



بررسی تحلیلی مدل‌های موجود جهت مدلسازی روگذری موج در سازه های ساحلی

علی فرهادزاده، دانشجوی دکتری مهندسی عمران، سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس

مهدی شفیعی فر، استادیار گروه عمران، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

پدیده روگذری امواج (Wave overtopping) از سازه های ساحلی و موجشکن ها همواره به عنوان مسئله ای که در طراحی تراز این سازه ها بای د مد نظر قرار گیرد مطرح بوده است. بدلیل وابستگی میزان روگذری به پارامترهای مختلف و وجود عدم قطعیت هایی در ماهیت پدیده، تخمین دقیق این پارامتر در هنگام طراحی میسر نیست. با این وجود تلاشهای زیادی در جهت مدلسازی پدیده و تخمین دقیقتر آن انجام شده است. این تحقیقات عمدتاً به دو دسته مدلسازی آزمایشگاهی و مدلسازی عددی قابل دسته بندی است.

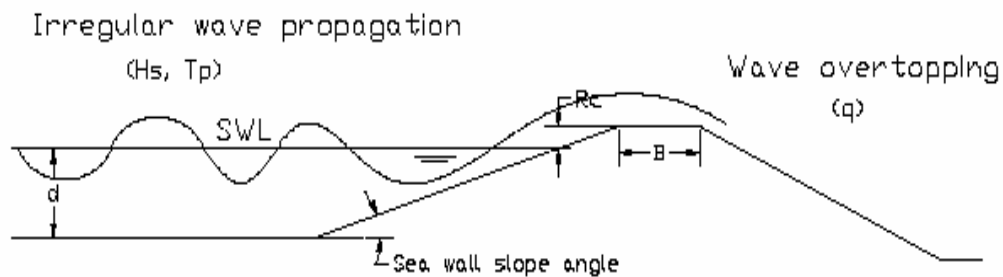
در این مقاله بصورت تحلیلی مروری بر مطالعات و تحقیقات عددی انجام شده بر روی پدیده روگذری طی سالهای اخیر ارایه شده و پیشرفت های انجام شده در این زمینه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: موج، روگذری، سازه های ساحلی، VOF، BEM

۱- مقدمه

روگذری امواج از سازه های ساحلی یکی از مهمترین واکنشهای هیدرولیکی است که در طراحی این نوع سازه ها در نظر گرفته می شود. پدیده روگذری امواج بویژه در خصوص سازه های حفاظت از شهرها و تأسیسات، نظیر دیوارهای ساحلی و دایک ها اهمیت می یابد، چرا که روگذری از این سازه ها می تواند به تخریب سازه و وارد آمدن تلفات و یا خسارات مالی بیانجامد. همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده

است فرایند روگذری موج (Wave Overtopping) عبارت از برخورد موج به سازه، بالا روی و نهایتاً سرریز جریان آب از سازه می باشد. این پدیده عامل بسیاری از تخریبها در سازه های ساحلی و سازه های موجود در پسرکرانه آنها، در گذشته و حال بوده است. بدلیل وجود عدم قطعیت در پیش بینی تراز طراحی آب و همچنین در تعیین امواج طراحی از یک سو و از سوی دیگر به لحاظ هزینه اقتصادی احداث سازه های بلند، قبول وقوع در صدی روگذری غیر قابل اجتناب است.



شکل ۱- دیاگرام فرآیند برخورد موج به سازه و روگذری از آن

تحقیقات فراوانی در خصوص پدیده روگذری امواج از سازه های ساحلی در ۵۰ سال اخیر انجام شده است. این مطالعات منجر به تصحیح مداوم در روشهای پیش بینی روگذری از سازه های محافظت از ساحل در مقابل امواج دریا گردیده است. روشهای موجود عمدتاً به دو دسته روشهای عددی و روشهای آزمایشگاهی تقسیم میگردند. در سالهای اخیر از روشهای آزمایشگاهی علیرغم قرابت بیشتر با طبیعت پدیده، بدلیل هزینه بالای تجهیز آزمایشگاه و نیز دشواری ایجاد شرایطی مشابه آنچه در طبیعت بوقوع می پیوندد کمتر استفاده گردیده است. حال آنکه روشهای عددی علیرغم پیچیدگی های آنها، بدلیل آنکه شرایط مختلف موج و اشکال مختلف سازه در آن با تغییرات اندک در برنامه قابل بررسی است مورد اقبال عمومی محققین قرار گرفته اند.

در ادامه پس از بررسی مطالعات صورت گرفته و دانش موجود در زمینه پدیده روگذری امواج از سازه های ساحلی با نگاهی تحلیلی به نقاط ضعف و قوت مدل‌های موجود عددی مدلسازی شکست و روگذری موج از سازه های ساحلی پرداخته شده و سعی شده بر روی مطالعاتی که جزئیات دقیق تری از پدیده را در نظر میگیرند تمرکز گردد.



۲- مدل‌های عددی روگذری موج ناشکنا

در دو دهه اخیر، تلاشهایی بمنظور ایجاد مدل عددی روگذری موج صورت گرفته است. مدل‌های اولیه عموماً به مدل‌سازی پدیده روگذری بدون در نظر گرفتن شکست موج می پرداختند. نخستین تلاشهای جدی در این زمینه در سال ۱۹۸۹ و توسط Kobayashi و Wurjanto صورت گرفته که به مدل‌سازی عددی روگذری موج منظم از سازه ساحلی نفوذناپذیر واقع بر روی ساحل شیبدار پرداختند. مدل عددی آنها قادر به پیش‌بینی جزئیات هیدرودینامیکی مربوط به روگذری موج از بالای تاج یک دیوار ساحلی نفوذناپذیر و صاف که بر روی ساحلی شیبدار قرار گرفته، بوده است. [۳۷]

در سال ۱۹۹۸ Hiraishi و Maruyama، یک مدل عددی را بمنظور محاسبه دبی روگذری امواج چند جهته از یک موج‌شکن قائم ارائه نمودند. فرض اساسی آنها در این مدل این است که دبی روگذری می‌تواند توسط یک رابطه سرریز توصیف شود. [۱۵]

Hu و همکاران (۲۰۰۰)، یک مدل دوبعدی عددی را برای محاسبه روگذری، با استفاده از معادلات غیرخطی آب کم عمق ارائه نمودند. اما حتی این مطالعه که اخیراً انجام شده نیز تنها برای امواج منظم معتبر است. [۷]

بنظر می‌رسد که حتی با قدرت محاسباتی که امروز موجود است، مدل‌سازی عددی فرایند روگذری موج هنوز کار سخت و طاقت فرسایی است. اما، بمجرد اینکه قدرت محاسباتی کامپیوترها باندازه کافی زیاد شود، روش‌هایی نظیر آنچه که در بالا بدانها اشاره شده و همچنین دیگر روش‌ها- بعنوان مثال روش‌های مبتنی بر حجم سیال (VOF) احتمالاً قادر خواهند بود تا دبی روگذری را برای امواج نامنظم و سه‌بعدی پیش‌بینی نمایند. این امر موجب خواهد شد که مطالعه فرآیند روگذری با جزئیات بیشتری از آنچه که در آزمایشات مدل فیزیکی امکان‌پذیر است، انجام گیرد و در نتیجه، طراحی سازه‌هایی که بهتر از سازه‌های امروزی، اهداف مورد نظر را تأمین نمایند، آسان‌تر خواهد گردید.

روشهای اشاره شده در فوق جهت محاسبه روگذری در امواج ناشکنا بوده است اما از آنجاییکه امواج در نواحی ساحلی عموماً "دچار شکست می‌گردند و در صورت عدم شکست تا نزدیکی موجشکن، امواج پس از



برای مسائلی که در آنها مرزهای آزاد دستخوش تغییر شکل‌های عمده‌ای می‌گردد، استفاده از روش‌های لاگرانژی مشکل است (Nichols و همکاران، ۱۹۸۰)، در اینگونه مسائل، برنامه‌هایی نظیر SOLA-VOF که در ادامه به آن خواهیم پرداخت، معادلات اویلری آب را برای مسائل دینامیک سیالات با در نظر گرفتن مرزهای آزاد حل می‌کند. [۴۵]

نخستین روش که با موفقیت به مسائلی که در آنها سیال دارای حرکات پیچیده سطح آزاد می‌باشند می‌پردازد، روش سلول و علامتگذار (MAC) می‌باشد (Welch و Harlow، ۱۹۶۵). [۵۲]

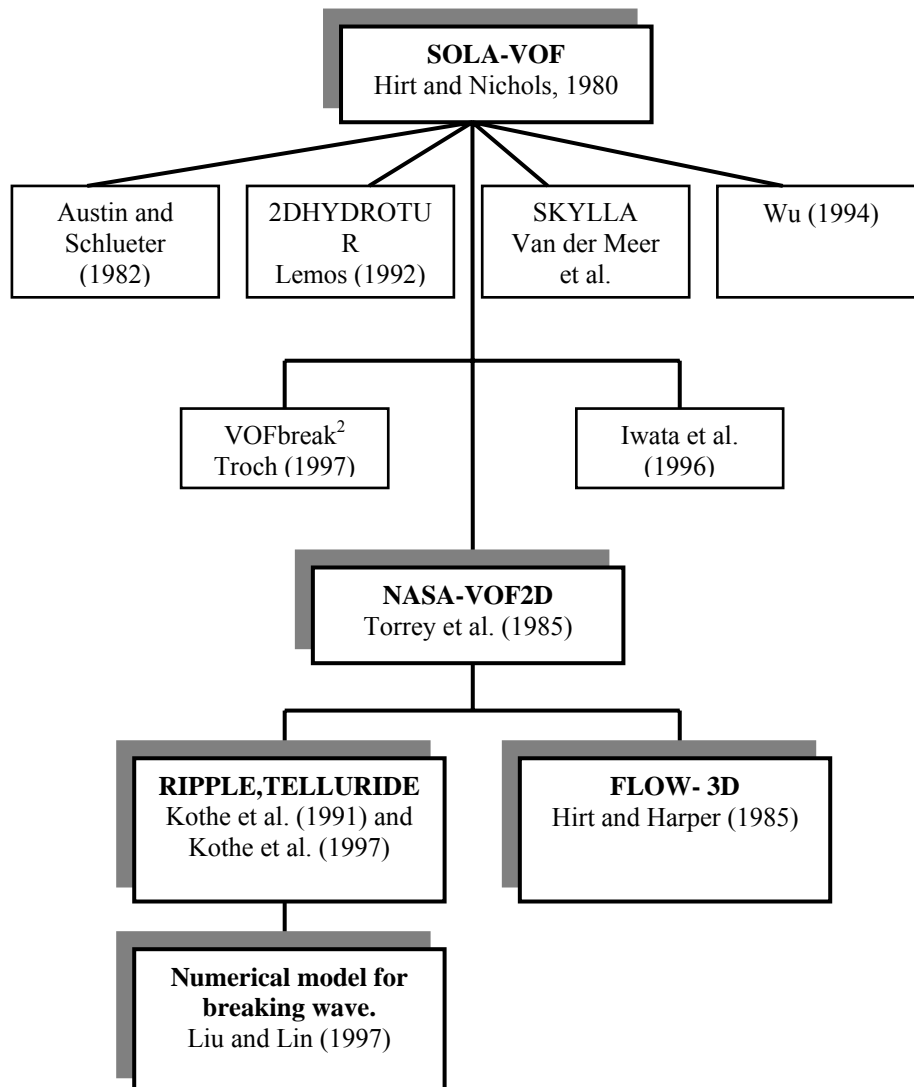
گونه ساده شده‌ای از الگوریتم حل پایه (SOLA) که در روش MAC استفاده شده در کد موسوم به SOLA موجود است. اگرچه SOLA به سطوح آزاد نمی‌پردازد، اما گونه‌ای توسعه یافته از SOLA-SURF، از روش تابع ارتفاع سطح استفاده می‌کند. سادگی و انعطاف‌پذیری کدهای SOLA آنها را به پایه‌ای برای توسعه کدهای پیچیده‌تر تبدیل کرده است، بدین علت، گونه‌ای از کد SOLA با مشخص متغیر، بنام SOLA-VM، بعنوان یک برنامه پایه‌ای که از تکنیک VOF بهره می‌جوید برگزیده شده است. گونه آزمایشگاهی این کد جدید، SOLA-VOF، نخستین بار توسط Hirt و Nichols در سال ۱۹۷۵ گزارش گردید، از آن زمان اصلاحات فراوانی انجام شد و این تکنیک با استفاده از کاربرد آن در حل بسیاری از مسائل، بطور نسبتاً کامل توسعه یافت. بعنوان مثال Mc Master و Gong (۱۹۷۹) و Mc Master و همکاران (۱۹۸۰)، کد SOLA-SURF را با تکنیک متفاوتی مبتنی بر مفهومی مشابه با VOF، برای رهگیری سطح مشترک با هم تلفیق نموده و بکار گرفتند. Nichols و همکاران (۱۹۸۰) نیز گونه‌ای به روز شده‌ای از SOLA-VOF را ارائه نمودند. شکل (۲-۵) درخت خانواده مدل‌های عددی مبتنی بر VOF را نشان می‌دهد. [۴۷ و ۴۴ و ۵۱]

یکی از کدهای معروف، کد NASA-VOF2D (Torrey و همکاران ۱۹۸۵) می‌باشد که اصلاحات زیادی در آن صورت گرفته است، این کد و نیز کد SOLA-VOF در آزمایشگاه ملی Los Alamos (LANL)، در نیومکزیکو آمریکا توسعه یافته است. پس از آن Hirt و Harper (۱۹۸۵) با توسعه این مدل VOF، کد CFD تجاری بنام FLOW-3D را ایجاد نمودند، این مدل بعنوان یکی از آخرین پیشرفت‌های کد CFD با کاربری عمومی محسوب می‌گردد. [۳۹ و ۴۰]

از دیگر کدهای موفق که در LANL توسعه یافته، کد RIPPLE (Kothe و همکاران، ۱۹۹۱) برای شبیه‌سازی دوبعدی و کد TELLURIDE (Kothe و همکاران، ۱۹۹۷) برای شبیه‌سازی سه‌بعدی می‌باشد.



در مدل عددی RIPPLE و TELLURID جریان، تراکم ناپذیر فرض میشود و معادله فشار با تکنیک گرادیان مزدوج ناکامل چولسکی حل می شود. [۲۰ و ۳۴]



شکل ۲- مروری بر پیشرفت‌های کلیدی مدل‌های عددی از نوع VOF

Austin و Schlueter (۱۹۸۲)، اولین کاربرد مدل SOLA-VOF را در حیطه مهندسی سواحل ارائه نمودند. این مدل، میدان جریان را در لایه متخلخل آرمور یک موجشکن متشکل از سیستم بلوک مستطیلی (Antifer) پیش‌بینی می نماید. این مدل شروعی بر شبیه‌سازی انتشار امواج و اندرکنش آنها با سازه‌ها در مهندسی سواحل هرچند به شکل نسبتاً خام محسوب می شود. [۴۲]



در سال ۱۹۹۲، Lemos مدل آشفتگی $k-\epsilon$ را در کدی با عنوان 2DHYDROTUR که مبتنی بر SOLA-VOF بوده وارد نمود، این کد قادر بود تا بصورت محدودی میدان آشفتگی را در نظر گیرد. او در سال ۱۹۹۲ یک طرح اختلاف محدود مرتبه بالا را در کد مبتنی بر VOF بمنظور بهبود پایداری و دقت حل عددی بکار برد. این طرح بهبود یافته قادر به شبیه‌سازی ضربه موج بر روی سازه‌ها و محاسبات نیروهای ضربه موج بوده است. باید اشاره نمود که در این مدل هیچ مرز جذبی یا مرز دریای آزاد در این مدل استفاده نگردید. [۳۳]

مدل (Van der meer) SKYLLA و همکاران، (۱۹۹۲) در Delft-Hydraulics توسعه یافت. این مدل چندین بار توسعه یافت که مهمترین آنها در نظر گرفتن حل کننده (Solver) شیب مزدوج برای معادله پواسون فشار است (Van der meer و همکاران، ۱۹۹۲). [۳۲]

Wu (۱۹۹۴)، یک مدل مبتنی بر مدل SOLA-VOF را برای شبیه‌سازی سینماتیک امواج در شکنا و نشکسته درون و بر روی سازه‌های قائم نفوذناپذیر با هندسه مختلف بکار بردند. وی فشار کامل ضربه و بارگذاری ناشی از آنرا بدون در نظر گرفتن پدیده بدام افتادن هوا در سیال شبیه‌سازی نمود. در مدل Wu، شرایط مرزی انعکاس مشابه با مدل SKYLLA بکار برده شد. [۲۹]

Iwata و همکاران (۱۹۹۶)، از نتایج یک مدل بهبود یافته SOLA-VOF که قادر به محاسبه تغییر شکل موج در حین شکست و پس از شکست در اثر سازه‌های نفوذناپذیر مستغرق بوده، جهت مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی استفاده نمود. در این مدل، امواج درونی با استفاده از تکنیک تولید چشمه در دامنه محاسباتی تولید شدند (Brorsen و Larsen ۱۹۸۷) همچنین جذب با استفاده از شرایط مرزی تشعشعی Sommerfeld انجام شد. [۲۶ و ۳۸]

Troch (۱۹۹۷)، مدل عددی $VOF\ break^2$ را براساس کد SOLA-VOF ارائه نمود. در این مدل اصلاحاتی در جهت بهبود مدل عددی برای حرکت موج درون و روی سازه‌ها انجام گرفته است. مدل مزبور توجه ویژه‌ای جهت استفاده برای موج‌شکن توده سنگی صورت داشته است در این مدل، معادلات حاکم بمنظور شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل یک سازه ساحلی نفوذپذیر، توسعه داده شد. این مدل عددی هم بوسیله داده‌های آزمایشگاهی و هم توسط داده‌های پرتوتیپ مورد صحت سنجی قرار گرفت.



برخی از اصلاحات برگرفته از مدل NASA-VOF2D، بر روی مدل $VOF\ break^2$ نیز اجرا گردید.
[۲۱]

Lin و Liu (۱۹۹۷)، یک مدل عددی را برای محاسبه تغییرات یک موج در حال شکست ارائه نمودند. این مدل تلفیقی است از گونه اصلاح شده RIPPLE (Kothe و همکاران ۱۹۹۱) و مدل آشفتگی $k-\epsilon$. این مدل عددی دوبعدی معادلات ناویراستوکس با رینولدز متوسط‌گیری شده (RANS) را برای میدان جریان متوسط و معادلات $(k-\epsilon)$ ، برای انرژی جنبشی k و نرخ اتلاف آشفتگی ϵ ، حل می‌کند و بنام مدل عددی دوبعدی موج در حال شکست یا 2-D BWNM موسوم می‌باشد. در این مدل، روش الگوریتم حجم سیال (VOF)، (Hirt و Nichols (۱۹۸۱))، برای دنبال کردن حرکات سطح آزاد بکار گرفته شده است. [۲۳]

Lin و Liu (۱۹۹۹)، توابع چشمه جرم درونی را جهت معادله بقاء جرم، در عبارت چشمه داخلی ناحیه جریان افزودند تا قطار موج مشخصی را تولید نماید. این مدل به نحوی توسعه یافته تا بتواند هر نوع طیف موج دریا را با سرهم کردن تعداد محدودی از مدهای موج خطی با ارتفاع و پریود مختلف، شبیه‌سازی نماید. [۹]

Liu و همکاران (۱۹۹۹)، این مدل را با افزودن قابلیت شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل و همچنین ایجاد بهبود در مدل آشفتگی $k-\epsilon$ که برای توصیف میدان آشفتگی مربوطه بکار می‌رود، توسعه دادند. در این مطالعه آنها توانستند تاثیر میزان تخلخل لایه های سنگچین موجشکن را بر نرخ روگذری موج بررسی نمایند. این مدل با استفاده از داده های اندازه گیری شده آزمایشگاهی مقایسه و نتایج قابل قبولی بدست آوردند. مدل مزبور به دلیل آنکه از فرضیاتی نظیر صرفنظر کردن از ترم های انتقال، خطی سازی نیروهای اصطکاکی و غیره استفاده نمی کند، بسیار عمومی تر از مدل های پیشین می باشد. [۱۰]

Isobe و همکاران (۱۹۹۹) و Isobe (۲۰۰۱)، یک فلوم موج عددی را برای استفاده عملی در طراحی سازه‌های دریایی که مبتنی بر مدل NASA-VOF2D بود، توسعه دادند. [۱۳ و ۵۳]



Lin در سال ۲۰۰۴ مدلی را توسعه دادند که قادر به مدل‌سازی اندرکنش موج با یک مانع مستطیلی شکل مستغرق است. در این مدل از ضرایب انعکاس، گذر و اتلاف (RTD) جهت تعیین مشخصات تغییرات موج بر روی سازه استفاده شده است. [۲]

Shi و همکاران (۲۰۰۵)، مدل دو بعدی VOF را با توسعه مدل RIPPLE ارائه نمودند. این مدل مبتنی بر معادلات ناویر استوکس فیلتر شده مکانی (Spatial-Filtered NS) به همراه مدل آشفتگی $k-l$ قادر به شبیه سازی اندرکنش موج با سازه های ساحلی با اشکال پیچیده می باشد. در این مدل، جریان در سازه متخلخل با استفاده از معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده زمانی دارسی به همراه ترم های نیروی درگ محاسبه می شود. مدل اخیر که با استفاده از داده های آزمایشگاهی مختلف صحت سنجی گردیده است، توانایی مدل‌سازی موج تحت تاثیر سازه های متخلخل با اشکال دلخواه و نیز سازه های نفوذناپذیر دلخواه و همچنین مدل آشفتگی multi-scale از نوع $k-l$ که مبتنی بر معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده زمانبست را به مدل RIPPLE می افزاید. [۱]

در سالهای اخیر مدل‌های تلفیقی جهت مدل‌سازی موج از دوردست تا ناحیه شکست و نهایتاً روگذری از سازه ساحلی مورد توجه قرار گرفته اند. در این تکنیک که بر مبنای درگیر ساختن دو روش مختلف مدل‌سازی شکل میگیرد، از روشهای اجزاء محدود و حجم سیال و یا اجزاء مرزی و حجم سیال بطور درگیر استفاده می شود. روش اخیر در ادامه تشریح میگردد، ذکر این نکته ضروری است که این روشها تاکنون صرفاً جهت مدل‌سازی شکست موج مورد استفاده قرار گرفته اند و مدل‌سازی روگذری موج با استفاده از این شیوه هنوز صورت نگرفته است.

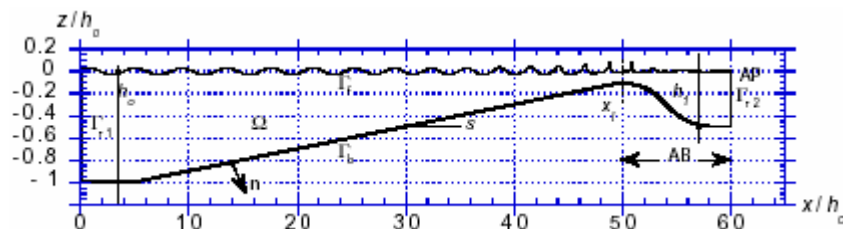
۳-۲- مطالعات مبتنی بر درگیر کردن روش VOF و BEM

روش المان مرزی (BEM) روش بسیار موثری برای محاسبه انتشار و خزش (Shoaling) امواج بر روی سطحی با توپوگرافی دلخواه می باشد که البته تا آستانه شکست یعنی Overturning قابل استفاده است. (Grilli و همکاران، ۱۹۹۴، ۱۹۹۷، ۱۹۹۸؛ Grilli و Horrillo، ۱۹۹۷، ۱۹۹۸). [۱۴ و ۲۴ و ۲۸]

در مطالعات مبتنی بر المان مرزی جهت مدلسازی تغییرات امواج در نزدیکی ساحل، تئوری جریان پتانسیل کاملاً غیرخطی توسط فرمولاسیون انتگرال مرزی مبتنی بر تابع گرین با تابع بروزکننده زمانی هندسه مرز و پتانسیل، درگیر می‌گردد. در ادبیات فنی، غالباً به چنین مدل‌هایی تانک‌های عددی موج (NWT) گفته می‌شود چرا که آنها می‌توانند عملکرد تانک‌های موج، یعنی تولید، انتشار و تشعشع / جذب موج را شبیه‌سازی نمایند. بسیاری از آزمایشات نشان داده‌اند که محاسبات در NWT مبتنی بر معادلات جریان پتانسیل، در پیش‌بینی شکل و سینماتیک خزش امواج سطحی بر روی بستر شیبدار، تا نقطه شکست (جائیکه مماس بر وجه مقابل موج، قائم شود) و کمی پس از این نقطه، تا جائیکه ضربه جت شکست به سطح آزاد برخورد می‌کند بسیار دقیق است. (Grilli و همکاران ۱۹۹۴، ۱۹۹۷) اما پس از این نقطه، روش المان مرزی بدلیل تخطی از معادلات حاکم، با شکست مواجه می‌شود.

محدود بودن مدل‌های BEM-NWT به امواج نشکسته، منجر به توسعه روش‌های مختلفی برای پیشگیری از شکست در محاسبات شده است. در این روش‌ها معمولاً از شیوه‌ای تحت عنوان سواحل جذب‌کننده (AB) (absorbing beach) استفاده می‌گردد. (Cointe ۱۹۹۰، Clement ۱۹۹۶ و Grilli و Horrillo ۱۹۹۷، ۱۹۹۸) (شکل ۳). [۳۵]

اصول این مکانیزم عبارتست از جذب انرژی امواج برخوردی در محل انتهایی NWT. قبل از آغاز پیچش (Overturning) امواج، از طریق تلفیق فشار سطحی و جذب فعال جانبی (Absorbing points, AP) بدون لحاظ کردن یک AB، امواج پریودیک در حال خزش بر روی یک شیب، بطور طبیعی دچار شکست‌های پیاپی در بالای شیب می‌شوند که تنها اولین آنها در NWT محاسبه خواهد شد در صورتیکه با وجود یک AB، می‌توان به امواج پیاپی اجازه داد قبل از اینکه وارد AB شوند و دچار اتلاف انرژی گردند، تا نقطه‌ای نزدیک نقطه شکست دچار خزش شوند. (Grilli و Horrillo، ۱۹۹۷، ۱۹۹۸).



شکل ۳- شمایی از محاسبات خزش موج پریودیک بر روی یک شیب سطح S در مدل 2-D-BEM-NWT

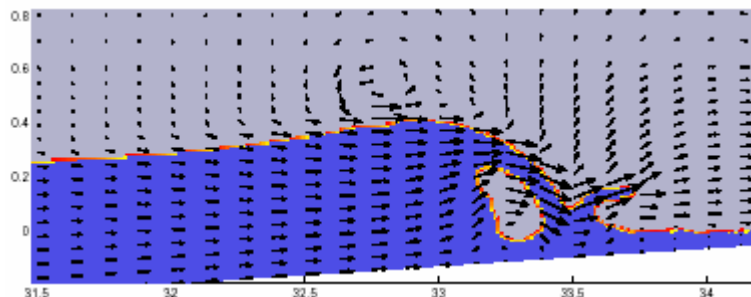
Grilli و Horrillo (۱۹۹۷) با یک ساحل جذب‌کننده (AB) و یک پیستون جذب‌کننده (AP) در انتها.

باتوجه به اینکه جذب سراسری انرژی در منطقه AB مانند آنچه در طبیعت رخ میدهد یعنی تلفیق عمل گردابه و آشفتگی و لزجت درون حجمی از سیال، صورت نمی پذیرد، نتایج مربوط به شکل و سینماتیک موج در درون AB) که آنرا تنها می توان بعنوان یک جعبه سیاه که عمل تابع جذب انرژی را در مدل عددی انجام می دهد، در نظر گرفت)، بلااستفاده اند.

با توجه به افزایش قدرت محاسباتی کامپیوترها در سالهای اخیر، حل مستقیم مستقیم معادلات ناوراستوکس بر روی شبکه پوشاننده همه دامنه، امکانپذیر گشته است. در این روش حرکت سطوح آزاد و سطوح مشترک بین سیالها با استفاده از علامتگذاریهای توزیع شده در سطح، به دقت دنبال میگردند.

با استفاده از روشهای مبتنی بر VOF می توان بسته های هوا را که درون سیال به دام افتاده و نیز قطعاتی از سیال را که از سیال اصلی جدا شده است، مدل نمود. بنابراین، این روشها برای مدل سازی امواج در حال شکست بر روی یک بستر شیبدار ایده آل می باشند (Guignard و همکاران، ۱۹۹۹) (شکل ۴)؛ توجه شود که در این مدل، فرض می شود که فاز هوا تراکم ناپذیر است، حتی برای بسته های هوای بدام افتاده در آب) اما روشهای VOF از نظر محاسباتی گرانند و از دیفیوژن عددی که منجر به اتلاف مصنوعی انرژی موج در طول مسافت انتشار می گردد، رنج می برند. [۸]

در روشهایی که دو روش BEM و VOF را با هم درگیر می سازند، خصوصیات و فواید هر دو شیوه در مدل سازی خزش موج و برخورد جت موج به سطح آزاد، بکار گرفته می شود. روش BEM با بکارگیری از مدل NWT، همراه با یک AB، دارای دقت و کارایی کافی برای محاسبات خزش بر روی بستر شیبدار قبل از وقوع شکست می باشد.

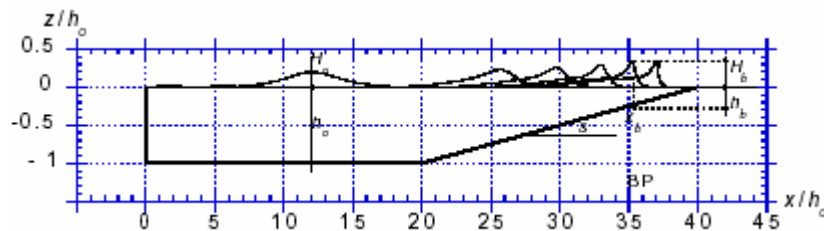


شکل ۴- شکست یک موج یکتایی بر روی شیب 1:15 در مدل VOF دو فازه (Guignard و همکاران، ۱۹۹۸)

روش VOF با استفاده از پارامترهای جریان سیال که در مرز باز دریا با استفاده از روش BEM-NWT شروع و بروز شده قادر به محاسبه امواج در حال شکست و پس از شکست در سطح شیبدار و بر روی شبکه محلی می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل شده از این روش، مدل درگیر برای محاسبات انتشار و تغییرات موج دارای دقت کافی می‌باشند.

• مدل Guignard و همکاران (۱۹۹۹)

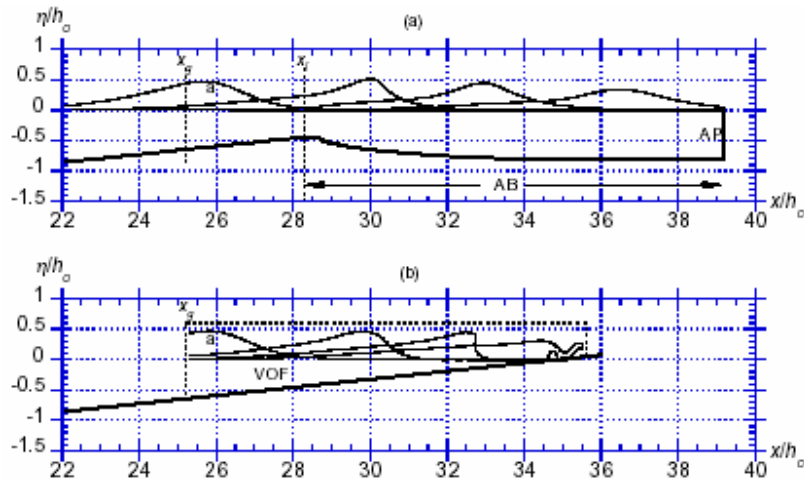
Guignard و همکاران در سال ۱۹۹۹ یک مدل درگیر BEM/VOF برای محاسبه خزش



شکل ۵- خزش (Shoaling) و پیچش (overturning) موج یکتایی بر روی شیب

و شکست موج یکتایی بر روی شیب‌های ملایم که دارای انعکاس کم می‌باشند، ارائه نمودند، که در واقع ساده‌ترین حالت است چرا که هیچ بازخوردی (Feed back) از مدل VOF به مدل BEM بر نمی‌گردد (شکل ۵ و ۶). اصول مدلسازی اخیر شامل بخش‌های زیر می‌باشد: [۸]

مدل 2D-NWT، Grilli و همکاران که در مورد آن توضیح داده شد، انتشار امواج کاملاً غیرخطی دلخواه را بر روی بستر با توپوگرافی پیچیده مدل می‌کنند. مقادیر مرزی پارامترهای جریان موج (سرعت، شتاب، فشار و ...) بسرعت در دسترس‌اند؛ در صورت نیاز، مقادیر میدان‌های مشابه را نیز می‌توان در نقاط داخلی مشخص محاسبه نمود. Guignard و همکاران از این مدل NWT برای تولید داده‌های آغازین در مدل VOF خود، جهت انتشار امواج یکتایی تک بزرگ در عمق ثابت و بر روی یک شیب استفاده نمودند.



شکل ۶- اصول درگیرسازی ضعیف BEM/VOF

در مطالعه صورت گرفته توسط Guignard و همکاران (۱۹۹۹)، یک مدل درگیر BEM/VOF جهت تلفیق فواید و خصوصیات روشهای المان مرزی و روش حجم سیال توسعه داده شد. در این مرحله، تنها خزش و شکست امواج یکتایی (Solitary) بر روی شیبهای مسطح استفاده شد و الگوریتم درگیر ساختن ضعیف یعنی بدون بازخورد از مدل VOF به مدل BEM در نظر گرفته شد.

بدلیل دقت و کفایت مدل BEM به لحاظ عددی برای امواج نشکسته، این مدل بیشتر جهت انجام انتشار موج از آبهای آزاد به شیب بالادست تا نزدیکی نقطه شکست مورد استفاده قرار گرفت. درگیر کردن مدل در دو سطح صورت می گیرد:

(۱) با استفاده از نتایج BEM که بر روی شبکه VOF محاسبه شده، مدل VOF بر روی

سطحی کوچکتر از آنچه که بوسیله مدل BEM تحت پوشش قرار گرفته شروع به کار می کند.

(۲) برای زمانهای بعدی، شرایط مرز بالادست در مدل VOF بوسیله نتایج BEM که در

جهت قائم محاسبه شده، فراهم می گردد.

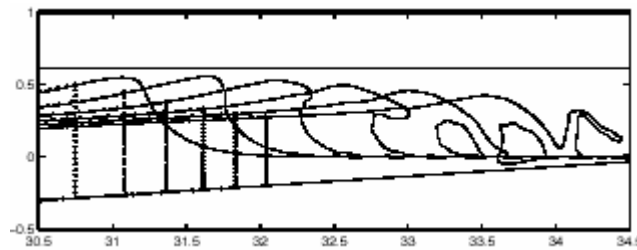
در مدل BEM، جهت پیگیری محاسبات برای زمان به اندازه کافی طولانی، یک ساحل جذب کننده در

بالای شیب جهت پیشگیری از پیچش (Overturning) و شکست موج استفاده می شود.

اساساً در رهیافت درگیرسازی، مدل‌های BEM و VOF به دنبال هم اجرا می‌گردند. در مدل BEM هم مقادیر اولیه و هم یک پایگاه اطلاعات برای شرایط مرزی جانبی بصورت یک تابع زمان محاسبه و ذخیره می‌گردد، سپس مدل VOF اجرا می‌گردد، به این وضعیت، درگیری ضعیف اطلاق می‌گردد. Guignard و همکاران (۱۹۹۹)، با استفاده از مدل درگیر شده ضعیف BEM و VOF به جهت شبیه‌سازی خزش و شکست امواج در ناحیه نزدیک ساحل به این نتیجه رسیدند که مدل درگیری ضعیف VOF، هم دقیق‌تر و هم کاراتر از مدل VOF تنهاست که بر روی شبکه درشت‌تر استفاده شده است.

• مدل Lachaume و همکاران

Lachaume و همکاران (۲۰۰۳)، مدلی را که مبتنی بر درگیر نمودن مدل BEM جهت حل معادلات FNPF و یک مدل VOF جهت حل معادلات NS اجرا و ارزیابی نمودند. آنها در متدولوژی درگیری ضعیف و قوی (شکل ۷) را آزمایش نمودند و نتایج مدل درگیر شده قوی را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کرده و نشان دادند که تطابق خوبی در خصوص ارتفاع موج پس از شکست وجود داشته است. [۵۴]



شکل ۷- اصول درگیرسازی قوی بین مدل‌های FNPF-BEM و NS-VOF

در حالت دیگری که بررسی شد، شیب بستر بیشتر در نظر گرفته شد در این حالت، مدل VOF نمی‌توانست باعث پخش (dissipation) و کاهش عمده در ارتفاع موج گردد. در نتیجه ارتفاع موج در مدل BEM کمتر از ارتفاع موج در مدل BEM/VOF در محل شکست می‌باشد. مدل اخیر، قادر به محاسبه مشخصات امواج در حال شکست و پس از شکست بر روی شیب‌ها، با در نظر گرفتن حداکثر بالاروی می‌باشد.



• مدل Biausser و همکاران

Biausser و همکاران (۲۰۰۳)، یک مدل عددی سه‌بعدی شبیه‌سازی شکست امواج را با درگیر نمودن روش‌های VOF و BEM ارائه نمودند. آنها در این مدل سه‌بعدی، توسعه و اعتبار مدل عددی مبتنی بر درگیر نمودن روش المان مرزی مرتبه بالا جهت حل معادلات جریان پتانسیل کاملاً غیرخطی با حل حجم سیال (VOF) جهت معادلات اوپلر را بررسی نمودند. آنها در واقع مدل دوبعدی درگیر شده BEM و VOF مربوط به Guignard و همکاران (۱۹۹۹ و ۲۰۰۱) را به مدل سه‌بعدی درگیر گسترش دادند. در این تحقیق از لزجت صرف‌نظر و در نتیجه معادلات اوپلر حل گردید. [۴]

در مجموع می‌توان چنین ارزیابی نمود که با توجه به کارایی و دقت مدل BEM برای مدلسازی تغییرات امواج در حین انتشار و اینکه این مدل به لحاظ محاسباتی زمان بسیار کمی را نیاز دارد، از این مدل می‌توان تا نزدیکی نقطه شکست استفاده نمود، از طرف دیگر می‌توان بدلیل توانایی مدل VOF جهت مدلسازی شکست و تغییرات پس از شکست، از آن استفاده نمود. این مدل اگرچه زمان محاسباتی بیشتری را نسبت به مدل BEM نیاز دارد ولی چون در ناحیه کوچکی از کل دامنه محاسباتی مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان از مش‌ریزتری بهره جست تا خطاهای محاسباتی به حداقل برسد.

۴- جمع بندی

با افزایش قدرت محاسباتی کامپیوترها، توسعه مدل‌های محاسبات مربوط به شکست و روگذری موج از سازه‌ها طی دهه اخیر شتاب مضاعفی یافته است. در میان مدل‌های ارائه شده مدل‌های مبتنی بر VOF از دقت و کارایی کافی جهت مدلسازی جزئیات تغییرات موج در ناحیه شکست و سپس بالاروی موج از سازه و نهایتاً روگذری آن از سازه برخوردار می‌باشند. این دسته از مدل‌ها به نحو مطلوبی جهت محاسبه روگذری موج از سازه‌های ساحلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج حاصل از آنها با داده‌های آزمایشگاهی در تطابق خوبی بوده است. این دسته از مدل‌ها در طی سال‌های اخیر بطور پی‌در پی بهبود و توسعه یافته‌اند. در حال حاضر در میان این مدل‌ها مدل Liu قویترین و کاملترین مدل می‌باشد، اما علیرغم دقت خوب مدل‌های مبتنی بر VOF در مدلسازی پدیده شکست، این دسته از مدل‌ها هنوز دارای نقاط



ضعف می باشند. یکی از این نقاط ضعف، افزایش زمان محاسبه و نیاز به کامپیوترهای با سرعت بالا در صورت مدلسازی موج نزدیک شونده از فاصله ای دور از سازه است، در این حالت دیفیوژن های عددی نیز در نتایج مشاهده خواهند شد.

مدلهای مبتنی بر BEM علیرغم عدم توانایی مدلسازی شکست موج، قادرند تغییرات موج نزدیک شونده از فاصله ای دور به ساحل شیبدار را تا آستانه شکست مدلسازی نمایند. این دسته از مدلها از معادلات ساده شده نایر استوکس یعنی معادله لاپلاس با شرایط مرزی مربوطه در جهت مدلسازی پدیده بهره می جویند.

بکارگیری تواناییهای هر دو مدل یعنی مدلهای مبتنی بر VOF و مدلهای مبتنی بر BEM در سالهای اخیر منجر به ارائه مدلهای درگیر BEM-VOF گردیده است. در این شیوه جدید، از تواناییهای هر دو روش بطور مطلوبی استفاده میگردد تا مدلسازی شکست موج صورت پذیرد بدین صورت که تغییرات موج از دوردست تا نزدیکی نقطه شکست یعنی آنجاییکه دیگر روش BEM قادر به مدلسازی شکست موج نمی باشد از این مدل استفاده میشود و از آن نقطه به بعد، مدل VOF وارد عمل شده و جزئیات شکست را مدلسازی مینماید.

این تکنیک جدید به دو صورت انجام می پذیرد: **درگیری ضعیف و درگیری قوی**. در درگیری ضعیف، داده های خروجی از مدل BEM در سمت مرز رو به ساحل بعنوان داده های ورودی مدل VOF استفاده می شود و هیچ بازخوردی از VOF به مدل BEM صورت نمی پذیرد اما در درگیری قوی این بازخورد و تبادل اطلاعات بطور مداوم صورت میگیرد و داده های مرز رو به دریای مدل VOF به عنوان داده های مرزی BEM مورد استفاده قرار میگیرند و بالعکس. این روش هنوز جهت مدلسازی پدیده روگذری موج از سازه مورد استفاده واقع نشده هرچند تلاشهایی در این زمینه در حال صورت گرفتن میباشد.



مراجع

- 1- Shi, F., Zhao, Q., Kirby, J. (2005), "Modeling of wave interaction with complex coastal structures using an enhanced VOF model", in press
- 2- Lin, P.,(2004), "A numerical study of solitary wave interaction with rectangular obstacles", *Coastal Engineering* Vol. 51:pp. 35-51
- 3- Shen, Y. M., Ng, C. O., Zheng, Y. H.,(2004). "Simulation of wave propagation over a submerged bar using the VOF method with a two-equation k- ϵ turbulence modeling", *Ocean Engineering* Vol31: pp.87-95.
- 4- Biauxser, B., Grilli, S.T., and Fraunié (2003a), "Numerical simulations of three-dimensional wave breaking by coupling of a VOF method and a Boundary Element method", *Proc. 13th Offshore and Polar Engng. Conf.* (ISOPE03, Honolulu, HI, May 2003) (to appear).
- 5- Takahashi, S., Y. Kotako, R. Fujiwara and M. Isobe (2002), "Performance evaluation of perforated-wall caissons by VOF numerical simulations", *Proceeding of the 28th International Conference, Coastal Engineering 2002, Cardiff, UK.*: pp. 1365-1376.
- 6- Goda, Y. (2000), "Random seas and design of maritime structures", University of Tokyo Press, Tokyo, Japan.
- 7- Hu K. C. G. Mingham and D. M. Causon(2000), "Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the Non_Linear shallow water equations", *Coastal Engineering* (41),433-435
- 8- Guignard, S., Grilli, S.T., Marcer, R. and Rey, V. (1999) "Computation of shoaling and breaking waves in nearshore areas by the coupling of BEM and VOF methods," *Proc. 9th Offshore and Polar Engng. Conf.* (ISOPE99, Brest, France, May 1999), Vol. III, 304-309.
- 9-Lin, P. and P. L.-F. Liu (1999), "Internal wave-maker for Navier-Stokes equations models", *Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* Vol. 125(4): pp. 207-215.
- 10- Liu, P. L.-F., P. Lin and K. A. Chang (1999), "Numerical modeling of wave interaction with porous structures", *Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* Vol. 125(6): pp. 322-330.



- 11- Troch, P. and J. De Rouck (1999), "An active wave generation-absorbing boundary condition for VOF type numerical model", Coastal engineering Vol. 38: pp. 223-247.
- 12- Van Gent, M. R. A. (1999) Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores, "2D model tests with single and double peak wave energy spectra", Delft Hydraulics, Report H3608.
- 13- Isobe, M., S. Takahashi, S. P. Yu, T. Sakakiyama, K. Fujima, K. Kawasaki, Q. Jiang, M. Akiyama and H. Oyama (1999), "Interim report on development of numerical wave flume for maritime structure design", Proceeding of Civil Engineering in the Ocean, J.S.C.E., Vol. 15: pp. 321-326.
- 14- Grilli, S.T. and Horrillo, J. (1999), "Shoaling of periodic waves over barred-beaches in a fully nonlinear numerical wave tank", *Intl. J. Offshore and Polar Engng.*, Vol. 9, No. 4, pp 257-263
- 15- Hiraishi and Maruyama 1998, Presented a numerical model for calculation of overtopping discharges for a vertical breakwater in multi directional waves, The basic assumption is that the overtopping discharge can be described by a weir expression as suggested by Kikkawa et al 1998
- 16- Hedges T.S. and M. T. Reis (1998a), "Random wave overtopping of simple seawalls: A new regression model", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Maritime and Energy 130(1), 1-10
- 17- Hedges T. S. and M. T. Reis (1998b), "Random wave overtopping of simple sea walls: a new regression modeled", Oceanographic Literature Review 45(19),1711
- 18- Besley, P., T. Stewart and N. W. H. Allsop (1998), "Overtopping of vertical structures: new prediction methods to account for shallow water conditions", Proc. of the Conference on Coastlines, structures and breakwaters, ICE
- 19- Troch, P. and J. De Rouck (1998), "Development of two-dimensional numerical wave flume for wave interaction with rubble mound breakwater", Proc. Of the Coastal Engineering Conference: pp. 1639-1649.
- 20- Kothe, D. B., R. C. Ferrell, J. A. Turner and S. J. Mosso (1997), "A high resolution finite volume method for efficient parallel simulation of casting processes on unstructured meshes, Los Alamos, NM, USA, Los Alamos National Laboratory.



In: Proceeding 8th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Community, Minneapolis, NM, USA, Report LA-UR-97-30.

21- Troch, P. (1997), "VOFbreak2, a numerical model for simulation of wave interaction with rubble mound breakwaters", Proceedings 27th IAHR Congress, San Francisco, USA: pp. 1366-371.

22- Sakakiyama, T. and R. Kajima (1997), "Wave overtopping and stability of armor units under multidirectional waves", Proceedings of the Coastal Engineering Conference 2: pp. 1862-1875.

23- Liu, P. L.-F. and P. Lin (1997) , "A numerical model for breaking waves: The volume of fluid method", Newark, Delaware, Centre for Applied Coastal Research, Ocean Engineering Laboratory, University of Delaware

24- Grilli, S.T. and Horrillo, J. (1997), "Numerical Generation and Absorption of Fully Nonlinear Periodic Waves," *J. of Engng. Mechanics*, Vol. 123, No. 10, pp 1060-1069.

25- Shih, T.-H., J. Zhu and J. L. Lumley (1996), "Calculation of wall-bounded complex flows and free shear flows", International Journal. for Numerical Methods in Fluids Vol. 23: pp. 1133-1144.

26- Iwata, K., R. C. Kawasaki and D. Kim (1996), "Breaking limit, breaking and postbreaking wave deformation due to submerged structures", In: Proceedings 25th Conference on Coastal Engineering, Orlando, USA Vol. 3: pp. 2338-2351.

27- Grilli and J., Horrillo, "Exact Periodic Wave Generation and Absorption for Nonlinear Wave Computations", *J. Engng. Mech.* (submitted), 1995.

28- Grilli, S, Losada, M.A. and F., Martin, "Characteristics of Solitary Wave Breaking Induced by Breakwaters", *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engng.* **120** (1), 74-92, 1994.

29- Wu, N. (1994), "Numerischen simulation der druckschlagbelastung durch brechende wellen auf senkrechte bauwerke. Ph.D thesis Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen ", Universität Hannover. Hannover, Germany.

30- Van der Meer, J.W. and J. P. F. M. Janssen (1994), "Wave run-up and wave overtopping at dikes", Wave forces on inclined and vertical structures: pp. 1-27.



- 31- Umeyama, M. (1993), "Wave overtopping on vertical boundary and water surface displacement", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 119(3): pp. 243-260.
- 32- Van der Meer, J. W., H. A. H. Petit, P. Van den Bosch, G. Klopman and R. D. Broekens (1992), "Numerical simulation of wave motion on and in coastal structures", In *Proceeding 23 rd International Conference on Coastal Engineering*, Venice, Italy **Vol. 2**: pp. 1172-1784.
- 33- Lemos, C. M. (1992), "Wave breaking, a numerical study", *Lecture Notes in Engineering* No. 71. Springer-Verlag, Berlin, Germany
- 34- Kothe, D. B., R. C. Mjolsness and M. D. Torrey (1991), "RIPPLE: a computer program for incompressible flows with free surfaces", Los Alamos, NM, USA, Los Alamos Scientific Report, Report LA-12007-MS.
- 35- Cointe, R., "Numerical Simulation of a Wave Channel", *Engng. Analysis with Boundary Elements*, **7** (4), 167-177, 1990.
- 36- Grilli, S., Skourup, J. and I.A., Svendsen, "An Efficient Boundary Element Method for Nonlinear Water Waves", *Engng. Analysis with Boundary Elements* **6** (2), 97-107, 1989.
- 37- Kobayashi, N. and Wurjanto, A. (1989), "Wave Overtopping on Coastal Structures", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 115(2), 235-251
- 38- Brorsen, M. and J. Larsen (1987), "Source generation of nonlinear gravity waves with boundary integral equation method", *Coastal Engineering* Vol. 11: pp. 93-113.
- 39- Hirt, C. W. and R. P. Harper (1985), "Sample Problem for an Oil/Water/Gas Separator", *Flow Science Technical Note 1*, (FSI-85-00-TN1).
- 40- Torrey, M. D., L. D. Cloutman, R. C. Mjolsness and C. W. Hirt (1985), "NASAVOF2D: a computer program for incompressible flows with free surfaces", Los Alamos, NM, USA, Los Alamos Scientific Report, Report LA-10612- MS.
- 41- Owen, M. W. (1982), "The hydraulic design of seawall profiles", *Proc. Conf. on Shoreline Protection*, ICE, London, UK: pp. 185-192.
- 42- Austin, D. I. and R. S. Schlueter (1982), "A numerical model of wave breaking /breakwater interactions. In *proceedings 18th International Conference on Coastal Engineering*", Cape Town, Republic of South Africa Vol. 3: pp.2079-2096.



- 43- Hirt, C. W. and B. D. Nichols (1981), "Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries", *Journal of Comp. Phys.* Vol. 39: pp. 201-225.
- 44- McMaster, W. H., C. S. Quinones, D. M. Landram, D. M. Norris, E. Y. Gong, N. A. Machen and R. E. Nickell (1980), "Applications of the coupled fluid-structure code PELE-IC to pressure suppression analysis", *Annual Report to NRC for 1979*, NURER/CR-1179, Report UCRL-52733.
- 45- Nichols, B. D., C. W. Hirt and R. S. Hotchkiss (1980), "SOLA-VOF: A solution algorithm for transient fluid flow with multiple free boundaries", Los Alamos, CA, USA, Los Alamos Scientific Report, Report LA-8355.
- 46- Owen, M. W. (1980), "Design of seawalls allowing for wave overtopping", HRWallingford, UK., Technical Report EX-924.
- 47- McMaster, W. H. and E. Y. Gong (1979), "PELE-IC User's manual", Lawrence Livermore Laboratory, Report UCRL-52609.
- 48- Hirt, C. W., B. D. Nichols and N. C. Romero (1975) , "SOLA- A numerical solution algorithm for transient fluid flows", Los Alamos, CA, USA, Report LA-5852.
- 49- Nichols, B. D. and C. W. Hirt (1975), "Methods for calculating multi-dimensional, transient free surface flows past bodies", *Proc. of 1st International Conference in Numerical Ship Hydrodynamics*, Gaithersburg, Maryland
- 50- Pope, S. B. (1975), "A more general effective-viscosity hypothesis", *Journal of Fluid Mechanics* Vol. 72: pp. 331-340.
- 51- Nichols, B. D. and C. W. Hirt (1971), "Improved free surface boundary conditions for numerical incompressible-flow calculations", *J. Comp. Phys.* Vol. 8: pp. 434-448.
- 52- Harlow, F. H. and J. E. Welch (1965), "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow", *Phys. fluids* Vol. 8: pp. 2182-2189.
- 53- Isobe, M. (2001) , "A review of numerical models for wave trans-formation in shallow water", *Proc. of International Work-shop on Advanced Design of maritime Structures in the 21st century*, Port and Harbour research Institute: pp. 200-205.
- 54-Lachaume, Ch. Biausser, B , Grilli, S.T. Fraunié, Ph, Guignard, S.(2003). "Modeling of Breaking and Post-breaking Waves on Slopes by Coupling of BEM and VOF Methods", *Proc. 13th Offshore and Polar Engng. Conf. (ISOPE03, Honolulu, HI, May 2003)*.