

# مدل سازی عددی سه بعدی برخورد موج تنها به سازه و شکست چرخان موج

امید بردبار<sup>۱</sup> و محمود رستمی ورنوسفادرانی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی دریا، گروه دریا، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر  
۲- استادیار، گروه دریا، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

\*rostamivf@aut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۹۷/۰۸/۲۱؛ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۳/۱۱)

**چکیده**- نیروی موج، مهمترین نیروی وارد بر سازه‌های دریایی است و شدیدترین نیروها را، موج در حال شکست، بر سازه وارد می‌کند. در شکست موج، آشفتگی و اختلاط شدید، ایجاد می‌شود. و تحلیل آن، کاری دشوار و پیچیده‌ای است. در پژوهش حاضر، ابتدا بصورت عددی، یک موج تنها ایجاد گردیده و سپس شکست چرخان موج تنها روی سطح شیب‌دار شبیه‌سازی شده است. در مدل‌سازی عددی اخیر از روش حجم محدود و مدل دو فازی حجم سیال برای مدل‌سازی سطح آزاد استفاده شده است. شبیه‌سازی در حالت غیردائم و با استفاده از مدل توربولانسی k-w SST انجام گرفته است. معادلات حاکم بر حرکت موج نیز کدنویسی شده‌اند. شکل سطح آزاد آب از نظر کمی و کیفی انطباق خوبی با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی دارد و در مراحل مختلف شکست موج، یعنی شروع شکست موج، برخورد نوک موج به زمین، تشکیل جت آب و شکست مجدد آن، تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. مدل‌سازی عددی سه‌بعدی برخورد موج تنها، با یک ستون صلب در دو حالت شکست و بدون شکست موج انجام پذیرفته و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج عددی این مدل‌سازی از لحاظ مقدار نیروی برخورد، از اعتبار خوبی برخوردارند.

**کلید واژگان:** شکست موج، موج تنها، سطح آزاد، دینامیک سیالات محاسباتی، برخورد موج به سازه.

## ۱- مقدمه

در حوزه مهندسی دریا، شکست امواج در نزدیکی ساحل و فراساحل از اهمیت زیادی برخوردار است. شکست موج یک پدیده طبیعی و مهم است که شامل پدیده‌های مهم دیگری مانند آشفتگی، انتقال رسوب، ایجاد موج و بالاروی موج و روگذری موج، در سازه‌های ساحلی است. امواجی که به مناطق ساحلی می‌رسند قسمت اعظم انرژی خود را در این مناطق از دست می‌دهند. هنگامی که امواج به ساحل نزدیک می‌شوند انرژی آنها به صورت حرارت حاصل از اغتشاش و حرکت آب ناشی از شکست،

اصطکاک و نفوذ به کف دریا مستهلک می‌شود (Dean and Dalrymple, 1991). شکست امواج به علت تأثیراتش بر روی ساحل و سازه‌های ساخته شده در ساحل دارای اهمیت است و تأثیر زیادی بر پدیده‌های نزدیک ساحل دارد و هنگام طراحی سازه‌ای که در ناحیه شکست قرار دارد، لازم است موقعیت شکست موج پیش‌بینی شود. ضریب کاهش عمق نشان می‌دهد که در آب خیلی کم عمق، ارتفاع موج به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. البته این موضوع غیر فیزیکی است. امواجی که از آب عمیق به سمت آب کم عمق پیشروی می‌کنند، کاهش طول و

هدف از مقاله اخیر، مدل‌سازی عددی شکست موج و برخورد آن به سازه به همراه دستیابی به دقت بالا در حل و هزینه محاسباتی پایین است. مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار استار<sup>۲</sup> انجام می‌پذیرد. با توجه به طبیعت دوفازی موج و شناسایی سطح آزاد از روش حجم سیال استفاده می‌شود. از آنجایی که تماس موج و بخصوص جت آب با سطح و دیواره صلب رخ می‌دهد، از مدل توربولانسی تنش برشی کا-امگا<sup>۳</sup> که دقت خوبی در مدل‌سازی تنش برشی دارد، استفاده می‌شود. در مقاله حاضر ابتدا یک موج تنها<sup>۴</sup> به روش عددی ایجاد و پروفیل سطح آن با مقادیر تحلیلی به شکل کمی مقایسه می‌شود. سپس شکست موج تنها به صورت دوبعدی بر روی سطح شیب دار، شبیه‌سازی می‌شود. نتایج آن به صورت کیفی با نتایج آزمایشگاهی معتبرسازی می‌شود. برای بررسی صحت مدل‌سازی، استقلال از شبکه با تراکم و تعداد سلول‌ها مختلف انجام می‌گیرد. در انتها مدل‌سازی عددی سه‌بعدی برخورد موج با ستون استوانه‌ای صلب در دو حالت شکست موج و بدون شکست موج انجام می‌پذیرد. صحت‌سنجی در مسئله اخیر صرفاً برای نیروی برخورد به صورت کمی انجام می‌شود. از جنبه‌های نو در این مقاله، شبیه‌سازی تمامی مراحل شکست موج تا انتهای استهلاك موج است. این مراحل عبارت‌اند از: ایجاد شکست، برخورد نوک موج بر روی سطح، ایجاد جت آب، شکست مجدد موج و پخش بخشی از جت آب به اطراف.

## ۲- معادلات اساسی حاکم و روش عددی

معادلات بقاء جرم، بقاء ممنتوم و بقاء انرژی، معادلات اصلی حاکم بر محیط پیوسته هستند. در پروانه‌های دریایی به دلیل میزان بسیار کم انتقال حرارت می‌توان از حل معادله انرژی صرف‌نظر کرد. معادلات بقاء جرم و بقاء ممنتوم به ترتیب از قرار زیرند (Currie et al., 2002):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

افزایش ارتفاع می‌دهند. بنابراین تیزی آنها افزایش می‌یابد و در یک مقدار مشخص عمق، یک موج با مشخصات معلوم، ناپایدار شده و می‌شکند (Dean and Dalrymple, 1991).

Lee et al. (1982) شکست موج و ایجاد جت آب را به شکل آزمایشگاهی انجام داده‌اند. (Grilli et al. (1999) از روش المان مرزی برای شبیه‌سازی تولید امواج و شکست آنها بر روی ساحل استفاده کرده‌اند که البته در هنگام شکست موج نمی‌توانست برخورد جت آب تشکیل شده را بر روی سطح آزاد آب نشان دهد و شبیه‌سازی دچار اختلال می‌شد. (Ketabdari et al. (2008) و Lubin et al. (2003) از روش حجم سیال به منظور شبیه‌سازی شکست موج استفاده کردند. (Shao et al. (2006) بر روی شکست موج، (Colagrossi and Monaghan et al. (2003) و et al. (2003) بر روی شکست موج بر روی سازه و (Khayyer et al. (2008) بر روی پس از شکست موج، با استفاده از ISPH مطالعه و تحقیق کرده‌اند.

(Dalrymple and Rogers. (2006) با استفاده از SPH، شکست موج در سواحل، امواج برخوردی به عرشه کشتی‌ها و برهم‌کنش بین سازه‌های دریایی و امواج را به صورت دوبعدی و سه‌بعدی مدل‌سازی کرده‌اند. (YANG and HUANG. (2006) با توسعه کد حلگر اپن‌فوم<sup>۱</sup>، جریان‌های پایا و ناپایای سطح آزاد را شبیه‌سازی کرده‌اند. یکی از این شبیه‌سازی‌ها، شبیه‌سازی عددی امواج برخوردی به یک عرشه در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی است. (Rezae, H., Ketabdari (2012) نشان داد که فشار و نیروی امواج در حال شکست وارده بر بدنه سازه شناور بسیار بیشتر از فشار امواج شکسته است و نیروی عظیمی را در مهارهای آن بوجود می‌آورد که می‌تواند باعث گسیختگی مهارهای موج‌شکن شناور در طوفان‌های سهمگین شود. (Lubin et al. (2013) با استفاده از مدل LES و با حدود ۸۲ میلیون شبکه، به شبیه‌سازی شکست موج پرداخته است. (Brucker et al. (2008) با استفاده از کد NFA و با حدود ۱۳۴ میلیون شبکه، شکست موج در آب عمیق را شبیه‌سازی کرده است.

2. Star-CCM  
3. k-w SST  
4. Solitary

1. OpenFoam

یک و در سایر نقاط صفر است. سلول‌هایی که مقدار  $F$  در آنها بین صفر و یک است، شامل سطح آزاد هستند. بدین ترتیب با روش حجم سیال، سطح آزاد، مدل می‌شود. روش حجم سیال در هر سلول تنها به یک فضای ذخیره سازی نیاز دارد. در واقع این تابع، به عنوان یک کمیت اسکالر به حساب می‌آید. در یک سلول ممکن است بطور هم‌زمان آب و هوا وجود داشته باشد و در جایی که مقدار  $F$  برابر ۰/۵ است، سطح آزاد تعریف می‌شود. روش محاسبه جرم مخصوص  $\rho$  و لزجت دینامیکی  $\mu$  در سلول‌های مختلف با استفاده از کسر حجمی  $(\alpha_i)$  و بر اساس روش حجم سیال به قرار زیر است:

$$\rho = \sum \rho_i \alpha_i ; \mu = \sum \mu_i \alpha_i ; \alpha_i = \frac{v_i}{V} \quad (5)$$

که در آنها  $V$ ، حجم سلول و  $v_i$  حجم اشغال شده توسط هر سیال در همان سلول است. وابستگی  $F$  به زمان و مکان توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

معادله فوق بیان کننده مشتق مادی  $F$  است و از حل معادله فوق که در آن مقادیر سرعت از معادلات حرکت بدست می‌آیند،  $F$  محاسبه می‌شود.

#### ۴- مدل سازی عددی و معتبر سازی

##### ۴-۱- فرآیند حل مسئله هنگام شبیه سازی

در ابتدای شبیه سازی، بر سطح آب و ناحیه‌هایی که پارامترهای دیگر (بخصوص سرعت و فشار) تغییرات زیادی دارند شبکه ریزتری ایجاد می‌شود تا حدی که تغییرات با دقت شبیه سازی شوند. از آنجایی که از مدل شبکه تریم استفاده می‌شود به کمک کنترل حجمی شبکه، ایجاد شبکه با دقت زیاد، امکان پذیر است. در ابتدای حل در راستای عمود بر سطح آب نسبت به راستای طولی نیاز به تراکم شبکه بیشتری است. گام زمانی بر حسب کوچکترین اندازه‌ی شبکه دامنه (شبکه سطح آزاد) و سرعت سیال (سرعت حرکت سطح آزاد) تعیین می‌شود. به این صورت که در هر گام زمانی، جریان به اندازه طول شبکه سطح آزاد، جابجا شود. در این صورت

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) \quad (2)$$

که بردار سرعت،  $p$  فشار و  $\bar{\tau}$  تانسور تنش است.

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

که  $\mu$  ویسکوزیته مولکولی و  $I$  واحد تانسور است. با روش متوسط گیری رینولدز (RANS)، معادله ممنتوم از قرار زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right]$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) + \rho g_i + F_i$$

که  $\delta_{ij}$  تابع دلتای کرونگر و  $-\rho \overline{u_i' u_j'}$  تابع تنش رینولدز است که برای محاسبه این تانسور، مدل‌های آشفتگی مختلفی ایجاد و توسعه یافته‌اند. معادلات فوق در نرم افزار توسط روش حجم محدود<sup>۱</sup> گسسته سازی می‌شوند.

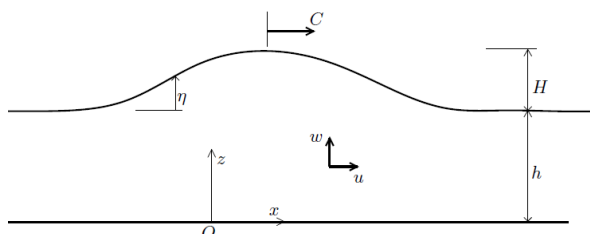
شبیه سازی‌ها در حالت ناپایا و با حل کننده تفکیکی<sup>۲</sup> انجام شده‌اند. بعلاوه خطی سازی معادلات به روش ضمنی<sup>۳</sup> و مجزاسازی معادلات به روش بالادست<sup>۴</sup> مرتبه اول صورت گرفته است. وابستگی سرعت - فشار به روش سیمپل است. برای مدل سازی آشفتگی از مدل تنش برشی کا-امگا بهره گرفته شده است. برای شناسایی سطح آزاد نیز از مدل چندفازی حجم سیال<sup>۵</sup> استفاده گردیده است.

#### ۳- روش حجم سیال

در این روش، برای هر سلول شبکه تنها یک مقدار برای هر متغیر وابسته جهت بیان حالت سیال لازم است یعنی استفاده از چندین نقطه در یک سلول جهت تعریف ناحیه‌ای که توسط سیال اشغال شده، غیر ضروری است. در این روش، تابع  $F$  به این صورت تعریف می‌شود که اگر داخل سلول سیال وجود داشته باشد، مقدار آن برابر مقدار

1. Finite Volume Method (FVM)
2. Segregated
3. Implicit
4. Upwind
5. Volume of fluid (VOF)

موج تنهای شبیه سازی شده، مرتبه سه<sup>۱</sup> است و توابع منحنی سطح آب و مولفه های سرعت جریان براساس Lee et al. (1982) و (2006) Grilli هستند (شکل ۱).



شکل ۱ طرحواره موج تنها

که  $\eta$  سطح آزاد موج،  $C$  سرعت موج،  $u$  و  $w$  مولفه افقی و عمودی سرعت ذرات،  $h$  عمق آب،  $H$  ارتفاع موج،  $x$  و  $z$  موقعیت راستای افقی و عمودی،  $t$  زمان هستند.

$$\eta(x, t) = h \left[ \begin{array}{l} \in S^2 - \frac{3}{4} \epsilon^2 S^2 q^2 \\ + \epsilon^3 \left( \frac{5}{8} S^2 q^2 - \frac{101}{58} S^4 q^2 \right) \end{array} \right] \quad (7)$$

$$C = \sqrt{gh} \left( 1 + \epsilon - \frac{1}{20} \epsilon^2 - \frac{3}{70} \epsilon^3 \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$\alpha = \left( \frac{3}{4} \epsilon \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{5}{8} \epsilon + \frac{71}{128} \epsilon^2 \right)$$

$$\in = H/h$$

$$X = x - Ct$$

$$S = \operatorname{sech} \alpha X/h$$

$$q = \tanh \alpha X/h$$

در ادامه در شکل ۲ بین شکل سطح موج شبیه سازی و نتایج تحلیلی با عمق ۲۰ سانتیمتر ( $h=20$ ) و با نسبت ارتفاع موج اولیه به عمق متوسط ۰/۴ ( $H/h=0.4$ )، در ثانیه ۱/۴۱ شبیه سازی، مقایسه صورت گرفته است که تطابق زیادی بین این دو وجود دارد. موقعیت اولیه طولی قله موج در ثانیه صفر در ۱/۲- متر با فرض فشار هیدرواستاتیک است. زمان کل شبیه سازی با ۶ هسته ۲/۲ گیگاهرتز، ۲۶ دقیقه است.

تنها یک سلول بین دو سیال قرار می گیرد و سطح آزاد تنها با یک ردیف سلول مشخص می شود. تعداد تکرار در هر گام زمانی به تعدادی انتخاب می شود که در هر گام زمانی، نمودار باقیمانده ها به مقدار قابل قبولی (یک ده هزارم) برسد. اندازه سلول ها، گام زمانی و تعداد تکرار در هر گام بر یکدیگر تأثیر می گذارند و در هنگام حل لازم است بین آنها تناسب برقرار شود تا شبیه سازی به دقت مطلوب برسد. روش فوق، روشی برای جریان چندفازی با تغییر شکل شدید سطح آزاد است. در این روش در کنار دقت بالای شبیه سازی (از نظر شکل سطح آزاد و نیروهای محاسبه شده)، هزینه محاسباتی به حداقل ممکن می رسد و شبیه سازی چنین جریان هایی، به صرفه، سریع و انجام پذیر در یک رایانه معمولی PC است.

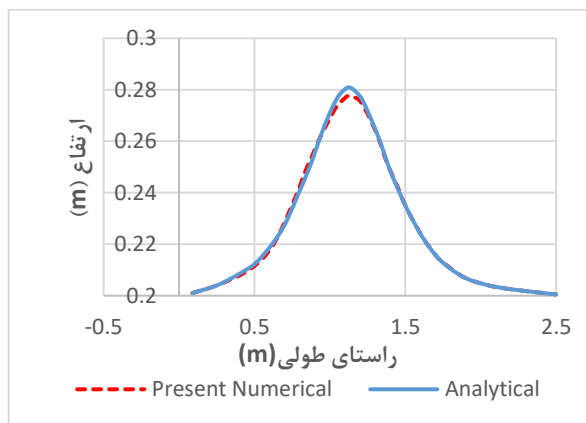
#### ۴-۲- ایجاد موج تنها

برای ایجاد موج در آب کم عمق بخصوص امواج تنها، از مدل موج ساز پیستونی استفاده می شود. لذا جهت اعمال یک موج بلند، به خصوص یک موج تنها به عنوان شرایط اولیه برای موج ساز پیستونی از تئوری گورینگ-بوسینسک استفاده می شود (Goring, 1979). در مدل سازی های عددی حجم محدود، معمولاً روش های موج سازی عبارتند از: الف) جابه جا کردن مرز دیواره. ب) اعمال مستقیم شار بر مرز. در روش اول، با جابه جا کردن مرز دیواره (wall) با استفاده از تابعی که حرکت و سرعت آن را تعیین می کند، موج مورد نظر ایجاد می شود که مانند اتفاقی است که در آزمایشگاه می افتد. در روش دوم، توابع نسبت حجمی سیال و سرعت که خود توابعی از فضا و زمانند، بر روی مرز ورودی اعمال می شوند. این روش به دلایل زیر نسبت به روش اول برتری دارد: الف) نیازی به جابجا کردن شبکه و مرزها نیست. ب) حساسیت به کیفیت شبکه در مرز، کمتر است. ج) امکان شروع شبیه سازی موج در زمان غیر صفر وجود دارد به این معنا که در شرایط اولیه، یک موج اولیه وجود داشته باشد و شبیه سازی از ثانیه  $n$ ام شروع شود.

#### ۴-۳- شبیه سازی موج تنها و اعتبارسنجی

هدف از این اعتبارسنجی، اطمینان از دقت کدنویسی معادلات موج و شبیه سازی آن در نرم افزار استار می باشد تا در ادامه از این موج برای بررسی پدیده شکست، استفاده شود. موج تنها

نشان داده شده است که در آن موج از سمت چپ وارد می‌شود و بر روی شیب ساحل می‌شکند. طول دامنه ۶ متر و ارتفاع دامنه ۰/۵ متر است. در قسمت‌هایی که موج می‌شکند، شبکه‌ی محاسباتی، ریزتر شده است. شکل ۴ شبکه محاسباتی برای شکست موج نشان داده شده است. در مسائل حالت پایا، هنگام حل و پس از همگرایی نسبی، دامنه و شبکه به طور دستی بهبود پیدا می‌کند تا تأثیر هر تغییر مشخص شود. با تغییر دامنه و شبکه، حل جدید با شرایط اولیه حل قبلی انجام می‌شود. همین کار با مدل‌های فیزیکی و روش‌های حل و همگرایی انجام می‌شود. از این رو می‌توان در یک حل، تمامی مطالعات لازم به سرعت انجام شود تا هزینه‌ی زمانی و پردازشی بسیار کاهش یابد. در مسائل ناپایا نیز چنین عملی با کمی احتیاط و دقت بیشتر، امکان پذیر است. هرچند لازم است گذر زمان در تحلیل نتایج در نظر گرفته شوند. به بیان دیگر تغییر در پارامترهای حل (فشار، سرعت، کسر حجمی و ...) در هر زمان و اثرگذاری آنها به نتایج گام‌های زمانی بعد مد نظر قرار گیرد.



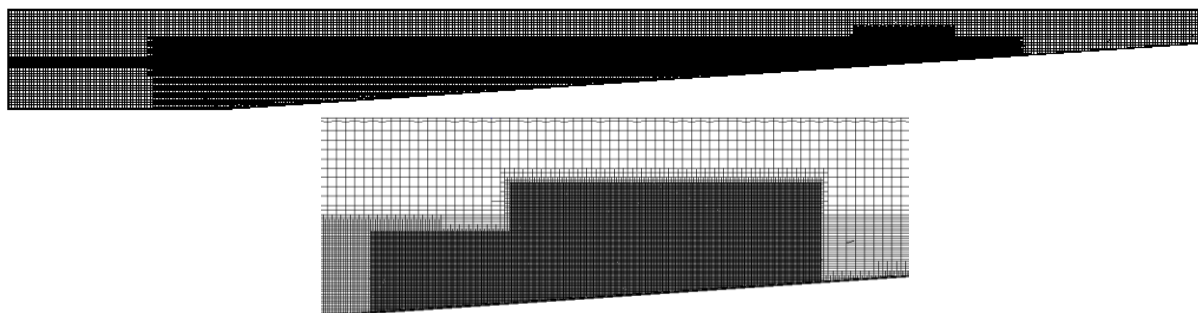
شکل ۲ مقایسه روش عددی و نتایج تحلیلی ایجاد پروفیل سطح موج

#### ۴-۴- شبیه‌سازی شکست موج تنها بر روی ساحل در حالت دو بعدی

در این مسئله، یک موج منفرد از مرز کناره تولید شده، سپس این موج بر روی یک ساحل شیب‌دار با نسبت شیب ۱/۱۵ می‌شکند. روند شکست این موج به همراه آشفتگی جریان در پدیده شکست موج، در این شبیه‌سازی نشان داده می‌شود. دامنه محاسباتی برای این مسئله در شکل ۳



شکل ۳ تانک عددی موج تنها

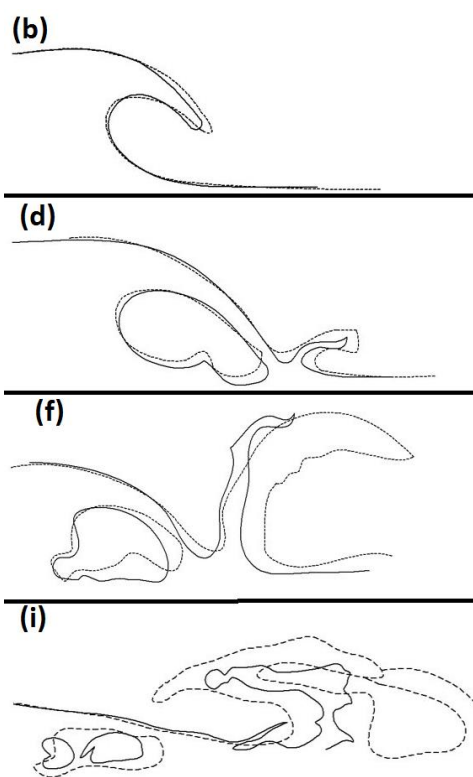


شکل ۴ شبکه محاسباتی برای مسئله شکست موج تنها

ناحیه‌ی شکست در نظر گرفته شده است که به ترتیب دارای ابعاد سلول ۱۰، ۵، ۲/۵ و ۱/۲۵ میلی‌متر هستند. قابل ذکر است که علت تفاوت کم در تعداد کل سلول‌های

برای مطالعه استقلال از شبکه، چهار حالت شبکه بندی با تعداد سلول‌های ۳۳ هزار، ۳۶ هزار، ۴۶ هزار و ۷۰ هزار بترتیب تحت عناوین درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز در

برخورد جت آب به خود آب، پرتاب آب به بالا و حتی آشفستگی پس از شکست وجود دارد. در شکل ۷ در زیر هر شکل آزمایشگاهی، شکل مرتبط با کار عددی آورده شده است. در شکل ۷ همان طور که مشخص است ابتدا موج شروع به شکست می‌کند (شکل a و b). سپس نوک موج به سطح آب برخورد می‌کند (شکل c و d). در اثر برخورد نوک موج به سطح آب، جت آب تشکیل می‌شود (شکل e, f و g) و در نهایت جت آب تشکیل شده، دچار شکست و پخش می‌شود (شکل h و i). زمان شبیه‌سازی در حدود ۵ ثانیه در نظر گرفته شده است.

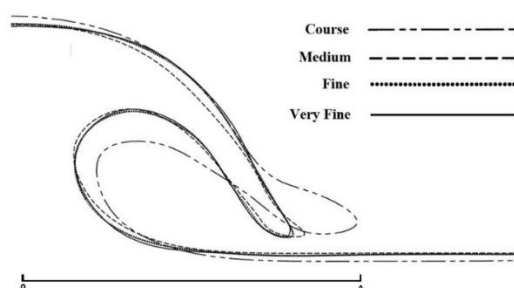


شکل ۶ مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی Lee et al. (1982) در مراحل مختلف شکست موج (— عددی، ---- آزمایشگاهی)

#### ۴-۵- شبیه‌سازی سه بعدی برخورد موج تنها به ستون صلب

هدف از این شبیه‌سازی اعتبارسنجی نیروهای حاصل از برخورد موج به سازه است. این شبیه‌سازی در دو حالت غیرشکست و در حال شکست موج انجام شده است. شرایط مسئله و مقایسه نتایج بر اساس کار آزمایشگاهی Mo et al. (2019) است. کار آزمایشگاهی مربوط به حالت

دامنه محاسباتی، ناشی از اعمال شبکه‌بندی ریزتر به صورت موضعی در ناحیه شکست موج است. در این شبیه‌سازی و بر طبق کار Lee et al. (1982)، نسبت ارتفاع موج اولیه به عمق متوسط برابر  $H/h=0.4$  و عمق متوسط آب  $32/5$  سانتیمتر است. شکل ۵ سطح آب برای چهار حالت شبکه را نشان می‌دهد. بین دو شبکه ریز و خیلی ریز، اختلاف کمی دیده می‌شود. بنابراین شبکه ریز به عنوان مبنای محاسباتی در نظر گرفته می‌شود.

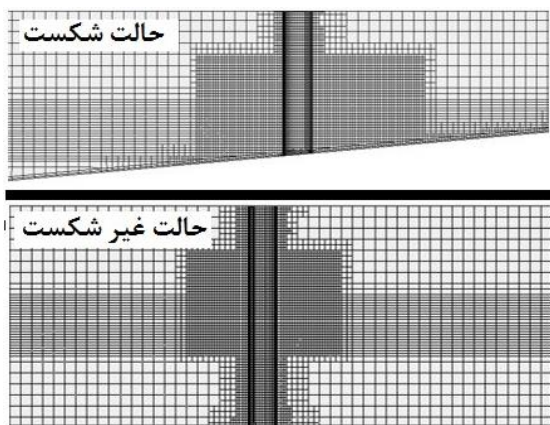


شکل ۵ مقایسه شکل سطح آب برای شبکه‌های درشت (---)، متوسط (— · —)، ریز (·····) و خیلی ریز (—)

در روند پیشروی و شکست موج، برای بالابردن دقت شبیه‌سازی به تدریج در مراحل مختلف، شبکه محاسباتی در سطح آزاد ریزتر می‌شود. به این صورت که شبیه‌سازی در مراحل مختلف متوقف و شبکه محاسباتی به روزرسانی می‌شود و سپس حل ادامه پیدا می‌کند. و همچنین تنظیمات حل و همگرایی، بخصوص اندازه گام زمانی<sup>۱</sup> و تعداد تکرار در هر گام زمانی<sup>۲</sup> تغییر می‌کنند. این روش بهبود شبکه و تغییر تنظیمات بر روی هزینه محاسباتی (توان پردازش و زمان حل) بسیار تأثیرگذار است. در ادامه نتایج این شبیه‌سازی با Lee et al. (1982) از نظر شکل سطح آب در هنگام شکست موج مقایسه کیفی شده است. در شکل ۶ مراحل مهم شکست موج نشان داده شده‌اند. در این شکل مقایسه نتایج عددی سطح آزاد با نتایج آزمایشگاهی انجام شده است. این مقایسه، انطباق خوب بین نتایج عددی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تطابق بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی حاضر، نشان دهنده دقت بالای شبیه‌سازی است. این تطابق در شروع شکست،

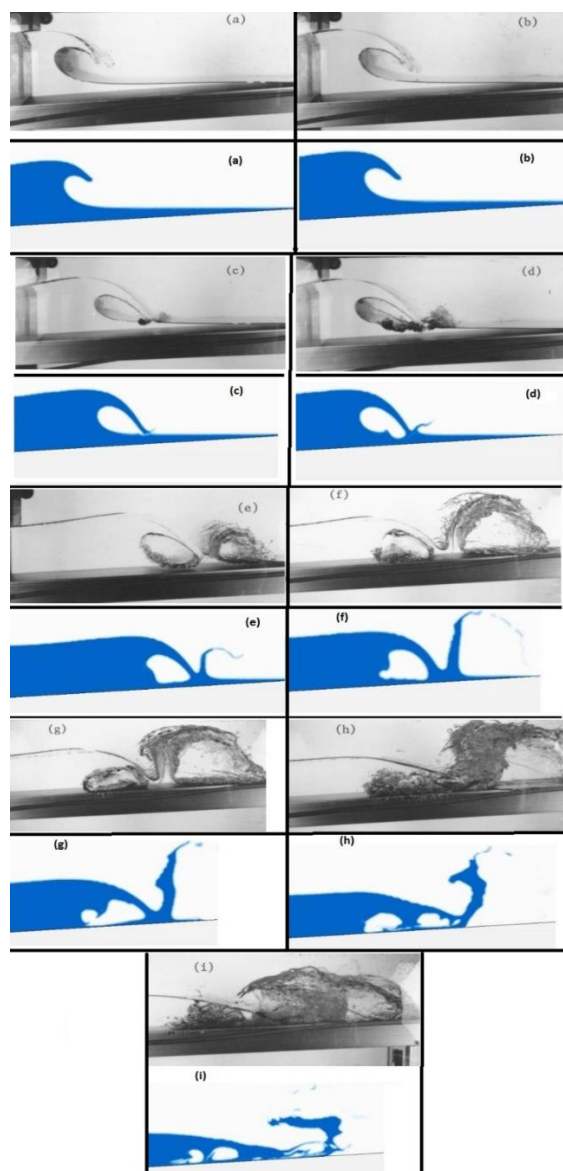
1. Time Step  
2. Inner Iterations

حالت شکست (شکنا) و غیرشکست (ناشکنا)، عمق آب با سطح شیب‌دار تغییر یافته است. برای انجام دو حالت شکست و غیر شکست، دو موقعیت مختلف برای ستون در نظر گرفته شده است. قطر ستون، ۶ سانتیمتر است. در حالت شکست ستون بر روی ساحل قرار گرفته است. در صورتی که در حالت غیر شکست ستون با فاصله از ساحل قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها عمق آب  $20/5$  سانتیمتر و نسبت ارتفاع موج اولیه به عمق متوسط  $H/h=0.4$  است. در مدل‌سازی عددی حاضر تعداد  $400$  هزار سلول در شبکه محاسباتی استفاده شده است. در شکل ۹ شبکه محاسباتی نشان داده شده است. ابعاد دامنه محاسباتی به اندازه ابعاد آزمایشگاهی است. فرآیند حل عددی مانند مساله شبیه‌سازی دوبعدی شکست موج تنها است. با این تفاوت که در اینجا شبیه‌سازی بصورت سه‌بعدی انجام گرفته است. در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نتایج مدل‌سازی عددی برخورد موج تنها در حالت شکست موج و غیر شکست دیده می‌شود. در نمای از بالا، تفرق موج دیده می‌شود.

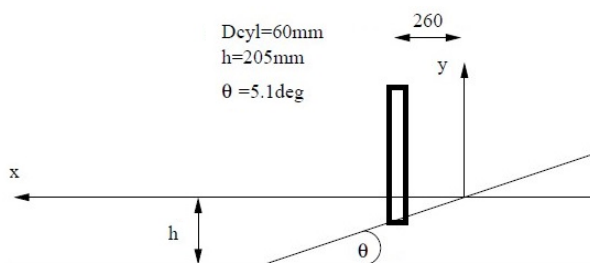


شکل ۹ شبکه‌ی محاسباتی مسئله برخورد موج به ستون صلب

در شکل ۱۲ نیروی افقی وارد بر ستون بر حسب زمان نمایش داده شده است. مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در حالت شکست انجام شده است. این مقایسه بین دو نیروهای محاسبه شده عددی و آزمایشگاهی تطابق نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد. برای مقایسه نیروها در حالت شکست و غیر شکست، مقادیر نیروها در حالت غیر شکست نیز در شکل ۱۳ آورده شده

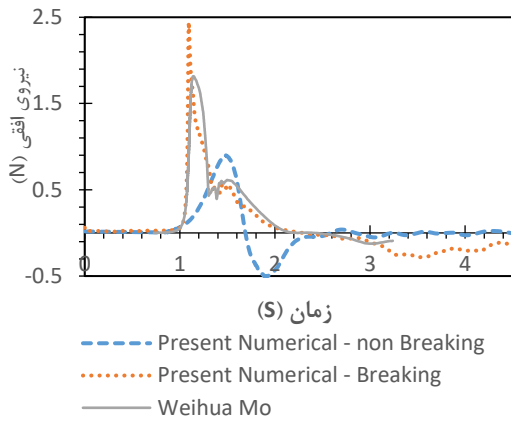


شکل ۷ مراحل شکست موج تنها و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی (Lee et al. (1982)

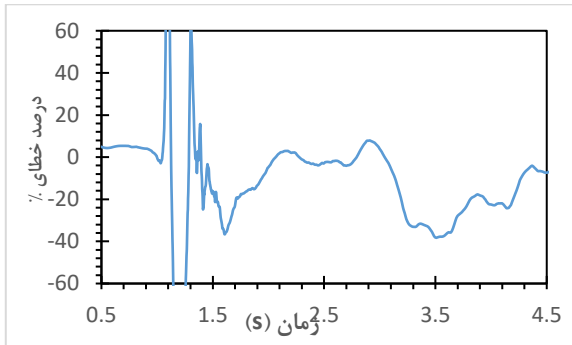


شکل ۸ مشخصات هندسی مسئله برخورد موج به ستون صلب در حالت شکست

شکست است و حالت غیرشکست در شبیه‌سازی به منظور مقایسه با حالت شکست ایجاد گردیده است. برای ایجاد



شکل ۱۲ نیروی وارد بر استوانه بر حسب زمان ناشی از موج و مقایسه بین حالت شکست و غیر شکست موج و Mo et al. (2019)



شکل ۱۳ اختلاف نیروی وارد بر استوانه بر حسب زمان ناشی از موج در حال شکست بین نتایج عددی و تجربی

موج حداکثر نیرو ( $N$ ) زمان اثر نیرو ( $S$ )

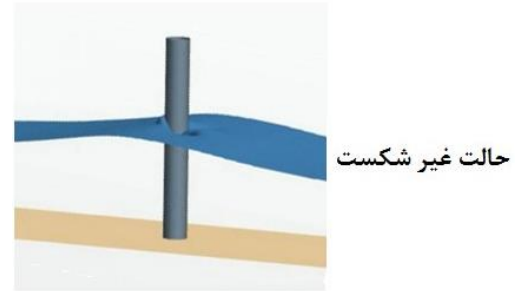
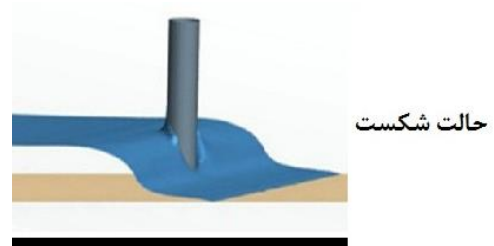
ناشکنا	۰/۸	۲/۴
شکنا	۲/۴	۰/۸

شکل ۱۴ نیروی وارد بر استوانه ناشی از موج و زمان اثر

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا شبیه‌سازی عددی موج تنها و مقایسه آن با حل تحلیلی انجام شده است. استقلال از شبکه برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی مسئله شکست موج تنها بر روی ساحل، انجام شد. نتایج مدل سازی عددی مطابقت خوبی از نظر دقت پیش‌بینی شکست سطح آزاد و روند تغییر آن با نتایج آزمایشگاهی داشتند. به‌طوری‌که این موضوع در مراحل مختلف شکست موج از جمله اختلاط و آشفتگی به خوبی دیده می‌شود. سپس برخورد موج تنها

است. به نظر می‌رسد که اختلاف در حداکثر نیروی لحظه‌ای وارد بر ستون، بین کار حاضر و تست‌آزمایشگاهی



شکل ۱۰: برخورد موج به ستون (نمای کنار)



شکل ۱۱ برخورد موج به ستون (نمای بالا)

بر اثر اختلاف بازه‌های زمانی گزارش‌گیری شده نیروها باشد که در کار حاضر به دلیل اینکه بازه‌ی زمانی کوچکتر است حداکثر نیروی بیشتری دیده می‌شود به بیان دیگر ممکن است در آزمایشگاه حداکثر نیرویی که در شبیه‌سازی محاسبه شده ثبت نشده باشد. حداکثر نیروی وارد بر ستون در حالت شکست تقریباً ۳ برابر حالت غیر شکست محاسبه شده است. در ضمن بازه زمانی از برخورد تا رسیدن به حداکثر نیرو در حالت شکست یک سوم حالت غیر شکست است. در نتیجه، توان برخورد بر واحد متر ( $F/t$ ) در حالت شکست، ۹ برابر حالت غیر شکست است که نتیجه قابل توجهی در مقایسه دو حالت برخورد یک موج محسوب می‌شود.



Colagrossi, A., Landrini M. (2003), Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics, *J. Comput. Phys.* 191 448-75.

Currie, I.G. (2002), *Fundamental mechanics of fluids*. Crc Press.

Dalrymple and Rogers. (2006), Numerical modeling of water waves with the SPH method, *Coastal engineering*, 53: 141-147.

Dean, Robert G., and Robert A. Dalrymple. (1991), *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific Publishing Company.

Goring, D.G. (1979). Tsunamis-the propagation of long waves onto a shelf, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology.

Grilli, S.T., Svendsen, I.A. and R., Subramanya. (1999), Breaking Criterion and Characteristics for Solitary Waves on Slopes, *J. Waterway Port Coastal and Ocean Engng.*, 123(3): 102-112.

Grilli, G. (2006). Numerical study of three-dimensional overturning waves in shallow water, *J. Fluid Mechanics*, 547: 361-388.

Ketabdari, M.J., Nobari, M.R.H., Moradi Larmaei, M. (2008), Simulation of wave's group propagation and breaking in coastal zone using a Naviere Stokes solver with an improved VOF free surface treatment, *Applied Ocean Research* 30(2): 130-143.

Khayyer, A., Gotoh, H., Shao, S.D. (2008), Corrected Incompressible SPH method for accurate water-surface tracking in breaking waves, *Coastal Engineering*. 55: 236-250.

Lee, J.-J., Skjelbreia, J.E., and Raichlen, F. (1982), Measurement of velocities in solitary waves, *J. Waterway Port Coastal & Ocean Div.*, Proc. ASCE, 108(2): 200-218.

Lubin, P., Vincent, S., Caltagirone, J.-P. and Abadie, S. (2003). Fully Three-dimensional Direct Numerical Simulation of Plunging Breaking Waves, *C. R. Mécanique*, 331: 495-501.

Lubin, P., and Glockner, S. (2013). Detailed numerical investigation of the three-dimensional flow structures under breaking waves, Proc. 7th International Conference on Coastal Dynamics Conference.

Mo, W., Jensen, A., and Liu, P.L-F. (2013). Plunging solitary wave and its interaction with a slender cylinder on a sloping beach, *Ocean Engineering* 74: 48-60.

به ستون صلب در دو حالت شکست و غیر شکست انجام شد. در این شبیه‌سازی نیروی وارد بر ستون، محاسبه شده است. نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. مقایسه دو حالت شکست و غیر شکست نشان دهنده این است که توان برخورد بر واحد متر در حالت شکست، ۷.۵ برابر حالت غیر شکست است. این مسئله اهمیت ضربه حاصل از موج در حال شکست به سازه را نشان می‌دهد. به علاوه در این مسئله، تفرق موج نیز در سطح آزاد قابل مشاهده است.

## ۶- فهرست علائم

$\bar{v}$	بردار سرعت (m/s)
$p$	فشار استاتیک (pa)
$\bar{\tau}$	تانسور تنش
$I$	واحد تانسور
$\delta_{ij}$	تابع دلتای کرونگر
$-\rho \overline{u_i' u_j'}$	تابع تنش رینولدز
$\rho$	جرم مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )
$\alpha_i$	کسر حجمی
$\mu$	لزجت دینامیکی (pa-s)
$V$	حجم سلول ( $\text{m}^3$ )
$V_i$	حجم اشغال شده هر سیال ( $\text{m}^3$ )
$F$	تابع حالت سیال
$\eta$	سطح آزاد موج (m)
$C$	سرعت موج (m/s)
$u$	مولفه افقی سرعت ذرات (m/s)
$w$	مولفه عمودی سرعت ذرات (m/s)
$h$	عمق آب (m)
$H$	ارتفاع موج (m)
$x$	موقعیت راستای افقی (m)
$z$	موقعیت راستای عمودی (m)
$t$	زمان (S)
$F_x$	نیروی برخورد افقی (N)

## ۷- مراجع

Brucker, K.A., O'Shea, T.T., Dommermuth, D.G., and Adams, P. (2014). Three-dimensional simulations of deep-water breaking waves, arXiv:1410.1746v1 [physics.flu-dyn].

Shao, S.D., Ji, C., Graham, D.I., Reeve, D.E., James, P.W. and Chadwick, A.J.(2006). Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model, *Coastal Engineering*, 53(9): 723-735.

Yang, C., Huang, F., and Wan, D.-c. (2011). Numerical simulations of highly nonlinear steady and unsteady free surface flows, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 23(6): 683-696.

Monaghan, J. J., Kos, A. and Issa, N. (2003), Fluid motion generated by impact, *J. Waterway Port Coastal Ocean Eng.* 129: 250-259.

Rezae, H., Ketabdari, M.J. (2012), Estimation of Breaking Solitary Wave Pressure on Moored Pontoon Floating Breakwaters Using VOF Method, *J. Civil Engineering*, 21(4): 111-22. (In Persian)

## 3D Numerical modeling of solitary wave impact to structure and plunging wave breaker

Omid Bordbar<sup>1</sup> and Mahmoud Rostami Varnousfaaderani<sup>2\*</sup>

1- MSc, Department of Marine Technology, Mechanics Faculty, MalekAshtar University of Technology

2- Assistant Professor, Department of Marine Technology, Mechanics Faculty, MalekAshtar University of Technology

\* [rostamivf@aut.ac.ir](mailto:rostamivf@aut.ac.ir)

### Abstract

The wave impact is the most important force to the marine structures. Breaking waves makes the most severe forces to the marine structure. Due to the turbulence and strong mixing behavior of the breaking waves, its analysis is difficult and complicated. In the present research, first a solitary wave is numerically modeled, and then the propagating of the solitary wave plunging breaker is simulated on the slope beach. The finite volume method and the two-phase VOF model have been implemented for free-surface modeling. The simulation was performed in an unsteady-state using the k-w SST turbulence model. The governing equations of the wave movement were coded in the model. The shape of the free surface of the water is quantitatively and qualitatively in good agreement with analytical and experimental results. All of the different stages of wave breaking including the beginning, the tip-wave collision to the bed, the jet of water formation and its further breaking, are relatively in good agreement with the experimental data. Three-dimensional simulations of a solitary wave impact to a rigid column have been performed. These simulations were separately implemented for two states of breaking and without wave breaking. The results were validated in terms of impact forces.

**Keywords:** Plunging wave breaker, Solitary wave, Free surface, CFD, Wave impact to structure.