



مرکز بررسی‌ها و مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



مدلسازی عددی و تجربی تغییرات موج انتقالی از روی موج شکن های مستغرق

رونالد کاکس
دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست
دانشگاه نیو ساوت ولز

r.cox@unsw.edu.au

مجتبی تجزیه چی
استادیار گروه مهندسی عمران
دانشگاه هرمزگان

m.tajziehchi@hormozgan.ac.ir

چکیده

در این مقاله مدل دو بعدی آزمایشگاهی و عددی انتقال موج از روی موج شکن مستغرق دور از ساحل ارائه شده است. در مدل دو بعدی آزمایشگاهی پدیده شکست و انتقال موج تحت شرایط متنوع موج، هندسه موج شکن و عمق آب مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی منتشر شده توسط دیگر محققین در خصوص پیش بینی و محاسبه شکست و انتقال موج از روی موج شکن های مستغرق مورد بحث و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی حاضر قرار گرفته و مدل تجربی بهبود یافته ای پیشنهاد شده است.

مدل عددی دو بعدی انتقال موج از روی موج شکن های مستغرق با استفاده از نگارش جدید بسته نرم افزاری Delft3D مورد بررسی قرار گرفته است. رابطه جدیدی به منظور تعیین شاخص شکست موج و کاربرد آن در نرم افزار مذکور ارائه شده است تا مقدار محاسبه شده ارتفاع موج انتقال یافته توسط مدل عددی بهبود یافته و با داده های آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد.

واژه های کلیدی

موج شکن مستغرق - ضریب انتقال موج - شکست موج - استهلاك انرژی

مقدمه

امروزه دانش عملی طراحی موج شکن های مستغرق و اثرات آن بر موج انتقالی، جریان و تغییرات خط ساحلی کافی نبوده و در حال توسعه می باشد. اغلب تحقیقات تجربی (آزمایشگاهی) گذشته در مورد انتقال موج عبوری از روی موج شکن های مستغرق (Johnson و همکاران، ۱۹۵۱؛ Adams و Choule، ۱۹۸۶؛ d'Angremond و همکاران، ۱۹۹۶؛ Seabrook، ۱۹۹۷ و van der Meer و همکاران، ۲۰۰۴) با عرض تاج کم و نیمه مستغرق انجام شده است و مطالعات منحصر به بازه محدودی از عرض موج شکن بوده است. تحقیقات گذشته نشان می دهد که موج شکن های مستغرق با عرض تاج کم احداث شده در نواحی ساحلی، بعضاً به دلیل کمی عرض و یا عدم وجود روشهای قابل اطمینان طراحی در حفاظت سواحل بدون تأثیر بوده اند. از آنجا که موج شکن های مستغرق با عرض نسبتاً زیاد کارایی بیشتری در حفاظت سواحل دارند، مطالعات بیشتری بمنظور توسعه دانش امواج عبوری از روی اینگونه سازه ها مورد نیاز می باشد.

مدلسازی موج بر روی موج شکن های مستغرق با استفاده از بسته نرم افزاری MIKE21 PMS توسط Johnson (۲۰۰۶) نشان داد که مدل استهلاك انرژی Battjes و Janssen (۱۹۷۸) مقادیر بیشتر انرژی تلف شده و ضریب انتقال موج بر روی موج شکن های مستغرق را نسبت به نتایج آزمایشگاهی Zanuttigh و همکاران (۲۰۰۳) بدست می دهد. در این مدل پارامتر (شاخص) شکست مربوط به مدل استهلاك موج به عنوان ضریب واسنجی انتخاب و یک رابطه ساده بین پارامتر شکست و نسبت استغرق ارائه شد. ضریب انتقال بدست آمده از مدل مذکور نتایج قابل قبولی را با توجه به برخی مدل های آزمایشگاهی نشان داد.

در این مقاله مدلهای تجربی موجود پیش بینی انتقال امواج بر روی موج شکن های مستغرق مورد بررسی قرار گرفته و بهبود یافته است. علاوه بر این، مدل عددی دو بعدی انتقال امواج از روی اینگونه سازه ها با استفاده از ویرایش جدید بسته نرم افزاری Delft3D مورد بررسی قرار می گیرد.

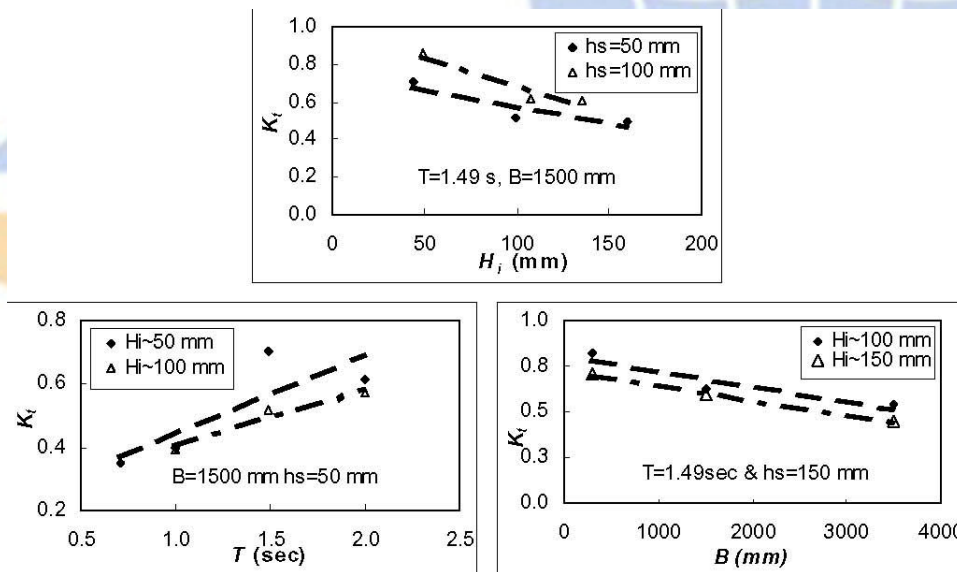
مدل تجربی انتقال موج

مدل آزمایشگاهی جامعی در فلوم به عرض ۳ متر ، عمق ۱/۵ و طول ۳۰ متر در آزمایشگاه تحقیقات آب دانشگاه نیو ساوت ولز استرالیا انجام شده است . شرایط متنوع موج ، عمق آب و عرضهای متفاوت موج شکن نفوذ ناپذیر با سطح صاف در این سری آزمایشات مورد مطالعه قرار گرفته است . جزئیات بیشتر مدل آزمایشگاهی در مقاله Tajziehchi و Cox (۲۰۰۵) ارائه شده است. ارتفاع موج انتقال یافته در طول فلوم و بر روی موج شکن با استفاده از ۹ موج سنج اندازه گیری شد. ضریب انتقال موج K_t با نسبت میانگین ارتفاع موج های انتقال یافته به موج رسیده اندازه گیری شده توسط موج سنج متحرک محاسبه گردید. به منظور بررسی ضریب انتقال موج ۵۲ حالت از آزمایشات با موج در حال شکست بر روی موج شکن در نظر گرفته شد.

تحلیل ضریب انتقال موج و تأثیر متغیرهای مختلف بدون و با بعد بر آن، با روشهای گرافیکی و آماری مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات ضریب انتقال نسبت به ارتفاع موج رسیده " H_i " ، دوره تناوب موج " T " و عرض تاج موج شکن " B " در شکل (۱) نشان داده شده است. بررسی گرافیکی نشان می دهد که ضریب انتقال با عمق استغراق و دوره تناوب افزایش یافته، در حالی که عرض تاج موج شکن و ارتفاع موج رسیده اثر معکوس بر ضریب انتقال دارد. این یافته ها با نتایج مطالعات انجام شده گذشته مطابقت دارد (Ahrens, ۱۹۷۸; van der Meer, ۱۹۹۱ و Seabrook, ۱۹۹۷).

آنالیز آماری داده های آزمایشگاهی ارتباط بین پارامترهای مؤثر را بر ضریب نفوذ پذیری به شرح زیر نشان می دهد:

- تأثیر عمق استغراق " hs " و ارتفاع موج " H_i " برای موج شکن عریض تر بیشتر بوده در حالیکه دوره تناوب در موج شکن های با عرض کمتر اثر بیشتری دارد.
- تأثیر دوره تناوب و عمق استغراق در شرایط ارتفاع موج کمتر، بیشتر بوده در حالی که عرض تاج موج شکن برای موج های با ارتفاع زیاد مؤثر است.



شکل ۱ تأثیر متغیرهای ارتفاع موج ، دوره تناوب و عرض موج شکن بر ضریب انتقال موج

نتایج مذکور بالا می تواند به عنوان راهنمای خوبی برای طراحی اولیه موج شکن های مستغرق بکار رود. در هر صورت، استفاده از پارامترهای بدون بعد می تواند همبستگی بین متغیرهای بالا را روشن تر سازد. بر اساس آنالیز ابعادی و مرور متغیرهای بالا، پارامترهای بدون بعد زیر برای تحلیل و مطالعات بعدی در نظر گرفته شد:

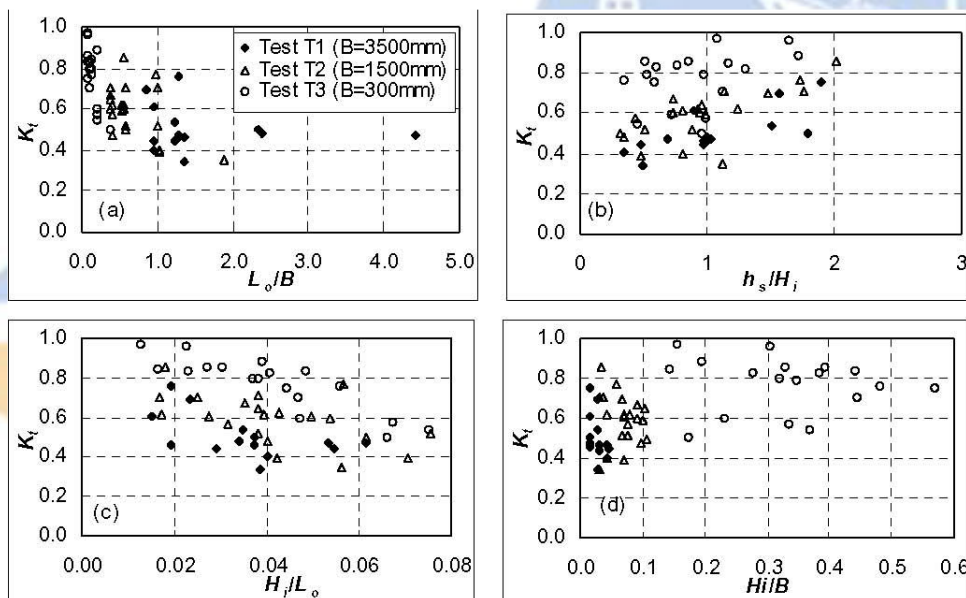
$$K_t = f\left(\frac{B}{L_0}, \frac{h_s}{H_i}, \frac{H_i}{L_0}, \frac{H_i}{B}\right) \quad (1)$$

که در آن طول موج در آب عمیق L_0 جایگزین دوره تناوب T به کار گرفته شده است.

در شکل (۲) تغییرات ضریب انتقال بر حسب متغیرهای بدون بعد معرفی شده در بالا نشان داده شده است. آنالیز گرافیکی پارامترهای بدون بعد نشان می دهد که ضریب انتقال موج با کاهش عرض موج شکن افزایش میابد. دلیل این روند تغییرات را می توان در طول ناحیه کم عمق به منظور تکمیل

شکست موج جستجو نمود. برای موج شکن های عریض، طول کافی آب کم عمق در مسیر حرکت موج وجود داشته و در نتیجه پروسه شکست موج کامل شده و انرژی بیشتری آزاد می شود. بر اساس تحلیل روند تغییرات در شکل (۲) تأثیر پارامترهای بدون بر ضریب انتقال موج را می توان به شرح زیر بیان کرد:

- پارامتر بدون بعد عرض تاج موج شکن " B/L_o " اثر معکوس بر " K_t " دارد. در آزمایش های انجام شده با موج شکن با عرض کمتر (باریک تر) که در آن $B/L_o < 1$ است، ضریب انتقال نسبت به پارامتر بدون بعد عرض تاج موج شکن حساس تر می باشد. در حالتی که عرض تاج موج شکن از طول موج بزرگ تر است، طول منطقه شکست در ناحیه کم عمق به اندازه کافی بزرگ بوده و تأثیری بر نحوه شکست موج ندارد.
- تأثیر نسبت استغراق " h_s/H_i " بر ضریب انتقال موج مستقیم می باشد. افزایش نسبت استغراق موجب عبور موج با شکست کمتر و در نتیجه انتقال بیشتر انرژی از روی موج شکن می شود. تغییرات ضریب انتقال بر حسب نسبت استغراق برای موج شکن با عرض های مختلف نشان می دهد که نسبت استغراق در آزمایش های با موج شکن عریض تر تأثیر بیشتری دارد.
- افزایش تیزی موج " H_i/L " موجب کاهش ضریب انتقال می شود (به دلیل شکست کامل موج روی موج شکن).
- ضریب انتقال موج با افزایش نسبت ارتفاع موج به عرض موج شکن (نسبت ارتفاع موج) افزایش میابد، ولی زمانی که $H_i/B \geq 0.1$ اثر نسبت ارتفاع موج کمتر می شود. در این حالت موج رسیده به موج شکن در شیب سمت دریای سازه (ابتدای موج شکن) شکسته و دیگر ضریب انتقال بستگی به عرض موج شکن نخواهد داشت.



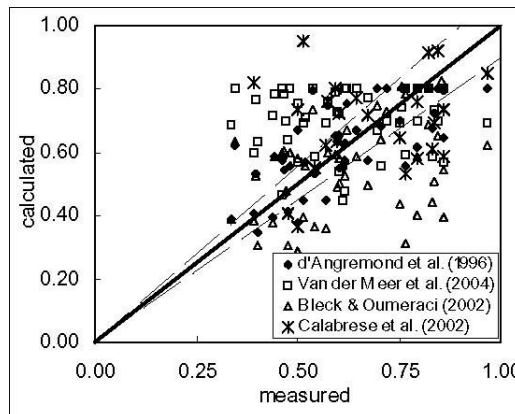
شکل ۲ تغییرات ضریب انتقال موج نسبت به متغیرهای بدون بعد مختلف برای آزمایش هایی که امواج بر روی موج شکن می شکند.

به منظور بررسی بیشتر پارامترهای بدون بعد و تأثیر گذاری آنها، آنالیز آماری متغیرهای مذکور انجام شد. ضریب همبستگی بین ضریب انتقال K_t و سایر متغیرهای بدون بعد نشان داده شده در جدول (۱) بیان می کند که معکوس نسبت عرض تاج موج شکن " L_o/B "، ارتفاع نسبی موج " H_i/B "، معکوس تیزی موج " L_o/H_i " و نسبت استغراق " h_s/H_i " پارامترهای بدون بعدی هستند که به ترتیب بیشترین تأثیر را بر ضریب انعکاس دارند.

جدول ۱ ضریب همبستگی بین ضریب انتقال K_t و سایر متغیرهای بدون بعد

L_o/H_i	L_o/B	H_i/B	h_s/H_i	پارامتر بدون بعد
۰/۴۷	۰/۷۷	۰/۵۵	۰/۳۸	ضریب همبستگی

در شکل (۳) مقادیر ضریب انعکاس اندازه گیری شده در آزمایشگاه با چهار رابطه ارائه شده به منظور محاسبه ضریب انعکاس (d'Angremond و همکاران، ۱۹۹۶؛ Bleck و Oumeraci، ۲۰۰۲؛ Calabrese و همکاران، ۲۰۰۲ و van der Meer و همکاران، ۲۰۰۴) مقایسه شده است. دلیل اصلی اختلاف بین مقادیر پیش بینی شده توسط روابط تجربی گذشته با مقادیر متناظر اندازه گیری شده در آزمایشات حاضر را می توان در محدوده شرایط آزمایشگاهی در تحقیق حاضر را نشان می دهد. همانطور که از جدول بر می آید، داده های آزمایشگاهی حاضر محدوده وسیعی از متغیرهای بدون بعد را نسبت به تحقیقات گذشته پوشش می دهد. بنابراین بمنظور پیش بینی دقیق تر ضریب انتقال موج از روی موج شکن با عرض های زیاد، روابط ارائه شده در گذشته نیاز به اصلاح دارد.



شکل ۳. مقایسه ضریب انتقال موج اندازه گیری شده با مدل های تجربی گذشته

جدول ۲ مقایسه محدودیت های آزمایشگاهی انجام شده در گذشته و تحقیق حاضر به منظور پیش بینی ضریب انتقال موج

آزمایش حاضر	Calabrese و همکاران (۲۰۰۲)	Oumeraci و Bleck (۲۰۰۱)	d'Angremond و همکاران (۱۹۹۶)	مأخذ
۰/۰۱	۰/۳	۰/۱	-	بیشینه h_s/B
۰/۵	۰/۴	۰/۶	-	کمینه
۱/۷۶	۱/۰۶	۲/۵	-	بیشینه B/H_i
۷۱/۷	۸/۱۳	۱۲/۵	-	کمینه
۰/۱۲	۰/۳۱	۰/۱۱	-	بیشینه H_i/h
۰/۴۶	۰/۶۱	۰/۲۹	۰/۵۴	کمینه
۰/۰۱	-	۰/۰۰۱۴	-	بیشینه H_i/L_o
۰/۰۸	-	۰/۱	۰/۶	کمینه
۱/۸۲	۳/۰	-	-	بیشینه L_o/B
۴/۴۱	۵/۲	-	-	کمینه

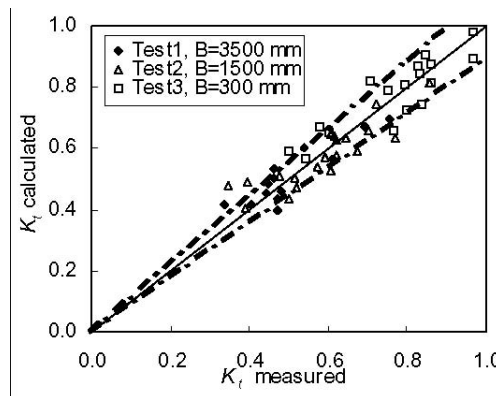
بمنظور بررسی ضریب انتقال موج بر روی موج شکن مستغرق فرم کلی معادلات ارائه شده توسط d'Angremond و همکاران (۱۹۹۶) بصورت زیر در نظر گرفته شده است :

$$K_t = b_1 \left(\frac{h_s}{H_i} \right) + b_2 \left(\frac{B}{H_i} \right)^{b_3} \cdot (1 - \exp(b_4 \cdot \xi)) \quad (۲)$$

که در آن h_s ارتفاع آب از روی تاج موج شکن ، H_i ارتفاع موج ، B عرض تاج موج شکن و K_i عدد ایریرن می باشد. مقادیر ضرایب b_1 تا b_4 با استفاده از برازش غیر خطی محاسبه شده و معادله زیر بمنظور محاسبه (پیش بینی) ضریب انتقال موج بطور قابل اطمینان تری برای موج شکن های مستغرق با محدوده وسیعی از عرض نسبی تاج ($0/08 < B/L < 4/4$) و نسبت استغراق پیشنهاد می گردد:

$$K_t = 0.17 \left(\frac{h_s}{H_i} \right) + 2.84 \left(\frac{B}{H_i} \right)^{-0.26} \cdot (1 - \exp(-0.14 * \xi)) \quad (3)$$

مقایسه مقادیر ضریب انتقال اندازه گیری شده و محاسبه شده (با استفاده از معادله ۳) در شکل (۴) نشان داده شده است که بیانگر دقت کافی و قابل قبول مدل ارائه شده می باشد.



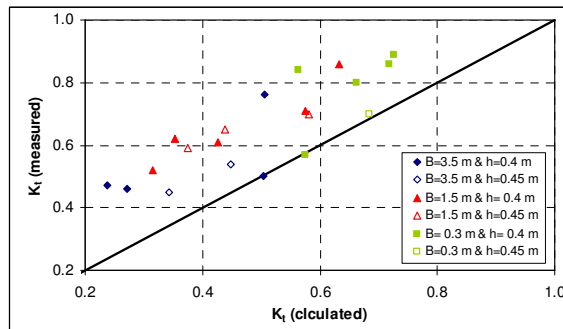
شکل ۴ مقایسه ضرایب انتقال اندازه گیری شده با مقادیر متناظر محاسبه شده توسط مدل پیشنهادی

مدل عددی

تغییرات وضعیت موج در داخل فلوم تحت اثر موج شکن مستغرق با استفاده از مدل موج SWAN از بسته نرم افزاری Delft3D محاسبه شده است. آنالیز حساسیت مدل بیانگر این بود که عامل مؤثر کاهش ارتفاع موج در طول فلوم مدل شده، شکست موج ناشی از کاهش عمق با حضور موج شکن مستغرق می باشد. در بسته نرم افزاری Delft3D، تنها مدل استهلاک ناشی از شکست موج مدل ارائه شده توسط Battjes و Janssen (۱۹۷۸) و Eldeberky و Battjes (۱۹۹۵) می باشد.

تاکنون، تئوری Battjes و Janssen (۱۹۷۸) برای شرایط مدلسازی شکست موج بر روی سواحل با شیب کم با موفقیت بکار گرفته شده است. Battjes و Stive (۱۹۸۵) مدل ذکور را توسط محدوده وسیعی از داده های آزمایشگاهی و میدانی در شرایط موج مختلف بر روی بستر با شیب های ملایم و اسنجی کرده و مقادیر $0/6$ تا $0/83$ را (با میانگین $0/73$) به عنوان اندیس شکست موج بر روی بستر با شیب کم پیشنهاد نمودند.

در ابتدا، به منظور بررسی کاربرد مدل استهلاک شکست موج Battjes و Janssen (۱۹۷۸) در موج شکن های مستغرق، مقدار متوسط اندیس شکست $\gamma = 0/73$ در مدل Delft3D-SWAN انتخاب شد. مقایسه ضریب انتقال موج محاسبه شده توسط مدل عددی SWAN با مقادیر متناظر اندازه گیری شده در آزمایشگاه (شکل ۵) نشان می دهد که مقادیر ضریب انتقال موج محاسبه شده با $\gamma = 0/73$ کمتر از مقادیر اندازه گیری شده است. بنابراین، کاربرد مدل استهلاک انرژی Battjes و Janssen (۱۹۷۸) موجب استهلاک بیشتر انرژی بر روی موج شکن مستغرق شده و در نتیجه مدل عددی SWAN با مقادیر پیشنهادی اندیس شکست بر روی بستر با شیب ملایم قابل کاربرد نمی باشد. این یافته با آنچه توسط Zanuttigh و همکاران (۲۰۰۳) و Johnson (۲۰۰۶) ارائه شده است انطباق دارد.



شکل ۵ مقایسه مقادیر اندازه گیری شده ضریب انتقال با مقادیر محاسبه شده توسط SWAN

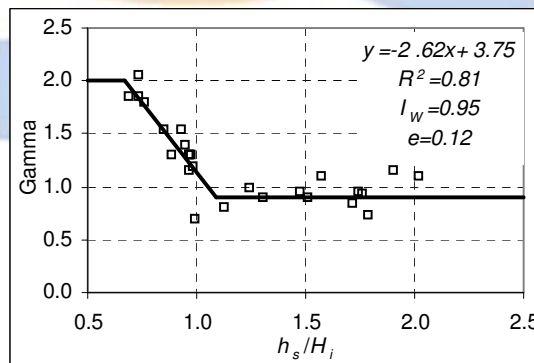
در مطالعه حاضر، مدل عددی SWAN برای شرایط مختلف موج، عمق آب و عرض تاج (براساس شرایط آزمایشگاهی) اجرا شده است. آزمایشات منتخب برای مدل عددی شامل محدوده وسیعی از عرض تاج و نسبت استغراق با مقادیر $2/33 < B/L < 0/11$ و $2/0 < H_i/h_s < 0/63$ می باشد. مقدار عددی شاخص شکست γ در مدل SWAN به نحوی انتخاب شده تا مقادیر ضریب انتقال محاسبه شده با مقادیر متناظر اندازه گیری شده در آزمایشگاه برابر باشد.

تغییرات γ نسبت به پارامترهای بدون بعد (از قبیل عدد اورسل " U_R "، " H_i/d "، عدد ایریرین " ξ "، " L_o/H_i "، " d_s/H_i "، " H_i/h_o " و " B/L_o ") نشان داد که رابطه خطی بین مقادیر واسنجی شده اندیس شکست در SWAN و نسبت استغراق وجود دارد. مطالعات نشان داد که اثر سایر پارامترهای بدون بعد در مقادیر واسنجی شده اندیس شکست ناچیز است.

تغییرات ضریب شکست واسنجی شده بر حسب نسبت استغراق در شکل (۶) نشان می دهد که برای نسبت استغراق $h_s/H_i < 0/10$ ، ضریب شکست با مقدار $0/92$ و انحراف معیار $0/13$ تقریباً ثابت بوده و دیگر تابعی از نسبت استغراق نمی باشد. این مقدار ضریب شکست، نزدیک به مقدار پیشینه ارائه شده توسط Battjes و Stive (۱۹۸۵) است. برای مقادیر نسبت استغراق $0/1 < h_s/H_i < 0/5$ ، شکل (۶) رابطه خطی بین اندیس شکست و نسبت استغراق را نمایش می دهد. معادلات زیر به منظور محاسبه شاخص شکست موج بصورت تابعی از نسبت استغراق معرفی می گردد تا در معادله استهلاک موج ارائه شده توسط Battjes و Janssen (۱۹۷۸) (در مدل Delft3D-SWAN) بکار گرفته شود:

$$\gamma = -2.62 \frac{h_s}{H_i} + 3.75 \leq 2.0 ; 0.5 < \frac{h_s}{H_i} \leq 1.0 \quad (4)$$

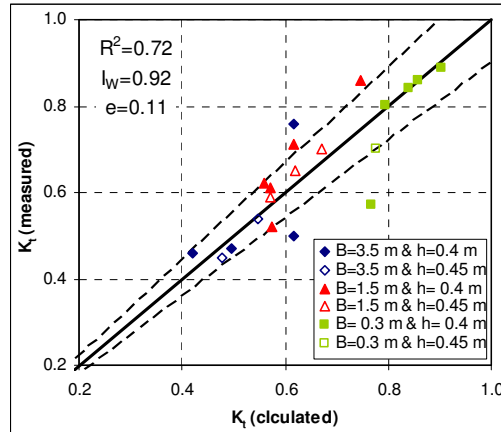
$$\gamma = 0.90 ; \frac{h_s}{H_i} > 1.0$$



شکل ۶ مدل ارائه شده برای محاسبه ضریب شکست موج در مدل SWAN

مقادیر ضرایب انتقال بر روی موج شکن با استفاده از مقادیر واسنجی شده شاخص شکست γ (معادله ۴) در مدل SWAN محاسبه و مقادیر مذکور با ضرایب K_t اندازه گیری شده در آزمایشگاه مقایسه شده است. شکل (۷) بیانگر این است که مقادیر محاسبه شده با تخمین بسیار خوبی (بدون در نظر گرفتن عرض تاج موج شکن) با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه مطابقت دارد.

بنابراین، رابطه ۴ بهبود قابل توجهی در کاربرد مدل استهلاک Janssen و Battjes (۱۹۷۸) برای پیش بینی وضعیت موج روی موج شکن مستغرق و پس از آن (وقتی $h_s/H_i > 0.5$) را نشان می دهد. Johnson (۲۰۰۶) رابطه مشابهی را برای واسنجی مدل Janssen و Battjes و کاربرد آن در مدلسازی موج در حضور موج شکن های مستغرق ارائه نمود. اما مدل Johnson بر پایه تعداد اندک و محدوده کوچکی از آزمایشات بنا شده، در حالی که مدل ارائه شده حاضر بر اساس تعداد ۲۱ آزمایش ارائه شده است.



شکل ۷ مقایسه ضرایب انتقال اندازه گیری شده با مقادیر متناظر محاسبه شده توسط مدل پیشنهادی با استفاده از مقادیر واسنجی شده شاخص شکست در معادله Janssen و Battjes (۱۹۷۸).

نتیجه گیری

در این مقاله تغییر شکل موج بر روی سازه موج شکن مستغرق صاف و غیرقابل نفوذ مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایشات وسیعی به منظور مطالعه اثر پارامترهای مختلف بر موج انتقالی بر روی موج شکن های مستغرق انجام شده است. داده های آزمایشگاهی اندازه گیری شده موج های شکسته انتقالی نشان داد که ضریب انتقال " K_t " با عمق استغراق و دوره تناوب افزایش میابد، در حالی که عرض تاج موج شکن و ارتفاع موج رسیده اثر معکوس بر ضریب انتقال دارد. بررسی تغییرات ضریب انتقال بر حسب پارامترهای بدون بعد نشان داد که معکوس عرض موج شکن نسبی " L_i/B "، نسبت ارتفاع موج به عرض موج شکن " H_i/B "، معکوس تیزی موج " L_o/H_i " و استغراق نسبی " h_s/H_i " به ترتیب پارامترهای با تأثیر بیشتر بر ضریب انتقال هستند.

برای محدوده وسیعی از B/L رابطه بهبود یافته ای جهت پیش بینی ضریب انتقال موج K_t ارائه شده است. مدل پیشنهادی، پیشرفت قابل توجهی را برای محاسبه K_t بر روی موج شکن های مستغرق در شرایط عرض نسبی موج شکن با بازه وسیع $0.4 < B/L_o < 0.8$ نشان می دهد. در حالی که مدل های موجود در مقالات برای موج شکن با عرض کم قابل کاربرد می باشد.

مدل عددی تغییرات موج روی موج شکن مستغرق با استفاده از بسته نرم افزاری Delft3D-SWAN انجام شده است. استفاده از مدل شکست Janssen و Battjes (۱۹۷۸) برای موج شکن های مستغرق، مقدار انرژی مستهلک شده بیشتری را ناشی از شکست موج ارائه می دهد. در این مقاله رابطه ای برای محاسبه اندیس شکست بر روی موج شکن و کاربرد آن در رابطه Janssen و Battjes و مدل عددی پیشنهاد شده است، بطوریکه مقادیر محاسبه شده ضریب انتقال موج از روی موج شکن های مستغرق (توسط مدل عددی) انطباق خوبی را نسبت به مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه نشان می دهد.

- Adams, C.B. and Choule J.S. (1986). Wave transmission across submerged near-surface breakwater, *Proc. 20th Int. Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, 1730-1738.
- Ahrens, J.P. (1987). Characteristics of reef breakwaters, *Technical Report, CERC-87-17*,
- Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, 569-587.
- Battjes, J.A. and Stive, M.J.F. (1985). Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No. C5, 9159-9167.
- Bleck, M. and Oumeraci, H. (2004). Analytical model for wave transmission at artificial reefs, *Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, 269-281.
- Calabrese, M., Vicinanza, D. and Buccino M. (2002). Large-scale experiments on the behaviour of low crested and submerged breakwaters in presence of broken waves, *Proc. 28th Int. Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, 1900-1912.
- Cox, R.J. and Tajziehchi, M. (2005). 2D experimental modeling of hydrodynamic effects of submerged breakwaters, *Coastal Dynamics'2005*, 12p. [CD].
- d'Angremond, K., Van der Meer, J.W. and De Jong, R.J. (1996). Wave transmission at low-crested structures, *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, 2418-2427.
- Eldeberky, Y. and Battjes, J.A. (1996). Spectral modelling of wave breaking: Application to Boussinesq equations, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. C1, 1253-1264.
- Johnson, J.W., Fuchs, R.A. and Morison, J.R. (1951). The damping action of submerged breakwaters, *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 32, No. 5, 704-718.
- Johnson, H.K. (2006). Wave modeling in the vicinity of submerged breakwaters, *Journal of Coastal Engineering*, 53, 39-48.
- Seabrook, S.R. (1997). Investigation of the performance of submerged rubblemound breakwaters, *MSc. Thesis*, 199 pp., Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- van der Meer, J.W. (1991). Stability and transmission at low-crested structures, *Technical report*, Delft Hydraulic, Report No. H 453. 33p.
- van der Meer, J.W., Briganti, R., Wang, B. and Zanuttigh, B. (2004). Wave transmission at low-crested structures, including oblique wave attack, *Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, 4152-4164.
- Zanuttigh, B., Guerrero, M. and Lamberti, A. (2003). 3D experimental analysis and numerical simulations of hydrodynamics around low crested structures, *Proc. IAHR Conf.*, 369-376.

Numerical and Experimental Modeling of Wave Evolution over Submerged Breakwaters

M. Tajziehchi

R. J. Cox

ABSTRACT

Two dimensional experimental and numerical modeling of wave transmission over detached submerged breakwaters has been carried out in this paper. A comprehensive series of 2D laboratory experiments have been conducted in the 3 m wide wave flume including wide variety of wave-climates, breakwater geometry and water depth. The 2D laboratory tests examined wave breaking as well as wave transmission over submerged breakwater/reef structures. Different approaches to experimental data processing are examined in producing reliable application of the 2D laboratory measurements. Sensitivity of wave transmission coefficient, over submerged breakwaters to various dimensional and non-dimensional parameters is comprehensively investigated. Previously published experimental studies for predicting/calculating wave breaking and wave transmission are discussed and compared with the present experimental results. Improved empirical equations/models are presented. The 2D depth averaged numerical modeling of wave transmission over submerged breakwaters was investigated using the recent research version of Delft3D. Wave energy dissipation model of Battjes and Janssen (1978) was found to overestimate wave-induced breaking dissipation over submerged breakwaters. Alternative equations for wave breaker parameter were developed for incorporation in the model of Battjes and Janssen (1978) to improve the calculation of transmitted wave height over and behind submerged breakwaters/reefs.

Keywords: submerged breakwaters- wave transmission- breaker parameter- energy dissipation