شبیهسازی عددی اندرکنش موج با یک واحد نیروگاهی ستون نوسان گر آب در فضای دوبعدی قائم

حمیدرضا صاحبالزمانی^۱*، مسعود منتظری نمین^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازههای دریایی، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکدههای فنی، دانشگاه تهران؛ hsahebzamani@ut.ac.ir ^۲استادیار، گروه سازههای دریایی، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکدههای فنی، دانشگاه تهران؛ mnamin@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیدہ
<i>ناریخچه مقاله:</i> تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۱۳ تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۸	مدلی عددی برای شبیهسازی اندرکنش موج و ستون نوسان گر آب در فضای دوبعدی قائم به زبان فرترن ارائه شده است. معادلات حاکم، معادلات ناویراستوکس هستند. سطح آزاد آب در مدل دوبعدی با استفاده از روش حجم سیال حل شده است. همچنین در این مدل، برای جذب امواج انعکاس یافته، از یک دیوار متخلخل با تخلخل متغیر در ابتدای کانال استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای حل معادله
<i>کلمات کلیدی:</i> دستگاه ستون نوسانگر آب اندرکنش موج روش حجم سیال	پواسون از یک روش ضمنی بدون نیاز به تکرار استفاده شده است. برای تعیین فشار و تراز آب درون دستگاه ستون نوسانگر آب از یک روش تکراری استفاده شده است. با حصول اطمینان از صحت عملکرد مدل، اندرکنش موج و دستگاه ستون نوسانگر آب شبیهسازی شده و با دادههای آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. سپس اثر امواج منظم مختلف و همچنین اثر میزان بازشدگی بر راندمان دستگاه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عددی و آزمایشگاهی همخوانی مناسبی داشتند.

Numerical Simulation of Wave Interaction with One Oscillating Water Column in Two Dimensional Vertical Plane

Hamidreza Sahebalzamani^{1*}, Masoud Montazeri Namin²

^{1*} Msc. Student, School of Civil Engineering, University College of Engineering, University of Tehran; hsahebzamani@ut.ac.ir ²Assistant professor, School of Civil Engineering, University College of Engineering, University of Tehran; manamin@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History: Received: 29 Dec. 2013 Accepted: 23 Jan. 2014 Available online: 19 Mar. 2014

Keywords: Oscillating Water Column Wave interaction Volume of fluid method

ABSTRACT

A numerical model has been introduced to simulate wave interaction with oscillating water column (OWC) in two dimensional vertical plane. Two-dimensional Navier-stokes equations have been used. To track free surface, Volume of fluid method has been employed. Also a porous wall is situated at the beginning of the canal to absorb the reflected waves. It's valuable to mention that the Poisson equation has been solved using an implicit non-iterative method. In order to calculate pressure and water elevation inside OWC, an iterative method has been used. After model verification, the interaction of wave and OWC has been simulated. The effect of different wave conditions and also the immersion depth of the OWC's front wall have been investigated. The numerical results were consistent with available experimental results.

۱ – مقدمه

مصارف کنونی انرژی جهانی دارای مشکلات زیست محیطی متعددی بوده و منابع فعلی تأمین آن پایان پذیرند. روزانه حجم عظیمی از سوختهای سنگوارهای مانند زغال سنگ، نفت و گاز سوزانده میشوند که پسماندهای احتراقی تولید شده، باعث افزایش انتشار دیاکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن می گردند. توجه جدی به چنین چشم اندازهای ناخوشایند و فراملیتی موجب گشته است که طی سالهای اخیر، لزوم کاهش میزان استفاده و جایگزینی سوختهای سنگوارهای با منابع جدید انرژی با تأکید بیشتری مطرح گردد. از جمله این منابع میتوان به انرژی امواج دریا اشاره کرد. روشهای مختلفی برای بهرهبرداری از این منبع عظیم انرژی وجود دارد که واحد نیروگاهی ستون نوسان گر آب⁴ یکی از آنهاست.

هندسهی عمومی در طرحهای مختلف واحدهای نیروگاهی ستون نوسانگر آب عبارت است از محفظهای با دو انتهای باز که به صورت ایستا در معرض امواج قرار می گیرد. سطح آزاد آب، حجم داخلی استوانه را به دو ناحیه تقسیم میکند، به گونهای که هر دو ناحیه تنها در یک انتهای خود دارای بازشدگی میباشند. به این ترتیب حجم اصلی محفظه همزمان محل نوسان دو ستون نوسانگر سیال (آب و هوا) خواهد بود. وضعیت نصب سازه به شکلی است که مقطع بازشدگی تحتانی (با ابعاد به مراتب بزرگتر) در معرض میدان امواج قرار داشته و در نتیجه در هنگام کار دستگاه، سطح آب داخل محفظه متأثر از تلاطم خارجی موج، به نوسان در می آید. در اثر این حرکت رفت و بازگشتی سطح آب داخل محفظه، حجم ناحیهی فوقانی (مرز ستون نوسانگر هوا) به صورت متناوب تغییر نموده و متناسب با دو مشخصهی سرعت نوسان سطح آب و افت مقطع فوقانی خروج هوا، فشار نسبی ستون هوا در این ناحیه، به صورت ضربانی حول مقدار فشار سطح آزاد آب (فشار هوای داخل محفظه در حالت غیر برانگیخته) نوسان مینماید. بازشدگی تعبیه شده در انتهای ناحیه فوقانی، جریان تحت فشار هوای داخل محفظه را به سمت یک توربین هوایی هدایت میسازد. طراحی این توربین به این صورت است که بر اثر هر دو جهت نوسان سیال (رفت یا برگشت)، در یک جهت می چرخد. حاصل این فرایند، انتقال انرژی تراکمی جریان هوای خروجی به محور یک مولد الکتریکی و در نهايت توليد الكتريسيته خواهد بود.

تلاشهای متعددی برای بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی مشخصات هیدوردینامیکی OWC انجام شده است. انجام نخستین مطالعات موضوعی در زمینه ستونهای نوسان گر آب، به عنوان دستگاهی برای جذب انرژی از امواج، به مطالعات انجام شده توسط ایوانس باز می گردد[1]. این مطالعات بر اساس تئوری جسم صلب انجام شده است به این معنا که حرکت سطح آزاد سیال درون OWC مانند

یک پیستون صلب بیوزن در نظر گرفته شده است. نکته اصلی این است که هرگونه تغییر شکل در سطح آزاد آب در اثر فشار سطحی نادیده گرفته شده است. در ادامه تحقیقات، ایوانس و پرتر در سال ۱۹۹۵، جهت بهبود تئوری جسم صلب از یک مدل توزیع فشار برای به دست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی ستون نوسانگر آب استفاده کردند[۲]. مدل توزیع فشار مطلوبتر از مدل قبلی است زیرا با فیزیک پدیده هم خوانی بیشتری دارد و مدل دقیق تری را ارائه میدهد. وانگ و همکاران، برای بررسی عملکرد هیدرودینامیکی ستون نوسانگر آب، یک مدل عددی با استفاده از روش اجزاء محدود و بر اساس تئوری خطی موج ارائه کردند[۳]. آنها نشان دادند هنگامی که فرکانس تشدید رخ میدهد خواص غیر خطی موج افزایش مییابد و نتایج مدل ریاضی و آزمایشگاهی فاصله می گیرند. در سال ۲۰۰۷، موریس و همکارانش به صورت تجربی تاثیر پارامترهای هندسی دستگاه ستون نوسانگر آب را مورد بررسی قرار دادند [۴]. آبخور دیوار جلویی، ضخامت و شکل دریچه ديوار جلويي مغروق پارامترهاي اصلي تحقيق بودند. وي و همکارانش به این نتیجه رسیدند که افزایش آبخور دیوار جلویی باعث كاهش بازده هيدروديناميكي در امواج كوتاه ميشود. اين نتیجه در مورد افزایش ضخامت دیواره جلویی تکرار می شود. همچنین دریچه دایرهای عملکرد بهتری نسبت به دریچه مستطیلی دارد. در سال ۲۰۱۲ یک مدل عددی دو فازه با تصحیح جرمی^۲ و روش مرزی غوطهور ۲ برای شبیهسازی اندر کنش موج با یک مخزن نيمه مغروق توسط ژانگ و همكارانش به دست آمد [۵]. اين مدل می تواند میزان نوسان آب داخل محفظه را به دست آورد. راندمان هیدرودینامیکی که توسط مدل عددی به دست آمده، نزدیکی بیشتری به نتایج آزمایشگاهی موریس، نسبت به نتایج تئوری تحليلی خطی ايوانس دارد. آنها علت تطابق بيشتر نتايجشان با مدل آزمایشگاهی نسبت به مدل تحلیلی را اتلاف انرژی در دهانه و جریانات گردایی کناره دیواره دانستند.

در مدل عددی حاضر سعی شده است تا با رویکردی نوین، مدلی سادهتر و کمهزینهتر در فضای دوبعدی قائم ارائه شود تا بتوان با استفاده از آن مشخصات هیدوردینامیکی دستگاه ستون نوسانگر آب را مورد بررسی قرار داد.

۲- مدل عددی ۲-۱ معادلات اساسی حاکم

معادلات حاکم بر جریان دو بعدی قائم، با انتگرال گیری از معادلات ناویر- استوکس در عرض واحد به دست میآید و شکل بقایی این معادلات به صورت زیر بیان میشود:

 $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial (u^2)}{\partial x} + \frac{\partial (uw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial (w^2)}{\partial z} + \frac{\partial (uw)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{xx} \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{xz} \frac{\partial w}{\partial z} \right) - g$$
(7)

در این روابط u و w، به ترتیب سرعتهای افقی و قائم، P فشار، چگالی آب، v ضریب آشفتگی و g شتاب گرانش است. شبکه hoبه کار رفته در مدل، شبکه منظم با ساختار جابهجا شده در مختصات كارتزين است.

در این مدل عددی، برای منقطعسازی معادلات از روش حجم محدود و برای حل آنها از روش تفکیک زمانی^۵ استفاده شده است. معادلات ناویر - استوکس با استفاده از روش تفکیک زمانی در دو گام حل می شوند. در گام اول قسمت انتقالی معادلات اندازه حرکت (شامل ترمهای جابهجایی و پخش) حل شده و مقادیر میانی برای سرعتهای افقی (u) و قائم (w) به دست می آید. در گام دوم با تلفيق بخش باقىمانده معادلات اندازه حركت با معادله پيوستگى و به کار گرفتن سرعتهای میانی، معادلهای بر حسب فشار موسوم به معادله پواسون به دست میآید. با حل این معادله، مقادیر فشار در گام زمانی جدید محاسبه میشوند و در نهایت مقادیر نهایی مولفههای سرعت با استفاده از مقادیر جدید فشار به دست مي آيند [۶]. معادله جابه جايي تابع حجم سيال (VOF) با استفاده از سرعتهای جدید و تکنیک مربوطه حل می شود و مقادیر تابع در گام زمانی جدید محاسبه می شود. به این ترتیب حرکت Fسطح آزاد آب دنبال می شود. از روش یانگ برای حل معادله حجم سیال استفاده شده است.

۲-۲- شبکهبندی

شبکه به کار رفته در مدل، شبکه منظم با ساختار جابهجا شده در n_x مختصات کارتزین است. فضای محاسباتی در راستای افق به سلول با فواصل مساوی Δx و در راستای قائم به n_k سلول با فواصل مساوی Δz تقسیم شده است. فضای محاسباتی در شکل ۱ نشان داده شده است.



۲-۳- روش حل در گام اول، بر اساس روش تفکیک زمانی، ترم فشار از معادلات مومنتوم حذف می شود و ترمهای جابه جایی و پخش برای سرعت ها حل می شود. این گام در دو مرحله انجام می شود. در مرحله اول، معادله انتقال برای سرعتهای افقی در هر دو جهت افق و قائم حل می شوند و سرعتهای افقی میانی محاسبه می شوند و سپس محاسبات مربوط به سرعتهای قائم میانی انجام میشود. برای حل معادلات جابهجایی از روش صریح Fromm و برای معادلات پخش از روش غیرصریح کرنک نیکلسون استفاده شده است [۷]. سرعتهای میانی که در این گام محاسبه میشوند، معادله پیوستگی را ارضا نمی کنند. بنابراین معادله پیوستگی همزمان با معادلات مومنتوم بدون ترمهای انتقال و پخش، حل می شوند. حل همزمان معادله پیوستگی و معادلات مومنتوم، معادله پواسون را مطابق معادله (۴) به دست می دهد.

$$\frac{\Delta t}{\rho\Delta x^{2}} \left\{ \psi \left[2P_{i,k}^{n+1} - P_{i-1,k}^{n+1} - P_{i-1,k}^{n+1} \right] \right\} + \frac{\Delta t}{\rho\Delta z^{2}} \left\{ \psi (2P_{i,k}^{n+1} - P_{i,k-1}^{n+1} - P_{i,k-1}^{n+1}) \right\} \\
= \frac{(w_{i,k}^{**} - g\Delta t) - (w_{i,k+1}^{**} - g\Delta t)}{\Delta z} + \frac{u_{i,k}^{**} - u_{i+1,k}^{**}}{\Delta x} - (f) \\
\frac{\Delta t (1 - \psi)}{\rho\Delta x^{2}} \cdot \left[2P_{i,k}^{n} - P_{i+1,k}^{n} - P_{i-1,k}^{n} \right) \right] \\
- \frac{\Delta t (1 - \psi)}{\rho\Delta z^{2}} \cdot (2P_{i,k}^{n} - P_{i,k+1}^{n} - P_{i,k-1}^{n})$$

معادله پواسون برای هر سلول، به شکل رابطه (۵) مرتب می شود:

$$a_{i,k}P_{i-1,k}^{*n+1} + b_{i,k}P_{i+1,k}^{*n+1} + c_{i,k}P_{i,k}^{*n+1} + d_{i,k}P_{i,k-1}^{*n+1} + e_{i,k}P_{i,k+1}^{*n+1} = f_{i,k}$$
 (Δ)

اگر مقدار فشار معلوم باشد، نیازی به حل معادله پواسون نبوده و مقدار فشار سلول برابر مقدار فشار معلوم می گردد:

$$P_{i,k} = P_0 \tag{(7)}$$

در سطح آزاد آب، فشار معلوم فرض می شود. با فرض فشار هیدروستاتیک و با استفاده از مقدار تابع VOF در هر سلول مقدار فشار در مرکز سلول از رابطه (۷) محاسبه می شود.

$$P = ds.\rho g \tag{(Y)}$$

فاصله مرکز سلول تا سطح آب در همان سلول است. اگر سطح dsآب از مرکز سلول بالاتر باشد، مقدار ds مثبت و در غیر این صورت منفی است. g شتاب ثقل و ho چگالی آب است.

DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.8.2

 $\rho\Delta z^2$

۲-۳-۲- مدل کردن دستگاه ستون نوسانگر آب در فضای دوبعدی قائم

$$dqv = -dq.\Delta t / area \tag{(A)}$$

dqv میزان تغییر تراز آب درون *OWC*، *pb* دبی عبوری از بازشدگی دستگاه و *area* سطح مقطع دستگاه است. علامت منفی *i*شان دهنده آن است که اگر دبی در حال وارد شدن به *OWC* نشان دهنده آن است که اگر دبی در حال وارد شدن به *i* و *OWC* باشد، تراز آب بالا رفته و در نتیجه حجم هوا کاهش می یابد. در گام ول فرض می شود که اطاقک *OWC* کاملا بسته است و تغییرات فشار ناشی از تغییرات تراز آب درون *OWC* محاسبه می شود. اگر هوا به عنوان گاز ایده آل در نظر گرفته شود، رابطه زیر برای آن برقرار است:

$$PV = nRT \tag{9}$$

که در این رابطه P فشار مطلق گاز، V حجم گاز، n مقدار گاز به مول و T دمای مطلق گاز است. n ثابت گازهاست و مقدار آن برابر $J/_{K.mol}$ ۸/۳۱۴ است. اگر شرایط به گونهای باشد که مقدار nRT ثابت باشد، رابطه زیر بین فشار و حجم در شرایط اولیه با فشار و حجم در شرایط ثانویه برقرار است.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \tag{(1.)}$$

با ورود یا خروج جریان تراز آب درون OWC بالا یا پایین میرود و در نتیجه حجم هوای درون اطاقک کاهش یا افزایش مییابد. با توجه به رابطه فوق با کاهش حجم هوا، فشار آن افزایش مییابد و بالعکس. با استفاده از رابطه فوق اختلاف فشار ایجاد شده به صورت زیر تعریف میشود.

$$dP = P_1 - P_{\text{tank}} = P_1 \cdot (\frac{V_0}{V_1} - 1)$$
(11)

 $P_{\text{tank}} = V_0$ فشار و حجم اولیه هوا درون اطاقک و $P_1 = V_0$ فشار و P_{tank} OWC حجم هوای درون اطاقک پس از تغییرات تراز آب درون OWC قابل هستند. V_1 با استفاده از دبی عبوری از ورودی OWC قابل محاسبه است. حجم هوای درون OWC به صورت $h \times area$ قابل محاسبه است. صلح مقطع ثابت و لذا قابل حذف است. میزان تغییر $n_1 = h_{\text{tank}} + dqv$ با رابطه (۸) محاسبه شده است، بنابراین $n_1 = h_{\text{tank}} + dqv$ است. با این ترتیب رابطه اختلاف فشار ایجاد شده به صورت زیر قابل استفاده این.

$$dp = -P_{\text{tank}} dqv / (h_{\text{tank}} + dqv)$$
(1)

فشار جدید برابر است با:

$$P_{1} = P_{\text{tank}} + dp \tag{17}$$

OWC در گام دوم تغییر فشار در اثر خروج هوا از محل توربین OWC مورد نظر قرار می گیرد. بین تغییرات چگالی و فشار در اثر تغییرات k' میک رابطه خطی به صورت $P = k'\rho$ فرض می شود. k' خرم ضریبی است که با توجه به دما قابل تعیین است. از طرفی نرخ جرم خروجی از دریچه بالای OWC با فشار درون اطاقک متناسب است.

$$\frac{dm}{dt} = e.(P - P_{air}) \tag{11}$$

$$ho=P/k'$$
و $m=
ho V$ و $m=
ho$ و $m=
ho$ $m=
ho$ و $m=
ho$ p

$$\frac{dm}{dt} = \frac{V}{k} \frac{\partial P}{\partial t} = e.(P - P_{air})$$
(1 Δ)

معادله حاكم عبارتست از:

$$P^{n+1} = P^n - \frac{\Delta t \, \dot{k} \cdot e}{V} \overline{P} \tag{19}$$

اگر رابطه (۱۶) مورد استفاده قرار گیرد، مقدار اصلاح شده فشار از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$P_{2} = P_{1} - 0.5 \times \Delta t.rk.e.(P_{1} + P_{tank} - 2.P_{air}) / h_{tank}$$
(1V)

OWC فشار در تمامی سلولهای بالای سطح آزاد درون اطاقک OWC برابر فشار معلوم P_2 قرار داده می شوند. معادله پواسون حل شده، مقادیر جدید فشار استخراج می شوند. سپس سرعتهای جدید محاسبه می شوند و حلقه تکرار وارد تکرار بعدی می شود. دبی عبوری با استفاده از سرعتهای جدید تجدید می شود و مراحل فوق تکرار می شوند. معمولا پس از چند تکرار مقادیر فشار همگرا می شوند و حلقه تکرار به پایان می رسد. سپس معادله VOF با

$$\begin{aligned} a_{i,j} &= -xcoef_{i,j} \frac{\psi \Delta t \gamma}{\lambda \Delta x^{2}} \\ b_{i,j} &= -xcoef_{i+1,j} \frac{\psi \Delta t \gamma}{\lambda \Delta x^{2}} \\ c_{i,j} &= -(a_{i,j} + b_{i,j} + d_{i,j} + e_{i,j}) \\ d_{i,j} &= -zcoef_{i,j} \frac{\psi \Delta t \gamma}{\lambda \Delta z^{2}} \\ e_{i,j} &= -zcoef_{i,j+1} \frac{\psi \Delta t \gamma}{\lambda \Delta z^{2}} \\ f_{i,j} &= \frac{wcoef_{i,j}(w_{i,j}^{**} - (\gamma g \Delta t / \lambda)) - wcoef_{i,j+1}(w_{i,j+1}^{**} - (\gamma g \Delta t / \lambda)))}{\Delta z} \\ &+ \frac{ucoef_{i,j}u_{i,j}^{**} - ucoef_{i+1,j}u_{i+1,j}^{**}}{\Delta x} + \frac{\Delta t}{\lambda \Delta x} (Rx_{i+1,j} - Rx_{i,j}) \\ &+ \frac{\Delta t}{\lambda \Delta z} (Rz_{i,j+1} - Rz_{i,j}) \end{aligned}$$

۲-۳-۳- حل عددی معادله پواسون

با نوشتن رابطه (۵) برای تمام سلولها، یک دسته از معادلات به دست میآید که در آنها فشار در گام زمانی بعد مجهول است.



و يا به عبارتي:

$$\overline{A_{i}} \overline{P_{i-1}} + \overline{B_{i}} \overline{P_{i}} + \overline{C_{i}} \overline{P_{i+1}} = \overline{D_{i}}$$
(14)

استفاده از سرعتهای جدید محاسبه می شود. نکته مهم این است که در این تکرارها حجم اولیه هوای درون دستگاه و سرعتهای اولیه ثابت و برابر مقدار آنها در گام زمانی قبل فرض می شود.

۲-۳-۲ محیط متخلخل

در مدل دوبعدی برای جذب امواج منعکس شده و برگشتی به ابتدای کانال از یک دیوار متخلخل با تخلخل متغیر استفاده شده است. معادلات حاکم بر محیط متخلخل با وارد کردن مشخصات هندسی و نیروهای مقاوم در برابر حرکت سیال، در معادلات ناویر-استوکس به دست میآیند [۸]:

$$\frac{\partial(\gamma_{x}u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_{z}w)}{\partial z} = 0 \qquad (1 \wedge)$$

$$\lambda_{v} \frac{\partial u}{\partial t} + \lambda_{x} \frac{\partial u^{2}}{\partial x} + \lambda_{z} \frac{\partial uw}{\partial z} = -\gamma_{v} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_{x}v(2\frac{\partial u}{\partial x}) \right\} + \qquad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_{z}v\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \right\} - R_{x}$$

$$\lambda_{v} \frac{\partial w}{\partial t} + \lambda_{x} \frac{\partial wu}{\partial x} + \lambda_{z} \frac{\partial w^{2}}{\partial z} = -\gamma_{v} \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_{x}v\left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial z}\right) \right\}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_{z}v\left(2\frac{\partial w}{\partial z}\right) \right\} - R_{z}$$

$$(14)$$

 $\gamma_{x} = \gamma_{x}$ و γ_{x} تخلخل سطحی هستند که نسبت سطح متخلخل به سطح مقطع سلول را نشان میدهند. γ_{x} تخلخل حجمی است. در این تحقیق مقدار این سه کمیت یکسان و برابر γ فرض شده است. مقدار λ از رابطه $M_{M}(\gamma - 1) + \gamma = \lambda$ محاسبه میشود. C_{M} مقدار λ از رابطه $M_{M}(\gamma - 1) + \gamma = \lambda$ محاسبه میشود. C_{M} مقدار λ از رابطه $M_{M}(\gamma - 1) + \gamma = \lambda$ محاسبه میشود. C_{M} مقدار λ از رابطه می دراگ ضریب اینرسی است. ϕ نیز برابر $g + \rho + gz$ است. نیروهای دراگ γ_{x} و R_{x} و R_{x} از روابط زیر به دست می آیند:

$$R_{x} = \frac{C_{D}}{2\Delta x} (1 - \gamma_{x}) u \sqrt{u^{2} + w^{2}}$$

$$R_{z} = \frac{C_{D}}{2\Delta z} (1 - \gamma_{z}) w \sqrt{u^{2} + w^{2}}$$
(71)

 C_D ضریب دراگ است. با قرار دادن $1 = \gamma$ این معادلات به معادلات حاکم بر جریان بدون مانع تبدیل می شوند و قابل کاربرد برای فضای بیرون محیط متخلخل هستند. لذا معادلات (۱۸) تا (۲۰) به عنوان معادلات اصلی در کل فضای محاسباتی به کار می روند و ضرایب معادله پواسون به شکل زیر تعریف می شوند:

$$\begin{split} u_{i,j}^{n+1} &= ucoef_{i,j}u_{i,j}^{**} + \frac{\Delta t\gamma}{\lambda\Delta x}xcoef_{i,j}\left\{\psi\left(P_{i-1,k}^{n+1} - P_{i,k}^{n+1}\right)\right. \\ &+ (1 - \psi) \cdot \left(P_{i-1,k}^{n} - P_{i,k}^{n}\right)\right\} - \frac{\Delta t}{\lambda}Rx_{i,j} \\ w_{i,j}^{n+1} &= wcoef_{i,j}w_{i,j}^{**} + \frac{\Delta t\gamma}{\lambda\Delta z}zcoef_{i,j}\left\{\psi\left(P_{i,k-1}^{n+1} - P_{i,k}^{n+1}\right)\right. \\ &+ (1 - \psi)(P_{i,k-1}^{n} - P_{i,k}^{n})\right\} - \frac{\gamma g \Delta t}{\lambda} - \frac{\Delta t}{\lambda}Rz_{i,j} \end{split}$$
(*1)

در معادلات فوق $u_{i,k}^{*^*}$ و $w_{i,k}^{*^*}$ مولفه سرعتهای به دست آمده از حل معادلات اندازه حرکت بدون در نظر گرفتن ترم فشار هستند.

۲-۳-۵ مدل آشفتگی

در تحقیق حاضر از مدل اسماگورینسکی برای وارد کردن لزجت گردابهای در معادلات ناویراستوکس استفاده شده است. لزجت گردابهای اسماگورینسکی (_۲) از رابطه زیر محاسبه میشود:

$$v_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S.S} \tag{(TT)}$$

$$S = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \tag{(TT)}$$

که در آن ۵ بستگی به ابعاد شبکه دارد و عبارتست از:

$$\Delta = \sqrt{(\Delta x \Delta z)} \tag{(\%)}$$

پارامتر C_s ثابت اسماگورینسکی است. C_s یک ثابت تجربی است و از مقایسه بین مدلهای عددی و نتایج آزمایشگاهی قابل محاسبه است. به طور کلی در منابع مقادیر بین ۰/۱ تا ۱ برای C_s به کار می ود. در مدل حاضر مقدار ۲۵/۱ برای این پارامتر به کار رفته است.

۳- کاربرد مدل

 $\Delta x = 0.08m$ می شود. $\Delta x = 0.08m$ می شود. $\Delta x = 0.08m$ می شود. $\Delta x = 0.08m$ و $\Delta z = 0.04m$ در نظر گرفته شدهاند. در شرایط اولیه تغییرمکان سطح آب، سرعتهای افقی و قائم برابر صفر هستند. تولید موج در فاصله ۱۰ متری از ابتدای کانال و با استفاده از روش منبع جرم⁹ انجام می شود [۹]. برای جذب امواج منعکس شده و برگشتی یک دیوار قائم متخلخل در ابتدای کانال در نظر گرفته شده است. تخلخل این دیوار از $0.00 = \gamma$ (کاملا نفوذناپذیر) در مرز ابتدایی کانال تا $0.00 = \gamma$ در انتهای دیوار به صورت خطی تغییر می کند. ضریب اینرسی $0.00 = \gamma$ در انتهای دیوار به صورت خطی تغییر می کند. ضریب اینرسی $0.00 = \gamma_m$ و ضریب دراگ $0.00 = \gamma_m$

۳-۱- شرایط مرزی

شرایط مرزی در کف کانال و دیوارهها، شرط مرزی لغزش آزاد است. مطابق این شرط، سرعتهای عمودی بر مرز (u_n) و گرادیان

در این رابطه مجهولات $\overline{X_i} = \overline{P_i}^{n+1}$ هستند و *ni* تعداد سلولها در راستای x است. اگر یکی از معادلات دستگاه (۲۵) به صورت زیر نوشته شود:

$$= \underbrace{-}_{A_i X_{i-1}} + \underbrace{B_i X_i}_{i} + \underbrace{C_i X_{i+1}}_{i} = \underbrace{D_i}$$
(YF)

با روشی مشابه الگوریتم رفتوبرگشت دوتایی، میتوان یکی از مجهولات را حذف کرد. مطابق رابطه زیر میتوان هر مجهول را به عنوان تابعی خطی از مجهول کناریاش در نظر گرفت.

$$\overline{X}_{i-1} = \overline{\overline{E}}_i \overline{X}_i + \overline{F}_i \tag{YY}$$

ماتریس دوبعدی \overline{E}_i و بردار \overline{F}_i در رابطه بالا مجهول هستند و باید روابط مربوط به هر کدام استخراج شوند. با جای گذاری معادله (۲۷) در رابطه (۲۶) و مرتب کردن آن، رابطه زیر به دست خواهد آمد.

بنابراین ماتریس دوبعدی $\overline{\overline{E}}_i$ و بردار $\overline{\overline{F}}_i$ مطابق روابط زیر قابل محاسبه خواهند بود.

مقادیر \overline{E}_i و \overline{F}_i را برای هریک از ستونها، از ابتدا تا انتها محاسبه نمود. با داشتن ماتریس \overline{E}_i و بردار \overline{F}_i ، با استفاده از رابطه (۲۷) از ستون آخر به ستون اول، مقادیر مجهول فشار محاسبه میشوند. لازم به ذکر است که ضرایب $b_{i,ni}$ برای ستون آخر صفر و در نتیجه ماتریس \overline{C}_{ni} برابر صفر است. لذا با توجه به رابطه (۲۹) مقدار \overline{E}_{ni} نیز برابر صفر خواهد بود و بردار مجهول فشار در ستون آخر از رابطه زیر به دست میآید:

$$\overline{X}_{ni} = \overline{F}_{ni} \tag{(7.)}$$

۲-۳-۴- به دست آوردن سرعتهای جدید

پس از حل معادله پواسون و تعیین فشار کلیه سلولها، مقادیر مولفههای سرعت در گام زمانی جدید به صورت زیر محاسبه میشوند:



الف –مقایسه سری زمانی نتایج مدل حاضر با نتایج مقاله ژنگ و همکاران [۵] برای ترازهای سطح آب در وسط OWC (Kh = 0.5)



ب – مقایسه سری زمانی نتایج مدل حاضر با نتایج مقاله ژنگ و همکاران [۵] برای فشار درون *OWC* (*Kh* = 0.5) شکل ۲ – مقایسه نتایج مدل حاضر با مقاله ژنگ و همکاران

-۳-۳ بررسی تغییرات تراز آب و فشار درون اطاقک OWC

پس از اطمینان از صحت مدل، سری زمانی ترازهای نقطه میانی سطح آب درون OWC برای مقادیر Kh برابر ۵/۰، ۱/۴، ۲/۵ و ۴/۵ با استفاده از نتایج مدل حاضر در شکل ۳ رسم شده است. با افزایش Kh، تراز آب دورن OWC کاهش مییابد. به همین ترتیب مودار سری زمانی فشار درون OWC برای Kh های ۵/۰، ۱/۴، ۲/۵ و ۲/۵ در شکل ۴رسم شده است. روند کاهش فشار با افزایش Kh ها قابل مشاهده است.

−۴-۳ محاسبه راندمان OWC

راندمان دستگاه برای Kh های ۰/۵، ۷/۱، ۱/۱، ۲/۱، ۲/۱، ۴/۱، ۸/۱، ۸/۱، ۲/۵ و ۲/۵ محاسبه شده است. وقتی موج به دستگاه برخورد میکند، بخشی از آن جذب شده و بخشی از آن منعکس میشود. دامنه موج منعکس شده به راحتی در مدل قابل مشاهده است. لذا اگر انرژی موج منعکس شده محاسبه شود و از انرژی اولیه موج کاسته شود، میتوان گفت باقیمانده، انرژی است که توسط دستگاه OWC جذب شده است. به عبارتی راندمان دستگاه برابر است با رابطه (۳۴). سرعتهای مماس بر مرز (u_i) برابر صفر هستند. شرط مرزی فشار در مرز بالا و پایین $g = -g / \partial z$ و در مرز چپ و راست $\partial P / \partial x = 0.$ است. در سطح آزاد آب، شرط مرزی سینماتیکی با حل معادله جابهجایی برای تابع *VOF* ارضا می شود.

برای مدل کردن دستگاه *OWC* یک دیواره نفوذناپذیر از z = 0.77m یک دیواره نفوذناپذیر از z = 0.77m تا z = 0.77m تعریف میشود. همچنین سقف اطاقک دستگاه به صورت یک مرز نفوذناپذیر تعریف میشود. روشن است که در صورتی که بازشدگی نفوذناپذیر $z_0 = 0.69m$ مدنظر باشد، دیواره اطاقک از z = 0.69m شروع خواهد شد.

۲-۳- کالیبراسیون ضریب e با دادههای آزمایشگاهی لازم است که ابتدا مقدار ضریب e بر اساس نتایج آزمایشگاهی کالیبره شود. مقدار k' در رابطه (۱۵) در حدود ۱۰۰۰۰۰ میباشد. e به این ترتیب مقادیر e بسیار کوچک می شوند. لذا مضربی از برابر k^{-4} گرفته شده و در ضریب $k^{'}$ ضرب می شود. به این ترتيب مقادير مختلف e برابر ١/٥، ١، ١/٥، ١/٩، ١/٢ و ٢ d0 = 0.77 مورد بررسی قرار گرفتهاند. مقدار بازشدگی دستگاه است. نتایج مدل حاضر با نتایج مقاله ژنگ و همکاران [۵] مقایسه و RMS محاسبه شده است. مقادیر e برابر ۱، ۱/۵، ۱/۶، ۱/۷، ۱/۷، ۱/۸ و ۲ برای ترازهای آب نتایجی تقریبا مشابه و نزدیک به دادههای ژنگ میدهند. اما در مورد فشار با افرایش مقدار *e*، مقادیر فشار روند کاهشی را دنبال میکنند. e برابر ۱/۷ مناسبترین نتایج را با توجه به دادههای ژنگ به دست میدهد. در شکل ۲ نمودار سری زمانی تراز آب در نقطه وسط درون OWC و همچنین سری زمانی فشار درون OWC برای مدل حاضر در مقایسه با دادههای ژنگ برای Kh = 0.5 نشان داده شده است.

جدول ۱- برخی از مشخصات امواج مورد استفاده در محاسبات [۵]

T(s)	$L_t(m)$	Kh
$\chi/\chi \chi$)	22	•/۵
४/४९९	۱۸	•/Y
1/974	۱۵	١/•
۱/۷۵۶	۱۲	١/٢
١/٦٨٧	۱۲	١/٣
1/878	۱۲	١/۴
۱/۵۷۱	۱۲	۱/۵
1/474	٩	١/٨
١/٢١۶	γ	۲/۵
٠/٩٠٧	٧	۴/۵



شکل ۳- سری زمانی ترازهای نقطه میانی سطح آب درون OWC



$$W = \frac{\frac{1}{2}\rho g a^2 C_g - \frac{1}{2}\rho g a_r^2 C_g}{\frac{1}{2}\rho g a^2 C_g} = \frac{a^2 - a_r^2}{a^2}$$
(7a)

نتایج مدل حاضر در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موریس [۴] در شکل نشان داده شده است. نتایج انطباق خوبی دارند. قابل مشاهده است که برای محدوده مشخصی از *Kh*ها، بیشترین راندمان به دست میآید.

میزان بازشدگی دیواره جلویی دستگاه از جمله پارامترهای تاثیرگذار بر راندمان OWC است. به منظور بررسی صحت این موضوع در مدل دوبعدی، مقادیر راندمان برای Khهای مختلف برای 163 = 0.16 و 20.5 = 0.1 h محاسبه میشود. مقدار بازشدگی در حالت اول 0.77 = 0.5 است که در بخش قبل محاسبات مربوط به آن انجام شده است. در حالت دوم مقدار بازشدگی برابر 0.69 = 0.5 است. نتایج آزمایشگاهی حاکی از کاهش عمومی راندمان با کاهش بازشدگی دستگاه است که البته نتایج مدل عددی در شکل ۵ نیز این موضوع را تایید می کند.

۳–۵– بررسی سرعتها در اطراف OWC شکل ۶ تصویر لحظهای از بردارهای سرعت را نشان میدهد. تراز آب در حال بالا آمدن درون دستگاه است. شکل دوم سرعتها را در حال پایین آمدن تراز آب نشان میدهد.



شکل ۵- نمودار راندمان دستگاه OW برای بازشدگیهای $d_0 = 0.69$ و $d_0 = 0.77$

۴- جمعبندی و نتیجهگیری

در این مقاله مدلی عددی در فضای دوبعدی قائم ارائه شد. مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی حاکی از صحت مدل است. بررسی فشار و تراز آب درون OWC برای موجهای مختلف نشان میدهد که با کاهش دوره تناوب یا به عبارتی افزایش Kh مقادیر فشار و تراز آب درون دستگاه کاهش مییابد. رسم نمودار راندمان برای Kh های مختلف نشان میدهد که یک محدوده خاص در اطراف Kh = 1.4 از فرکانس موج وجود دارد که راندمان حداکثر را به دست میدهد. علت این موضوع میتواند پیدایش حالت تشدید درون دستگاه OWC در این محدوده فرکانسی باشد. مهچنین همان طور که در شکل ۴ دیده شد، کاهش بازشدگی دیواره جلویی دستگاه عموما باعث کاهش راندمان میشود.

Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-03

۵- مراجع

- 1. Evans, DV., (1976), *A theory for wave-power absorption by oscillating bodies*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 77(01), p. 1–25.
- 2. Evans DV, Porter R., (1995), *Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device*, Applied Ocean Research, Vol. 17(3), p.155–164.
- Wang, D.J., Katory, M. and Li, Y.S., (2002), Analytical and experimental investigation on the hydrodynamic performance of onshore wavepower devices, Ocean Engineering, Vol. 29(8), p. 871–885.
- 4. Morris-Thomas, M.T., Irvin, R.J. and Thiagarajan, K.P., (2007), *An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water column*, Journal of offshore mechanics and Arctic engineering, Vol. 129(4), p. 273–238.
- 5. Zhang, Y., Zou, Q-P., and Greaves, D., (2012), Air-water two-phase flow modelling of hydrodynamic performance of an oscillating water column device, Journal of Renewable Energy, Vol.41, p.159–170.
- Ahmadi, A., Badiei, P. and Namin, M.M., (2007), *An implicit two-dimensional non-hydrostatic* model for free-surface flow, International Journal of Numerical Methods in Fluids, Vol. 54(9), p. 1055–1074.
- Leonard, B.P., MacVean, M.K. and Lock, A.P., (1995), *The flux integral method for multidimensional convection and diffusion*, Applied Mathematical Modelling, Vol. 19 (6), p. 333-342.
- Karim, M.F., Tanimoto, K. and Hieu, P.D., (2009), Modelling and simulation of wave transformation in porous structures using VOF based two-phase flow model, Applied Mathematical Modelling, Vol. 33(1), p.343–360.
- Lin, P., and Liu, P., (1999), *Internal Wave-Maker* for Navier-Stokes Equations Models, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. Vol. 125(4), p.207–215.



شکل۶- بردارهای سرعت در اطراف OWC . الف- تراز آب در حال بالا آمدن. ب- تراز آب در حال پایین آمدن

کليد واژگان

- 1- Oscillating Water Column (OWC)
- 2- Global mass correction
- 3- Immersed boundary method
- 4- Staggered
- 5- Time Splitting Method
- 6- Volume of fluid method
- 7- Source term