



سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی رانی 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





نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی  
**ICOPMAS 2010**  
 10-8 آذر ماه (تهران)



## مدل سازی عددی هیدرودینامیک امواج ایستا و موج شکن های شیب دار با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار

عباس یگانه بختیاری، استادیار، دانشگاه علم و صنعت ایران، [yeganeh@iust.ac.ir](mailto:yeganeh@iust.ac.ir)،  
 حمید هوشنگی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، [houshanghi@civileng.iust.ac.ir](mailto:houshanghi@civileng.iust.ac.ir)،  
 احسان کاظمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، [kazemi@civileng.iust.ac.ir](mailto:kazemi@civileng.iust.ac.ir)

### چکیده

خصوصیات هیدرودینامیکی جریان های دائمی<sup>1</sup> حاصل از تشکیل امواج ایستا در مقابل سازه های ساحلی نظیر موج شکن های با دیواره ی قائم و شیب دار، از اصلی ترین عوامل آبستگي پای موج شکن ها بوده و ناپایداری و تخریب این سازه ها را در بر دارد. در این میان شناخت ویژگی های هیدرودینامیکی الگوی تشکیل جریان های چرخشی دائمی در مجاورت موج شکن ها، گام موثری در پیش بینی و جلوگیری از اثرات مخرب این پدیده خواهد بود. در این مقاله از یک مدل عددی دو بعدی بدون شبکه بندی بنام هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر<sup>2</sup> برای شبیه سازی تشکیل امواج ایستا در پای یک موج شکن قائم استفاده شده و نتایج مدل عددی با نتایج تحلیلی و همچنین نتایج آزمایشگاهی زنگ و همکاران در سال 2001<sup>3</sup> صحت سنجی و با نتایج عددی یگانه بختیاری و همکاران در سال 2010<sup>4</sup> مقایسه شده است. مقدار خطای ناچیزی که در نتایج صحت سنجی دیده می شود، قدرت روش هیدرودینامیک ذرات هموار در شبیه سازی این مسئله را به خوبی نمایان می سازد. در ادامه با استفاده از مدل صحت سنجی شده، الگوی جریان های دائمی حاصل از تشکیل امواج ایستای کامل و ناقص در مجاورت موج شکن های با شیب دیواره ی مختلف مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای این منظور سه نوع موج شکن با شیب های دیواره ی قائم، 1:2 و 2:1 مورد نظر می باشد.

نتایج مدل سازی تحقیق حاضر حاکی از آن است که در پای موج شکن ها یک سری جریان های دائمی در سل های تکرار شونده ای ایجاد می شود که بسته به مشخصات موج ایستا، عمق آب، ارتفاع و اندازه شیب موج شکن ها، دارای سرعت های چرخشی متفاوتی می باشند و سرعت ذرات آب در جریان های دائمی پای موج شکن با شیب کمتر (2:1) بطور چشمگیری افزایش یافته و جریان دیگری درون سل اصلی جریان ایجاد می شود که آبستگي این ناحیه را تشدید می کند.

**کلید واژه:** امواج ایستا، جریان های دائمی، سل های چرخشی، موج شکن شیب دار و هیدرودینامیک ذرات هموار.

### مقدمه

وقتی که موجی با مشخصات معلوم اولیه به یک موج شکن برخورد نماید، موج برخورد نموده بر اساس ضریب انعکاس موج شکن با همه یا بخشی از انرژی اولیه خود به سمت دریا باز می گردد. اثر توام موج برخوردی<sup>5</sup> و موج برگشتی<sup>6</sup> موجب تشکیل امواج ایستای کامل<sup>7</sup> یا امواج ایستای ناقص<sup>8</sup> می شود. درجه شیب موج شکن یکی از موثرترین پارامترهای تاثیرگذار بر مقدار ضریب انعکاس موج شکن می باشد و مشخصات

<sup>1</sup> Steady streaming

<sup>2</sup> Compressible Smoothed Particle Hydrodynamic (CSPH)

<sup>3</sup> Zhang et al; 2001

<sup>4</sup> Yeganeh-Bakhtiary et al; 2010

<sup>5</sup> Incident Waves

<sup>6</sup> Reflected Waves

<sup>7</sup> Fully standing waves

<sup>8</sup> Partially standing waves

هیدرودینامیکی این امواج اعم از کامل یا ناقص بودن آنها به مقدار این ضریب بستگی دارد. برای اولین بار کارتر و همکاران در سال 1973<sup>9</sup> در یک مطالعه تجربی و عددی، شکل (1) چگونگی تشکیل امواج ایستای کامل را در مقابل موج شکن قائم نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود در اثر تشکیل امواج ایستا در مقابل موج شکن قائم یک سری سل‌های جریان چرخشی دائمی کف و بالا که در فواصل  $L/4$  از پای موج شکن تکرار می‌شوند، بوجود می‌آیند. جهت جریان سیال در سل‌های چرخشی نیز در هر نقطه‌ی گرهی و غیرگرهی که در شکل دیده می‌شود، تغییر می‌یابند [1]. زنگ و همکاران در سال 2001<sup>10</sup> بر اساس مطالعات آزمایشگاهی بر روی خصوصیات هیدرودینامیکی امواج ایستای کامل و ناقص دریافتند که بیشینه‌ی سرعت افقی ذرات آب در حالتی که امواج ایستا به صورت ناقص ایجاد می‌شوند اندکی کمتر از حالتی است که امواج ایستا به طور کامل تولید می‌شوند [2]. سومر و فردسو در سال 2000<sup>11</sup> نیز آبنشستگی در پای موج شکن‌های مایل را بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها نیز آبنشستگی در پای موج شکن‌های مایل را همانند موج شکن‌های کیسونی به تشکیل جریان‌های دائمی مربوط دانسته‌اند [3]. مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی دیگری نیز در این زمینه صورت گرفته است که با توجه به پیچیدگی بالای مسئله و هزینه و زمان بر بودن مطالعات آزمایشگاهی، محققان برای درک و شناخت رفتار پیچیده‌ی این پدیده از روش‌هایی مانند شبیه‌سازی عددی بهره می‌گیرند.

گیسلسون و همکاران در سال 2000<sup>12</sup> از یک مدل نایر-استوکس<sup>13</sup> دو بعدی برای شبیه‌سازی الگوی ایجاد امواج ایستا در پای موج شکن قائم بهره جستند. آنها با متوسط‌گیری در دوره تناوب کامل موج، توانستند در چند نقطه از مدل سرعت جریان‌های دائمی پدید آمده را اندازه‌گیری کنند ولی نتایج بیشتری از آنها ارائه نگردید [4]. یگانه بختیاری و همکاران در سال 2010 یک مدل عددی بر اساس متوسط رینولدز معادلات نایر-استوکس<sup>14</sup> برای شبیه‌سازی امواج ایستا در جلوی موج شکن قائم ارائه دادند و پی‌گردی سطح آزاد موج را با تکنیکی به نام حجم سیال<sup>15</sup> مدل نموده و نتایج قابل قبولی را بدست آوردند. آنها برای صحت سنجی نتایج عددی از نتایج آزمایشگاهی زیه در سال 1981<sup>16</sup> استفاده نمودند [5]. در تکنیک‌هایی مانند حجم سیال معادلات نایر-استوکس در یک شبکه ثابت اولبری حل می‌شوند و در شرایطی که سطح آزاد با تغییرات بزرگی همراه باشد شاهد پخش عددی بالایی در معادلات نایر-استوکس خواهیم بود. این در حالیست که در روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای شبیه‌سازی عددی از هیچگونه شبکه‌ای استفاده نمی‌گردد و به راحتی می‌توان دیدگاه لاگرانژی را در حل مسائل در نظر گرفت. یگانه بختیاری و همکاران در سال 2009 یک مدل عددی دو بعدی مبتنی بر روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم-پذیر برای شبیه‌سازی امواج ایستا در پای یک موج شکن کیسونی استفاده نموده و برای صحت سنجی نتایج عددی از نتایج تجربی و تحلیلی استفاده نمودند. آنها با دقت بالایی سرعت بیشینه جریان‌های چرخشی پای موج شکن را اندازه گرفتند. پیگردی سطح آزاد موج در مدل آنها با نتایج تحلیلی خطی تطابق بسیار خوبی نشان داد. همچنین آنها توانستند فشار هیدرودینامیکی وارد بر موج شکن را اندازه‌گیری نمایند [6].

هیدرودینامیک ذرات هموار یک روش کاملاً لاگرانژی است و برای اولین بار توسط موناگان و همکاران<sup>17</sup> برای مسائل اختر فیزیک ابداع شد و سپس توسط موناگان در مدل‌سازی مسائل هیدرودینامیکی گسترش یافت [7]. در شبیه‌سازی جریان‌های تراکم ناپذیر<sup>18</sup> توسط روش هیدرودینامیک ذرات هموار، تراکم ناپذیری با استفاده از معادله حالت<sup>19</sup> تحقق می‌یابد به طوری که سیال کمی تراکم پذیر<sup>20</sup> در نظر گرفته می‌شود و این روش به هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر موسوم است [8]. در این مقاله از این روش برای شبیه‌سازی تشکیل امواج ایستا در مقابل یک موج شکن قائم استفاده می‌شود و نتایج مدل عددی با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی صحت سنجی و ارائه می‌گردد. در ادامه با استفاده از مدل صحت سنجی شده، الگوی جریان‌های دائمی حاصل از تشکیل امواج ایستای کامل و ناقص در مجاورت موج شکن‌های با شیب دیواره‌ی مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور سه نوع موج شکن با شیب‌های دیواره‌ی قائم، 1:2 و 2:1 مورد نظر می‌باشد.

## معادلات حاکم بر حرکت سیال

معادلات حاکم بر حرکت سیال معادلات بقاء جرم و ممتوم می‌باشند که به فرم لاگرانژی در روابط (1) و (2) نوشته می‌شوند.

<sup>9</sup> Carter, Liu and Mei, 1973

<sup>10</sup> Zhang et al. 2001

<sup>11</sup> Sumer and Ferdsoe. 2000

<sup>12</sup> Gislason et al. 2000

<sup>13</sup> Navier-Stokes model

<sup>14</sup> Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation (RANS)

<sup>15</sup> Volume Of Fluid (VOF)

<sup>16</sup> Xie, 1981

<sup>17</sup> Monaghan, Lucy, Gingold, 1977

<sup>18</sup> Incompressible

<sup>19</sup> State equation

<sup>20</sup> Compressible

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (2)$$

در معادلات قبل  $\rho [ML^{-3}]$  چگالی،  $\bar{\mathbf{u}} [LT^{-1}]$  بردار سرعت،  $P [MT^{-2}L^{-1}]$  فشار،  $\vec{\tau} [ML^{-1}T^{-2}]$  تانسور تنش برشی،  $\bar{\mathbf{g}}$  شتاب ثقل و  $t$  زمان است. با توجه به فرمولاسیون روش SPH، معادلات پیوستگی و ممتوم (ناویر-استوکس) به فرم روابط (3) و (4) گسسته سازی می-شوند.

$$\left( \frac{D\rho}{Dt} \right)_a = \sum_b m_b (\bar{\mathbf{u}}_a - \bar{\mathbf{u}}_b) \cdot \bar{\nabla}_a W_{ab} \quad (3)$$

$$\left( \frac{D\bar{\mathbf{u}}}{Dt} \right)_a = -\sum_b \left( \frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) \cdot \bar{\nabla}_a W_{ab} \quad (4)$$

در روابطه فوق  $w$  تابع درونیاب کرنل و  $h$  طول هموار<sup>21</sup> ذره  $a$  و اندیس  $b$  مربوط به ذرات مجاور ذره  $a$  می باشد و سری های فوق بر روی تمامی ذرات همسایه ذره  $a$  جمع می شوند [8].  $\Pi_{ab}$  یک نمونه لزجت مصنوعی<sup>22</sup> است و برای جلوگیری از نفوذ غیر فیزیکی ذرات در یکدیگر و کاهش پخش عددی در ترم های انتقال معادلات ناویر-استوکس به کار می رود و به صورت زیر تعریف می شود [7].

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha_{\Pi} \bar{c}_{ab} \phi_{ab} + \beta_{\Pi} \phi_{ab}^2}{\bar{\rho}_{ab}}, & u_{ab} \cdot r_{ab} < 0 \\ 0, & u_{ab} \cdot r_{ab} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

که در رابطه‌ی فوق

$$h_{ab} = \frac{h_a + h_b}{2}, \quad \bar{\rho}_{ab} = \frac{\rho_a + \rho_b}{2}, \quad \phi_{ab} = \frac{h_{ab} \cdot u_{ab} \cdot r_{ab}}{|r_{ab}|^2 + \varphi^2}, \quad \bar{c}_{ab} = \frac{c_a + c_b}{2} \quad (6)$$

$$r_{ab} = r_a - r_b, \quad u_{ab} = u_a - u_b \quad (7)$$

$\alpha_{\Pi}$  و  $\beta_{\Pi}$  مقادیر ثابت می باشند که در این تحقیق  $\alpha_{\Pi} = 0.01$  و  $\beta_{\Pi} = 0$  در نظر گرفته شده است. مقدار  $\varphi$  برای جلوگیری از صفر شدن مخرج بکار می رود و معمولاً برابر  $0.1h_{ab}$  در نظر گرفته می شود.  $c$ ،  $u$  و  $r$  نیز به ترتیب سرعت صوت، بردار سرعت و بردار مکان ذره‌ی مورد نظر می‌باشند. اساس روش هیدرودینامیک ذرات هموار بر تئوری درونیابی بنا نهاده شده است. در این تحقیق از تابع درونیاب (کرنل) ماریچچ درجه 3<sup>23</sup> که توسط موناگان و لاتانزیو<sup>24</sup> به صورت رابطه (8) ارائه گردیده است، استفاده می‌شود.

$$\begin{cases} W(r, h) = \frac{10}{7\pi h^2} \left( 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 \right) & q < 1 \\ W(r, h) = \frac{10}{28\pi h^2} (2 - q)^3 & 1 < q < 2 \\ W(r, h) = 0 & q > 2 \end{cases} \quad (8)$$

که در آن  $q = \frac{r}{h}$  و  $r$  فاصله بین ذرات و  $h$  طول هموار که شعاع تاثیر یک ذره بر ذرات مجاورش می‌باشد [7]. در روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر، سیال کمی تراکم پذیر در نظر گرفته می شود و حرکت ذرات بوسیله گرادیان فشار ذرات توسط معادله حالت به فرم زیر صورت می گیرد.

<sup>21</sup> Smooth lenght  
<sup>22</sup> Artificial viscosity  
<sup>23</sup> Cubic spline  
<sup>24</sup> Monaghan and Lattanzio

$$p = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (9)$$

که  $\gamma = 7$ ،  $p$  فشار نسبی و  $B$  پارامتر ثابت و  $\rho_0$  نیز دانسیته در فشار اتمسفر می باشد [9]. مقدار  $B$  از رابطه  $B = \rho_0 c_s^2 / \gamma$  که  $c_s = (10 \sim 40)v$  و  $v$  سرعت بیشینه سیال است، محاسبه می شود. در این تحقیق  $c_s = 12v$  و  $v = \sqrt{g(d+h)}$  می باشد که در آن  $v$  سرعت موج،  $h$  ارتفاع موج و  $d$  عمق آب می باشد. در بیشتر مسائل هیدرودینامیکی، تعیین شرایط مرزی از اهمیت بالایی برخوردار است. اکثر شرایط مرزی در هیدرودینامیک ذرات هموار شامل ذراتی است که به ذرات سیال نیرو وارد می کند. شکل کلی و معمولی این نوع نیرو، نیروی لنارد جونز<sup>۲۵</sup> می باشد که در رابطه‌ی (10) آمده است.

$$f(r) = D \begin{cases} \left[ \left( \frac{r_0}{r_{ab}} \right)^{n1} - \left( \frac{r_0}{r_{ab}} \right)^{n2} \right] \left[ \frac{\bar{r}_{ab}}{r_{ab}^2} \right], & \left( \frac{r_0}{r_{ab}} \right) \leq 1 \\ 0, & \left( \frac{r_0}{r_{ab}} \right) > 1 \end{cases} \quad (10)$$

که  $r_0$  فاصله اولیه بین ذرات و  $D$  پارامتر وابسته مسئله که بعد آن برابر بعد بیشترین سرعت به توان دو است [7]. در این تحقیق  $D = g(d+h)$  در نظر گرفته شده است. حرکت ذرات در هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر، توسط تکنیک XSPH به صورت زیر انجام می گیرد.

$$\left( \frac{dr}{dt} \right)_a = u_a + \varepsilon \sum_b \frac{m_b}{\rho_{ab}} (u_b - u_a) W_{ab} \quad (11)$$

که  $\varepsilon$  مقداری ثابت بوده و در این تحقیق  $\varepsilon = 0.5$  در نظر گرفته شده است [8]. در مقاله‌ی حاضر از الگوریتم پیش‌بینی-تصحیح<sup>۲۶</sup> برای حل معادلات ناویر استوکس استفاده می شود. چنانچه معادلات (3)، (4) و (11) را در نظر بگیریم، می توان آنها را به فرم خلاصه زیر بازنویسی نمود.

$$\begin{cases} \left( \frac{D\rho}{Dt} \right)_a = D_a \\ \left( \frac{Du}{Dt} \right)_a = F_a \\ \left( \frac{Dr}{Dt} \right)_a = U_a \end{cases} \quad (12)$$

$U_a$  مربوط به ترم تصحیح بردار سرعت ذره  $a$  در تکنیک XSPH می باشد. چنانچه روند حل از گام زمانی  $n$  آغاز گردد در اینصورت در گام زمانی  $n + 1/2$  خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \rho_a^{n+1/2} = \rho_a^n + \frac{\Delta t}{2} D_a^n \\ u_a^{n+1/2} = u_a^n + \frac{\Delta t}{2} F_a^n \\ r_a^{n+1/2} = r_a^n + \frac{\Delta t}{2} U_a^n \end{cases} \quad (13)$$

$$p_a^{n+1/2} = B \left[ \left( \frac{\rho_a^{n+1/2}}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (14)$$

<sup>25</sup> Lenard\_Jones

<sup>26</sup> Predictor-Corrector



با استفاده از مقادیر بدست آمده در این مرحله، مقادیر سرعت، چگالی و مکان ذره  $a$  به صورت رابطه‌ی (15) اصلاح می‌گردد.

$$\begin{cases} \rho_a^{n+\frac{1}{2}} = \rho_a^n + \frac{\Delta t}{2} D_a^{n+\frac{1}{2}} \\ u_a^{n+\frac{1}{2}} = u_a^n + \frac{\Delta t}{2} F_a^{n+\frac{1}{2}} \\ r_a^{n+\frac{1}{2}} = r_a^n + \frac{\Delta t}{2} U_a^{n+\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (15)$$

و در نهایت پس از طی زمان  $\Delta t$  و در پایان گام زمانی  $(n+1)$  ام و استفاده از مقادیر اصلاحی خواهیم داشت.

$$\begin{cases} \rho_a^{n+1} = 2\rho_a^{n+\frac{1}{2}} - \rho_a^n \\ u_a^{n+1} = 2u_a^{n+\frac{1}{2}} - u_a^n \\ r_a^{n+1} = 2r_a^{n+\frac{1}{2}} - r_a^n \end{cases} \quad (16)$$

$$P_a^{n+1} = B \left[ \left( \frac{\rho_a^{n+1}}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (17)$$

در شبیه‌سازی به روش SPH میدان فشار ذرات نوسانات بزرگی را نشان می‌دهد، برای فائق آمدن بر این مشکل از فیلتر شپرد<sup>27</sup> که بر روی چگالی ذرات اعمال می‌شود استفاده می‌گردد. این ترم در هر 30 گام زمانی به فرم رابطه (18) یکبار بر روی میدان چگالی ذرات اعمال می‌شود.

(18)

$$\begin{cases} \rho_a^{new} = \sum_b m_b \bar{W}_{ab} \\ \bar{W}_{ab} = \frac{W_{ab}}{\sum_b W_{ab} \frac{m_b}{\rho_b}} \end{cases}$$

### صحت سنجی مدل

برای تعیین دقت مدلسازی از مقایسه نتایج عددی حاصل با نتایج تحلیلی، نتایج آزمایشگاهی زنگ و همکاران در سال 2001 و نتایج عددی یگانه بختیاری و همکاران در سال 2010 استفاده می‌کنیم. در صورتیکه امواج برخوردی از تئوری موج خطی پیروی کنند و موج شکن نیز امواج را به صورت 100٪ منعکس کند، پروفیل سطح امواج ایستا از رابطه زیر بدست می‌آید [1].

(19)

$$\eta(x,t) = \frac{2H}{2} \cos(kx) \cos(\omega t)$$

که در رابط فوق  $\omega = 2\pi/T$ ،  $k = 2\pi/L$ ،  $T$  پریود موج،  $L$  طول موج،  $H$  ارتفاع موج برخوردی و  $h$  عمق آب در سیستم متریک می‌باشند. مقدار  $2H$  برابر ارتفاع موج ایستای ناشی از برخورد موج با موج شکن که دو برابر ارتفاع موج برخوردی است، می‌باشد [9]. شکل (2) مدل‌هایی که زنگ و همکاران در سال 2001 به صورت آزمایشگاهی مدل نمودند نشان می‌دهد. آنها چندین موج را مطابق جدول (1) با مشخصات مختلف ایجاد نمودند و بیشینه سرعت افقی اربیتالی ذرات آب را اندازه گیری کردند. در این تحقیق برای صحت سنجی و تعیین دقت مدل، از مشخصات موج حالت اول در جدول (1) برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. همانطور که در جدول (1) مشاهده می‌گردد، برای شبیه‌سازی، موجی با ارتفاع 0/09 متر، پریود 1/4 ثانیه و طول موج 2/7 متر مد نظر است. با توجه به شکل (2) عمق اولیه آب 0/65 متر، طول حوزه‌ی شبیه‌سازی 5/4 متر، ارتفاع موج شکن 0/75 متر می‌باشد و همچنین در این مدل روگذری آب مد نظر نمی‌باشد.

در این شبیه‌سازی فاصله اولیه بین ذرات 0/02 متر انتخاب شده و تعداد کل ذرات سیال 8910 ذره و ذرات مرزی دیواره و مولد موج 2438 ذره می‌باشد. برای تولید موجی با مشخصات مورد نظر با توجه به شکل (2) از یک مولد موج که یک سر آن در پای بستر لولا گردیده و یک

طرف دیگر می‌تواند آزادانه با حرکات رفت و برگشتی موجب تشکیل موج گردد، استفاده می‌شود. مشخصات موج مورد نظر با محدودی در جهت رفت و برگشتی مولد موج در ارتباط است. بنابراین می‌توان موج مورد نظر را با توجه به این رابطه در مدل ایجاد نمود. جنس ذرات مولد موج نیز از نوع ذرات مرزی دیواره می‌باشد. برای صحت سنجی نتایج شبیه سازی، پروفیل موج شبیه سازی شده با پروفیل بدست آمده از رابطه‌ی تحلیلی (19) مقایسه می‌گردد که در شکل (4) برای زمان‌های  $t = 1.4 \text{ sec}$  و  $t = 0.7 \text{ sec}$  ترسیم شده است. با منطبق نمودن این دو نمودار بر روی هم می‌توان نقاط گره‌ی و غیر گره‌ی که در نتایج کارتر و همکاران توسط شکل (1) اشاره شد، در شکل (5) نیز به خوبی مشاهده نمود. همچنین در جدول (2) بیشینه‌ی سرعت افقی اربیتالی ذرات آب در اولین گره از پای موج‌شکن و در عمق 40 سانتیمتری از مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی زنگ و همکاران در سال 2001 و نتایج عددی یگانه بختیاری و همکاران در سال 2010 مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار خطای پایین در شبیه‌سازی عددی گویای قابلیت بالای روش SPH در حل این مسئله می‌باشد.

### معرفی مدل در تحقیق حاضر

جهت بررسی تاثیر شیب موج‌شکن بر مشخصات هیدرودینامیکی امواج ایستا سه مدل عددی دوبعدی در شبیه‌سازی ارائه می‌شود که شامل سه نوع موج‌شکن با شیب‌های قائم 90 درجه، 63.43 درجه (1:2) و 26.56 درجه (2:1) می‌باشد. در همه این شبیه‌سازیها مشخصات موج برخوردی و عمق اولیه آب یکسان در نظر گرفته شده است. در جدول (3) مشخصات هر سه مدل آمده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود هر سه مدل دارای دوره تناوب موج 2.41 ثانیه، طول موج 4 متر، ارتفاع موج 0.06 متر و عمق اولیه آب 0.3 متر می‌باشند که در شکل (6) به صورت شماتیکی نشان داده شده است. فاصله بین ذرات در سه مدل فوق 0.01 متر و مدت زمان اجرای شبیه‌سازی نیز 19.28 ثانیه که 8 برابر یک پریود کامل موج است در نظر گرفته شد. با اجرای کد نوشته شده برای شبیه‌سازی، موج تشکیل شده بعد از برخورد به دیواره موج-شکن منعکس شده و با برخورد موج تولیدی دیگر موج ایستا در دومین پریود موج تشکیل گردید. در حالت تشکیل موج ایستای ناقص نیز همین رویه روی داد. برای بررسی تاثیر شیب موج‌شکن بر رفتار هیدرودینامیکی موج ایستا، الگوی تشکیل جریان‌های دائمی در پای موج‌شکن، برای هر سه مدل با استفاده از یک متوسط گیری زمانی و مکانی بر روی بردار سرعت اربیتالی ذرات سیال در یک پریود کامل موج بعد از تشکیل موج ایستا، مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (7) جریان‌های دائمی حاصل از تشکیل امواج ایستا را در پای موج‌شکن برای هر سه مدل نشان می‌دهد. در این شکل سل‌های چرخشی ساعتگرد و پادساعتگرد جریان‌های دائمی در هر سه مدل به چشم می‌خورند. همانگونه که ملاحظه می‌شود در نحوه تشکیل سل‌ها در مدل شماره 1 و 2 تفاوت چندانی دیده نمی‌شود و جریان‌های دائمی در هر دو مدل به طور منظم و یکدست تشکیل می‌گردند. در صورتیکه این وضعیت در مدل شماره (3) کمی پیچیده‌تر به نظر می‌آید. با ملاحظه بزرگی بردار سرعت جریان در پای سه مدل حاضر می‌توان دریافت که سرعت جریان‌های دائمی در مدل سوم به مراتب بیشتر از دو مدل دیگر است.

در پای موج‌شکن مدل شماره (3) الگوی تشکیل سل‌های چرخشی با پیچیدگی محسوسی روبرو است. این پیچیدگی در شکل شماره (8) با مقیاس بزرگتری نمایش داده شده است. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌گردد یک سل چرخشی مضاعف درون سل چرخشی اصلی تشکیل می‌گردد که در دو حالت دیگر مشاهده نمی‌شود که این موضوع بر روی آبشستگی دیواره‌ی موج‌شکن تاثیر مضاعفی دارد. این وضعیت تصدیق‌کننده اظهارات سومر و فردسو در رابطه با پدیده آبشستگی در پای موج‌شکن شیبدار است. آنها در سال 2000 به طور آزمایشگاهی بر روی پدیده آبشستگی در پای موج‌شکن سنگریزه‌ای شیب دار مطالعه کردند و نتایج شان را با نتایج زیه در سال 1981 مقایسه نمودند. آنها دریافتند اگرچه تاثیر رفتار پدیده تشکیل جریان‌های دائمی بر روی آبشستگی در پای موج‌شکن قائم و شیبدار مشابهت دارد اما آبشستگی بر روی موج‌شکن قائم صفر بوده و بر روی موج‌شکن شیبدار مقداری غیر صفر می‌باشد. همچنین عمق آبشستگی در پای موج‌شکن شیبدار حدود 25% کمتر از عمق آبشستگی در پای موج‌شکن قائم است. آنها دریافتند که تفاوت‌هایی در الگو و قدرت جریان‌های دائمی در پای موج‌شکن‌های قائم و شیبدار وجود دارد که با روش‌های آزمایشگاهی تعیین این تفاوت‌ها قابل بررسی نیست. برای مطالعه بیشتر بیشینه سرعت افقی ذرات آب در هر سه مدل در فاصله بین پای موج‌شکن و اولین گره از پای موج‌شکن مقایسه گردید. شکل (9) سرعت ذرات آب در فاصله 0.06 متر از کف بستر برای سه مدل نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌شود که سرعت بیشینه افقی ذرات آب در پای موج‌شکن در مدل (3) نسبت به دو مدل دیگر بیشتر است. در حالی که با دور شدن از پای موج‌شکن این وضعیت تغییر می‌کند و بیشینه سرعت افقی ذرات برای مدل موج‌شکن قائم در نقطه گره‌ی بیشتر می‌شود که در نتیجه باعث افزایش عمق آبشستگی در پای موج‌شکن قائم می‌شود. این در حالی است که در دو مدل (1) و (2) مقادیر این سرعت‌ها تفاوت چندانی ندارند.

### نتیجه گیری

در این مقاله از یک مدل عددی دو بعدی مبتنی بر روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر CSPH که معادلات ممنتوم و پیوستگی دینامیک سیالات را با یک سری معادلات ذره‌ای تقریب می‌زند، برای شبیه‌سازی و مطالعه تاثیر شیب موج‌شکن‌ها بر روی رفتار هیدرودینامیکی امواج ایستا در مقابل این سازه‌ها استفاده گردید. برای پیگردی هرچه بهتر سطح موج فیلتری به نام فیلتر شپرد که در هر 30 گام زمانی یک بار

بر روی میدان چگالی ذرات سیال اعمال می‌گردید به کار گرفته شد. برای تولید موج از مولد موجی که به پای بستر لولا شده در پای درگاه رفت و برگشتی در انتهای دیگرش بود استفاده گردید. در این تحقیق ابتدا مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی زنگ و همکاران در سال 2001، نتایج بدست آمده از روابط تحلیلی و نتایج عددی ارائه شده توسط یگانه و همکاران در سال 2010 صحت سنجی شد و مشاهده گردید که روش هیدرودینامیک ذرات هموار دارای قابلیت و انعطاف‌پذیری بالایی در شبیه‌سازی و حل مسائلی از این قبیل می‌باشد. سپس سه مدل عددی با مشخصات موج اولیه و عمق آب یکسان و موج‌شکن‌هایی با شیب قائم، شیب 1:2 و شیب 2:1 برای مطالعه و بررسی تاثیر شیب موج شکن بر روی رفتار هیدرودینامیکی امواج ایستای تولید شده مورد شبیه‌سازی و مطالعه قرار گرفت. از نتایج عددی بدست آمده می‌توان چنین استنباط نمود که در موج‌شکن با شیب 2:1 بر خلاف دو موج‌شکن دیگر یک سل چرخشی مضاعف درون سل چرخشی اصلی در پای موج شکن ایجاد می‌شود که باعث تشدید آبشستگی بر روی این موج‌شکن می‌گردد. مقدار سرعت اربیتالی ذرات آب برای دو مدل با موج شکن قائم و شیب 1:2 تقریباً یکسان، ولی این مقدار در مدل دیگر متفاوت بود به این صورت که مقدار سرعت اربیتالی ذرات آب در پای موج شکن شیبدار با شیب 2:1 بیشتر از موج‌شکن قائم بود و این وضعیت با دور شدن از پای دو موج‌شکن تا اولین گره از پای موج‌شکن تغییر می‌کرد و سرعت اربیتالی ذرات آب برای موج‌شکن قائم و موج‌شکن با شیب 1:2 بیشتر می‌شد.

جدول 1: مشخصات مدل‌های زنگ و همکاران در سال 2001

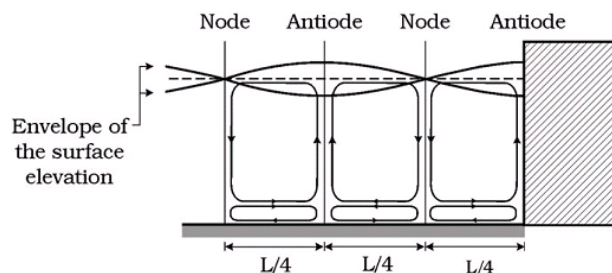
Test No.	T (s)	L (m)	H (m)	d (m)	Hwall (m)	Overtopping
1	1.4	2.7	0.09	0.65	0.75	No
2	1.4	2.7	0.12	0.65	0.75	Yes
3	1.4	2.7	0.15	0.65	0.75	Yes
4	1.4	2.7	0.18	0.65	0.75	Yes

جدول 2: صحت سنجی نتایج در مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی و عددی

Methods	T (sec)	L (m)	H (m)	d (m)	Hwall (m)	U (m/s)	Error (%)
Experimental (Zhang et al, 2001)	1.4	2.7	0.09	0.65	0.75	0.37	
Numerical (Yeganeh-Bakhtiary et al, 2010)	1.4	2.7	0.09	0.65	0.75	0.38	2.71
CSPH	1.4	2.7	0.09	0.65	0.75	0.3651	1.32

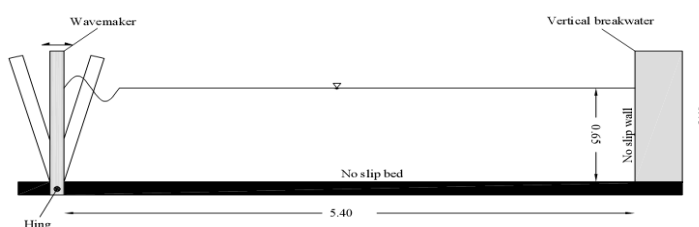
جدول 3: مشخصات مدل‌های مورد مطالعه در این تحقیق

Test	T (s)	L (m)	H (m)	d (m)	Breakwater	Angle
1	2.41	4.0	0.06	0.3	Vertical	90
2	2.41	4.0	0.06	0.3	1:2	63.43
3	2.41	4.0	0.06	0.3	2:1	26.56

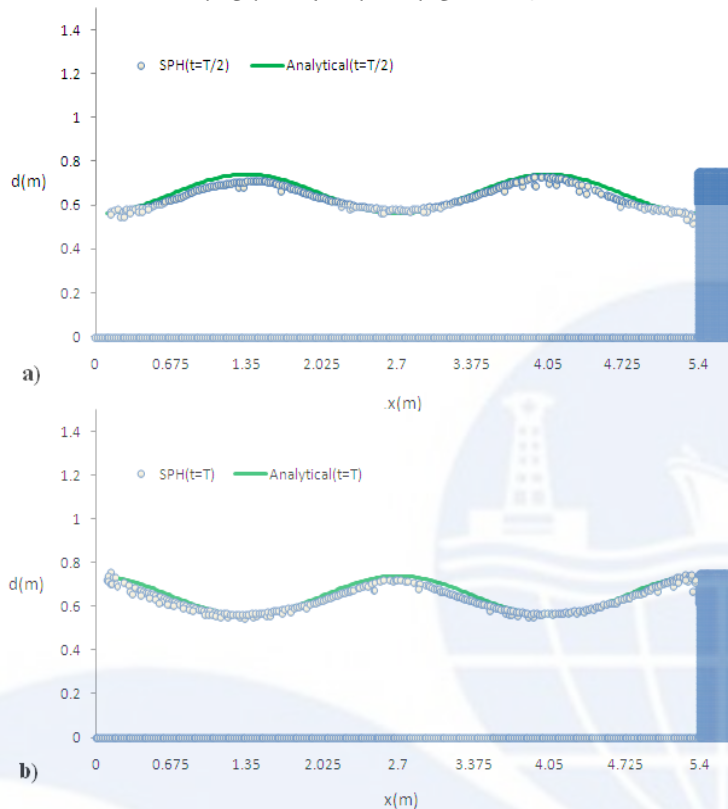


شکل 1: نحوه تشکیل جریان‌های دائمی و سل‌های چرخشی در مقابل موج‌شکن با دیوار قائم (کارتر و همکاران، 1976)

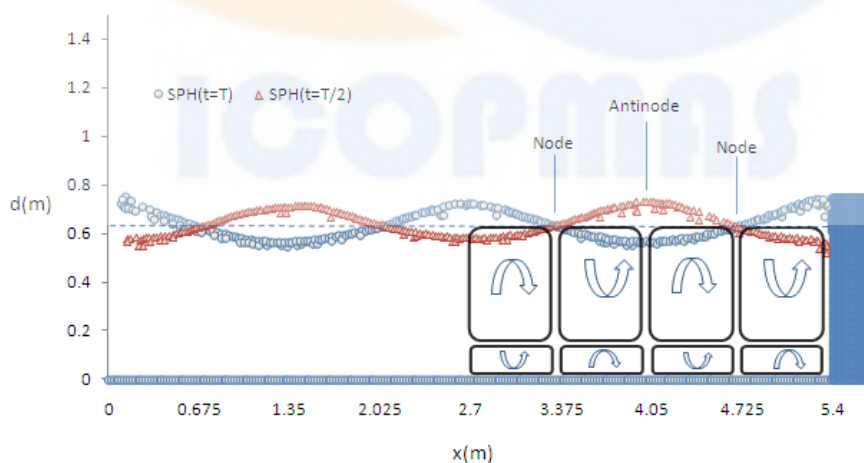




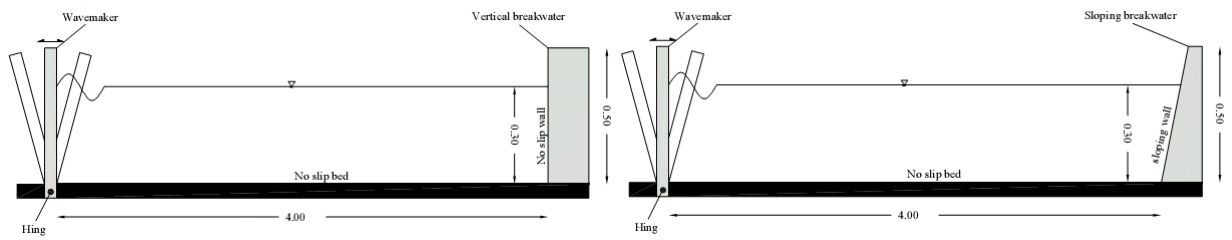
شکل 2: نمای شماتیکی از مدل زنگ و همکاران در سال 2001



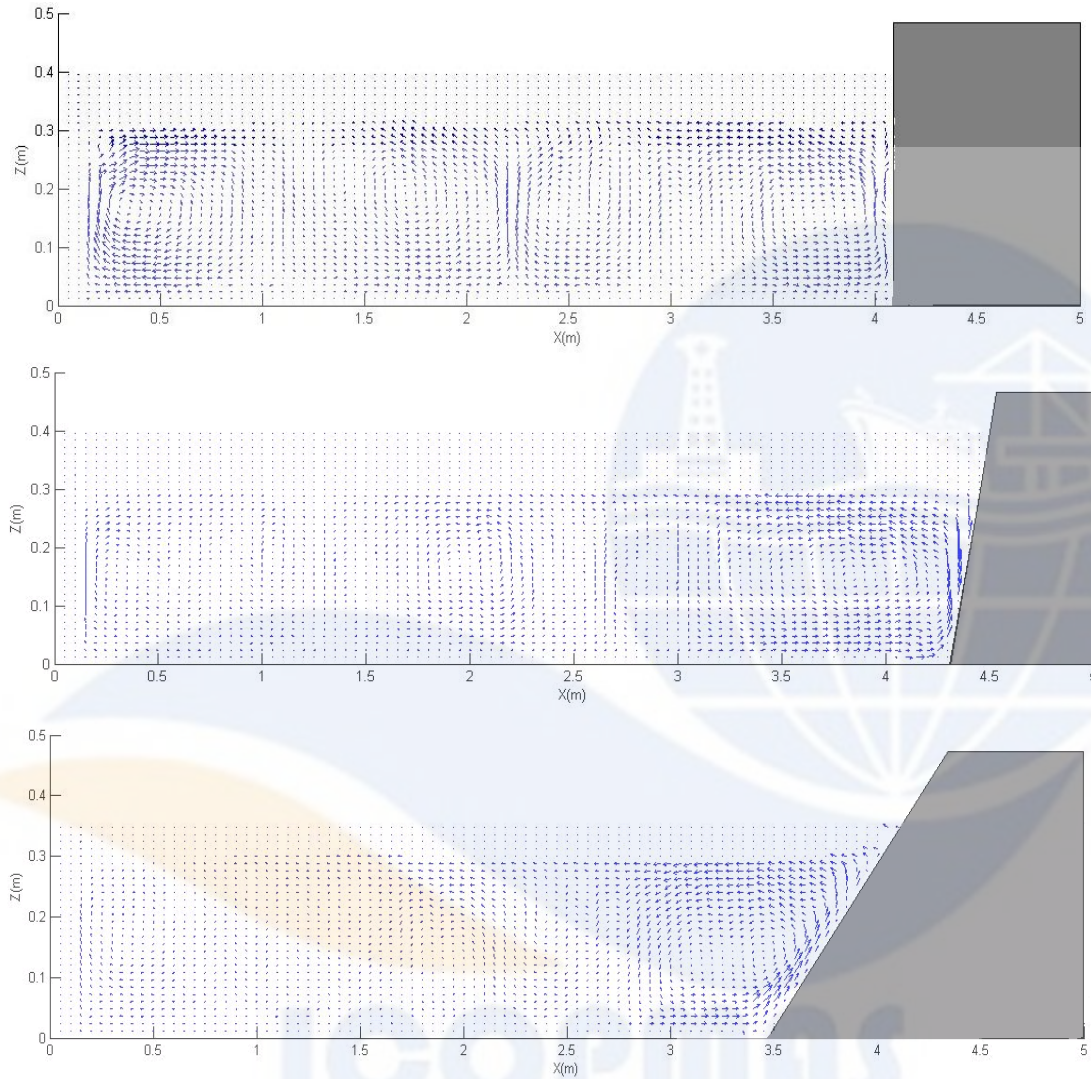
شکل 4: مقایسه پروفیل سطح آزاد موج ایستا در روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر (CSPH) با روش تحلیلی برای زمان های  $t = 1.4\text{sec}$  (b) و  $t = 0.7\text{sec}$  (a)



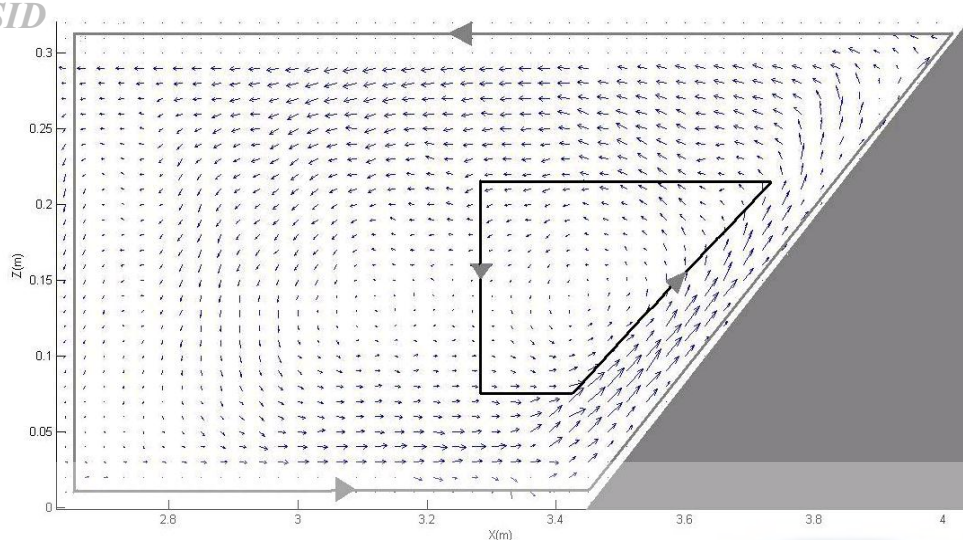
شکل 5: نمایش نقاط گرهی و غیر گرهی و سل های چرخشی در مدل صحت سنجی



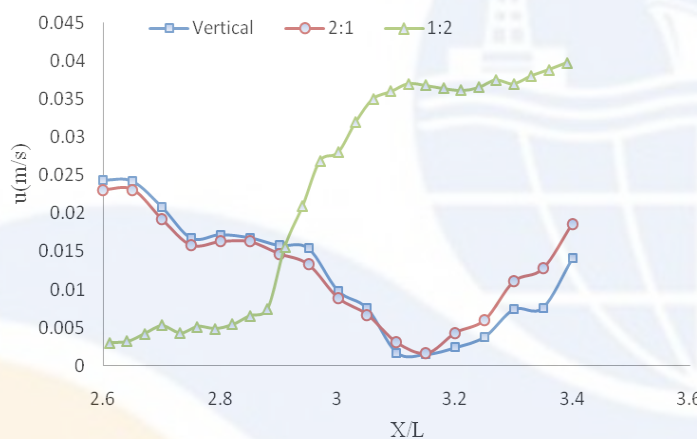
شکل 6: نمای شماتیکی از مدل‌های مورد نظر در این تحقیق



شکل 7: نحوه تشکیل جریان‌های دائمی در پای موج‌شکن‌ها



شکل 8: نمایش جریان‌های دائمی در پای مدل شماره 3 با شیب 2:1



شکل 9: مقایسه تغییرات سرعت اریتمالی ذرات آب در پای موج‌شکن‌ها

مراجع

- [1] Carter, T.G, Liu, L.F.P. and Mei, C.C. (1973). Mass transport by waves and offshore sand bed forms. Journal of Waterway Harbors and Coastal Engineering, ASCE, Vol. 99, No. WW2, pp. 165-184.
- [2] Zhang S, Cornett A, Li Y. 2001; Experimental study of kinematics and dynamical characteristics of standing waves. In: Proceeding 29th IAHR conference.
- [3] Sumer, B.M., Ferdsoe, J., 2000. Excremental Study of 2D Scour and its Protection at a rubble-mound breakwater, Coastal Engineering. 40(1), 59-78.
- [4] Gislason, K., Fredsøe, J., Mayer, S., Sumer, B.M., 2000. The mathematical modeling of the scour in front of the toe of a rubble-mound breakwater. Summary. ICCE2000 Sydney, July 2000.
- [5] Yeganeh-Bakhtiary, A., Hajivalie, F. and Hashemi Javan, A. (2010). Steady streaming and flow turbulence in front of vertical breakwater with wave overtopping, Applied Ocean Research. 10.1016/j.apor.2010.03.002, in press
- [6] Yeganeh-Bakhtiary, A., Houshangi, H., Kazemi, E., 2009 "Numerical Study of Hydrodynamic Characteristics of Standing Waves Near Caisson Breakwaters by Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics (CSPH)", 11th marine industries conference (MIC), Paper No. 182

- Archive of SID
- [7] Monaghan, J.J. (1992). Smoothed particle hydrodynamics, *Anu. Rev. Astron. Astrophysics.* 30 543–574.
- [8] D.A.Jones, D.Belton, (2006); "Smoothed Particle Hydrodynamics: "Applications with DSTO", Defense Science and Technology Organization,
- [9] Dean and Dalrymple, "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", 1984.

