شبیه‌سازی عددی اندرکنش موج با واحد نیروگاهی ستون نوسان‌گر آب در فضای یک‌بعدی

سید حمیدرضا صاحب‌الزمانی[۱]، مسعود منتظری نمین[۲]

[۱] کارشناس 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: ۱۳۹۳/۰۱/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰

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

چکیده

واحد نیروگاهی ستون نوسان‌گر آب از جمله ابزار موجود برای بهره‌برداری از منابع عظیم انرژی در دریاست. در این مقاله مدلی عددی برای شبیه‌سازی اندرکنش موج و ستون نوسان‌گر آب در فضای یک‌بعدی به زبان فرترن ارائه شده است. معادلات حاکم، معادلات شیب ملایم می‌باشند. مقادیر فشار و تراز آب درون دستگاه ستون نوسان‌گر آب با استفاده از یک روش تکراری محاسبه می‌شود. در ابتدای کانال، مرز امواج انعکاس یافته را به طور کامل جذب می‌کند. با استفاده از آزمون‌های متداول صحت مدل تایید شده است. با حصول اطمینان از عملکرد صحیح 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 Oscillating Water Column in One Dimension

Seyed Hamidreza Sahebalzamani[1*], Masoud Montazeri Namin[2]

[1] MSc, 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: 27 Mar. 2014
Accepted 13 Jan. 2015
Available online: 11 Mar. 2015

Keywords:
Oscillating Water Column
Wave interaction
Volume of fluid method

ABSTRACT

Oscillating water column (OWC) is one of the wave energy converting devices available. In this article, a numerical model has been introduced to simulate wave interaction with OWC in one dimensional plane. Mild slope equations have been used in one dimension. The pressure and water elevation inside OWC have been calculated using an iterative method. Also an absorbing boundary is used at the beginning of the canal .

Conventional test cases were used in order to verify the model such as sinusoidal waves. After the 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 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.7.2]

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 یکی از آن‌هاست (شکل ۱).

تلاش‌های متعددی برای بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی مشخصات هیدوردینامیکی 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 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 رزونانس 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 و روش مرزی غوطه‌ور 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 که یک مدل یک‌بعدی است، سعی شده است تا با استفاده از روشی ساده و کم‌هزینه‌تر، پیش‌بینی مشخصات کلی دستگاه ستون نوسان‌گر آب امکان‌پذیر شود. مدل برای محاسبه راندمان دستگاه و همچنین اثر تغییرات آبخور دیواره جلویی دستگاه استفاده شده است.

۱- مدل عددی

۱-۲ معادلات اساسی حاکم

معادلات حاکم بر موج یک بعدی، معادلات شیب ملایم، عبارتند از [۶]:

$$\begin{cases} \dfrac{C_g}{C}.\dfrac{\partial \xi}{\partial t}+\dfrac{\partial q}{\partial x}=0. \\ \dfrac{\partial q}{\partial t}+C.C_g\dfrac{\partial \xi}{\partial x}=0. \end{cases} \quad (۱)$$

که در این رابطه ξ تراز سطح آب نسبت به تراز مبنا، C سرعت تغییرشکل موج، C_g سرعت گروهی موج و q فلاکسی است که بعنوان پارامتر کمکی برای تجزیه معادله استفاده شده است. با گسسته‌سازی رابطه دوم و مرتب کردن آن بر حسب ترازهای آب، رابطه فوق به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$q_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}=a_i^1\xi_{i+1}^{n+1}+a_i^2\xi_i^{n+1}+a_i^3 \quad (۲)$$

که در آن:

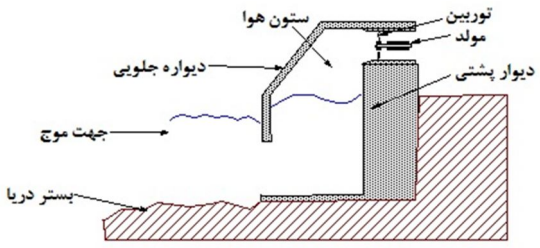
$$a_i^1=-\frac{\Delta t}{\Delta x}C.C_g\theta$$

$$a_i^2=\frac{\Delta t}{\Delta x}C.C_g\theta \quad (۳)$$

$$a_i^3=q_{i+\frac{1}{2}}^n-\frac{\Delta t}{\Delta x}C.C_g(1-\theta)(\xi_{i+1}^n-\xi_i^n)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.7.2]



شکل ۱ – شمای کلی دستگاه ستون نوسان‌گر آب

سپس معادله اول رابطه (۱) گسسته‌سازی می‌شود.

$$\frac{C_g}{C\Delta t}\xi_i^{n+1} = \frac{C_g}{C\Delta t}\xi_i^{n} - \frac{1}{\Delta x}\left[\psi(q_{i+\frac{1}{2}} - q_{i-\frac{1}{2}})^{n+1} + (1-\psi)(q_{i+\frac{1}{2}} - q_{i-\frac{1}{2}})^{n}\right] \quad (۴)$$

با جای‌گذاری رابطه دبی (۲) در این رابطه و مرتب کردن آن، رابطه‌ای به شکل زیر به دست می‌آید:

$$A_i^1\xi_{i-1}^{n+1} + A_i^2\xi_i^{n+1} + A_i^3\xi_{i+1}^{n+1} = A_i^4 \quad (۵)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} A_i^1 &= -\frac{\psi}{\Delta x}a_{i-1}^2 \\ A_i^2 &= \frac{C_g}{C\Delta t} + (a_i^2 - a_{i-1}^1)\frac{\psi}{\Delta x} \\ A_i^3 &= a_i^1\frac{\psi}{\Delta x} \\ A_i^4 &= \frac{C_g}{C\Delta t}\xi_i^n - \frac{(1-\psi)}{\Delta x}(q_{i+\frac{1}{2}} - q_{i-\frac{1}{2}})^n \\ &+ \frac{\psi}{\Delta x}(a_{i-1}^3 - a_i^3) \end{aligned} \quad (۶)$$

با نوشتن این رابطه برای تمامی سلول‌ها یک دستگاه از معادلات به دست می‌آید که با استفاده از روش توماس قابل محاسبه است. با حل دستگاه معادلات، ترازهای سطح آب در گام زمانی جدید محاسبه می‌شوند. با جای‌گذاری این مقادیر در رابطه (۲)، مقادیر دبی در گام زمانی جدید محاسبه خواهند شد.

۲-۱- مدلسازی

۲-۱-۱- شرایط مرزی

در مرز ابتدایی کانال، مرز کاملا جذب‌کننده تعریف شده است تا به امواج منعکس شده از انتهای کانال اجازه عبور داده شود. برای این منظور با استفاده از خط مشخصه دبی با میانگین‌گیری از دبی‌های دو طرف محاسبه می‌شود. لذا مقدار دبی معلوم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q_{known} = w = q_{end-1}^n + (1 - \frac{\sqrt{C.C_g}}{dx}.(q_{end}^n - q_{end-1}^n) \quad (۷)$$

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

برای مدل کردن دستگاه ستون نوسان‌گر آب OWC، لازم است تا دبی عبوری از بازشدگی دستگاه و هم‌چنین فشار ایجاد شده درون اطاقک آن محاسبه شود. همه سلول‌های داخل OWC تغییر فشار یکسانی را تجربه می‌کنند و می‌توان روابط موج یک‌بعدی را برای آن‌ها نیز به کار برد. مسئله مورد بررسی به دو سلول مجاور OWC معطوف می‌شود که یکی خارج از دستگاه و دیگری داخل دستگاه قرار دارد. این دو سلول مجاور هم، دارای اختلاف فشاری هستند که در تعیین دبی در مرزشان و همچنین در تعیین تراز در سلول داخل OWC تاثیرگذار است. تعداد سلول‌های اختصاص داده شده به مدل کردن دستگاه OWC از تقسیم طول آن به فواصل Δx به دست می‌آید. در مرز بازشدگی OWC معادله مومنتوم به شکل زیر اصلاح می‌شود:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + C.C_g.\frac{d_0}{d}\frac{\partial \xi}{\partial x} = 0. \quad (۸)$$

در این رابطه d_0 میزان بازشدگی و d عمق آب است.

اگر jj شمارنده سلول خارجی مجاور OWC باشد، ξ_{jj} و ξ_{jj+1} به ترتیب تراز آب در سلول خارجی مجاور OWC و تراز آب در سلول داخلی مجاور دستگاه می‌باشد. همان‌گونه که ذکر شد، در سلول jj فشار هوا برای مقدار استاندارد است اما در سلول $jj+1$ مقدار فشار متفاوت است. بنابراین می‌توان گفت تراز معادل در سلول $jj+1$ برابر است با ξ_{jj+1} به علاوه فشار درون OWC بر حسب متر آب. با این توصیف، معادله (۸) گسسته‌سازی و مرتب می‌شود.

$$q_{jj+\frac{1}{2}}^{n+1} = a_{jj}^1\xi_{jj+1}^{n+1} + a_{jj}^2\xi_{jj}^{n+1} + a_{jj}^3 \quad (۹)$$

ضرایب عبارت خواهند بود از:

$$\begin{aligned} a_{jj}^1 &= -\frac{\Delta t}{\Delta x}.\frac{d_0}{d}.CC_g.\theta \\ a_{jj}^2 &= \frac{\Delta t}{\Delta x}.\frac{d_0}{d}.CC_g.\theta \end{aligned} \quad (۱۰)$$

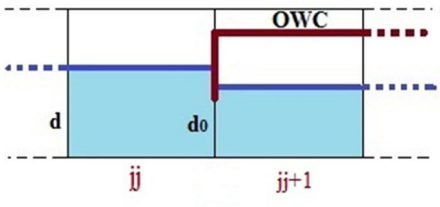
ضریب سوم یعنی a_{jj}^3 به دو بخش تقسیم می‌شود:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.7.2]

$$a^3_{jja} = q^n_{jj+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\Delta x}.\frac{d_0}{d}.CC_g.(1-\theta)(\xi_{jj+1}-\xi_{jj})^n \qquad (11)$$

$$a^3_{jjb} = \frac{dt}{dx}.\frac{d_0}{d}.CC_g$$



شکل ۲ - دو سلول مجاور ستون نوسان‌گر آب

بخش اول مشابه قسمت قبل می‌باشد و بخش دوم مربوط به مقادیر فشار است. پس از محاسبه مقدار جدید فشار، a^3_{jj} با استفاده از روابط فوق به دست می‌آید. برای محاسبه مقدار فشار درون OWC و دبی عبوری از بازشدگی دستگاه از یک روش تکرار استفاده می‌شود. برای شروع تکرار، مقدار دبی عبوری از بازشدگی OWC برابر $q^n_{jj+1/2}$ 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.

$$dqv = -dq.\Delta t / area \qquad (12)$$

dqv میزان تغییر تراز آب درون OWC، dq دبی عبوری از بازشدگی دستگاه و $area$ سطح مقطع دستگاه می‌باشد. 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:

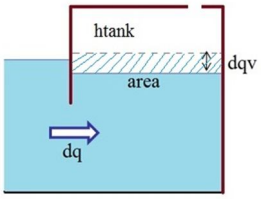
$$PV = nRT \qquad (13)$$

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 $8/314$ J/(K.mol) می‌باشد. 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.

$$P_1V_1 = P_2V_2 \qquad (14)$$

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.

$$dP = P_1 - P_{\text{tank}} = P_1.(\frac{V_0}{V_1} - 1) \qquad (15)$$



شکل ۳ – پارامترهای استفاده شده در محاسبات

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 (۱۲) محاسبه شده است، بنابراین $h_1 = h_{\text{tank}} + dqv$ می‌باشد. به این ترتیب رابطه اختلاف فشار ایجاد شده به صورت زیر قابل استفاده است.

$$dp = -P_{\text{tank}}.dqv / (h_{\text{tank}} + dqv) \qquad (16)$$

فشار جدید برابر است با:

$$P_1 = P_{\text{tank}} + dp \qquad (17)$$

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 سعی و خطا قابل تعیین است. از طرفی نرخ جرم خروجی از دریچه بالای OWC با فشار درون اطاقک متناسب است.

$$\frac{dm}{dt} = e.(P - P_{air}) \qquad (18)$$

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

$$\frac{dm}{dt} = \frac{V}{k'}\frac{\partial P}{\partial t} = e.(P - P_{air}) \qquad (19)$$

معادله حاکم عبارتست از:

$$P^{n+1} = P^n - \frac{\Delta t.k'.e}{V}\overline{P} \qquad (20)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.7.2]

اگر رابطه (۲۰) مورد استفاده قرار گیرد، مقدار اصلاح شده فشار از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_2 = P_1 - 0.5 \times \Delta t.k.e.(P_1 + P_{\text{tank}} - 2.P_{air}) / h_{\text{tank}} \quad (۲۱)$$

با داشتن مقدار جدید فشار می‌توان ضریب a_{jj}^3 را محاسبه نمود.

$$a_{jj}^3 = a_{jja}^3 - a_{jjb}^3 \times 0.5 \times \left[(1-\theta).(P_{\tan k} - P_{air}) + \theta.(P_2 - P_{air})\right] \quad (۲۲)$$

پس از محاسبه ضریب a_{jj}^3، ضرایب A_i^1، A_i^2، A_i^3 و A_i^0 برای تمامی سلول‌ها محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از روش توماس ترازهای آب به دست می‌آیند. دبی عبوری از بازشدگی OWC با استفاده از تراز مربوط مطابق رابطه زیر استخراج می‌شود.

$$q_{jj}^* = a_{jj}^1 \xi_{jj+1}^{n+1*} + a_{jj}^2 \xi_{jj}^{n+1*} + a_{jj}^3 \quad (۲۳)$$

همان‌طور که گفته شد، روند فوق تا تعیین مقدار دقیق دبی و تراز آب درون OWC تکرار می‌شود، لذا مقادیر به دست آمده در هر تکرار به عنوان مقادیر میانی محسوب می‌شوند. به همین دلیل در رابطه فوق با پارامترها با علامت ستاره مشخص شده‌اند. حال به رابطه (۱۲) بازگشت می‌شود و برای مقدار دبی، میانگین q_{jj}^n و q_{jj}^* قرار داده می‌شود. پس از تکرار مراحل فوق به تعداد لازم، مقدار فشار درون دستگاه و دبی عبوری محاسبه می‌شوند. در آخرین تکرار، مقادیر به دست آمده برای ترازهای آب به عنوان مقادیر قطعی محسوب شده و در محاسبه سایر دبی‌ها به کار می‌روند.

۳- نتایج عددی

در این بخش مدل یک بعدی ارائه شده، برای مدلسازی OWC در فضای یک بعدی به کار می‌رود. نتایج آزمایشگاهی موریس و همکاران (۲۰۰۷) به عنوان مبنای مقایسه نتایج و ارزیابی مدل قرار داده شده است.

کانالی برای تولید موج عددی با شرایط اولیه و مرزی مناسب تعریف می‌شود. عمق آب ۰/۹۲ متر و طول OWC برابر ۰/۶۴ متر است و در طول محاسبات ثابت است. میزان بازشدگی OWC، $d_0 = 0.77m$ می‌باشد.

مرز انتهای کانال به عنوان یک مرز بسته برای مدل کردن دیواره پشتی OWC در نظر گرفته شده است. مولد موج در فاصله مناسبی از ابتدای کانال در نظر گرفته شده است. تولید موج با تعریف دبی با استفاده از معادله زیر انجام می‌شود (۶).

$$q_{wave} = C_g \xi(t) \quad (۲۴)$$

C_g سرعت گروهی و $\xi(t)$ معادله تراز آب است که از روابط زیر استخراج می‌شوند.

$$C_g = \frac{1}{2}(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh})C \quad (۲۵)$$

$$\xi(t) = a_0 \sin(\omega t) \quad (۲۶)$$

در روابط فوق $k = 2\pi / L$ عدد موج، h عمق آب، $C = L / T$ سرعت موج، a_0 دامنه موج و $\omega = 2\pi / T$ می‌باشد. در تحقیق حاضر موجی با دامنه $a_0 = 0.04m$ مورد نظر است. مقدار C_g می‌بایست برای امواج مختلف جداگانه محاسبه شود.شرایط موج و طول کانال مطابق اطلاعات داده شده در مقاله ژنگ و همکاران [۵] در نظر گرفته شده است که در جدول زیر آمده است. این مقاله نیز بر مبنای تحقیقات آزمایشگاهی موریس و همکاران [۴] می‌باشد.

جدول۱- برخی از مشخصات امواج مورد استفاده در محاسبات [۵]

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

T دوره تناوب امواج، L_t طول کانال و $K = \omega^2 / g$ می‌باشد. مقادیر dx و dt دارای اثر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج مدل می‌باشند. با بررسی مقادیر مختلف برای آن‌ها، در نهایت $dx = 0.1$ و $dt = 0.005$ در نظر گرفته شد. طول زمان محاسبات ۵۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

۳-۱- کالیبراسیون ضریب e با داده‌های آزمایشگاهی

همان‌طور که در روش مدلسازی اشاره شد، اثر دریچه خروج هوا در بالای اطاقک OWC توسط پارامتر e در معادلات وارد می‌شود. لذا در گام اول لازم است با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، مقدار e کالیبره شود و مقداری برای آن در محاسبات قرار داده شود که نزدیک‌ترین جواب را به نتایج موجود می‌دهد. برای این منظور موج با $Kh = 0.5$ در نظر گرفته می‌شود و مقادیر فشار و تراز آب درون اطاقک OWC از مدل عددی استخراج می‌شود. سپس نتایج با

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.7.2]

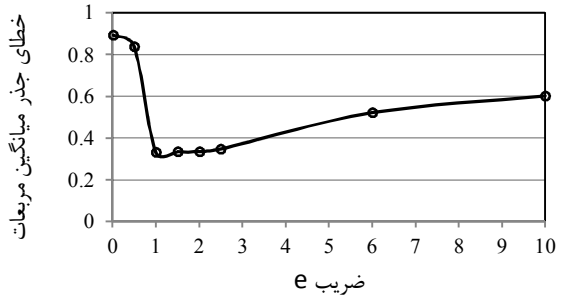
نتایج مدل ژنگ و همکاران مقایسه می‌شود و مقدار e که نزدیکترین نتایج را به دست داده باشد به عنوان مقدار e برای ادامه محاسبات در نظر گرفته می‌شود.

مقدار k' در رابطه (۱۹) 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 می‌شودبا استفاده از مدل عددی، تراز آب درون OWC برای مقادیر e برابر ۰/۰۱، ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵، ۲/۰، ۲/۵، ۶/۰ و ۱۰/۰ به دست آورده می‌شود. جهت مقایسه با داده‌های ژنگ و همکاران[۵]، از جذر میانگین مربعات[۱] استفاده می‌شود. مقادیر RMS برای ترازهای به دست آمده از مدل و نتایج مقاله ژنگ و همکاران محاسبه و در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

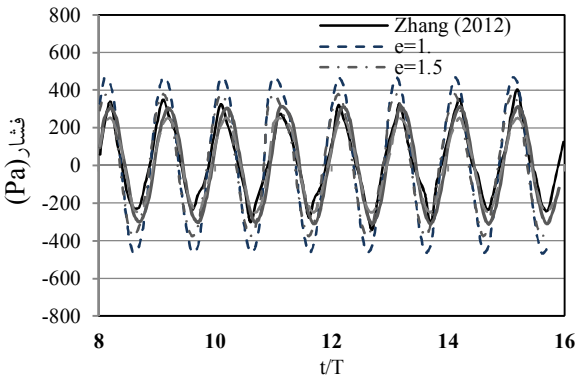
همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود مقدار RMS مربوط به ترازهای آب درون OWC، برای $1.5 < e < 2.5$ در یک محدوده و نزدیک به ۰/۳۳ می‌باشد. حال لازم است فشار درون OWC نیز با نتایج مقاله ژنگ و همکاران مقایسه شود تا مقدار مناسبی برای e انتخاب شود. مقدار RMS از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}(x_{1,t} - x_{2,t})^2}{n}} \qquad (۲۷)$$

n تعداد کل داده‌ها، $x_{1,t}$ و $x_{2,t}$ داده‌های دو گروه مورد مقایسه هستند.



شکل ۴- مقادیر جذر میانگین مربعات ترازهای درون OWC برای $Kh = 0.5$

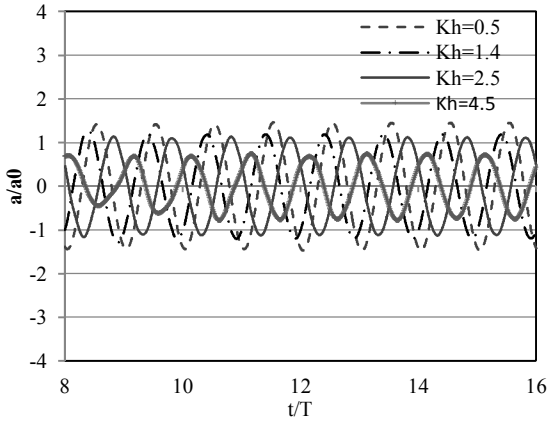


شکل ۵- مقادیر فشار درون OWC برای $Kh = 0.5$

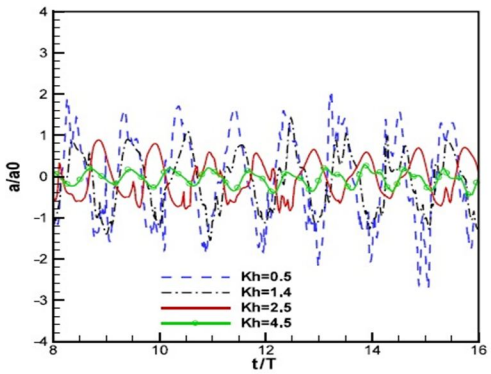
همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، مقدار $e = 2.0$ نزدیکترین مقادیر فشار را به نتایج مقاله ژنگ و همکاران [۵] به دست می‌دهد. بنابراین $e = 2.0$ برای ادامه محاسبات انتخاب می‌شود.

۴-۲- بررسی تغییرات تراز آب و فشار درون اطاقک OWC

حال با استفاده از مدل عددی، فشار و تراز آب درون OWC برای $Kh = 0.5, 1.4, 2.5, 4.5$ با $e = 2.0$ محاسبه می‌شود. شکل ۶ نتایج حاصل از مدل عددی و شکل ۷ نتایج مقاله ژنگ و همکاران[۵] را نشان می‌دهد. محور قائم نسبت تراز آب به دامنه موج ورودی (a_0) و محور افق نسبت زمان به دوره تناوب موج را نشان می‌دهد. روندی که در هر دو نمودار قابل مشاهده است، کاهش تغییرات تراز آب با افزایش Kh و یا به عبارتی کاهش دوره تناوب است. همچنین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل برای تراز آب در حالت $Kh = 4.5$ اندکی بیشتر از مقادیر ارائه شده در مقاله است.



شکل ۶- سری زمانی تراز نسبی سطح آزاد در وسط اطاقک OWC برای Kh های مختلف به دست آمده از مدل یک بعدی



شکل ۷- سری زمانی تراز نسبی سطح آزاد در وسط اطاقک OWC برای Kh های مختلف [۵]

در شکل ۸ سری زمانی مربوط به تغییرات فشار درون OWC نشان داده شده است. شکل ۹، نتایج مربوط به مقاله را نشان می‌دهد. همانند تراز سطح آزاد آب درون دستگاه، مقادیر فشار نیز با افزایش مقدار Kh و به عبارتی کاهش دوره تناوب کاهش می‌یابد. البته

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.7.2]

مقادیر پیش‌بینی شده برای فشار در حالت $Kh = 4.5$ اندکی بیشتر از مقادیر ارائه شده در مقاله است.

۴-۳- محاسبه راندمان OWC

بررسی راندمان OWC در شرایط مختلف موج می‌تواند اطلاعات مفیدی را در اختیار قرار دهد. دستگاه ستون نوسان‌گر آب یک دستگاه جذب انرژی نقطه‌ای است و راندمان آن تحت عنوان نسبت عرض دریافتی[۲] تعریف می‌شود. عرض دریافتی عبارتست از نسبت نرخ انرژی تولید شده داخلی در سطح آزاد اطاقک OWC به نرخ انرژی واحد موج ورودی [۴]. انرژی موج از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

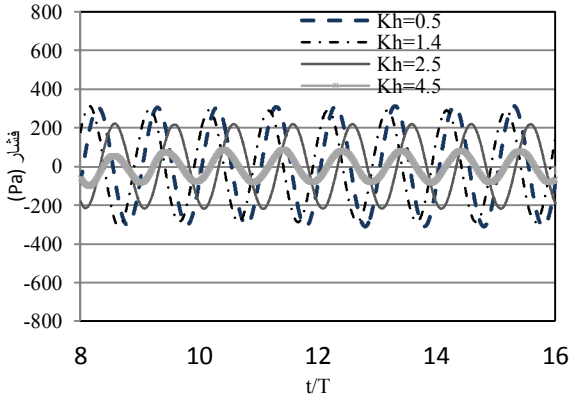
$$P_W = \frac{1}{2}\rho g a^2 C_g \qquad (۲۸)$$

ρ چگالی آب، g شتاب گرانش، a دامنه موج و C_g سرعت گروهی موج 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:

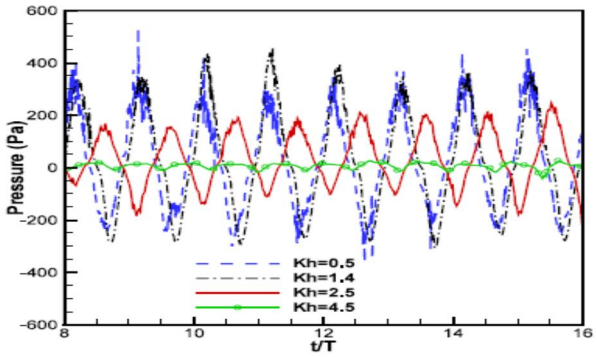
$$W = \frac{\frac{1}{2}\rho g a^2 C_g - \frac{1}{2}\rho g a_r^2 C_g}{\frac{1}{2}\rho g a^2 C_g} = \frac{a^2 - a_r^2}{a^2} \qquad (۲۹)$$

که در آن a_r دامنه موج منعکس شده است.

با استفاده از رابطه (۲۹) مقادیر راندمان برای های مختلف محاسبه شده است. نتایج در شکل ۱۰ در کنار نتایج آزمایشگاهی موریس و همکاران به نمایش گذاشته شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر به دست آمده از مدل حاضر اندکی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی موریس است که البته با توجه به اینکه ترازهای پیش‌بینی شده در مدل نیز اندکی بیشتر بودند امری طبیعی است. روند تغییرات راندمان با توجه به مقادیر Kh کاملا مشابه نتایج آزمایشگاهی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در $Kh = 1.3$ بیشترین مقدار راندمان وجود دارد. مقدار راندمان برای $Kh = 1.3$ در نتایج آزمایشگاهی در حدود ۰/۷۴ و در نتایج مدل حاضر در حدود ۰/۹ می‌باشد. علت افزایش راندمان در یک محدوده از Khها به علت حالت رزونانس متقارنی است که در آن شرایط موج در OWC رخ می‌دهد [۴].



شکل ۸- سری زمانی تغییرات فشار درون OWC برای Kh های مختلف به دست آمده از مدل یک بعدی



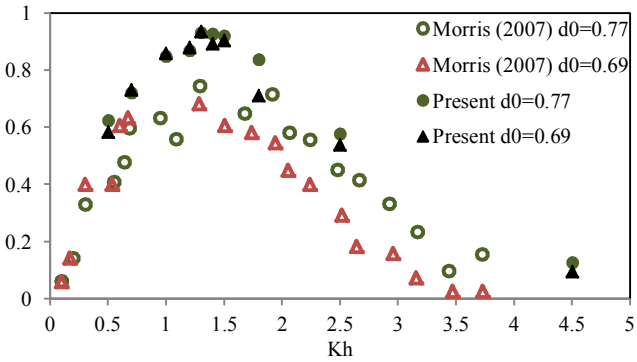
شکل ۹- سری زمانی برای تغییرات فشار درون OWC برای Kh های مختلف [۵]

۴-۳- بررسی اثر بازشدگی OWC بر راندمان دستگاه

از جمله پارامترهای تاثیرگذار بر راندمان OWC، میزان بازشدگی دیواره جلویی دستگاه می‌باشد. به منظور بررسی این موضوع، 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 حاصل به همراه داده‌های متناظر از آزمایش‌های موریس و همکاران [۴]، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کاهش ابعاد بازشدگی OWC یا به عبارتی افزایش آب‌خور دیواره جلویی دستگاه باعث کاهش در راندمان دستگاه می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.7.2]



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر راندمان برای بازشدگی‌های $d_0 = 0.69$ **و** $d_0 = 0.77$

۴- نتیجه گیری

یک مدل یک‌بعدی برای بررسی اندرکنش موج با ستون نوسان‌گر آب در این مقاله ارائه شده است. برتری این مدل نسبت به سایر مدل‌های موجود، سادگی و زمان کم محاسبات است. این در حالی است که مدل قادر است نتایجی نزدیک به واقعیت را به دست دهد. صحت‌سنجی مدل با داده‌های آزماشگاهی نتایج قابل قبولی را به دست داده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در یک محدوده خاص از فرکانس امواج، راندمان دستگاه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در این فرکانس‌های خاص، نوسان داخل ستون آب به حالت تشدید در می‌آید. علاوه بر این بررسی میزان بازشدگی دیواره جلویی ستون نوسان‌گر آب نشان می‌دهد که با افزایش بازشدگی اثر مثبتی در راندمان دستگاه دارد.

کلید واژگان

1- Root mean square
2- Capture width ratio

۴- مراجع

1. Evans DV., (1976), *a theory for wave-power absorption by oscillating bodies*, Journal of Fluid Mechanics. Sep; 77(01):1–25.
2. Evans DV, Porter R., (1995), *Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device*, Applied Ocean Research. Jun; 17(3):155–64.
3. Wang DJ, Katory M, Li YS., (2002), *Analytical and experimental investigation on the hydrodynamic performance of onshore wave-power devices,* Ocean Engineering. Jul; 29(8):871–85.
4. Morris-Thomas MT, Irvin RJ, Thiagarajan KP., (2007), *An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water column*, Journal of offshore mechanics and Arctic engineering; 129(4):273–8.
5. Zhang Y, Zou Q-P, Greaves D., (2012), *Air-water two-phase flow modelling of hydrodynamic performance of an oscillating water column device*, Journal of Renewable Energy; 41:159–70.
6. Madsen PA, Larsen J., (1987), *an Efficient Finite-Difference Approach to the Mild-Slope Equation*, Coastal Engineering, Jun; 11:329–51.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.7.2]