷	۰/۰۷۴۳۸۶۹۳۵	۰/۳۲	۴/۸	۴/۷۷۶	۱۱/۰۲۰
۳۱	۲۰۳۱	۵۰	۰/۳۷۸۸۴	۰/۰۷۹۲۰۵۵۲	۰/۳۱	۴/۸	۴/۷۸۳	۱۱/۰۲۰

پذیر (بدون هسته)، هسته با مصالح ریز (ماسه ریز)، هسته با مصالح درشت (ماسه درشت) و هسته کاملاً نفوذ ناپذیر (روکش نایلونی) استفاده شد:

$$(P_e = (D_{n50A}/D_{n50C}) = 3,1/9,5/15, > 20)$$

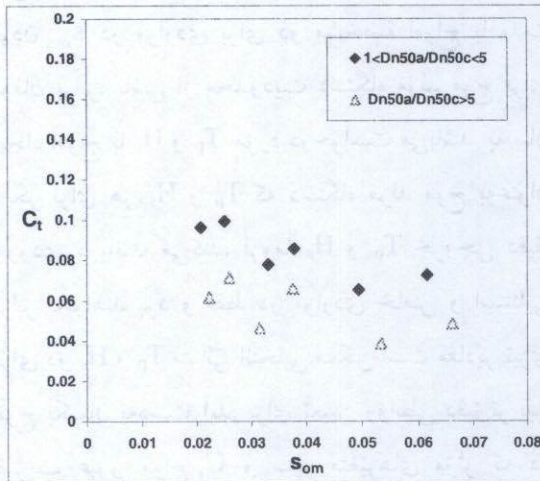
۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

به کمک تحلیل ابعادی و با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS متغیرهای مؤثر ذیل برای استفاده در برازش چند متغیره خطی انتخاب شد (تعاریف مربوط به هر متغیر در جدول ۱ آورده شده است):

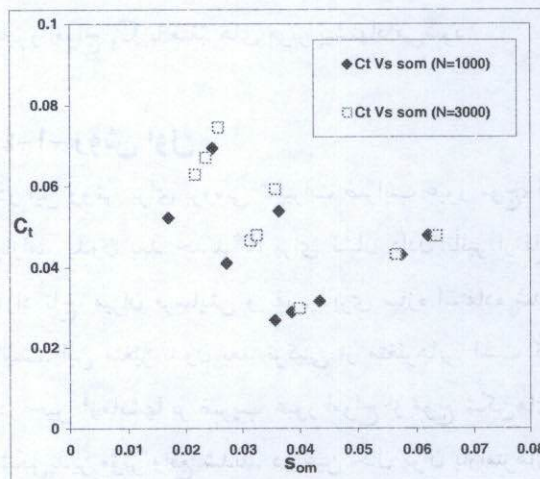
$$C_t = \Phi_z \cdot [s_{om}, N, D_{n85A}/D_{n15A}, \quad (11)$$

$$D_{n50A}/D_{n50C}, \cot \alpha, R_c/H_{si}, S]$$

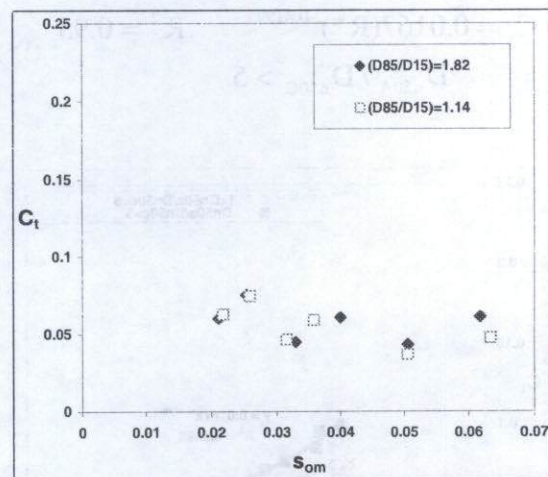
بررسی‌های اولیه نشان داد که تغییرات ضرایب عبور موج نسبت به تغییرات دانه‌بندی مصالح آرمور D_{n85A}/D_{n15A} و شیب اولیه سازه $\cot \alpha$ ناچیز است اما تغییرات شاخص نفوذپذیری مصالح سازه $P_e = (D_{n50A})/(D_{n50C})$ (نشانه A و C مخفف لایه آرمور و هسته موج‌شکن شکل‌پذیر است)، نسبت ارتفاع آزاد تاج سازه به ارتفاع موج تابشی R_c/H_{si} ، تیزی موج s_{om} ، تعداد امواج N و پارامتر آسیب S، بر ضرایب عبور موج از سازه مؤثر و مشخص است. به عنوان نمونه تغییرات نفوذپذیری، دانه‌بندی مصالح و تعداد امواج بر میزان عبور امواج در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ ارائه شده است.



شکل ۶ نمودار ضریب عبور امواج C_t بر حسب تیزی موج s_{om} به تفکیک برای P_e های مختلف



شکل ۷ نمودار ضریب عبور امواج C_t بر حسب تیزی موج s_{om} به ازای مدت‌های توفان $N=1000, 3000$



شکل ۵ نمودار ضریب عبور امواج C_t بر حسب تیزی موج s_{om} به تفکیک برای دانه‌بندی‌های مختلف

در این تحقیق پارامتر شاخص نفوذپذیری مصالح به صورت محدوده‌های فیزیکی و اجرایی، هسته نفوذ پذیر ($P_e > 5$) و هسته نفوذ ناپذیر ($P_e < 5$) بر روی گرافها و روابط پیشنهادی ارائه شد، تا با قابلیت انعطاف بیشتری

در آزمایشها برای اندازه گیری میزان نفوذپذیری از چهار حالت، مصالح یکنواخت برای کل بدنه موج شکن شکل

ضرایب عبور امواج از موج‌شکن‌های شکل‌پذیر دخالت داد.

$$R^* = \left(\frac{R_C}{H_{si}}\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{S_{om}}{2\pi}}\right) \cdot \frac{1}{S^{0.14}} \quad (12)$$

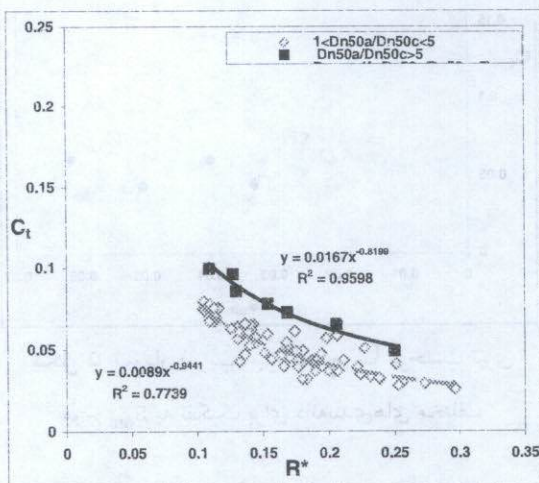
که در آن H_{si} ارتفاع مشخصه موج تابشی و $S = A_e/D_{n50}^2$ پارامتر آسیب است (A_e سطح فرسایشی در مقطع عرضی لایه آرمور میباشد). شایان ذکر است که در رابطه (۱۲) پارامتر بدون بعد S را به دو روش اندازه‌گیری یا بر اساس روابط تجربی پیشنهادی، می‌توان محاسبه کرد. همانطور که قبلاً اشاره شد شاخص نفوذپذیری مصالح سازه P_e یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب عبور موج از سازه توده سنگی شکل‌پذیر است. برای نشان دادن تأثیر نفوذپذیری، داده‌های آزمایشگاهی مورد بازبینی قرار گرفته و پس از دسته‌بندی، بر اساس محدوده‌های مختلف نفوذپذیری، روابط (۱۳) و (۱۴) حاصل شده است. در این روابط ضریب عبور موج C_t بر حسب R^* ارائه می‌شود:

$$C_t = 0.0089(R^*)^{-0.9441} \quad R^2 = 0.78 \quad (13)$$

$$1 \leq D_{n50A} / D_{n50C} < 5$$

$$C_t = 0.0167(R^*)^{-0.8199} \quad R^2 = 0.95 \quad (14)$$

$$D_{n50A} / D_{n50C} > 5$$



شکل ۸ نمودار ضریب عبور موج بر حسب پارامتر جدید R^*

بتوان از روابط و نمودارها استفاده کرد. در عین حال در کلیه آزمایشها نسبت ارتفاع هسته به ارتفاع تاج موج‌شکن در حدود ۰/۷۷ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که برای هر حالت حداقل ۶ تا ۸ آزمایش در محدوده تیزی موج ۰/۰۱ تا ۰/۰۷ انجام شده است. از طرفی یکسان بودن S_{om} در مواردی برای دو مشخصه امواج با مدت توفان برابر، ناشی از محدودیت دستگاه مولد موج برای ایجاد امواج با H_s و T_p مورد درخواست می‌باشد. به بیان دیگر برای هر H_s و T_p که دستگاه مولد موج به‌عنوان ورودی دریافت می‌کند، لزوماً H_s و T_p خروجی دقیقاً برابر نخواهند بود و فقط در مواردی خاص و استثنایی برای دو H_s و T_p متوالی انتخابی، ممکن است مقادیر تیزی موج یکسان به‌دست آید. برای تعیین روابطی دقیق‌تر بین ضریب عبور امواج C_t و سایر متغیرهای مؤثر که در رابطه (۱۱) مطرح شد، از روش تحلیل برازش چندگانه به کمک نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شده است. در اینجا به دو روش، روابطی برای توصیف ارتباط ضریب عبور امواج C_t با متغیرهای مؤثر پیشنهاد می‌شود.

۴-۱- روش اول

در این روش برای بررسی تغییرات ضرایب عبور موج، از پارامتر بدون بعد جدید R^* برای نشان دادن تأثیر ارتفاع آزاد تاج، میزان فرسایش و نفوذپذیری سازه استفاده شده است. این متغیر بدون بعد ترکیبی از متغیرهایی است که در حین آزمایشها بر ضریب عبور امواج از موج‌شکن‌های شکل‌پذیر مؤثر واقع شدند. در عین حال توان پارامترهای موجود در متغیر بدون بعد R^* با استفاده از روشهای برازش و به کمک نرم‌افزار SPSS به‌دست آمده است. اهمیت موضوع در این است که برخلاف تحقیقات گذشته که ضریب عبور امواج فقط به (مؤثرترین) پارامتر ربط داده می‌شد، می‌توان به کمک عدد بدون بعد R^* با تقریب خوب، تمامی پارامترهای مؤثر را در محاسبه

به‌شمار می‌رود). بنابراین موج‌شکن‌های توده‌سنگی شکل‌پذیر مشکل میزان عبور امواج را برای محیط پشت سازه بهتر حل می‌کنند (شکل ۹).

۴-۲- روش دوم

برای تعیین رابطه‌ای دقیق‌تر بین ضرایب عبور موج C_t و سایر پارامترهای مؤثر، به طوری‌که تمامی متغیرهای مؤثر در رابطه پیشنهادی ظاهر شوند، باید پارامترهای غیر وابسته مؤثر از کل پارامترهای مطرح جدا شود. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، یکی از راه‌های دقیق و علمی برای این منظور استفاده از تحلیل برازش چندگانه است. لذا به کمک نرم‌افزار SPSS و روش خطی چندگانه، معادله کلی زیر برای ارتباط مقادیر C_t با سایر متغیرها پیشنهاد می‌شود:

$$C_t = 0.00989 \frac{N^{0.124}}{P_e^{0.028} \cdot (R_c/H_{si})^{1.237} \cdot S_{om}^{.469}} \quad (15)$$

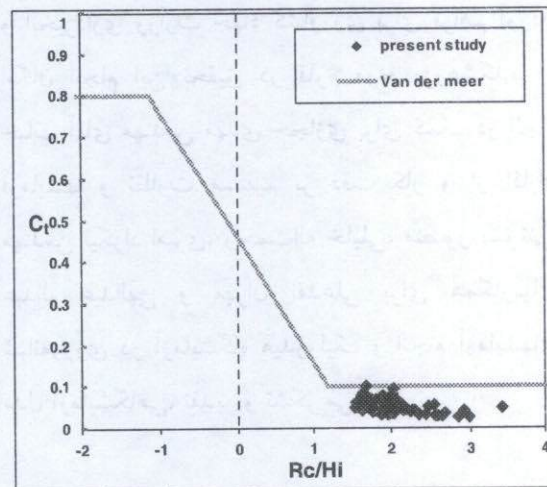
$$R^2 = 0.8$$

علت حذف پارامتر مؤثر فرعی S از رابطه بالا را می‌توان چنین بیان کرد که ضریب تأثیر پارامترهای مؤثر فرعی S و R_c/H_s هر دو در رابطه برازش، نسبت به پارامتر اصلی (C_t)، بالا بود و ضریب همبستگی^۱ بین دو پارامتر فرعی S و R_c/H_s نیز بزرگتر از ۰/۵ به‌دست آمد. در این حالت یکی از این دو پارامتر فرعی مؤثر باید از معادله برازش حذف می‌شد تا R^2 حاصل غیر واقعی نباشد. لذا با توجه به اینکه ضریب تأثیر S نسبت به پارامتر اصلی (C_t) کمتر از ضریب تأثیر R_c/H_s به‌دست آمد، از رابطه اصلی کنار گذاشته شد.

ضرایب امواج عبوری C_t پیش‌بینی شده از معادله (۱۵) و مقادیر مشاهده شده از آزمایشها در شکل ۱۰ ترسیم شده است. با توجه به شکل ۱۰، همانگونه که مشاهده می‌شود رابطه (۱۵) قابلیت خوبی برای برازش به داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر دارد.

نحوه برازش داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۸ نشان داده شده است. نکته قابل ذکر این است که در ابتدا بر اساس بررسی‌های کیفی اولیه، پارامتر N بر میزان عبور امواج به صورت تأثیر گذار مطرح شد، اما تحلیل با نرم‌افزارهای آماری نشان داد که ضریب تأثیر آن در مقابل سایر پارامترهای مؤثر بسیار کمتر است و در روش اول از معادله (۱۲) حذف شد.

برای مقایسه میزان عبور امواج در موج‌شکن سنتی با موج‌شکن شکل‌پذیر، در شکل ۹ بر اساس داده‌های به‌دست آمده از آزمایشها، نمودار ضریب عبور موج C_t بر حسب ارتفاع آزاد نسبی تاج (R_c/H_{si}) ترسیم شده و در کنار این اطلاعات آزمایشگاهی، روابط (۳)، (۴) و (۵) که توسط Van der Meer (1994) به‌دست آمده، ترسیم شده است.



شکل ۹ مقایسه نتایج تحقیقات (1994) Van der Meer با اطلاعات آزمایشگاهی حاضر

اطلاعات آزمایشگاهی تقریباً در زیر خط افقی $C_t = 0/1$ قرار گرفته که نشان می‌دهد در موج شکن شکل‌پذیر با شرایط بدون سرریزی از تاج، میزان عبور موج از سازه حداکثر ۰/۱ خواهد بود. این مقدار کمتر از مقادیر ثبت شده بر روی سازه‌های توده سنگی تاج کوتاه در آزمایشهای Van der Meer (1994) و Daemen (1991) است (موج‌شکن تاج کوتاه نیز یکی از موج شکن‌های سنتی

پیشنهاد می‌شود. پارامتر بدون بعد S را می‌توان به دو روش اندازه‌گیری یا بر اساس روابط تجربی، محاسبه کرد.

۵- معادلات مناسبی برای پیش‌بینی ضرایب عبور موج از موج‌شکنهای شکل‌پذیر با استفاده از برازش دو متغیره بر حسب پارامتر جدید R^* (رابطه ۱۳ و ۱۴) و برازش چند متغیره (رابطه ۱۵) ارائه شده است که از نظر آماری هر دو روش، دقت قابل قبولی دارند. اما از جنبه طراحی و محاسباتی، رابطه (۱۵) دقت عددی بیشتری دارد.

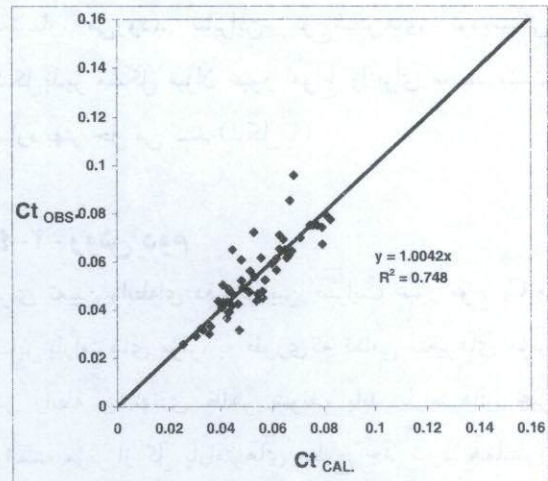
۶- عمده‌ترین تأثیر بر ضریب عبور موج، مربوط به مشخصات امواج و ارتفاع آزاد نسبی تاج سازه است.

۶- تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از مسئولان محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی برای فراهم آوردن امکان انجام این تحقیق در فلوم موج پژوهشکده، از جناب آقای مهندس مهدی حجازی برای کمک در انجام آزمایشها و نظارت مستقیم بر دقت کار و از آقایان مهندس نیکزاد امیری، رحمت‌اله خلیلی، منصور پشوتنی، عبدالله عبدالهی و مهران نقدعلی برای همکاریهای شبانه‌روزی در آزمایشگاه هیدرولیک و انجام آزمایشهای مدل آزمایشگاهی، تقدیر و تشکر می‌شود.

۷- منابع

- [1] Ahrens, J.P., 1987, Characteristics of Reef Breakwaters. CERC, Vicksburg Technical Report CERC-87-17.
- [2] CIRIA/CUR, 1991, Manual on the Use of Rock in Coastal and Shoreline Engineering. Special Publication 83, CUR Report 154, A.A.BALKEMA, Rotterdam.
- [3] CIRIA/CUR, 1995, Manual on the Use of Rock in Hydraulic Engineering. CUR/RWS Report 169, A. A. BALKEMA, Rotterdam.
- [4] Daemrich, K.F. and Kahle, W., 1985, Shutzwirkung Von Unterwasserwellenbrechern Unter Dem Einfluss Unregelmässiger Seegangswellen. Eigenverlag des



شکل ۱۰ ضرایب عبور موج مشاهده شده بر حسب مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه (۱۵)

۵- نتیجه‌گیری

تحقیقات آزمایشگاهی حاضر به منظور بررسی اثر عوامل مؤثر بر ضریب عبور موج از سازه‌های موج‌شکن شکل‌پذیر انجام شده است. نتایج این بررسیها را به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

- ۱- تأثیر دانه‌بندی مصالح لایه آر مور (D_{n85A}/D_{n15A}) بر حسب عبور موج از موج‌شکن شکل‌پذیر در محدوده داده شده (۱/۱۴ تا ۱/۸۲)، ناچیز است.
- ۲- شاخص نفوذپذیری مصالح سازه در محدوده‌های ارائه شده آزمایشها، بر ضریب عبور موج، تأثیرگذار است.
- ۳- ضرایب عبور موج از موج‌شکنهای شکل‌پذیر مورد آزمایش، با تعداد امواج N رابطه مستقیم و با شاخص نفوذپذیری مصالح سازه P_e نسبت ارتفاع آزاد تاج سازه به ارتفاع موج تابشی R_c/H_{si} و تیزی موج s_{om} رابطه معکوس دارد. در محدوده تغییرات متغیرهای به‌کار رفته، میزان عبور امواج در موج‌شکنهای شکل‌پذیر کمتر از موج‌شکنهای سنتی است.
- ۴- پارامتر بدون بعد جدید R^* برای نشان دادن تأثیر ارتفاع آزاد تاج سازه، نفوذپذیری، سطح فرسایش و پیش‌بینی ضریب عبور موج از موج‌شکنهای شکل‌پذیر

- Performance and Stability. Hydraulic Research, Wallingford. Report SR-57.
- [12] Seeling, W.N., 1980, Two-Dimensional Tests of Wave Transmission and Reflection Characteristics of Laboratory Breakwaters. CERC Technical Report No. 80-1, Vicksburg, USA.
- [13] USACE 1984, Shore Protection Manual. U.A. Government Publisher, Washington, DC.
- [14] Van der Meer, J.W., 1988, Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack. Doctoral Thesis. Delft Univ. of Technology. Also: Delft Hydraulics Communication No. 396.
- [15] Van der Meer, J.W. and d'Agremond, K., 1991, Wave Transmission at Low-Crested Structures. In Proc. Coastal Structures and Breakwaters. ICE, London UK.
- [16] Van der Meer, J.W., 1993, Conceptual Design of Rubble Mound Breakwaters. Delft Hydraulics. Report No. 483.
- [17] Van der Meer, J.W. and Daemen, I.F.R., 1994, Stability and Wave Transmission at Low-Crested Rubble-Mound Structures. J. of Waterway, Port, Coastal and Offshore Eng. ASCE. Vol. 120(1), pp. 1-19.
- [18] Van Gent, M.R.A., 1995, Wave Interaction with Permeable Coastal Structures. Ph.D Thesis, Delft University of Technology, ISBN 90-407-1182-8, Delft University Press.
- Franzius-Institut fuer Wasserbau und Kunstingenieurswesen, Heft 61 (In German).
- [5] Daemen, I.F.R., 1991, Wave Transmission at Low-Crested Breakwaters. M.Sc Thesis. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Delft.
- [6] Hughes, S.A., 1993, Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 7, World Scientific Publishing, Singapore.
- [7] Juhl, J. and Sloth, P., 1998, Berm Breakwaters-Influence of Stone Gradation, Permeability and Armoring. Proc. of the 25th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, 22 - 26 June 1998, ASCE.
- [8] Lissev, N., 1993, Influence of the Core Configuration on The Stability of Berm Breakwaters, Experimental Model Investigations. Report No. R-6-93, Department of Structural Engineering, University of Trondheim, the Norwegian Institute of Technology.
- [9] Mansard, E.P.D. and Funke, E.R., 1980, The Measurement of Incident and Reflected Spectral Using a Least Squares Method. Proc. 17th Coastal Engineering Conf., Sydney, Australia, pp. 154-172.
- [10] PIANC, MarCom WG 40, 2003, State-of-the Art of the Design and Construction of Berm Breakwaters. PIANC, Brussels.
- [11] Powell K.A. and Allsop N.W.H., 1985, Low Crested Breakwaters, Hydraulic