شبیه‌سازی عددی اندرکنش موج با یک واحد نیروگاهی ستون نوسان‌گر 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
[۲] استادیار، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران؛ mnamin@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۰۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۱۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۸

کلمات کلیدی:
دستگاه ستون نوسان‌گر آب
اندرکنش موج
روش حجم سیال

چکیده

مدلی عددی برای شبیه‌سازی اندرکنش موج و ستون نوسان‌گر 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 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 Namin[2]

[1] Msc. Student, School of Civil Engineering, University College of Engineering, University of Tehran; hsahebzamani@ut.ac.ir*
[2] Assistant 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.8.2]

۱ - مقدمه

مصارف کنونی انرژی جهانی دارای مشکلات زیست محیطی متعددی بوده و منابع فعلی تأمین آن پایان‌پذیرند. 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 می‌گردند. توجه جدی به چنین چشم‌اندازهای 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 نوسان‌گر آب[1] 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 می‌گیرد. 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 می‌آید. 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 می‌چرخد. حاصل این فرایند، انتقال انرژی تراکمی جریان هوای خروجی به محور یک مولد الکتریکی و در نهایت تولید الکتریسیته خواهد بود.

تلاش‌های متعددی برای بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی مشخصات هیدوردینامیکی OWC انجام شده است. انجام نخستین مطالعات موضوعی در زمینه ستون‌های نوسان‌گر آب، به عنوان دستگاهی برای جذب انرژی از امواج، به مطالعات انجام شده توسط ایوانس باز می‌گردد[۱]. 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 هم‌خوانی بیشتری دارد و مدل دقیق‌تری 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 می‌گیرند. 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 دیوار جلویی مغروق پارامترهای اصلی تحقیق بودند. وی و همکارانش به این نتیجه رسیدند که افزایش آبخور دیوار جلویی باعث کاهش بازده هیدرودینامیکی در امواج کوتاه می‌شود. این نتیجه در مورد افزایش ضخامت دیواره جلویی تکرار می‌شود. همچنین دریچه دایره‌ای عملکرد بهتری نسبت به دریچه مستطیلی دارد. در سال ۲۰۱۲ یک مدل عددی دو فازه با تصحیح جرمی[2] و روش مرزی غوطه‌ور[3] برای شبیه‌سازی اندرکنش موج با یک مخزن نیمه مغروق توسط ژانگ و همکارانش به دست آمد[۵]. این مدل می‌تواند 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 تحلیلی خطی ایوانس دارد. آن‌ها علت تطابق بیشتر نتایجشان با مدل آزمایشگاهی نسبت به مدل تحلیلی را اتلاف انرژی در دهانه و جریانات گردابی 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 انتگرال‌گیری از معادلات ناویر- استوکس در عرض واحد به دست می‌آید و شکل بقایی این معادلات به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (۱)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.8.2]

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial(u^2)}{\partial x}+\frac{\partial(uw)}{\partial z}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_{tx}\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_{tz}\frac{\partial u}{\partial z}\right) \quad (۲)$$

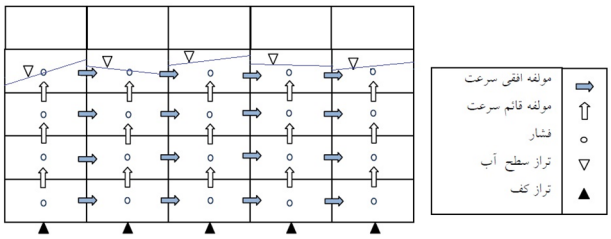
$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{\partial(w^2)}{\partial z}+\frac{\partial(uw)}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_{tx}\frac{\partial w}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_{tz}\frac{\partial w}{\partial z}\right)-g \quad (۳)$$

در این روابط u و w، به ترتیب سرعت‌های افقی و قائم، P فشار، ρ چگالی آب، ν ضریب آشفتگی و g شتاب گرانش است. شبکه به کار رفته در مدل، شبکه منظم با ساختار جابه‌جا شده[۴] در مختصات کارتزین 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 می‌شوند. 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 می‌آید. در گام دوم با تلفیق بخش باقی‌مانده معادلات اندازه حرکت با معادله پیوستگی 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 می‌آیند[۶]. معادله جابه‌جایی تابع حجم سیال[۶] (VOF) با استفاده از سرعت‌های جدید و تکنیک مربوطه حل می‌شود و مقادیر تابع F در گام زمانی جدید محاسبه می‌شود. به این ترتیب حرکت سطح آزاد آب دنبال می‌شود. 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 مختصات کارتزین است. فضای محاسباتی در راستای افق به n_x 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.



شکل ۱- شبکه محاسباتی

۲-۳- روش حل

در گام اول، بر اساس روش تفکیک زمانی، ترم فشار از معادلات مومنتوم حذف می‌شود و ترم‌های جابه‌جایی و پخش برای سرعت‌ها حل می‌شود. این گام در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، معادله انتقال برای سرعت‌های افقی در هر دو جهت افق و قائم حل می‌شوند و سرعت‌های افقی میانی محاسبه می‌شوند 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 نمی‌کنند. بنابراین معادله پیوستگی همزمان با معادلات مومنتوم بدون ترم‌های انتقال و پخش، حل می‌شوند. حل همزمان معادله پیوستگی و معادلات مومنتوم، معادله پواسون را مطابق معادله (۴) به دست می‌دهد.

$$\begin{aligned}&\frac{\Delta t}{\rho\Delta x^2}\left\{\psi\left[2P^{n+1}_{i,k}-P^{n+1}_{i+1,k}-P^{n+1}_{i-1,k}\right]\right\}+\\&\frac{\Delta t}{\rho\Delta z^2}\left\{\psi(2P^{n+1}_{i,k}-P^{n+1}_{i,k+1}-P^{n+1}_{i,k-1})\right\}\\&=\frac{(w^{**}_{i,k}-g\Delta t)-(w^{**}_{i,k+1}-g\Delta t)}{\Delta z}+\frac{u^{**}_{i,k}-u^{**}_{i+1,k}}{\Delta x}-\\&\frac{\Delta t(1-\psi)}{\rho\Delta x^2}.\left[2P^{n}_{i,k}-P^{n}_{i+1,k}-P^{n}_{i-1,k})\right]\\&-\frac{\Delta t(1-\psi)}{\rho\Delta z^2}.(2P^{n}_{i,k}-P^{n}_{i,k+1}-P^{n}_{i,k-1})\end{aligned} \quad (۴)$$

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

$$a_{i,k}P^{*n+1}_{i-1,k}+b_{i,k}P^{*n+1}_{i+1,k}+c_{i,k}P^{*n+1}_{i,k}+d_{i,k}P^{*n+1}_{i,k-1}+e_{i,k}P^{*n+1}_{i,k+1}=f_{i,k} \quad (۵)$$

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

$$P_{i,k}=P_0 \quad (۶)$$

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

$$P=ds.\rho g \quad (۷)$$

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.8.2]

۲-۳-۱- مدل کردن دستگاه ستون نوسان‌گر آب در فضای دوبعدی قائم

برای مدل کردن دستگاه OWC در فضای دوبعدی قائم از رویکردی مشابه با مدل یک بعدی استفاده شده است. در روند حل، پس از آن‌که معادله انتقال برای سرعت‌های افقی و قائم محاسبه شده و مقادیر u^{**} و w^{**} استخراج شدند، یک حلقه تکرار برای محاسبه فشار درون دستگاه تشکیل می‌شود. فرض بر این است که تمام نقاط بالای سطح آزاد درون OWC دارای فشار یکسانی هستند. برای شروع تکرار، مقدار دبی عبوری از بازشدگی OWC برابر $q^{n}_{jj+\frac{1}{2}}$ فرض می‌شود. میزان افزایش تراز آب درون دستگاه یا کاهش ارتفاع هوای درون دستگاه، با استفاده از این دبی و رابطه زیر به دست می‌آید.

$$dqv = -dq.\Delta t / area \qquad (۸)$$

dqv میزان تغییر تراز آب درون OWC، dq دبی عبوری از بازشدگی دستگاه و $area$ سطح مقطع دستگاه است. علامت منفی نشان دهنده آن است که اگر دبی در حال وارد شدن به OWC باشد، تراز آب بالا رفته و در نتیجه حجم هوا کاهش می‌یابد. در گام اول فرض می‌شود که اطاقک OWC کاملا بسته است و تغییرات فشار ناشی از تغییرات تراز آب درون OWC محاسبه می‌شود. اگر هوا به عنوان گاز ایده‌آل در نظر گرفته شود، رابطه زیر برای آن برقرار است:

$$PV = nRT \qquad (۹)$$

که در این رابطه P فشار مطلق گاز، V حجم گاز، n مقدار گاز به مول و T دمای مطلق گاز است. R 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.

$$P_1V_1 = P_2V_2 \qquad (۱۰)$$

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.

$$dP = P_1 - P_{\text{tank}} = P_1.(\frac{V_0}{V_1} - 1) \qquad (۱۱)$$

P_{tank} و V_0 فشار و حجم اولیه هوا درون اطاقک و P_1 و V_1 فشار و حجم هوای درون اطاقک پس از تغییرات تراز آب درون OWC هستند. V_1 با استفاده از دبی عبوری از ورودی OWC قابل محاسبه است. حجم هوای درون OWC به صورت $h \times area$ قابل تعریف است. سطح مقطع ثابت و لذا قابل حذف است. میزان تغییر تراز آب با رابطه (۸) محاسبه شده است، بنابراین $h_1 = h_{\text{tank}} + dqv$ است. به این ترتیب رابطه اختلاف فشار ایجاد شده به صورت زیر قابل استفاده است.

$$dp = -P_{\text{tank}}.dqv / (h_{\text{tank}} + dqv) \qquad (۱۲)$$

فشار جدید برابر است با:

$$P_1 = P_{\text{tank}} + dp \qquad (۱۳)$$

در گام دوم تغییر فشار در اثر خروج هوا از محل توربین OWC مورد نظر قرار می‌گیرد. بین تغییرات چگالی و فشار در اثر تغییرات حجم یک رابطه خطی به صورت $P = k'\rho$ فرض می‌شود. k' 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.

$$\frac{dm}{dt} = e.(P - P_{air}) \qquad (۱۴)$$

P فشار درون اطاقک است. از طرفی $m = \rho V$ و $\rho = P / k'$ است و بنابراین $m = \rho k' / V$ برقرار است. لذا:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{V}{k'}\frac{\partial P}{\partial t} = e.(P - P_{air}) \qquad (۱۵)$$

معادله حاکم عبارتست از:

$$P^{n+1} = P^{n} - \frac{\Delta t.k'.e}{V}\overline{P} \qquad (۱۶)$$

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

$$P_2 = P_1 - 0.5 \times \Delta t.rk.e.(P_1 + P_{\text{tank}} - 2.P_{air}) / h_{\text{tank}} \qquad (۱۷)$$

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.8.2]

استفاده از سرعت‌های جدید محاسبه می‌شود. 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 می‌شود.

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]:

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x}+\frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z}=0 \tag{۱۸}$$

$$\lambda_v\frac{\partial u}{\partial t}+\lambda_x\frac{\partial u^2}{\partial x}+\lambda_z\frac{\partial uw}{\partial z}=-\gamma_v\frac{\partial\phi}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left\{\gamma_x\nu(2\frac{\partial u}{\partial x})\right\}+\frac{\partial}{\partial z}\left\{\gamma_z\nu\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right\}-R_x \tag{۱۹}$$

$$\lambda_v\frac{\partial w}{\partial t}+\lambda_x\frac{\partial wu}{\partial x}+\lambda_z\frac{\partial w^2}{\partial z}=-\gamma_v\frac{\partial\phi}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\left\{\gamma_x\upsilon\left(\frac{\partial w}{\partial z}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)\right\}+\frac{\partial}{\partial z}\left\{\gamma_z\upsilon\left(2\frac{\partial w}{\partial z}\right)\right\}-R_z \tag{۲۰}$$

γ_x و γ_z تخلخل سطحی هستند که نسبت سطح متخلخل به سطح مقطع سلول را نشان می‌دهند. γ_v تخلخل حجمی است. در این تحقیق مقدار این سه کمیت یکسان و برابر γ فرض شده است. مقدار λ از رابطه $\lambda=\gamma+(1-\gamma)C_M$ محاسبه می‌شود. C_M ضریب اینرسی است. ϕ نیز برابر $P/\rho+gz$ است. نیروهای دراگ R_x و R_z از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$R_x=\frac{C_D}{2\Delta x}(1-\gamma_x)u\sqrt{u^2+w^2}$$
$$R_z=\frac{C_D}{2\Delta z}(1-\gamma_z)w\sqrt{u^2+w^2} \tag{۲۱}$$

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

$$\begin{aligned}
a_{i,j}&=-xcoef_{i,j}\frac{\psi\Delta t\gamma}{\lambda\Delta x^2}\\
b_{i,j}&=-xcoef_{i+1,j}\frac{\psi\Delta t\gamma}{\lambda\Delta x^2}\\
c_{i,j}&=-(a_{i,j}+b_{i,j}+d_{i,j}+e_{i,j})\\
d_{i,j}&=-zcoef_{i,j}\frac{\psi\Delta t\gamma}{\lambda\Delta z^2}\\
e_{i,j}&=-zcoef_{i,j+1}\frac{\psi\Delta t\gamma}{\lambda\Delta z^2}\\
f_{i,j}&=\frac{wcoef_{i,j}(w^{**}_{i,j}-(\gamma g\Delta t/\lambda))-wcoef_{i,j+1}(w^{**}_{i,j+1}-(\gamma g\Delta t/\lambda))}{\Delta z}\\
&+\frac{ucoef_{i,j}u^{**}_{i,j}-ucoef_{i+1,j}u^{**}_{i+1,j}}{\Delta x}+\frac{\Delta t}{\lambda\Delta x}(Rx_{i+1,j}-Rx_{i,j})\\
&+\frac{\Delta t}{\lambda\Delta z}(Rz_{i,j+1}-Rz_{i,j})
\end{aligned} \tag{۲۲}$$

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.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} a_{i,1} & & & \\ & a_{i,2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & a_{i,nk}\end{bmatrix}}_{A_i}\overline{P}^{n+1}_{i-1}+\underbrace{\begin{bmatrix} c_{i,1} & e_{i,1} & & \\ d_{i,2} & c_{i,2} & e_{i,2} & \\ & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & d_{i,nk} & c_{i,nk}\end{bmatrix}}_{B_i}\overline{P}^{n+1}_{i}+\underbrace{\begin{bmatrix} b_{i,1} & & & \\ & b_{i,2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & b_{i,nk}\end{bmatrix}}_{C_i}\overline{P}^{n+1}_{i+1}=\underbrace{\begin{Bmatrix} f_{i,1}\\ f_{i,2}\\ \vdots\\ f_{i,nk}\end{Bmatrix}}_{D_i} \tag{۲۳}$$

و یا به عبارتی:

$$\overline{\overline{A}}_i\overline{P}^{n+1}_{i-1}+\overline{\overline{B}}_i\overline{P}^{n+1}_{i}+\overline{\overline{C}}_i\overline{P}^{n+1}_{i+1}=\overline{D}_i \tag{۲۴}$$

در این رابطه $\overline{P}^{n+1}_i=\left[P^{n+1}_{i,1},P^{n+1}_{i,2},...,P^{n+1}_{i,nk}\right]$ بردار فشار مجهول برای ستون i و $\overline{\overline{A}}_i$، $\overline{\overline{B}}_i$ و $\overline{\overline{C}}_i$ ماتریس ضرایب دوبعدی به ترتیب برای فشار در ستون‌های $i-1$، i و $i+1$ هستند. با نوشتن رابطه (۲۵) برای تمامی ستون‌ها یک سیستم ماتریس بلوکی سه قطری شکل می‌گیرد:

$$\begin{bmatrix} \overline{\overline{B}}_1 & \overline{\overline{C}}_1 & & & & \\ \overline{\overline{A}}_2 & \overline{\overline{B}}_2 & \overline{\overline{C}}_2 & & & \\ & \cdots & \cdots & \cdots & & \\ & & \overline{\overline{A}}_i & \overline{\overline{B}}_i & \overline{\overline{C}}_i & \\ & & & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & & \overline{\overline{A}}_{ni} & \overline{\overline{B}}_{ni}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{X}_1\\ \overline{X}_2\\ \vdots\\ \overline{X}_i\\ \vdots\\ \overline{X}_{ni}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\overline{D}_1\\ \overline{D}_2\\ \vdots\\ \overline{D}_i\\ \vdots\\ \overline{D}_{ni}\end{bmatrix} \tag{۲۵}$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.8.2]

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:

$$\overline{\overline{A_i}}\,\overline{X_{i-1}} + \overline{\overline{B_i}}\,\overline{X_i} + \overline{\overline{C_i}}\,\overline{X_{i+1}} = \overline{D_i} \qquad (۲۶)$$

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.

$$\overline{X}_{i-1} = \overline{\overline{E}}_i \overline{X}_i + \overline{F}_i \qquad (۲۷)$$

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

$$\begin{aligned}\overline{X}_i &= -(\overline{\overline{A}}_i \overline{\overline{E}}_{i-1} + \overline{\overline{B}}_i)^{-1} \overline{\overline{C}}_i \overline{X}_{i+1} + \\ &(\overline{\overline{A}}_i \overline{\overline{E}}_{i-1} + \overline{\overline{B}}_i)^{-1}.(\overline{D}_i - \overline{\overline{A}}_i \overline{F}_{i-1})\end{aligned} \qquad (۲۸)$$

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

$$\begin{aligned}\overline{\overline{E}}_i &= -(\overline{\overline{A}}_i \overline{\overline{E}}_{i-1} + \overline{\overline{B}}_i)^{-1} \overline{\overline{C}}_i \\ \overline{F}_i &= (\overline{\overline{A}}_i \overline{\overline{E}}_{i-1} + \overline{\overline{B}}_i)^{-1}.(\overline{D}_i - \overline{\overline{A}}_i \overline{F}_{i-1})\end{aligned} \qquad (۲۹)$$

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

$$\overline{X}_{ni} = \overline{F}_{ni} \qquad (۳۰)$$

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:

$$\begin{aligned}u_{i,j}^{n+1} &= ucoef_{i,j} u_{i,j}^{**} + \frac{\Delta t \gamma}{\lambda \Delta x} xcoef_{i,j} \left\{ \psi \left(P_{i-1,k}^{n+1} - P_{i,k}^{n+1} \right) \right. \\ &\left. +(1-\psi).\left(P_{i-1,k}^{n} - P_{i,k}^{n} \right) \right\} - \frac{\Delta t}{\lambda} Rx_{i,j} \\ w_{i,j}^{n+1} &= wcoef_{i,j} w_{i,j}^{**} + \frac{\Delta t \gamma}{\lambda \Delta z} zcoef_{i,j} \left\{ \psi (P_{i,k-1}^{n+1} - P_{i,k}^{n+1}) \right. \\ &\left. +(1-\psi)(P_{i,k-1}^{n} - P_{i,k}^{n}) \right\} - \frac{\gamma g \Delta t}{\lambda} - \frac{\Delta t}{\lambda} Rz_{i,j}\end{aligned} \qquad (۳۱)$$

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 (ν_t) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S.S} \qquad (۳۲)$$

$$S = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \qquad (۳۳)$$

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

$$\Delta = \sqrt{(\Delta x \Delta z)} \qquad (۳۴)$$

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 می‌رود. در مدل حاضر مقدار ۰/۲۵ برای این پارامتر به کار رفته است.

۳- کاربرد مدل

کانالی با طول چهل متر در نظر گرفته می‌شود. $\Delta x = 0.08m$، $\Delta z = 0.04m$ و $\Delta t = 0.06s$ 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 جرم[۷] انجام می‌شود [۹]. برای جذب امواج منعکس شده و برگشتی یک دیوار قائم متخلخل در ابتدای کانال در نظر گرفته شده است. تخلخل این دیوار از $\gamma = 0.$ (کاملا نفوذناپذیر) در مرز ابتدایی کانال تا $\gamma = 1.0$ در انتهای دیوار به صورت خطی تغییر می‌کند. ضریب اینرسی $C_m = 0.5$ و ضریب دراگ $C_d = 3.5$ در نظر گرفته شده است[۸]. طول دیوار ۳/۲ متر است.

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.8.2]

سرعت‌های مماس بر مرز (u_t) برابر صفر هستند. شرط مرزی فشار در مرز بالا و پایین $\partial P/\partial z=-g$ 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 می‌شود.

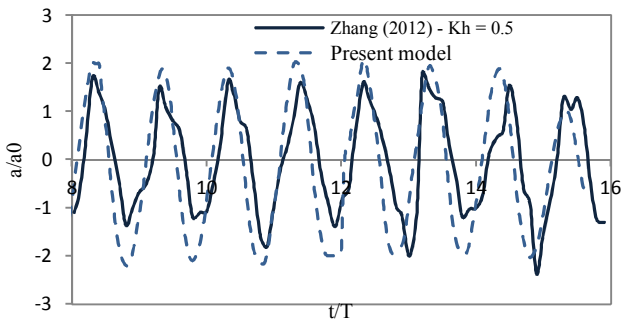
برای مدل کردن دستگاه OWC یک دیواره نفوذناپذیر از $z=0.77m$ تا $z=1.36m$ در فاصله ۰/۶۴ متری انتهای کانال تعریف می‌شود. همچنین سقف اطاقک دستگاه به صورت یک مرز نفوذناپذیر تعریف می‌شود. روشن است که در صورتی که بازشدگی $d_0=0.69m$ مدنظر باشد، دیواره اطاقک از $z=0.69m$ شروع خواهد شد.

۳-۲- کالیبراسیون ضریب e با داده‌های آزمایشگاهی

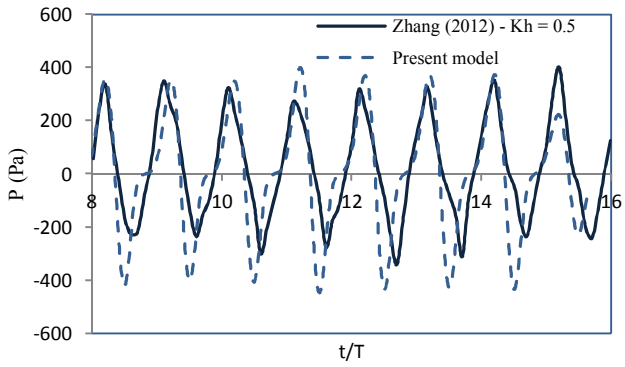
لازم است که ابتدا مقدار ضریب e بر اساس نتایج آزمایشگاهی کالیبره شود. مقدار k' در رابطه (۱۵) در حدود ۱۰۰۰۰۰ می‌باشد. به این ترتیب مقادیر e بسیار کوچک می‌شوند. لذا مضربی از e برابر 10^{-4} گرفته شده و در ضریب k' ضرب می‌شود. به این ترتیب مقادیر مختلف e برابر ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۱/۶، ۱/۷، ۱/۸ و ۲ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مقدار بازشدگی دستگاه $d0=0.77$ 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، ۱/۸ و ۲ برای ترازهای آب نتایجی تقریبا مشابه و نزدیک به داده‌های ژنگ می‌دهند. اما در مورد فشار با افزایش 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]

Kh	$L_t(m)$	$T(s)$
۰/۵	۲۲	۲/۲۷۱
۰/۷	۱۸	۲/۲۹۹
۱/۰	۱۵	۱/۹۲۴
۱/۲	۱۲	۱/۷۵۶
۱/۳	۱۲	۱/۶۸۷
۱/۴	۱۲	۱/۶۲۶
۱/۵	۱۲	۱/۵۷۱
۱/۸	۹	۱/۴۳۴
۲/۵	۷	۱/۲۱۶
۴/۵	۷	۰/۹۰۷



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

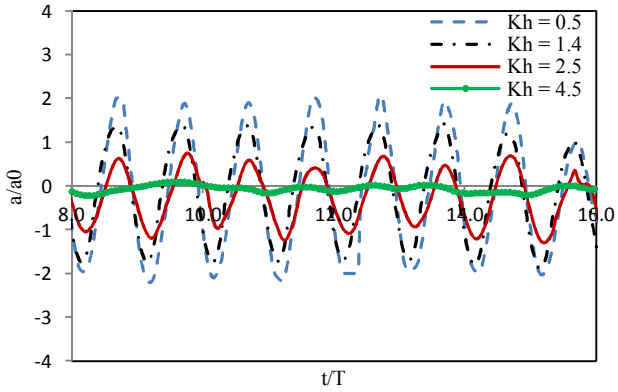
۳-۳- بررسی تغییرات تراز آب و فشار درون اطاقک OWC

پس از اطمینان از صحت مدل، سری زمانی ترازهای نقطه میانی سطح آب درون OWC برای مقادیر Kh برابر ۰/۵، 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 نمودار سری زمانی فشار درون OWC برای Kh های ۰/۵، ۱/۴، ۲/۵ و ۴/۵ در شکل ۴رسم شده است. روند کاهش فشار با افزایش Kh ها قابل مشاهده است.

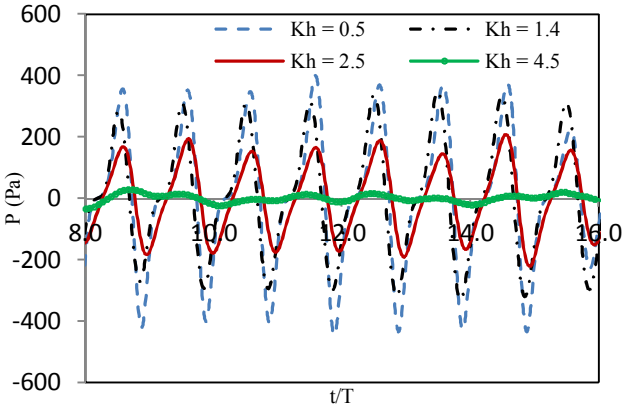
۳-۴- محاسبه راندمان OWC

راندمان دستگاه برای Kh های ۰/۵، ۰/۷، ۱/۰، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴، ۱/۵، ۱/۸، ۲/۵ و ۴/۵ 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).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.8.2]



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



شکل ۴- سری زمانی فشار درون OWC

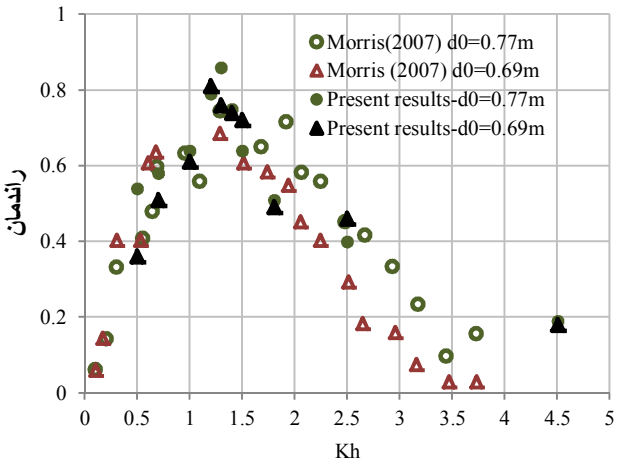
$$W = \frac{\frac{1}{2}\rho g a^2 C_g - \frac{1}{2}\rho g a_r^2 C_g}{\frac{1}{2}\rho g a^2 C_g} = \frac{a^2 - a_r^2}{a^2} \qquad (۳۵)$$

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 Khها، 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 $d_1/h = 0.163$ و $d_1/h = 0.25$ محاسبه می‌شود. مقدار بازشدگی در حالت اول $d_0 = 0.77$ است که در بخش قبل محاسبات مربوط به آن انجام شده است. در حالت دوم مقدار بازشدگی برابر $d_0 = 0.69$ 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 می‌کند.

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.



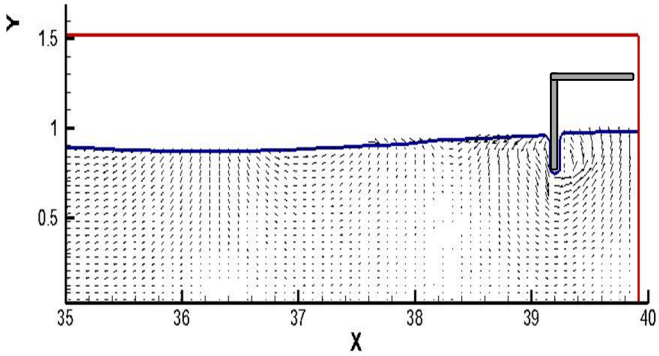
شکل ۵- نمودار راندمان دستگاه OWC برای بازشدگی‌های $d_0 = 0.77$ و $d_0 = 0.69$

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

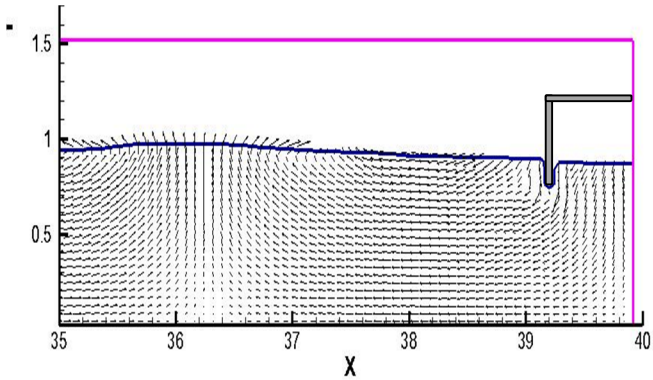
در این مقاله مدلی عددی در فضای دوبعدی قائم ارائه شد. مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی حاکی از صحت مدل است. بررسی فشار و تراز آب درون OWC برای موج‌های مختلف نشان می‌دهد که با کاهش دوره تناوب یا به عبارتی افزایش Kh مقادیر فشار و تراز آب درون دستگاه کاهش می‌یابد. رسم نمودار راندمان برای Khهای مختلف 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. همچنین همان‌طور که در شکل ۴ دیده شد، کاهش بازشدگی دیواره جلویی دستگاه عموما باعث کاهش راندمان می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.8.2]



شکل الف



شکل ب

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

کلید 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

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.
3. Wang, D.J., Katory, M. and Li, Y.S., (2002), *Analytical and experimental investigation on the hydrodynamic performance of onshore wave-power 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.8.2]