

مطالعه افزایش انرژی مؤلفه‌های فرکانس بالا و پایین در اثر شکست امواج در خیزاب بیرونی

سید مسعود محموداف

استادیار، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، پژوهشکده فناوری و مهندسی دریا، تهران، پست الکترونیکی:
m_mahmoudof@inio.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۳

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۶

چکیده

در این مطالعه اهمیت انتقال انرژی امواج در حین شکست موج در محدوده‌ی خیزاب بیرونی، بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی ۳۶ موج نامنظم منطبق بر طیف JONSWAP مورد ارزیابی قرار گرفت. تغییر شکل موج روی سطح شیب‌دار با شیب ۱:۱۶، با استفاده از دو گروه ۳ تایی حسگر فشار در ابتدا و انتهای آن تعیین شد. نتایج نشان داد حداکثر ۲۲٪ از انرژی مستهلک شده ناشی از شکست به محتوای انرژی موج شکسته شده باز می‌گردد که معادل ۹٪ از کل انرژی موج مربوطه در زمان تولید در عمق اولیه است. در این حالت ارتفاع موج شکسته شده حاصل از پیش-بینی مدل‌های طیفی حدود ۸٪ کمتر از مقدار واقعی خواهد بود. به طور کلی مشخص شد با افزایش عدد Ursell مربوط به موج تولیدی در عمق اولیه، انتظار می‌رود شاهد انتقال درصد بالاتری از انرژی مستهلک شده به فرکانس‌های بالا و پایین باشیم.

کلمات کلیدی: انتقال انرژی، فرکانس پایین، فرکانس بالا، شکست موج، مشاهدات آزمایشگاهی.

۱. مقدمه

کاهش میزان انرژی در محدوده‌ی فرکانس غالب است (عسگری و همکاران، ۱۳۹۴). در کنار این اثر بدیهی تولید تعداد قابل توجهی امواج کوتاه علاوه بر انتقال انرژی به فرکانس‌های پایین از دیگر اثرات شکست موج هستند (Masselink, 1998; Ruessink, 1998; Baldock and Huntley, 2002). فقط تعداد محدودی از مدل‌های سری زمانی مانند SWASH قادر به شبیه‌سازی نسبتاً قابل قبول تقویت انرژی در گروه امواج فروگرانشی (فرکانس پایین) در حین شکست امواج ناشی از باد هستند (De Bakker et al., 2016). از سوی دیگر به دلیل آنکه ماهیت معادلات طیفی شکل‌گیری امواج کوتاه و همچنین امواج بلند در اثر شکست به خوبی شناخته شده نیست در مدل‌های طیفی متوسط فازی^۳ از

شکست موج در محدوده‌ی آب‌های کم‌عمق نزدیک به ساحل در اثر کاهش عمق یکی از جذاب‌ترین پدیده‌های مربوط به تغییر شکل موج است. به محدوده‌ی پس از شکست موج خیزاب^۱ اطلاق می‌شود، حال اگر موج در مراحل نخستین شکست و با فاصله‌ی بیشتری نسبت به خط ساحلی باشد به آن محدوده‌ی خیزاب بیرونی^۲ گفته می‌شود (CEM (US Army, 2006)). استهلاك انرژی موج ناشی از شکست در محدوده‌ی خیزاب بیرونی باعث تغییر فرکانس غالب نمی‌شود و عمده تغییر مشهود،

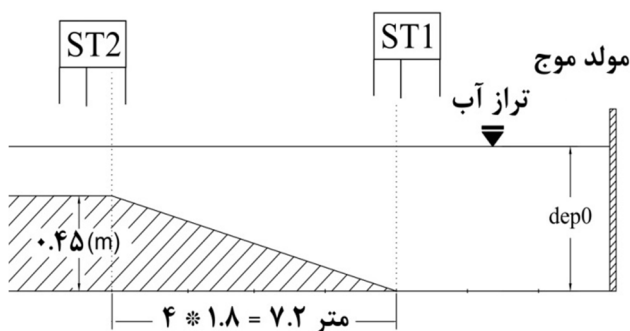
¹ surf-zone

² outer surf

³ phase averaged

۲. مواد و روش‌ها

به منظور انجام مطالعه‌ی حاضر از کانال دو بعدی موج دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه تهران به طول ۲۴ متر، عمق عملیاتی ۱،۱۰ و عرض ۱ متر استفاده شد. جداره‌های کانال غیر از محدوده‌ی تولید موج، از جنس شیشه لمینیت و بستر از جنس ملات نرم و مقاوم در برابر نفوذ رطوبت بودند. این کانال مجهز به یک مولد الکتریکی موج به همراه سامانه‌ی جاذب فعال^۲ روی تخته‌ی موج‌ساز و جاذب غیرفعال سنگ شکسته در انتهای کانال بود. اندازه‌گیری نوسانات تراز سطح آب در ابتدا و پایان سطح شیب دار در اعماق ثابت به کمک حسگرهای فشار انجام شده است. دامنه‌ی عملکرد و دقت نسبی حسگرهای مورد استفاده، به ترتیب ۱ متر آب (۱۰۰ میلی بار) و ۰،۱٪ دامنه‌ی کامل بود. فاصله‌ی متوسط تخته‌ی موج‌ساز از نقطه‌ی آغازین سطح شیب‌دار ۵،۴ متر بود. در شکل ۱ نحوه‌ی قرارگیری حسگرهای هدف نسبت به سطح شیب‌دار نشان داده شده است. ابتدا داده‌های دینامیکی فشار به روش اصلاح کاهش عمق^۳ به داده‌های تراز تبدیل شدند. به منظور حذف اثر موج منعکس شده از دو گروه سه‌تایی حسگر در محدوده‌ی اعماق ثابت پیش و پس از سطح شیب‌دار و روش Mansard و Funke (۱۹۸۰) استفاده شد. به عبارتی اثر شکست فقط بر طیف امواج تابشی در ابتدا و انتهای شیب مورد بررسی قرار گرفته و لذا بزرگی ضرایب انعکاس بر نتایج ارائه شده، اثری نخواهد داشت. هر چند که ضرایب انعکاس ابتدا و انتهای شیب بسته به عمق و فرکانس غالب به ترتیب بین (۲۶-۲۱)٪ و (۱۷-۱۴)٪ تغییر کرده است.



شکل ۱: موقعیت قرارگیری حسگرهای موج روی بستر شیب‌دار در کانال موج دو بعدی

جمله مدل بسیار توانمند SWAN از تقویت انرژی این دو گروه امواج در اثر شکست موج صرف نظر می‌شود. این مشکل زمانی بیشتر مشهود می‌شود که مدل عددی مذکور، فرکانس غالب و شکل طیف توزیع انرژی را در زمان طوفان برای اعماق بسیار کم به طور کلی اشتباه پیش‌بینی و شبیه‌سازی می‌کند (Mahmoudof et al., 2018).

مطالعات آزمایشگاهی انتقال فرکانسی انرژی موج توسط برخی محققین انجام شده‌اند (Baldock, 2006; Baldock et al., 1998; Baldock and Huntley, 2002; Dong et al., 2009; Lin and Hwung, 2012). البته اکثر این مطالعات با رویکرد شکل‌گیری اندرکنش‌های غیرخطی سه‌تایی^۱ از نوع تفاضلی در خصوص امواج دورنگی بوده است. همچنین مشاهدات جامع آزمایشگاهی به منظور مطالعه‌ی پدیده‌های تغییر شکل و مشخصات موج به ندرت انجام شده‌اند (Michallet et al., 2014; van Noorloos, 2003; Boers, 1997).

در خصوص اهمیت و آثار پدیده‌ی انتقال انرژی به فرکانس‌های بالا و پایین در اثر شکست، می‌توان به تغییر شکل طیف و محتوای انرژی امواج و در نتیجه تغییر ارتفاع مشخصه و همچنین تغییر برخی از مشخصات آماری مانند دوره‌ی تناوب متوسط قطار موج شکسته شده، اشاره نمود (Masselink, 1998). چشم‌پوشی از این پدیده در مدل‌های عددی طیفی موج (مانند SWAN) منجر به تخمین دست پایین ارتفاع موج شکسته شده خواهد شد. از سوی دیگر انتقال انرژی به فرکانس‌های پایین، باعث افزایش انرژی امواج بلند فروگرانشی می‌شود که در اثر کاهش ژرفا دچار شکست نمی‌شوند و در نتیجه آثار بسیار قابل توجهی در پدیده‌های مختلف ساحلی و بندری دارند (Yu and Mei 2000; Diaz-Hernandez et al., 2015).

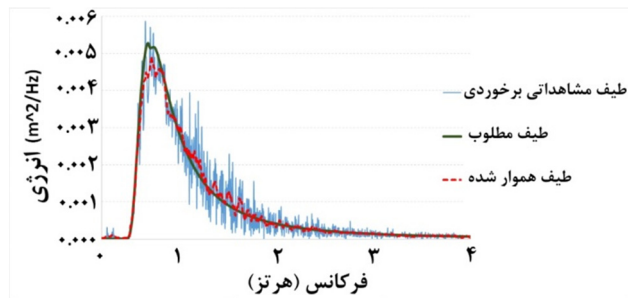
در این مطالعه اهداف زیر در ابعاد آزمایش‌های به عمل آمده دنبال می‌شوند: ۱- تخمین و برآورد بزرگی و اهمیت نسبی میزان انرژی منتقل شده به فرکانس‌های بالا و پایین؛ ۲- نقش و اثر مشخصات اصلی موج مانند ارتفاع، دوره‌ی تناوب (طول موج) و عمق آب در بزرگی نسبی انرژی منتقل شده در اثر شکست موج و ۳- تخمین میزان خطای مدل‌های طیفی موج (مانند SWAN) در برآورد میزان ارتفاع مشخصه‌ی امواج شکسته شده در اثر چشم‌پوشی از پدیده‌ی انتقال انرژی در اثر شکست موج.

² active wave absorber

³ depth attenuation correction

¹ triad

شده برای سامانه‌ی تولید موج و طیف موج تابشی اندازه‌گیری شده در فاصله‌ی ۱٫۵ متری از تخته‌ی موج و هموار^۱ شده با ۴۰ درجه آزادی، مربوط به یک موج با ارتفاع مشخصه ۱۲ در عمق ۸۵ سانتیمتری در شکل ۲ ارایه شده است.



شکل ۲: مقایسه‌ی بین طیف‌های مطلوب (خط پیوسته) و طیف برخوردی مشاهداتی (خط چین)

حداقل سرعت داده‌برداری بر اساس محدوده‌ی فرکانسی امواج مورد مطالعه تعیین می‌شود. به طور معمول فرکانس مطلوب داده‌برداری می‌بایست به نحوی باشد که در یک دوره‌ی تناوب، معادل با فرکانسی ۳ برابر فرکانس غالب، حداقل ۸ داده برداشت شود (Baldock and Huntley, 2002). بنابراین در مطالعه‌ی حاضر با در نظر گرفتن کوچک‌ترین دوره‌ی تناوب که برابر با ۱٫۴ ثانیه باشد حداقل سرعت داده‌برداری باید تقریباً ۱۷ Hz باشد. اما سامانه‌ی ثبت داده^۲ مورد استفاده دارای سرعت ثابت داده‌برداری ۵۰ Hz بوده که بیش از حداقل سرعت داده‌برداری مورد نیاز بوده است.

داده‌های نوسانات تراز سطح آب به مدت ۱۰ دقیقه به ثبت رسیده ولی تحلیل طیفی روی ۸ دقیقه‌ی میانی انجام شده است. بنابراین طیف اولیه بسیار پر نوسان^۳ با ۱۲۰۰۰ باند فرکانسی حاصل شده است. به منظور هموارسازی طیف‌ها به روش مشابه با مطالعات (van Noorloos (2003) و Daly (2009) از مقادیر انرژی ۲۵ فرکانس به مرکزیت هر فرکانس، متوسط‌گیری انجام شده و نتیجه به عنوان انرژی فرکانس مورد نظر ثبت می‌شود. با انجام این عمل روی ۴ موج دیگر با فاز تصادفی متفاوت و متوسط‌گیری بین ۵ طیف انرژی عملیات هموارسازی با ۲۵۰ درجه‌ی آزادی انجام شد.

شیب اجرا شده ۱:۱۶ بوده و در اثر آن ۴۵ سانتی‌متر از عمق آب کم شده است. در مطالعه‌ی حاضر شیب مورد نظر با استفاده از مصالح بنایی ایجاد شده که امکان وجود نوسان ناچیز و شیب عرضی روی سطح شیب‌دار را ممکن می‌سازد و در نتیجه می‌تواند باعث بروز خطای ناچیز در مشاهدات شود. امواج در سه عمق مختلف آب (dep_0) به ترتیب برابر با ۷۵، ۶۵ و ۸۵ سانتیمتر تولید شدند. در این مطالعه امواج طبیعی با دوره‌ی تناوب غالب منطقی بین ۷ تا ۱۲ ثانیه مد نظر قرار گرفتند. با در نظر گرفتن عدد ۲۵ به عنوان مقیاس متوسط طولی شبیه‌سازی فیزیکی، امواج شبیه‌سازی شده در هر عمق، دارای ۴ دوره‌ی تناوب غالب (۱٫۴، ۱٫۶، ۲٫۰ و ۲٫۴ ثانیه) و ۳ ارتفاع مشخصه‌ی اسمی (۱۲، ۱۵ و ۱۸ سانتیمتر) بودند. لذا بزرگی متغیر نظری $\sigma = \frac{Hm_0}{dep}$ با فرض نشکستن امواج در پایان شیب بین ۰٫۳ تا ۰٫۹ خواهد بود. پس انتظار می‌رود شکست‌های متوسط تا شدید امواج روی شیب مشاهده شود (Dally and Dean, 1987). امواج نامنظم بر اساس طیف JONSWAP و بر اساس ضرایب توصیه شده تولید شدند (Kahma and Calkoen, 1992) و با ۵ فاز تصادفی تکرار شدند. شماره‌ی مربوط به هر آزمایش در عمق اولیه $dep_0 = 65cm$ در جدول ۱ نشان داده شده است. برای آزمایش‌های به عمل آمده در اعماق ۷۵ و ۸۵ سانتیمتری برای ارتفاع موج مشخصه و دوره‌ی تناوب غالب مشابه با جدول ۱ به ترتیب اعداد ۱۲ و ۲۴ به کد آزمایش برای عمق ۶۵ سانتیمتری اضافه شدند (برای مثال کد ۱۸ مربوط به آزمایش با مشخصات $(Hm_0=15cm, Tp=1.6s, dep_0=75cm)$).

جدول ۱: کد هر موج با توجه به دوره‌ی تناوب غالب و ارتفاع مشخصه‌ی در عمق $dep_0 = 65cm$

دوره تناوب غالب (s)	ارتفاع مشخصه (cm)	۱٫۴	۱٫۶	۲٫۰	۲٫۴
۱۲	۱	۲	۳	۴	۴
۱۵	۵	۶	۷	۸	۸
۱۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۲

در جدول ۱ میزان ارتفاع امواج به صورت اسمی و بر اساس طیف مطلوب مورد هدف عنوان شده است. هر چند که سامانه تولید موج مورد استفاده، دوره‌ی تناوب موج مورد نظر را کاملاً دقیق تولید می‌نماید ولی ارتفاع و میزان انرژی موج تولید شده در نزدیکی تخته‌ی مولد موج با موج مطلوب هدف کمی اختلاف نسبی وجود دارد. به عنوان مثال مقایسه‌ی دو طیف مطلوب تعیین

¹ smooth
² logger
³ noisy

موج بر روی میزان افزایش نسبی انرژی فرکانس‌های بالا و پایین در اثر شکست تعیین خواهد شد. از آنجایی که سرعت داده- برداری بویه‌های امواج معمولاً ۲ Hz است (Cavaleri, 1980)، لذا حداکثر فرکانس طیف امواج حاصل از این بویه‌ها برابر با ۱ Hz است. با پذیرفتن حداکثر فرکانس ۱ Hz برای امواج مورد نظر در طبیعت و مقیاس طولی متوسط ۲۵ برای شبیه‌سازی فیزیکی دو بعدی و جذر آن برای مقیاس زمان، بررسی فرکانس‌ها تا سقف ۵ Hz ضروری خواهند بود.

۳. نتایج و بحث

به منظور دسته‌بندی و تفکیک مشاهدات به دست آمده، نتایج مطالعه در دو زیربخش مجزا ارائه شده است. ابتدا میزان کلی استهلاک نسبی امواج شبیه‌سازی شده و توزیع فرکانسی تغییرات انرژی در اثر شکست بررسی شده است. سپس دو متغیر نسبی افزایش انرژی فرکانس‌های بالا و پایین به نسبت انرژی مستهلاک شده و کل انرژی امواج، مقادیر بیشینه‌ی آن‌ها و همچنین اثر مشخصات امواج در بزرگی این متغیرها مورد بحث قرار گرفته است.

۳-۱ استهلاک نسبی مکانی^۱ و توزیع فرکانسی تغییرات انرژی

با توجه به اهداف مطالعه ابتدا باید از شرایط شکست در محدوده‌ی خیزاب بیرونی اطمینان حاصل نمود، یعنی به عبارتی با مقایسه‌ی طیف انرژی موج در دو ایستگاه ۱ و ۲ باید از ثابت باقی ماندن فرکانس غالب اطمینان پیدا کرد. برای این منظور به عنوان نمونه، مقایسه‌ی مذکور مربوط به آزمایش شماره‌ی ۴ در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است فرکانس غالب موج در هر دو ایستگاه یکسان و برابر با ۰٫۴۲ Hz است.

پس از اطمینان از شکست موج در محدوده‌ی خیزاب بیرونی، میزان نسبی استهلاک انرژی روی شیب عوامل مؤثر در میزان استهلاک نسبی انرژی امواج بررسی شده است. این متغیر بر اساس رابطه‌ی ۱ و ۲ برای تمامی امواج مورد مطالعه، محاسبه شده و نتیجه‌ی این بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است.

در این مطالعه فرض شده است که شکست موج ناشی از کاهش عمق تنها عامل استهلاک انرژی امواج روی سطح شیب دار است. به منظور مقایسه‌ی نوسانات انرژی روی شیب ضروری است تا چند متغیر مربوط به انرژی تعریف شوند. متغیر نخست مربوط به استهلاک انرژی روی شیب است که با E_{dis} نمایش داده می‌شود. این متغیر بر اساس رابطه‌ی ۱ و برای فرکانس‌هایی با مقادیر مثبت E_{dis} ، منظور و محاسبه می‌شود. در آن E_{1,f_i} میزان انرژی مؤلفه‌ی i ام در ایستگاه ۱ و E_{2,f_i} مقدار همین متغیر در ایستگاه ۲ و i شمارنده فرکانس‌های حاصل از تحلیل فوریه است.

$$E_{dis} = \sum_{i=1}^n (E_{1,f_i} - E_{2,f_i}), \quad \text{if } (E_{1,f_i} - E_{2,f_i}) > 0. \quad \text{رابطه ۱}$$

با تقسیم این متغیر به کل انرژی موج در ایستگاه ۱، درصد استهلاک انرژی روی شیب، طبق رابطه‌ی ۲ تعیین می‌شود.

$$P_{dis} = \frac{E_{dis}}{E_{1,total}} \times 100\% \quad \text{رابطه ۲}$$

برای بررسی تغییر فرکانسی انرژی، از متغیر بدون بعد تغییر نسبی مکانی انرژی فرکانسی δ استفاده می‌شود (رابطه‌ی ۳).

$$\delta_i = \frac{E_{2,f_i} - E_{1,f_i}}{E_{1,f_i}} \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

در نهایت به منظور تعیین نسبت رشد انرژی امواج فرکانس بالا و فرکانس پایین به کل انرژی مستهلاک شده، به ترتیب از متغیرهای ΔE_{Hi} و ΔE_{Lo} بر اساس رابطه‌های ۴ و ۵ استفاده شد. در این روابط انرژی فرکانس‌هایی منظور می‌شوند که از ایستگاه ۱ به ۲ افزایش انرژی داشته و به ترتیب بزرگ‌تر و کوچک‌تر از فرکانس غالب باشند.

$$\Delta E_{Hi} = \sum_{i=1}^n E_{2,f_i} - E_{1,f_i} / E_{dis} \times 100\%, \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\text{if } i > n(f_{peak}) \ \& \ E_{2,f_i} - E_{1,f_i} > 0$$

$$\Delta E_{Lo} = \sum_{i=1}^n E_{2,f_i} - E_{1,f_i} / E_{dis} \times 100\%, \quad \text{رابطه ۵}$$

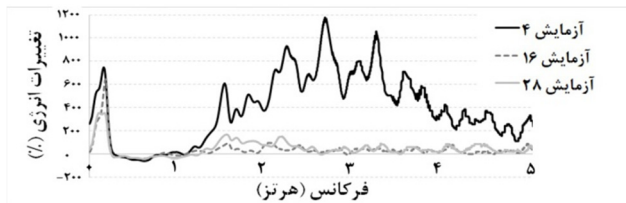
$$\text{if } i < n(f_{peak}) \ \& \ E_{2,f_i} - E_{1,f_i} > 0$$

که در آن n متناظر با شمارنده‌ی فرکانس غالب در تحلیل فوریه است. با بررسی همزمان این دو متغیر اثر مشخصات اولیه

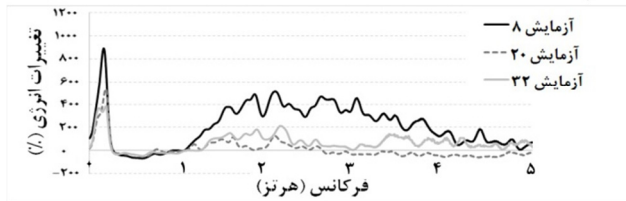
^۱ spatial

در ادامه تغییرات نسبی انرژی از ایستگاه ۱ به ۲ برای ۱۲ موج مورد نظر بر اساس رابطه‌ی ۳ بررسی شده است. بخشی از نتایج این بررسی در اشکال ۵ الف تا ۵ ج به طور خلاصه نشان داده شده است. همچنین بر اساس این اشکال می‌توان دریافت که برای امواج مشابه، بیشترین و کمترین رشد نسبی در فرکانس‌های پایین به ترتیب مربوط به اعماق ۶۵ و ۸۵ سانتیمتر است. همچنین بیشترین رشد نسبی فرکانس‌های بالا به ازای ارتفاع ثابت، متعلق به عمق ۶۵ با دوره‌ی تناوب ۲٫۴ ثانیه است. اثر تغییر عمق برای ارتفاع‌های ثابت ۱۲ و ۱۵ سانتیمتر و دوره‌ی تناوب ۲٫۴ ثانیه در شکل‌های ۵ الف و ب نشان داده شده است. همچنین اثر تغییر دوره‌ی تناوب با ارتفاع ثابت ۱۵ در عمق ۶۵ سانتیمتری در شکل ۵ ج ارائه شده است. بنابراین برای امواج با ارتفاع مشخصه و فرکانس غالب مشابه هر چه عمق کمتر باشد (هر چه $\left(\frac{H_{m0}}{dep0}\right)$ بزرگ‌تر باشد)، میزان رشد نسبی فرکانس‌های پایین بیشتر است. همچنین نتیجه‌ی مشابه برای فرکانس‌های بالا در کاهش عمق از ۷۵ به ۶۵ مشهود است.

الف



ب



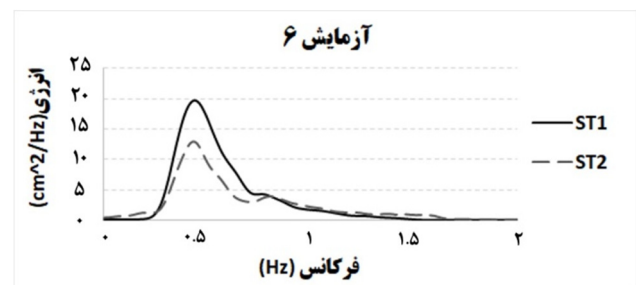
ج



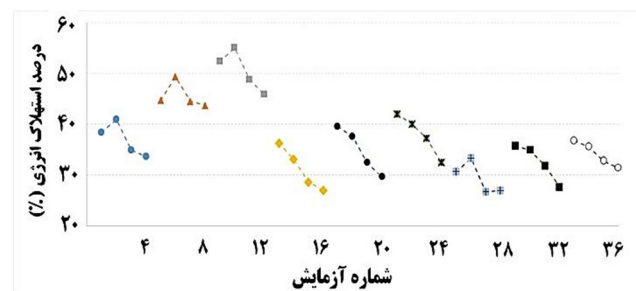
شکل ۵: الف) اثر عمق روی شدت افزایش نسبی انرژی فرکانس‌های بالا و پایین برای ارتفاع ثابت ۱۲ سانتیمتر و دوره‌ی تناوب ۲٫۴ ثانیه؛ ب) اثر عمق روی شدت افزایش نسبی انرژی فرکانس‌های بالا و پایین برای ارتفاع ثابت ۱۵ سانتیمتر و دوره‌ی تناوب ۲٫۴ ثانیه؛ ج) اثر دوره‌ی تناوب روی شدت افزایش نسبی انرژی فرکانس‌های بالا و پایین برای ارتفاع ثابت ۱۵ سانتیمتر و عمق ۶۵ سانتیمتر

میزان Pdis برای هر گروه از امواج در عمق ثابت و ارتفاع مشخصه برابر با یک نشانه و خطوط چین نشان داده شده است. مقدار این متغیر برای عمق ۶۵ سانتیمتری بیش از دو عمق دیگر است، اما رفتار تغییرات این متغیر در اعماق مختلف برای دوره‌ی تناوب غالب و ارتفاع‌های مختلف، متفاوت است. برای مثال در عمق ثابت ۶۵ سانتیمتری به ازای ارتفاع موج مشخصه ثابت، مقادیر بیشینه‌ی این متغیر برای دوره‌ی تناوب ۱٫۶ ثانیه مشاهده شده و برای امواج با دوره‌ی تناوب و عمق مشابه، مقادیر بیشینه متعلق به امواج مرتفع‌تر است (روند افزایشی از هر گروه چهارتایی به گروه بعدی در هر عمق ثابت). برای عمق ۷۵ سانتیمتر هم برای امواج با دوره‌ی تناوب ثابت، بیشترین مقادیر نسبی انرژی مستهلک شده مربوط به امواج مرتفع‌تر است، اما برای امواج با ارتفاع مشخصه ثابت بیشترین استهلاک نسبی مربوط به دوره‌ی تناوب غالب ۱٫۴ ثانیه و به عبارتی موج تیزتر است. برای عمق ۸۵ سانتیمتر هم با یک تفاوت جزئی شرایط مشابه عمق ۷۵ سانتیمتری است. در مجموع می‌توان گفت که مقادیر بیشینه‌ی این متغیر در اعماق و دوره‌ی تناوب غالب ثابت برای امواج مرتفع‌تر و تا حدودی تیزتر مشاهده شده است.

آزمایش ۶



شکل ۳: تغییرات فرکانسی توزیع انرژی از ایستگاه ۱ به ۲ در اثر شکست در آزمایش شماره ۴

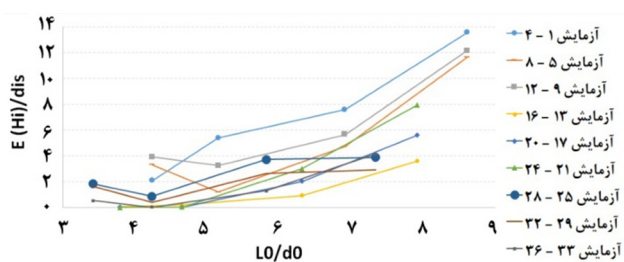


شکل ۴: استهلاک نسبی انرژی امواج مورد مطالعه، هر گروه چهارتایی از امواج با ارتفاع مشخصه و عمق ثابت با خطوط شکسته به یکدیگر متصل شده‌اند

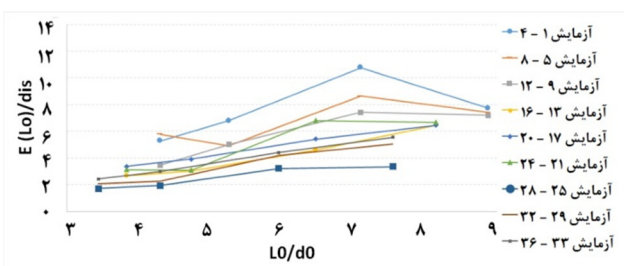
۳-۲ نسبت افزایش انرژی فرکانس‌های بالا و پایین به استهلاك ناشی از شکست

انرژی را در نواحی کم عمق ساحلی (مناطق که شکست موج غالب است) دقیق پیش‌بینی نمی‌کنند، بلکه ارتفاع موج مشخصه را نیز کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی خواهند کرد.

اما آنچه که به نظر می‌رسد بیش از متغیر $\left(\frac{H_{m0}}{dep0}\right)$ در انتقال بخشی از انرژی مستهلك شده به فرکانس‌های بالا و پایین تأثیر داشته باشد، نسبت بزرگی طول موج به عمق اولیه $\left(\frac{L_0}{dep0}\right)$ است. در این بررسی‌ها طول موج اولیه در آزمایش‌ها بر اساس رابطه‌ی پراکنش خطی محاسبه شده است. در شکل‌های ۷ و ۸ اثر طول موج به عمق روی متغیرهای ΔE_{Lo} و ΔE_{Hi} نشان داده شده است. بنابراین نتایج می‌توان مشاهده کرد که برای امواج با ارتفاع و عمق مشابه (هر خط پیوسته)، هر چه متغیر $\left(\frac{L_0}{dep0}\right)$ بزرگ‌تر باشد، انتظار می‌رود که مقدار ΔE_{Hi} بیشتر باشد، اما این روند برای ΔE_{Lo} کمی متفاوت است.



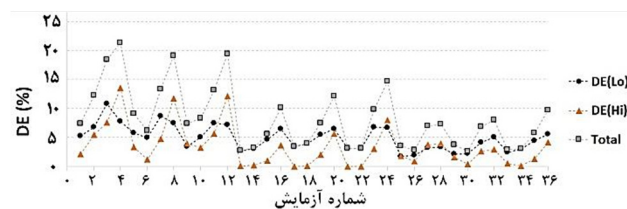
شکل ۷: تغییرات نسبت افزایش انرژی فرکانس‌های بالا به انرژی مستهلك شده در حین شکست موج در برابر متغیر $\left(\frac{L_0}{dep0}\right)$



شکل ۸: تغییرات نسبت افزایش انرژی فرکانس‌های پایین به انرژی مستهلك شده در حین شکست موج در برابر متغیر $\left(\frac{L_0}{dep0}\right)$

به دلیل تراکم بالای داده‌ها روی این دو شکل، نمودار با خطوط شکسته و به صورت پیوسته نشان داده شده است، هر چند که به لحاظ ریاضی و فیزیکی پیوستگی نمودارها بی‌معنی هستند. لحاظ نمودن همزمان اثر متغیرهای $\left(\frac{H_{m0}}{dep0}\right)$ و $\left(\frac{L_0}{dep0}\right)$ ، دلالت بر مفهوم عدد بدون بعد $Ursell = \frac{H_0 L_0^2}{d_0^3}$ است. برای این منظور تغییرات نسبت انرژی‌های منتقل شده به فرکانس‌های بالا و پایین به میزان

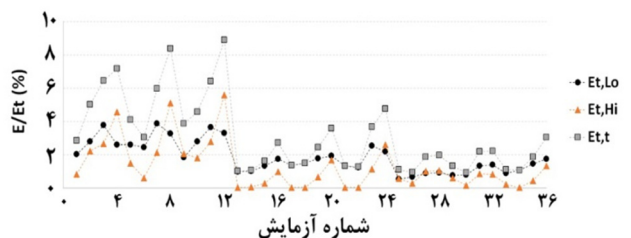
با نرمال کردن میزان افزایش انرژی فرکانس‌های بالا و پایین به میزان انرژی مستهلك شده، با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۵ میزان تغییرات دو متغیر ΔE_{Lo} و ΔE_{Hi} مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. این دو متغیر از این نظر قابل توجه هستند که بخشی از انرژی که در اثر شکست موج از فرکانس عمدتاً غالب مستهلك می‌شود، دوباره به محتوای انرژی موج بازمی‌گردد (Masselink, 1998). در شکل ۶ نتیجه‌ی این بررسی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود دامنه‌ی تغییرات افزایش نسبی انرژی فرکانس‌های بالا به میزان انرژی مستهلك شده بیش از متغیر مشابه برای فرکانس‌های پایین است. این مقدار برای فرکانس‌های بالا از حدود ۰ تا ۱۴ درصد متغیر است، در حالی که مقدار متغیر مشابه برای فرکانس‌های پایین از حدود ۲ تا ۱۱ درصد تغییر کرده است. با مقایسه‌ی گروه‌های چهارتایی که در آن‌ها ارتفاع موج ثابت و برابر بوده و فقط عمق آب تغییر کرده است، می‌توان دریافت که با افزایش عمق و یا به عبارتی با کاهش $\left(\frac{H_{m0}}{dep0}\right)$ ، مقادیر ΔE_{Lo} و ΔE_{Hi} کاهش یافته است (روند کلی کاهش دو متغیر مذکور در گروه‌های چهارتایی از سمت چپ نمودار به سمت راست مشهود است). از سوی دیگر با انجام این بررسی مشخص می‌شود که اهمیت افزایش و تقویت انرژی فرکانس‌های بالا اگر از فرکانس‌های پایین بیشتر نباشد، کمتر نیست. نکته‌ی قابل توجه دیگر این است که در این آزمایش‌ها حداکثر حدود ۲۲٪ از کل انرژی مستهلك شده به محتوای انرژی موج در اثر شکست موج بازگشته است (شکل ۶).



شکل ۶: درصد انرژی مستهلك شده و بازگشته به فرکانس‌های بالا، پایین و مجموع آن‌ها

این نکته اهمیت عدم توانایی مدل‌های متوسط طیفی در شبیه‌سازی این دو نوع انتقال انرژی را بیش از پیش نمایان می‌کند. چرا که قطعاً این گونه مدل‌ها علاوه بر آنکه شکل طیف توزیع

انرژی موج شکسته شده که توسط مدل‌های طیفی پیش بینی می‌شود، ۱۴٪ کمتر از مقدار واقعی و در نتیجه ارتفاع مشخصه موج شکسته شده حدود ۸٪ کمتر از ارتفاع واقعی است. از سوی دیگر با در نظر گرفتن دوره‌ی تناوب و ارتفاع موج ثابت، بیشترین نسبت انرژی منتقل شده به کل انرژی اولیه برای امواج تولیدی در عمق ۶۵ سانتیمتری بوده که مقدار $\left(\frac{H_{m0}}{dep}\right)$ بزرگ‌تری داشته‌اند. از نتایج ارائه شده به نظر می‌رسد که کل انرژی منتقل شده در اثر شکست با انرژی منتقل شده به فرکانس‌های بالا دارای هم‌نوایی بیشتر است، به طوری که ضریب همبستگی بین تقویت انرژی فرکانس‌های بالا و کل انرژی منتقل شده برابر با ۰٫۹۶ و همین متغیر برای افزایش انرژی فرکانس‌های پایین برابر با ۰٫۹۰ است.



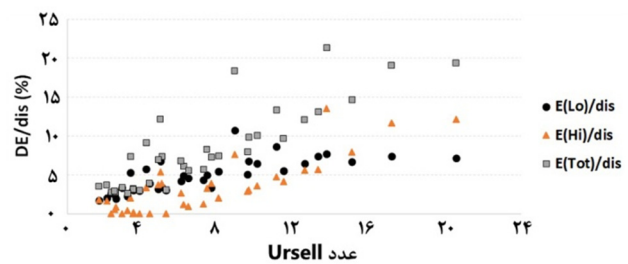
شکل ۱۰: نسبت انرژی‌های منتقل شده به فرکانس‌های بالا، پایین و مجموع آن به کل انرژی امواج در هنگام تولید

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، اهمیت و میزان افزایش انرژی فرکانس‌های بالا (امواج کوتاه) و پایین (امواج بلند) در اثر شکست امواج مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. اهمیت پدیده‌ی مورد نظر زمانی بیشتر مشخص می‌شود که بدانیم در مدل‌های طیفی موج هیچ جمله‌ی چشمه‌ای برای این پدیده وجود ندارد و از آن به کلی صرف نظر می‌شود. بدین منظور مجموعاً ۱۸۰ موج نامنظم منطبق بر طیف JONSWAP در ۳ عمق، با ۴ دوره‌ی تناوب و ۳ ارتفاع مشخصه و ۵ فاز تصادفی تولید شد. نوسانات تراز آب در ابتدا و انتهای یک شیب ثابت (۱:۱۶) اندازه‌گیری گردید.

بر اساس مشاهدات اولیه‌ی این مطالعه می‌توان گفت که هر چه نسبت ارتفاع موج مشخصه به عمق اولیه بزرگ‌تر باشد، انتظار می‌رود به طور کلی میزان رشد نسبی فرکانس‌های بالا و پایین بیشتر باشد. همچنین این متغیر تأثیر مستقیمی روی استهلاك نسبی انرژی امواج دارد، به طوری که مقادیر بیشینه‌ی استهلاك

انرژی مستهلك شده در برابر اعداد *Ursell* (مربوط به موج تولید شده در عمق اولیه) در آزمایش‌ها بررسی شده و نتیجه‌ی آن در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل می‌توان مشاهده نمود با افزایش عدد *Ursell* به طور کلی انتظار می‌رود در اثر شکست موج احتمال انتقال نسبی انرژی به فرکانس‌های بالا، پایین و در مجموع افزایش پیدا کند.



شکل ۹: تغییرات نسبت افزایش انرژی فرکانس‌های بالا، پایین و مجموع به انرژی مستهلك شده در اثر شکست در برابر عدد *Ursell*

همچنین با بررسی همزمان تغییرات ۳ متغیر ΔE_{Hi} ، P_{dis} و ΔE_{Lo} برای ۳۶ موج آزمایش شده در شکل‌های ۴ و ۶، می‌توان دریافت که برای هر گروه از امواج با ارتفاع و عمق آب برابر، بیشترین درصد کل انرژی مستهلك و منتقل شده به فرکانس‌های بالا مربوط به امواجی است که کمترین درصد استهلاك را داشته است. به عبارت دیگر هر گاه شکست موج ملایم‌تر بوده، درصد بیشتری از انرژی مستهلك شده به فرکانس‌های بالاتر منتقل شده است. البته شرایط برای فرکانس‌های پایین تا حدود بسیار زیادی شبیه به فرکانس‌های بالا بوده اما کاملاً یکسان نیست. ملایم بودن شکست موج برای امواج با ارتفاع و عمق برابر دلالت بر تیزی کم‌تر موج و یا همان بلندتر بودن طول موج دارد.

در کنار بررسی‌های فوق، نسبت انرژی انتقال یافته به فرکانس‌های بالا، پایین و مجموع آن‌ها به کل محتوای انرژی امواج نیز مورد مطالعه قرار گرفته که نتیجه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. دو متغیر اول با ضرب کردن مقادیر ΔE_{Hi} و ΔE_{Lo} در میزان نسبی انرژی مستهلك شده به دست آمده و حاصل جمع آن‌ها برابر با متغیر سوم است $(E_{t,t} = E_{t,Hi} + E_{t,Lo})$. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، در مطالعه‌ی حاضر بیشترین نسبت انرژی منتقل شده به کل محتوای انرژی موج اولیه مربوط به موج شماره‌ی ۱۲ با مشخصات $H_{m0}=18\text{cm}$ ، $(T_p=2.4\text{s}$ ، $dep_0=65\text{cm})$ و به میزان ۹٪ کل انرژی موج اولیه در زمان تولید بوده است. در این حالت،

1853-1876.

Baldock, T.; Holmes, P.; Bunker, S.; Van Weert, P., 1998. Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surf zone. *Coastal Engineering*, 34(3): 173-196.

Baldock, T.; Huntley, D., 2002. Long-wave forcing by the breaking of random gravity waves on a beach. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 458: 2177-2201.

Boers, M., 1997. Simulation of a surf zone with a barred beach; part 1: Wave heights and wave breaking. *Oceanographic Literature Review*, 4(44): 292.

Cavaleri, L., 1980. Wave measurement using pressure transducer. *Oceanologica Acta*, 3(3): 339-346.

Dally, W.R.; Dean, R.G., 1987. Transformation of random breaking waves on surf beat. *Proceedings of the 20th International Conference on Coastal Engineering*. Nov. 9-14, 1986. Taipei, Taiwan, 109-123pp.

Daly, C., 2009. Low frequency waves in the shoaling and nearshore zone. Master's thesis, Faculty of Civil Engineering and Geoscience. Delft University of Technology, Netherlands. 116P.

De Bakker, A.; Tissier, M.; Ruessink, B., 2016. Beach steepness effects on nonlinear infragravity wave interactions: A numerical study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(1): 554-570.

Diaz-Hernandez, G.; Mendez, F.J.; Losada, I.J.; Camus, P.; Medina, R., 2015. A nearshore long-term infragravity wave analysis for open harbours. *Coastal Engineering*, 97: 78-90.

Dong, G.; Ma, X.; Perlin, M.; Ma, Y.; Yu, B.; Wang, G., 2009. Experimental study of long wave generation on sloping bottoms. *Coastal Engineering*, 56: 82-89.

Kahma, K.K.; Calkoen, C.J., 1992. Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves. *Journal of Physical Oceanography*, 22(12): 1389-1405.

نسبی در اعماق و دوره‌ی تناوب غالب ثابت برای امواج مرتفع‌تر مشاهده گردید. با نرمال کردن میزان افزایش انرژی فرکانس‌های بالا و پایین به میزان انرژی مستهلک شده، تغییرات این دو متغیر را نسبت به مشخصات مختلف موج مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس به طور کلی می‌توان مشاهده کرد که اهمیت و میزان افزایش نسبی انرژی فرکانس‌های بالا از متغیر مشابه برای فرکانس پایین کمی بیشتر بوده و در مجموع حداکثر حدود ۲۲٪ از کل انرژی مستهلک شده که معادل ۹٪ از انرژی اولیه موج در هنگام تولید بوده، به محتوای کل انرژی بازگشته است. در این حالت چشم‌پوشی مدل عددی SWAN از این پدیده باعث کاهش ارتفاع مشخصه‌ی پیش‌بینی شده برای موج شکسته شده به میزان تقریبی ۸٪ خواهد شد.

در بین امواج با ارتفاع موج مشخصه و عمق آب ثابت، بیشترین مقادیر انرژی منتقل شده به فرکانس‌های بالا مربوط به امواج با طول موج بیشتر بود. در مقایسه با متغیر $\left(\frac{H_{m0}}{d_0}\right)$ ، می‌توان دریافت که متغیر $\left(\frac{L_0}{d_0}\right)$ تأثیر بیشتری در انرژی به فرکانس‌های بالا و پایین دارد. با لحاظ نمودن اثر همزمان این دو متغیر عدد *Ursell* حاصل شده و بر اساس مشاهدات حاصل شده می‌توان گفت که به طور کلی با افزایش عدد *Ursell*، میزان انرژی منتقل شده افزایش خواهد یافت.

۵. سپاسگزاری

نگارنده بر خود لازم می‌داند از پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی بابت حمایت از مطالعه‌ی حاضر در قالب طرح ۰۲-۰۳۸-۰۱-۰۲۱-۳۹۶ تشکر و قدردانی نماید.

منابع

عسگری، ح.؛ شانه‌ساززاده، ه.؛ اکبری، غ.؛ اردلان، ح.، ۱۳۹۴. تعیین مشخصات موج مبتنی بر تحلیل داده‌های میدانی: مطالعه موردی بندر جاسک. نشریه اقیانوس‌شناسی، سال ششم، شماره ۲۴، صفحات ۱-۱۱.

Baldock, T., 2006. Long wave generation by the shoaling and breaking of transient wave groups on a beach. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 462:

2014. Globex: Wave dynamics on a shallow sloping beach. HYDRALAB IV Joint User Meeting. Jul., 2014. Lisbon, Portugal, 1-12 pp.
- Ruessink, B., 1998. Bound and free infragravity waves in the nearshore zone under breaking and nonbreaking conditions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C6): 12795-12805.
- US Army, 2006. Coastal engineering manual. Engineer Manual 1110-2-1100. US Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- van Noorloos, J., 2003. Energy transfer between short wave groups and bound long waves on a plane slope. Master's thesis, Faculty of Civil Engineering and Geoscience. Delft University of Technology, Netherlands, 68p.
- Yu, J.; Mei, C.C., 2000. Formation of sand bars under surface waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 416: 315-348.
- Lin, Y.H.; Hwung, H.H., 2012. Infra-gravity wave generation by the shoaling wave groups over beaches. *China Ocean Engineering*, 26(1): 1-18.
- Mahmoudof, S.M.; Badiei, P.; Siadatmousavi, S.M.; Chegini, V., 2018. Spectral wave modeling in very shallow water at southern coast of Caspian sea. *Journal of Marine Science and Application*, 17(1): 140-151.
- Mansard, E.P.; Funke, E., 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proceedings of the 17th International Conference on Coastal engineering*. Mar. 23-28, 1980. Sydney, Australia, 154-172 pp.
- Masselink, G., 1998. Field investigation of wave propagation over a bar and the consequent generation of secondary waves. *Coastal Engineering*, 33(1): 1-9.
- Michallet, H.; Ruessink, B.; Lima, M.V.; Rocha, R.; De Bakker, A.; Van Der, A.D.; Rujju, A.; Silva, P.A.; Sénéchal, N.; Marieu, V.; Tissier, M.; Almar, R.; Abreu, T.; Birrien, F.; Vignal, L.; Barthélemy, E.,