

تحلیل عملکرد و بررسی نیروهای وارد بر مبدل انرژی امواج دریا بر مبنای ستون نوسانی آب تحت اثر موج منظم به روش عددی

مبین معصومی^۱، مهدی یوسفی فرد^۲

yousefifard@nit.ac.ir

۱- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، معماری کشتی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

چکیده

در این پژوهش یک مبدل انرژی امواج بر پایه ستون نوسانی آب با استفاده از روش عددی شبیه‌سازی شده است. معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس با بکارگیری روش عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی و استفاده از کد متن‌باز اوپن‌فوم حل شده است. حلگر مناسب برای در نظر گرفتن آثار سطح آزاد و همچنین آثار آشفتگی جریان بر حل مسئله انتخاب شده است. صحت‌سنجی حل عددی بر مبنای نتایج آزمایشگاهی معتبر و برای مسئله دو بُعدی انجام گرفته است. مواردی نظیر تغییرات سطح آزاد آب داخل مبدل، مقدار فشار و همچنین بازده مبدل ارائه شده و آثار شرایط امواج منتشر شده در تانک عددی بر عملکرد هیدرودینامیکی این مبدل مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین نیروهای وارد بر مبدل در شرایط مختلف ارائه شده و می‌تواند در طراحی مبدل بعنوان یک سازه ساحلی به کار گرفته شود. استفاده از روش حاضر و تولید موج منظم در تانک عددی و شبیه‌سازی دقیق رفتار هیدرودینامی مبدل و بررسی جزئیات دقیق جریان سیال که در تحلیل تجربی قابل ارزیابی نمی‌باشد، باعث ارائه یک راه حل دقیق و مناسب برای دستیابی به بهترین ابعاد و جانمایی این مبدل در شرایط واقعی دریا می‌گردد. نتایج دقیق شبیه‌سازی عددی در مقابل داده‌های تجربی موجود و امکان تحلیل دقیق جزئیات جریان در مقابل پژوهش‌های آزمایشگاهی از نقاط برجسته این مطالعه است.

واژگان کلیدی: مبدل انرژی امواج، ستون نوسانی آب، انرژی تجدید پذیر، دینامیک سیالات محاسباتی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۸/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۹/۰۲/۱۲

۱- مقدمه

استحصال انرژی تجدیدپذیر از منابع دریا در حال توسعه بوده و هنوز به جایگاه واقعی خود در مقابل سایر منابع انرژی دست پیدا نکرده است. از این رو، مطالعات زیادی در این حوزه در حال انجام بوده تا بتواند توجیه مناسبی برای استفاده از این منابع ارائه دهد. استفاده از یک ستون نوسانی آب^۱ بر مبنای امواج دریا یکی از روش‌های تبدیل انرژی امواج به انواع دیگر انرژی می‌باشد. ساخت تأسیسات مورد نیاز این مبدل‌ها در کنار ساحل و یا نقاط دور دست نیازمند صرف هزینه زیاد است. از این رو تلاش می‌گردد تا با افزایش بازده این مبدل‌ها و همچنین بهره‌برداری از آن‌ها در سازه‌های فراساحلی، هزینه نهایی تولید انرژی را کاهش داد. بنابراین عمده پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه تمرکز بیشتری بر روی تحلیل هیدرودینامیکی این مبدل‌ها و بررسی نیروهای وارد بر آن‌ها از سوی امواج وجود دارد. یکی از اولین تحقیقات پایه‌ای انجام گرفته بر روی مبدل‌های ستون نوسانی آب توسط مائدا و همکاران در سال ۱۹۸۵ ارائه شده، که در آن از مفاهیم اولیه برای شبیه‌سازی حرکت نوسانی سطح آزاد آب و تبدیل انرژی به برق استفاده شده است [۱]. همچنین تاکاهاشی و همکاران نیز نمونه‌ای از این نوع مبدل را در ابعاد اصلی در سال ۱۹۹۲ بصورت عملی ساخته و مورد آزمایش قرار دادند [۲]. هو و همکاران با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی، آثار تغییر هندسه ورودی را برای مبدل انرژی امواج بر مبنای ستون نوسانی آب در دو حالت مبدل تنها و یا نصب شده بر روی یک موج‌شکن بررسی نموده‌اند [۳]. نتایج ارائه شده توسط آن‌ها نشان‌دهنده این موضوع بود که تغییر هندسه ورودی مبدل از مقطع دایره‌ای به مستطیلی، اثر چندانی بر روی عملکرد این مبدل نداشته است. از سوی دیگر، نصب این مبدل بر روی یک موج‌شکن، علاوه بر بهبود عملکرد آن، می‌تواند هزینه‌های نصب و انتقال انرژی را نیز تا حد زیادی کاهش دهد.

رضانژاد و همکاران آثار وجود پله در بستر آب را بر عملکرد یک مبدل ستون نوسانی که در نزدیک ساحل نصب شده است را مورد ارزیابی قرار دادند [۴]. آن‌ها با تغییر فاصله پله از مبدل موج و استفاده از یک روش ریاضی ترکیبی توانستند با تغییر هندسه بستر ساحل، بازده مبدل را تا حد

زیادی افزایش دهند. اشلین و همکاران با استفاده از روش آزمایشگاهی، آثار قرارگیری چندین ستون نوسانی در عرض یکدیگر را که در یک موج‌شکن تعبیه شده‌اند مورد بررسی قرار دادند [۵]. با این کار، آن‌ها بازده کلی این مبدل را نسبت به نصب یک مبدل افزایش دادند. هی و هوآنگ با استفاده از روش آزمایشگاهی، عملکرد چنین مبدل‌هایی را در حالتی که بصورت ثابت با استفاده از پایه‌های ستونی و بعنوان موج‌شکن مورد استفاده قرار می‌گیرند مورد بررسی قرار دادند [۶]. در این تحقیق، آثار نصب چنین مبدلی بر میرایی موج در حالات مختلف ارائه شده است.

الحنافی و همکاران نیز یک مبدل ستون نوسانی را که بصورت یک سکوی ثابت طراحی شده است با استفاده از روش عددی و آزمایشگاهی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند [۷]. آن‌ها نیروهای افقی و عمودی وارد بر این سامانه را مورد ارزیابی قرار داده و آثار نصب توربین بر تغییرات نیروی عمودی وارد بر مبدل را ارائه کردند. ژو و هوآنگ با استفاده از روش عددی یک مبدل ستون نوسانی با مقطع دایره‌ای را مورد ارزیابی دقیق قرار دادند [۸]. آن‌ها تمرکز بیشتری بر روی آثار آشفتگی در ناحیه داخل مبدل و ایجاد پدیده اسلاشینگ^۲ داشته‌اند. یکی از دستاوردهای اصلی پژوهش آن‌ها، ارائه اثر مهم لبه‌های دیواره مبدل بر آشفتگی جریان و به تبع آن وجود آشفتگی در سطح آزاد در ناحیه درون مبدل بوده است. رضانژاد و همکاران اخیراً عملکرد هیدرودینامیکی یک مبدل انرژی امواج که به شکل L ساخته شده است را بررسی نموده‌اند [۹]. با چنین کاری آن‌ها توانستند بر مبنای عمق کمتر مبدل به بازده بیشتری دست پیدا کنند. نینگ و همکاران طرح نوآورانه‌ای را در خصوص مبدل ستون نوسانی بر اساس دو استوانه هم‌مرکز ارائه نموده‌اند [۱۰]. تحقیق آن‌ها بر اساس یک حل تحلیلی از جریان پتانسیل استوار است. در این تحقیق آثار حجم استوانه و وجود توربین بر بازده این مبدل مورد ارزیابی قرار گرفت.

ذبیحی و همکاران نیز عملکرد هیدرودینامیکی یک مبدل ستون نوسانی را با روش آزمایشگاهی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند [۱۱]. آن‌ها یک نمونه کوچک‌تر از چنین مبدلی را در حالی که در جایی دورتر از ساحل نصب شده است ساخته و در حوضچه کشش در معرض امواج قرار دادند. آثار

² Sloshing¹ Oscillating Water Column (OWC)

موج خطی و غیر خطی بر بازده مبدل را در حالات مختلف بررسی کرده‌اند. اشلین و همکاران آثار پروفیل بستر آب بر عملکرد هیدرودینامیکی چنین مبدلی را با استفاده از روش آزمایشگاهی و در حضور موج منظم و نامنظم آریایی نمودند [۱۸].

گنیل و همکاران در سال ۲۰۱۸ با استفاده از روش عددی عملکرد یک مبدل ستون نوسانی موج که دارای جابجایی عمودی (هیو) است را مورد بررسی قرار دادند [۱۹]. آن‌ها ابتدا رفتار دینامیکی این مبدل را بر اساس یک تانک دو بُعدی تحلیل کرده و سپس آثار خروجی هوا بعنوان یک مرز در حل عددی را اعمال نمودند. دانیل‌راج و همکاران اخیراً با استفاده از روش آزمایشگاهی آثار وجود دیواره‌های جانبی در مجاورت مبدل امواج را بررسی نموده‌اند [۲۰]. آن‌ها توانستند با چیدمان مناسب این دیواره‌ها، بازده چنین مبدلهایی را تا حد بسیار زیادی افزایش دهند.

بازده یک مبدل ستون نوسانی امواج در بستر پله‌ای به دو روش عددی و آزمایشگاهی توسط رضائزاد و همکاران بررسی شده است [۲۱]. کد عددی مورد استفاده در این تحقیق نیز اوپن‌فوم بوده و آن‌ها نتایج عددی خود را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مقایسه نمودند. الحنافی در سال ۲۰۱۶ با استفاده از روش عددی نیروهای وارد بر یک مبدل ستون نوسانی امواج را ارزیابی نمود [۲۲]. آثار نیروهای وارد از سوی هوای محبوس شده در داخل مبدل بر نیروهای وارد بر آن نیز در این تحقیق ارائه گردید. کامات و همکاران در سال ۲۰۱۵ عملکرد هیدرودینامیکی مبدل ستون نوسانی را با استفاده از روش عددی تحلیل نمودند [۲۳]. آن‌ها در یک تانک عددی دو بُعدی، اثر امواج با طول و شیب موج‌های متفاوت را بر بازده مبدل بررسی کرده و نتایج خود را با داده‌های آزمایشگاهی معتبر مقایسه نمودند. در این پژوهش نیز از نتایج ارائه شده توسط کامات و همکاران و همچنین آزمایش انجام شده توسط موریس-توماس و همکاران [۲۴] برای صحت‌سنجی حل عددی بهره گرفته شده است.

در این مطالعه از یک تانک عددی مبتنی بر کد متن‌باز اوپن‌فوم برای تولید موج منظم و تحلیل عملکرد یک مبدل انرژی امواج دریا تحت تأثیر این موج استفاده شده است. از آنجا که تحقیقات تجربی مناسبی بر روی چنین مبدلهایی

تغییر طیف موج نیز بر عملکرد این مبدل توسط آن‌ها بررسی شده است. تحلیل مبدل ستون نوسانی بر مبنای دو استوانه هم مرکز نیز توسط الحنافی و همکاران و بر اساس روش دینامیک سیالات محاسباتی ارائه شده است [۱۲]. آن‌ها آثار هندسه و همچنین مشخصات موج برخوردی را بر عملکرد مبدل بررسی کرده و بیشترین بازده مبدل را بر این اساس بدست آوردند. سیمونتی و همکاران یک مدل تجربی برای بهینه‌سازی متغیرهای طراحی یک مبدل ستون نوسانی ثابت ارائه نمودند [۱۳]. آن‌ها اطلاعات موجود از تحلیل‌های آزمایشگاهی و حل عددی سایر محققان را بررسی نموده و یک مدل تجربی برای تعیین حالت بهینه بدست آوردند. تیکسیرا و همکاران یک کد عددی بر مبنای حل معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز برای تحلیل مبدل ستون نوسانی امواج که در ساحل نصب شده است، ارائه نمودند [۱۴]. آن‌ها تحلیل خود را در دو مرحله انجام دادند. حل عددی هیدرودینامیک امواج در یک مرحله و تحلیل عملکرد توربین در مرحله دوم انجام گرفته است. در این تحقیق، اثر امواج با پریودهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

هزینه ساخت و نصب این مبدل‌ها در ساحل و یا در نقاطی دورتر از ساحل در مقابل انرژی استحصال شده از آن نسبتاً زیاد است. به همین دلیل نیز ایده استفاده از این مبدل‌ها بعنوان موج‌شکل و یا نصب آن‌ها درون موج‌شکن‌ها مطرح شده است. با این کار هزینه تولید و انتقال انرژی کاهش می‌یابد. پاپیتان و همکاران تحلیل آزمایشگاهی دقیقی را بر روی بارهای وارد شده بر روی چنین مبدلهایی در حالتی که از آن‌ها بعنوان موج‌شکن استفاده می‌شود ارائه نمودند [۱۵]. آن‌ها این تحلیل را بر اساس موج آزمایشگاهی منظم و نامنظم انجام دادند. لاورو و همکاران نیز تحلیل پایداری یک مبدل ستون نوسانی امواج را با استفاده از روش آزمایشگاهی و در حالتی که این مبدل بر روی یک موج‌شکن نصب شده است انجام دادند [۱۶]. آن‌ها نیروهای وارد بر این مبدل را در زمان‌های مختلف و در اثر امواج متفاوت ارائه نمودند.

لو و همکاران در سال ۲۰۱۴ تحلیل عددی با استفاده از حل معادلات غیر خطی سیال را ارائه داده و نتایج خود را در حالت دو بُعدی و سه بُعدی با نتایج آزمایشگاهی سایر محققان مقایسه نمودند [۱۷]. آن‌ها همچنین آثار ارتفاع

¹ Heave

روش حجم سیال برای ارائه تخمین دقیقی از سطح آزاد سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

معادله انتقال در این روش به شرح زیر تعریف می‌گردد:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(U - U_g)\alpha] + \nabla \cdot [U_r(1-\alpha)\alpha] = 0 \quad (3)$$

که در اینجا α بیانگر نسبت حجمی^۴ است، که می‌توان بر اساس آن مشخصات سیال درون هر سلول را محاسبه نمود.

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{air} \\ \alpha = 1 & \text{water} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{int erfase} \end{cases} \quad (4)$$

در معادله (۳) منظور از U_r همان سرعت دامنه جریان است که آثار سرعت در مرز مشترک آب و هوا را اعمال می‌نماید [۱۹]. از سوی دیگر، کشش سطحی در معادله (۲) بصورت $f_\sigma = \sigma \kappa \nabla \alpha$ تعریف می‌شود که در آن σ همان کشش سطحی آب (۰.۰۷ کیلوگرم بر مجذور ثانیه)، κ انحناى سطح آزاد سیال است که با استفاده از تعریف نسبت حجمی (α) قابل محاسبه می‌باشد. چگالی و ویسکوزیته دینامیکی ترکیبی نیز در این روش با استفاده از تعاریف زیر قابل محاسبه است.

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_1 + (1-\alpha) \rho_g \\ \mu = \alpha \mu_1 + (1-\alpha) \mu_g \end{cases} \quad (5)$$

علاوه بر معادلاتی که برای بقای جرم و مومنتوم ارائه شد و همچنین معادلات روش حجم سیال، نیاز است تا معادلات مربوط به آشفتگی نیز بعنوان روش شبیه‌سازی جریان آشفتگی در نظر گرفته شود [۲۸].

۳- معرفی مسئله

مبدل ستون آب نوسانی یک دستگاه مبدل انرژی امواج است که انرژی امواج را از طریق یک محفظه و ستون آب، و هوای درون این محفظه جذب می‌کند. هندسه‌ی محفظه و خصوصیات موج بر عملکرد این دستگاه تأثیر قابل توجهی دارند. در واقع یکی از پارامترهای اساسی در خصوص بازده مبدل نوع و شکل هندسی سازه آن است، که باید طوری طراحی شود که آب حرکت پیستون مانند داشته باشد و سطح آزاد آب درون مبدل به صورت هارمونیک و بدون تلاطم به بالا و پایین حرکت کند.

در گام نخست به منظور صحت‌سنجی از نتایج آزمایشگاهی موریس توماس و همکاران [۲۴] و کامات و همکاران [۲۳]

موجود بوده و ارزیابی این سامانه به روش عددی همچنان در حال توسعه است، در اینجا نیز سعی شده است تا علاوه بر ایجاد یک تانک عددی با دقت بالا، عملکرد مبدل نصب شده در این تانک نیز مورد بررسی قرار گیرد. نکته بارز تحلیل عددی صورت گرفته در این پژوهش ایجاد یک تانک عددی دقیق بر اساس تولید موج در مرز ورودی در یک نرم‌افزار متن‌باز می‌باشد. همچنین نیروهای وارد بر مبدل نیز برای تحلیل‌های بیشتر در شرایط امواج مختلف ارائه شده است.

۲- معادلات حاکم

در اینجا معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس^۱ بعنوان معادلات حاکم بر سیال شبیه‌سازی می‌گردد. همچنین روش حجم سیال^۲ به همراه تراکم مصنوعی برای تشخیص مرز آب و هوا در شبیه‌سازی جریان دوفازی مورد استفاده قرار گرفته است. جزئیات چگونگی اعمال این روش در نرم‌افزار اوپن‌فوم توسط جاساک [۲۵] و همچنین روشه [۲۶] ارائه شده و در اینجا بطور خلاصه مروری بر آن‌ها مشاهده می‌گردد.

معادلات حرکت سیال دو فازی شامل معادلات بقای جرم و مومنتوم بوده که به شرح زیر نوشته می‌شوند:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(U - U_g)U) = \\ - \nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) \\ + (\nabla U) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma \end{aligned} \quad (2)$$

که در اینجا، U و U_g به ترتیب سرعت سیال و سرعت حرکت سلول‌های شبکه می‌باشند. همچنین p_d فشار دینامیک است که از رابطه $p_d = p - \rho g \cdot x$ بدست می‌آید (یعنی تفاضل فشار کل و فشار هیدرواستاتیک).

شتاب گرانش نیز به صورت $g = (0, 0, -9.81)$ تعریف می‌گردد. ویسکوزیته دینامیکی مؤثر برابر است با $\mu_{eff} = \rho(v + v_t)$ که در آن v و v_t به ترتیب معرف ویسکوزیته سینماتیک و گردابه‌ای^۳ می‌باشند. f_σ هم ترم منبعی در اثر کشش سطحی است. همانطور که اشاره شد،

¹ Reynolds-Average Navier-Stokes Equations

² Volume Of Fluid (VOF)

³ Eddy Viscosity

⁴ Volume Fraction

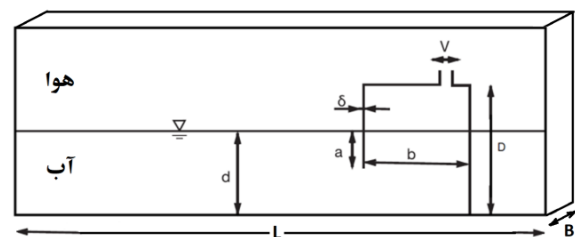
به منظور بررسی پارامترهای فیزیکی مبدل از متغیر بی‌بعد kd به عنوان متغیری استاندارد، که در مرجع‌های مرتبط مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده شده است که $k = \frac{\omega^2}{g}$ و d نیز عمق آب است و در این پژوهش عمق آب، $۰/۹۲$ متر و ثابت در نظر گرفته شده است. در جدول (۲) مشخصات موج تولید شده برای فرآیند صحت‌سنجی ارائه شده است.

از نرم‌افزار متن باز اوپن‌فوم^۱ و حلگر اینترفوم^۲ با بهره‌گیری از معادلات ناویر-استوکس و حل دو فاز با استفاده از تکنیک حجم سیال، و همچنین به دلیل وجود گردابه و تلاطم در سطح آزاد و اطراف دیواره ورودی مبدل از مدل آشفتگی کا-اپسیلون^۳ استفاده شده است. همان‌طور که در نمودار شکل (۲) نشان داده شد اختلاف نتایج مربوط به فشار برای kd معادل $۱/۲۶$ در انواع حل جریان نشان داده شده است که مقادیر دقیق مرتبط به k و ε مربوط به هر موج با سرعت متفاوت ورودی محاسبه شده و در حلگر مربوط به هر طول موج لحاظ شده است. برای تولید موج نیز از کتابخانه‌های موجود در اوپن‌فوم تحت حلگر اصلی اینترفوم استفاده شده است. مقادیر مثبت و منفی فشار ثبت شده در تحلیل آزمایشگاهی در بخش بعد ارائه شده است و نمودار مربوط به مدل آشفتگی کا-اپسیلون تطابق مناسب‌تری با این مقادیر در حالت پایدار دارد.

شرایط مرزی نیز بر اساس یک تانک عددی در نرم‌افزار اوپن‌فوم و بر اساس شکل (۱)، به شرح زیر انتخاب شده است. شرط مرزی ورودی در سمت چپ بعنوان سرعت متغیر برای تولید موج منظم و بر اساس توابع پیش‌فروش نرم‌افزار در نظر گرفته شده است. چنین شرایطی برای مرز سمت راست (بعنوان خروجی) نیز لحاظ شده است. شرط مرزی اعمال شده بر روی بدنه مبدل نیز بصورت گرادین صفر فشار و مقدار ثابت صفر برای سرعت در نظر گرفته شده است. با توجه به دو بُعدی بودن مسئله، برای شرط مرزی دیواره‌های جلو و عقب از شرط تقارن بهره گرفته شده است. دیواره پایین نیز توسط شرط مرزی بدون لغزش برای سرعت سیال تکمیل شده است. در دیواره بالایی نیز نوعی از شرط مرزی فشار خروجی اعمال شده تا نوسانات سطح آزاد سیال کمترین اثر را از سوی هوا بپذیرند.

که طرح آن در شکل (۱) نشان داده شده بهره گرفته شده است. این آزمایش بر روی یک مبدل با مقیاس $۱:۱۲$ انجام پذیرفته است. در بسیاری از تحقیقاتی که بصورت عددی انجام گرفته‌اند، به منظور کاهش آثار میرایی موج برگشتی از سوی مبدل بر دهانه ورودی موج‌ساز، فاصله مبدل تا موج‌ساز ۳ تا ۵ برابر طول موج در نظر گرفته می‌شود [۶، ۱۴، ۱۹ و ۲۳]. که این نسبت به صورت میانگین در حل‌های عددی لحاظ شده است. بنابراین، همانند تحلیل ارائه شده توسط کامات و همکاران [۲۳]، مبدل در فاصله ۲۰ متری از موج ورودی در تانک عددی با ارتفاع $۲/۲$ متر قرار گرفته است. سایر مشخصات مربوط به تانک عددی در جدول (۱) گردآوری شده است.

یکی از موارد تأثیرگذار در فشار خروجی مبدل قطر دهانه خروجی مبدل است، با توجه به مشخصات مبدل اصلی و مقیاس آزمایشگاهی آن قطر دهانه مبدل $۰/۰۵$ متر بدست خواهد آمد، که به دلیل عدم وجود توربین و متعلقات مربوط به آن در محفظه بالای دهانه خروجی از شبیه‌سازی محیط متخلخل و یا کاهش قطر دهانه خروجی معادل آن بهره گرفته می‌شود. که در این پژوهش نیز به همین منظور از دهانه خروجی به عرض $۰/۰۰۵$ متر استفاده شده است.



شکل (۱) طرح فیزیک مسئله و شرایط مرزی حاکم.

جدول (۱) مشخصات ابعادی تانک عددی

متغیر	مقدار	واحد
قطر دهانه مبدل (b)	۰/۶۴	متر
قطر حفره خروج هوا (v)	۰/۰۰۵	متر
عمق آب (d)	۰/۹۲	متر
فاصله لبه مبدل تا سطح آب (a)	۰/۱۵	متر
ارتفاع کلی مبدل از کف (D)	۱/۲۷۵	متر
ضخامت پیشانی مبدل (delta)	۰/۰۴	متر
حداکثر طول کلی دامنه حل (L)	۲۵	متر
عرض دامنه حل (B)	۰/۰۱	متر

¹ OpenFOAM

² InterFoam

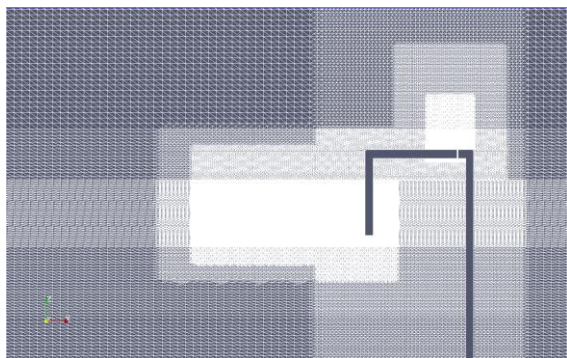
³ k-ε

۴- حل عددی

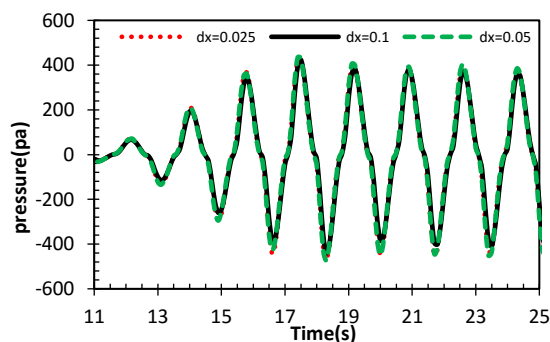
بخش اول مربوط به سطح آزاد، بخش دوم اطراف دهانه خروجی مبدل و بخش سوم هم شبکه‌های اطراف دیواره پیشانی مبدل که مکان وقوع گردابه و اغتشاش در جریان است. همچنین سلول‌هایی با اندازه متفاوت برای حل در حالت عمومی ($kd=1.26$) مورد استفاده قرار گرفت و سه اندازه متفاوت برای بزرگترین سلول در نظر گرفته شد. در نهایت بزرگترین اندازه شبکه معادل 0.05 متر برای کل دامنه انتخاب شد. با توجه به حل دو بُعدی مسئله، تعداد کل سلول‌ها بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ هزار سلول بسته به ابعاد تانک عددی متغیر است. در شکل ۳ (ب) آثار در نظر گرفتن این سه اندازه مشاهده می‌گردد.

۴-۲- صحت‌سنجی

صحت‌سنجی انجام شده در این پژوهش را می‌توان به دو بخش مجزا تقسیم کرد. بخش اول مربوط به مقایسه نمودارهای فشار در نقطه‌ای واقع در میانه مبدل و بالاتر از سطح آزاد (بین دهانه و سطح آزاد) و نمودارهای مربوط به تغییرات سطح آزاد در میانه مبدل است. بخش دوم و نهایی صحت‌سنجی مربوط به بازده مبدل می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۳ (الف) شبکه‌بندی دامنه حل در اطراف مبدل، (ب) اثر اندازه شبکه بر روی نوسان فشار درون مبدل.

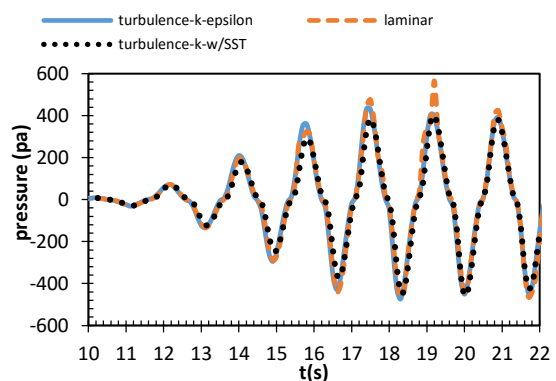
همانطور که در بخش گذشته به آن اشاره شد، مدل یک مبدل ستون نوسانی امواج دریا در یک تانک عددی در معرض امواج منظم قرار گرفته و عملکرد هیدرودینامیکی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. داده‌هایی که اندازه‌گیری شده و با نتایج معتبر سایر محققان مقایسه شده است عبارتند از: تغییرات سطح آزاد آب درون مبدل و سرعت عمودی این تغییرات، فشار هوای داخل مبدل و همچنین بازده مبدل بر اساس تعریفی که در ادامه ارائه می‌گردد. این نتایج بر اساس تحلیل عملکرد یک مبدل ستون نوسانی امواج در یک تانک دو بُعدی در شرایطی است که در جدول (۱) ارائه شده است.

۴-۱- شبکه‌بندی

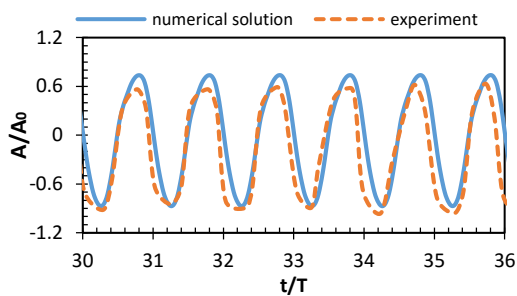
در این مطالعه از شبکه‌بندی سازمان یافته بهره گرفته شده که در نواحی اطراف سطح آزاد و مبدل به تدریج از سلول‌های کوچکتر استفاده شده است. در شکل ۳ (الف) نمایی از نحوه شبکه‌بندی در طرح مبدل ارائه شده است. در واقع تقسیم‌بندی شبکه در این پژوهش به ۳ بخش اصلی تقسیم می‌شود، که نیاز به ریز شدن خواهند داشت.

جدول (۲) مشخصات موج منظم تولید شده در تانک عددی.

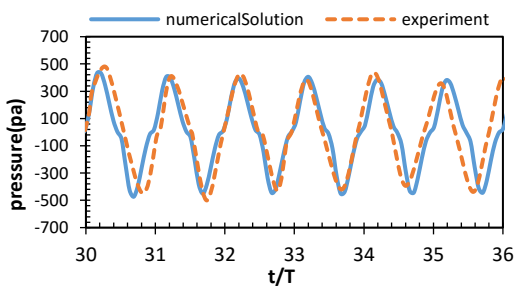
پرورد موج (s)	ارتفاع (m)	طول موج (m)	kd
۲/۷۳	۰/۱۲	۷/۳۶	۰/۵۲
۲/۳	۰/۱۲	۶/۱	۰/۷
۱/۷۱	۰/۱۲	۴/۰۷	۱/۲۶
۱/۴۳	۰/۱۲	۳	۱/۸
۱/۲۱	۰/۱۲	۲/۲۹	۲/۵
۱	۰/۱۲	۱/۵	۳/۵



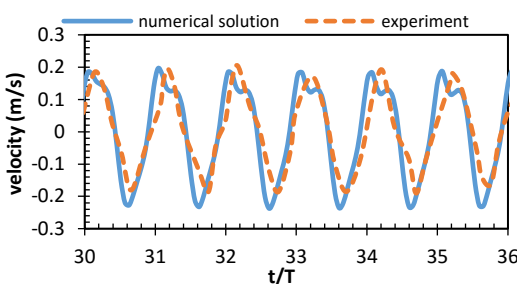
شکل (۲) تأثیر انتخاب نوع مدل آشفتگی بر تغییرات فشار.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴ (الف) تغییرات سطح آزاد آب درون مبدل بر حسب زمان (ب) تغییرات فشار داخل مبدل بر حسب زمان بی‌بعد (ج) تغییرات سرعت عمودی سطح آزاد در میانه طولی مبدل بر حسب زمان ($kd=1.26$).

در نمودار مربوط به سرعت سطح آزاد (شکل ۵ (ب))، مقادیر مرتبط با حل عددی با خطایی معادل ۱۰٪ بیشتر نسبت به مقادیر تجربی بدست آمدند و این در صورتی است که در kd معادل ۱/۲۶ این مقادیر با خطای ۸ درصد کمتر نسبت به نتایج تجربی بدست آمده‌اند. از این رو مبنای اعلام درصد خطای روش مورد استفاده در این پژوهش همان درصد خطای بهینه‌ترین حالت مبدل یعنی kd معادل ۱/۲۶ است. در خصوص علت کاهش خطای محاسباتی در نقطه طراحی مبدل نیز می‌توان به این نکته اشاره کرد که حرکت پیستونی آب درون مبدل در چنین شرایطی باعث شده است که تلاطم کمتری در سطح آزاد مشاهده شده و به همین دلیل نیز روش عددی توانایی بیشتری در شبیه‌سازی دقیق‌تر جریان در نقطه طراحی سیستم دارد.

که با استفاده از مقادیر بدست آمده برای فشار و سرعت سطح آزاد و استفاده از روابطی که در همان بخش ارائه شده است، می‌توان بازده مبدل که از کلیدی‌ترین متغیرهای مربوط به آن است را محاسبه نمود.

۴-۲-۱- فشار و سرعت سطح آزاد

در شکل ۴ (الف) نمودار تغییرات سطح آزاد درون مبدل بر حسب زمان بی‌بعد ارائه و با نتایج بدست آمده توسط کامات و همکاران [۲۳] مقایسه شده است. در طول یک بازه زمانی معادل ده برابر پریرود موج، رفتار یکسانی در خصوص تغییرات دامنه موج داخل مبدل به ثبت رسیده است. این دامنه نیز به نسبت موج ورودی بی‌بعد شده است تا بتوان آن‌ها را به راحتی با داده‌های تجربی موجود مقایسه نمود. متوسط دامنه مثبت و منفی ثبت شده برای تغییرات سطح آب ناشی از حل عددی به ترتیب معادل ۰/۷۳۰۲ و ۰/۸۷۷۷ بوده که مقدار ارتفاع موج ثبت شده دارای اختلاف ۶/۶ درصدی با نتایج آزمایشگاهی است.

در شکل ۴ (ب) نیز تغییرات فشار هوا در نقطه‌ای واقع در میانه مبدل بر حسب زمان ارائه شده است. تغییرات فشار هوا در داخل مبدل تابعی از قطر دهانه خروجی مبدل و همچنین نحوه نوسان سطح آزاد در داخل مبدل است. در مورد تغییرات فشار نیز تطابق مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌گردد. متوسط فشار مثبت و منفی ثبت شده در این بازه زمانی به ترتیب برابر ۴۳۳ و ۴۶۰ کیلوپاسکال است که اختلاف ۵/۸ درصدی در بازه تغییرات فشار بین نتایج عددی و تجربی به چشم می‌خورد.

متغیر دیگری که می‌تواند در چنین مسئله‌ای اندازه‌گیری و بررسی گردد، سرعت عمودی حرکت سطح آزاد آب درون مبدل می‌باشد. بنابراین، سرعت سطح آزاد در نقطه میانی طول مبدل محاسبه شده و در شکل ۴ (ج) تغییرات آن بر حسب زمان بی‌بعد ارائه و با مقادیر آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است.

البته نتایج حاصل و میزان خطای محاسباتی در هر مقدار kd متفاوت بوده و بسته به تغییرات شرایط موج و تأثیرپذیری مبدل، متغیر خواهد بود. شکل (م) مربوط به مقدار kd معادل ۰/۵۲ است ($\lambda = 7.36$ و $T = 2.73$). میزان خطای محاسباتی در نمودار مربوط به فشار از ۵/۸ درصد در حالتی که مقدار kd معادل ۱/۲۶ بوده به خطایی کمتر از ۴ درصد در kd برابر ۰/۵۲ تبدیل شده است.

آزاد و P_c فشار است. در نهایت، بازده مبدل به ازای واحد عرض آن، به این صورت تعریف می‌گردد:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (۸)$$

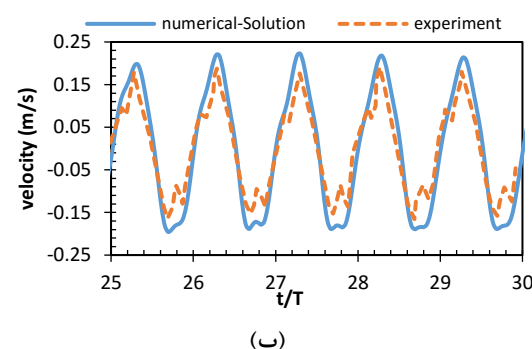
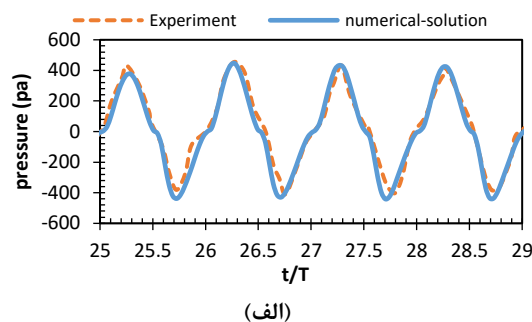
بازده مبدل برای مقادیر مختلف از kd با استفاده از حل عددی محاسبه شده است. که به صورت کامل در جدول (۳) ارائه شده است. مهم‌ترین بخش در محاسبه بازده مبدل محاسبه زاویه θ ، یا همان اختلاف فاز است. که بدین منظور باید از تطابق نمودار فشار و سرعت سطح آزاد با ضریب تطبیق ۱۰۰۰ استفاده کرد. به صورتی که اختلاف زمانی بین قله‌های دو نمودار بیانگر اختلاف فاز خواهد بود. و همان‌طور که در رابطه (۷) مشاهده می‌شود $\cos\theta$ تأثیری اصلی بر فشار خروجی خواهد داشت. در واقع هرچه اختلاف فاز بیشتر باشد، سیکل کاری نامنظم‌تر شده و بازده مبدل نیز کاهش می‌یابد.

برای نمونه در kd برابر $1/26$ مقدار بازده ۷۱ درصد بدست آمده است. در چنین طول موجی، حرکت نوسانی سطح آب درون مبدل به شکل یک پیستون قابل مشاهده می‌باشد. در حقیقت، کمترین تلفات ناشی از تلاطم جریان درون مبدل ایجاد شده و بخش زیادی از انرژی موج توسط مبدل جذب می‌گردد. با کمتر و بیشتر شدن طول موج، نوسانات سطح آب درون مبدل و تغییرات سطح آزاد آب در نقطه‌ای دور دست، هماهنگی خود را از دست داده و توانایی مبدل در جذب انرژی امواج کاهش می‌یابد.

این عدد در بازده محاسبه شده از تحلیل تجربی کامات و همکاران [۲۳] معادل ۷۶ درصد بوده، که ۵ درصد خطای محاسباتی را در بهترین حالت راندمان مبدل نشان می‌دهد. به منظور مشاهده بهتر نتایج خروجی بازده مبدل، می‌توان از نمودار مقایسه‌ای شکل (۶) استفاده کرد.

جدول (۳) مقادیر مربوط به فشار، سرعت عمودی و بازده مبدل در حل عددی.

kd	حداکثر فشار مبدل (Pa)	حداکثر سرعت عمودی (m/s)	بازده (درصد)
۰/۵۲	۴۴۶	۰/۲۱۹	۴۸
۰/۷	۴۷۰	۰/۱۰۵	۵۷
۱/۲۶	۴۰۴	۰/۱۸۸	۷۱
۱/۸	۳۶۱	۰/۱۷	۶۳
۲/۵	۲۰۸	۰/۱۳	۴۲
۳/۵	۶۸	۰/۰۹	۵/۸



شکل (۵) (الف) تغییرات فشار داخل مبدل بر حسب زمان بی‌بعد، (ب) تغییرات سرعت عمودی سطح آزاد در میانه طولی مبدل بر حسب زمان ($kd=0.52$).

۴-۲-۲- بازده مبدل

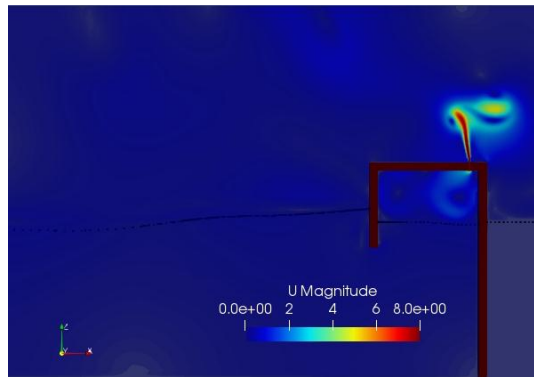
یکی دیگر از متغیرهایی که می‌توان آن را در حل عددی و تجربی بدست آورد، بازده مبدل است. در اینجا از همان روابطی استفاده می‌گردد که در سایر پژوهش‌ها برای محاسبه بازده مورد استفاده قرار گرفته است. بازده مبدل بر اساس انرژی امواج منتشر شده در تانک و مقدار انرژی جذب شده توسط مبدل تعریف می‌گردد. به همین دلیل چند متغیر جدید تعریف می‌شوند. فشار ورودی به صورت رابطه (۶) بدست خواهد آمد:

$$P_m = \frac{\rho_w \cdot g \cdot h^2 \cdot \lambda}{16T} \left[1 + \frac{4\pi d / \lambda}{\sinh(4\pi d / \lambda)} \right] \quad (۶)$$

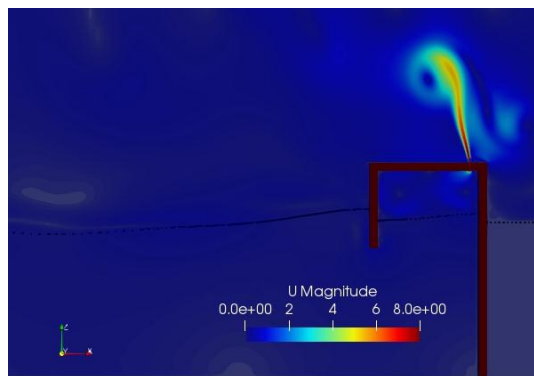
که واحد آن وات بر متر است. در این معادله، T همان پریود موج ورودی، ρ_w چگالی آب دریا و h و λ نیز به ترتیب ارتفاع و طول موج می‌باشد. همچنین فشار خروجی به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود، که در واقع با استفاده از حل عددی به محاسبه مقادیر مربوط فشار خروجی پرداخته می‌شود.

$$P_{out} = \frac{1}{T} \int_0^T P_c(t) \cdot q(t) dt = \frac{1}{2} |P_c| \cdot |w_{fs}| \cdot b \cdot l \cdot \cos(\theta) \quad (۷)$$

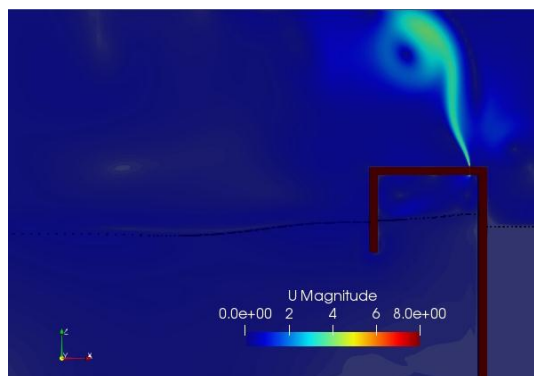
که در اینجا، θ اختلاف فاز بین سرعت سطح آزاد و فشار خروجی، l طول دریچه، b عرض مبدل، w_{fs} سرعت سطح



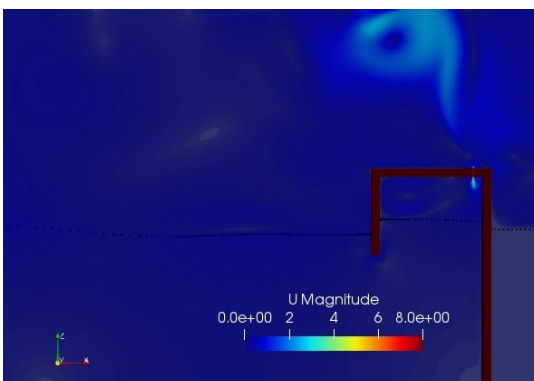
ت=1/4T (ج)



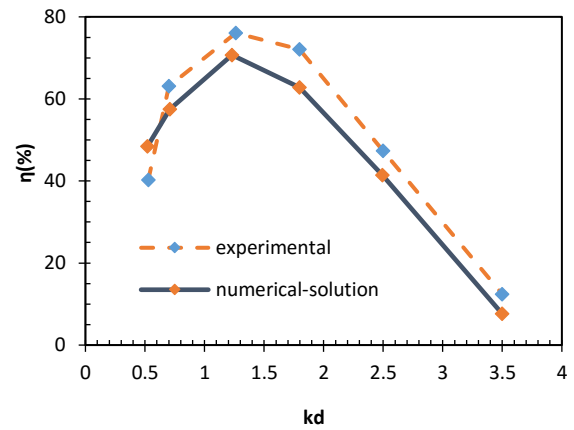
ت=3/8T (د)



ت=1/2T (ه)

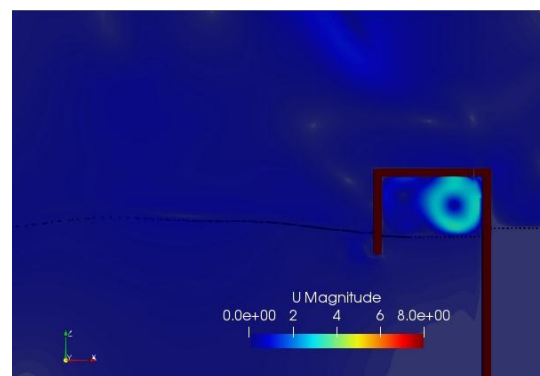


ت=5/8T (و)

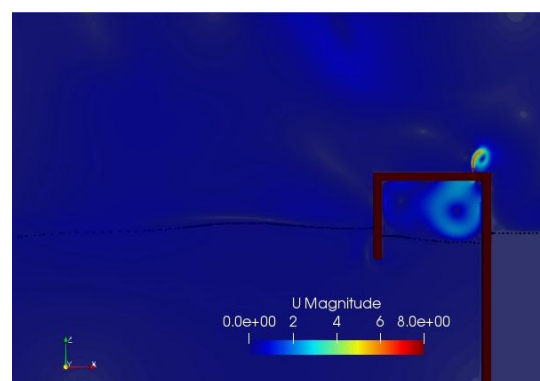


شکل (۶) اثر تغییرات طول موج بر بازده مبدل.

همچنین کانتور سطح آزاد و سرعت در زمان‌های مختلف در شکل (۷) ارائه شده است. در این شکل برای یک پریود زمانی و ۸ بازه مختلف می‌توان تغییرات سرعت سیال را در ناحیه حفره بالایی مبدل مشاهده نمود. این شکل‌ها تمامی فرآیند را از دو حالت جریان مثبت و منفی در مسیر حفره نمایش می‌دهد.



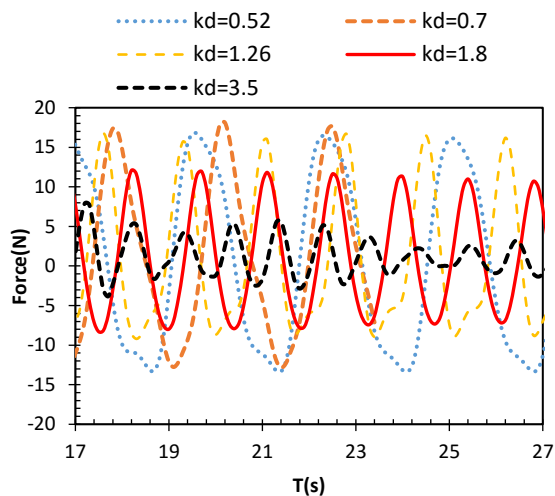
ت=0T (الف)



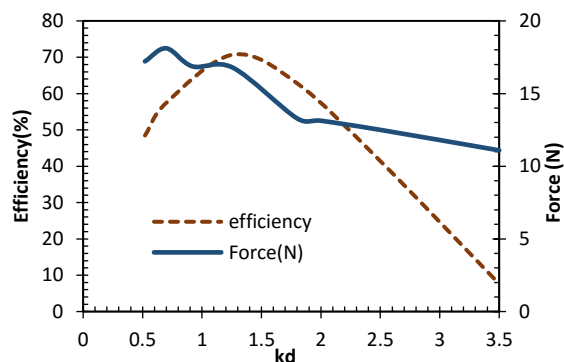
ت=1/8T (ب)

نرم افزار تغییراتی ایجاد شده است تا در زمان های مختلف، مؤلفه های عمودی و افقی نیروی وارد بر مبدل ثبت شده و آثار متغیرهای موج بر آن ها مورد ارزیابی قرار گیرد. در شکل (۸) نمودار تغییرات نیروی افقی وارد بر مبدل به ازای مقادیر مختلف kd رسم شده است. در شکل ۸ (الف) تغییرات نیرو با زمان ارائه شده و سپس در شکل ۸ (ب) بیشترین مقدار نیرو به ازای هر kd ترسیم گردیده است. همانطور که مشاهده می گردد، با افزایش مقدار kd نیروی وارد بر مبدل کاهش می یابد و آثار تغییر مقدار kd بر نیروی افقی بعد از $kd=2$ بسیار کمتر است.

در بخش صحت سنجی، اثر تغییرات طول موج برخوردی بر عملکرد مبدل بررسی گردید. در آنجا فرض بر این بود که دامنه موج منتشر شده در تانک عددی ثابت بوده و تنها آثار تغییر طول موج مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، تأثیر تغییر دامنه موج در طول موج ثابت نیز بررسی و نمودارهای نیروی عمودی و افقی وارد بر مبدل ارائه می گردد.

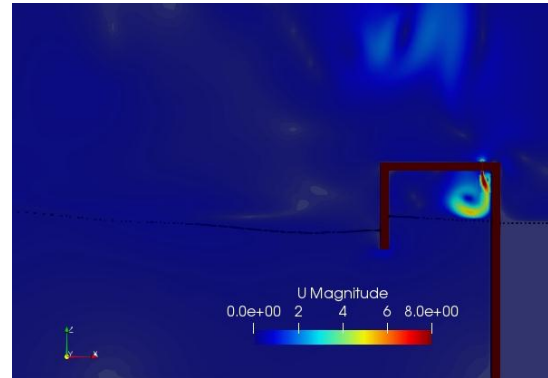
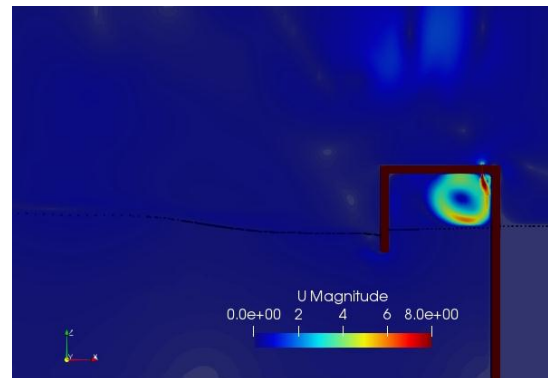
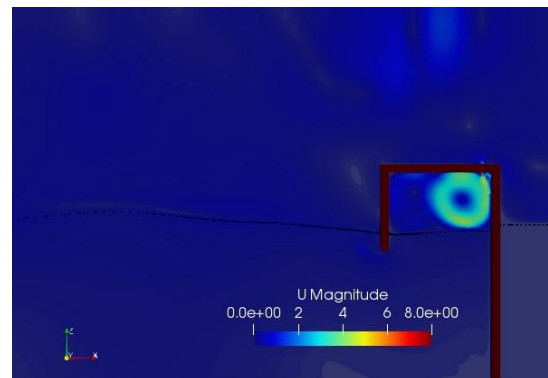


(الف)



(ب)

شکل (۸) مقادیر نیروی افقی وارد بر مبدل در kd های مختلف.

 $t=3/4T$ (ز) $t=7/8T$ (ح) $t=T$ (ط)

شکل (۷) کانتور سرعت سیال در شرایط طراحی و در زمان های مختلف ($kd=1.26$)

۳-۴- بررسی نیروهای وارد بر مبدل

از آنجا که در بسیاری از موارد، از چنین مبدل هایی در سازه های ساحلی نظیر موج شکن ها استفاده می شود، یکی از تحلیل هایی که می توان بر روی آن ها ارائه نمود، بررسی نیروهای وارد بر مبدل است. در اینجا مبدل بعنوان یک جسم ثابت شبیه سازی شده است که می توان از آن بعنوان موج شکن نیز استفاده نمود. در کد عددی پیش فرض

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش از یک روش عددی مبتنی بر نرم افزار متن باز اوپن فوم برای حل معادلات متوسط گیری شده ناور-استوکس و برای شبیه سازی عملکرد هیدرودینامیکی و بررسی نیروهای وارد بر یک مبدل ستون نوسانی امواج استفاده شده است.

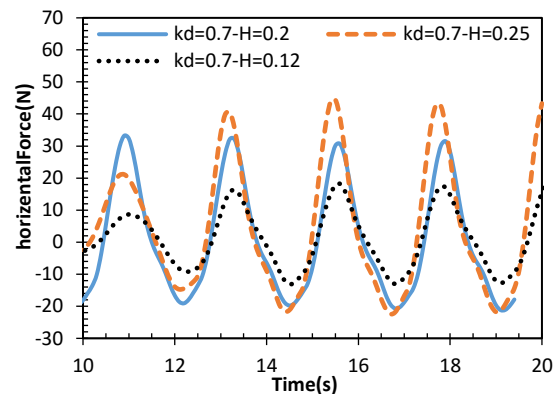
در نظر گرفتن جریان دوفازی و تولید موج در یک تانک عددی از چالش های پیش روی این پژوهش بوده است. همچنین تأثیرات استفاده از مدل سازی آشفتگی جریان نیز در این مطالعه ارائه شده است. روش ارائه شده در این مطالعه با توجه به ایجاد یک تانک عددی و تولید امواج منظم بر مبنای روش حجم محدود توانسته است به خوبی جزئیات هیدرودینامیکی این مبدل را شبیه سازی نماید. دامنه امواج تولید شده، تغییرات سطح آزاد آب درون مبدل، فشار داخل مبدل و همچنین بازده مبدل در جذب و تبدیل انرژی امواج با مقادیر آزمایشگاهی معتبر موجود مقایسه شده روش عددی حاضر صحه گذاری شده است.

همچنین آثار تغییرات موج منتشر شده بر عملکرد هیدرودینامیکی آن ارزیابی شده است. مطابقت مناسب نتایج حل عددی در مقایسه با داده های تجربی باعث می گردد تا بتوان از این روش برای طراحی و تحلیل سامانه های جذب و تبدیل انرژی امواج بهره گرفت. بر اساس یافته های این مطالعه می توان نتیجه گرفت:

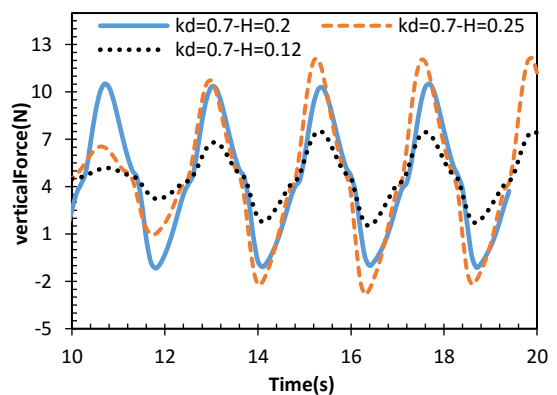
- ✓ افزایش طول موج ابتدا باعث بهبود عملکرد و افزایش بازده مبدل شده و این روند تا مقدار $kd=0.26$ ادامه می یابد. سپس، افزایش بیشتر طول موج منجر به کاهش بازده خواهد شد.
- ✓ ارتباط مستقیم بین بازده مبدل و بیشترین فشار ثبت شده در آن دارد.
- ✓ متوسط خطا در حل عددی برای تخمین تغییرات فشار و دامنه سطح آزاد در حالت طراحی و در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به ترتیب معادل 0.1 و 6.63 درصد می باشد، که این نکته مؤید دقت مناسب شبیه سازی عددی است.
- ✓ نیروی افقی وارد بر مبدل محاسبه شده و مشخص شد که افزایش مقدار kd منجر به کاهش نیروی افقی وارد

علاوه بر آن، به منظور بررسی دقیق تر تأثیر متغیرهای امواج بر نیروی وارد بر مبدل، از موج در حالتی که kd و ارتفاع موج به ترتیب معادل 0.7 و 0.12 متر، که بیشترین نیرو را بر سازه وارد می کند، به عنوان پایه حل، و از ارتفاع های $0.25/0-25/0$ متر با همان kd ، به عنوان متغیر استفاده شده است.

با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل (۹)، تغییرات در نیروی وارد بر سازه با تغییر در ارتفاع موج روندی مشابه با تغییر در طول موج خواهد بود. مشاهده می شود که این تغییرات در قسمت مثبت دامنه موج یعنی بالاروی آب درون مبدل بیشتر بوده و در قسمت منفی دامنه حرکت سطح آزاد که شامل پایین روی آب می شود، کمتر است. در این شرایط واضح است که نیروی عمودی وارد بر مبدل نیز تابع ارتفاع موج است. همچنین ملاحظه می شود مقدار این نیرو در مقابل نیروی افقی وارد شده به مبدل، بسیار کوچک است.



(الف)



(ب)

شکل (۹) مقادیر نیروی افقی و عمودی وارد بر مبدل در kd ثابت و ارتفاع موج های مختلف.

- [5] Ashlin, S.J., Sannasiraj, S.A., Sundar, V., "Performance of an Array of Oscillating Water Column Devices Integrated with an Offshore Detached Breakwater", Ocean Engineering, Vol.163, pp.518-532, 2018.
- [6] He, F., Huang, Zh., "Hydrodynamic Performance of Pile-Supported OWC-Type Structures as Breakwaters: An Experimental Study", Ocean Engineering, Vol.88, pp.618-626, 2014.
- [7] Elhanafi, A., Macfarlane, G., Fleming, A., Leong, Zh., "Experimental and Numerical Measurements of Wave Forces on a 3D Offshore Stationary OWC Wave Energy Converter", Ocean Engineering, Vol.144, pp.98-117, 2017.
- [8] Xu, C., Huang, Zh., "Three-Dimensional CFD Simulation of a Circular OWC with a Nonlinear Power-Takeoff: Model Validation and a Discussion on Resonant Sloshing Inside the Pneumatic Chamber", Ocean Engineering, Vol.176, pp.184-198, 2019.
- [9] Rezanejad, K., Souto-Iglesias, A., Guedes Soares, C., "Experimental Investigation on the Hydrodynamic Performance of an L-Shaped Duct Oscillating Water Column Wave Energy Converter", Ocean Engineering, Vol.173, pp.388-398, 2019.
- [10] Ning, D., Zhou, Y., Zhang, Gh., "Hydrodynamic Modeling of a Novel Dual-Chamber OWC Wave Energy Converter", Applied Ocean Research, Vol.78, pp.180-191, 2019.
- [11] Zabihi, M., Mazaheri, S., Montazeri Namin, M., "Experimental hydrodynamic investigation of a fixed offshore Oscillating Water Column device", Applied Ocean Research, Vol. 85, pp. 20-33, 2019.
- [12] Elhanafi, A., Macfarlane, G., Ning, D., "Hydrodynamic Performance of Single-Chamber and Dual-Chamber Offshore-Stationary Oscillating Water Column Devices using CFD", Applied Energy, Vol.228, pp.82-96, 2018.
- [13] Simonetti, I., Cappietti, L., Oumeraci, H., "An Empirical Model as a Supporting Tool to Optimize the Main Design Parameters of a Stationary Oscillating Water Column Wave Energy Converter", Applied Energy, Vol.231, pp.1205-1215, 2018.
- [14] Teixeira, P.R.F., Davyt, D.P., Didier, E., Ramalhais, R., "Numerical Simulation of an Oscillating Water Column Device using a Code based on Naviere-Stokes Equations", Energy, Vol.61, pp.513-530, 2013.
- [15] Pawitan, K.A., Dimakopoulos, A.S., Vicinanza, D., Allsop, W., Bruce, T., "A Loading Model for an OWC Caisson based Upon Large-Scale Measurements", Coastal Engineering, Vol.145, pp.1-20, 2019.

بر مبدل می‌گردد. این کاهش نیرو به ازای افزایش kd در مقادیر kd کوچکتر از ۲ مشهود است.

✓ آثار تغییر ارتفاع موج بر نیروی افقی و عمودی نیز ارائه شد که روند کلی تغییرات مشابه تغییر طول موج است. همچنین مقدار نیروی عمودی وارد بر مبدل در مقابل نیروی افقی وارد بر آن ناچیز است.

۶- علائم، نشانه‌ها و ارقام

b	عرض مبدل (متر)
d	عمق آب (متر)
l	طول دریچه (متر)
h, H	ارتفاع موج (متر)
k	عدد موج
T	پریود موج (ثانیه)
P	فشار کل (نیوتن بر متر مربع)
P_d	فشار دینامیکی (نیوتن بر متر مربع)
U	سرعت سیال (متر بر ثانیه)
U_g	سرعت سلول‌های شبکه (متر بر ثانیه)

حروف یونانی

α	نسبت حجمی
λ	طول موج (متر)
σ	کشش سطحی (نیوتن بر متر)
ρ	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)

۷- مراجع

- [1] Maeda, H., Kinoshita, T., Masuda, K., Kato, W., "Fundamental Research on Oscillating Water Column Wave Power Absorbers", Journal of Energy Resources Technology, Vol.107, No.1, pp.81-86, 1985.
- [2] Takahashi, S., Nakada, H., Ohneda, H., Shikamori, M., "Wave Power Conversation by Prototype Wave Power Extracting Caisson in Sakata Port", Coastal Engineering, Vol.23, pp.3440-3453, 1992.
- [3] Howe, D., Nader, J.R., "OWC WEC Integrated Within a Breakwater Versus Isolated: Experimental and Numerical Theoretical Study", International Journal of Marine Energy, Vol.20, pp.165-182, 2017.
- [4] Rezanejad, K., Bhattacharjee, J., Guedes Soares, C., "Stepped Sea Bottom Effects on the Efficiency of Nearshore Oscillating Water Column Device", Ocean Engineering, Vol.70, pp.25-38, 2013.

- an Industrial Perspective”, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol.23, No.4, pp.305-316, 2009.
- [16]Lauro, E.D., Lara, J.L., Maza, M., Losada, I.J., Contestabile, P., Vicinanza, D., “Stability Analysis of a Non-Conventional Breakwater for Wave Energy Conversion”, *Coastal Engineering*, Vol.145, pp.36-52, 2019.
- [17]Luo, Y., Nader, J.R., Cooper, P., Zhu, S.P., “Nonlinear 2D Analysis of the Efficiency of Fixed Oscillating Water Column Wave Energy Converters”, *Renewable Energy*, Vol.64, pp.255-265, 2014.
- [18]Ashlin, S.J., Sundar, V., Sannasiraj, S.A., “Effects of Bottom Profile of an Oscillating Water Column Device on its Hydrodynamic Characteristics”, *Renewable Energy*, Vol.96, pp.341-353, 2016.
- [19]Connell, K.O., Thiebaut, F., Kelly, G., Cashman, A., “Development of a Free Heaving OWC Model with Non-Linear PTO Interaction”, *Renewable Energy*, Vol.117, pp.108-115, 2018.
- [20]Daniel Raj, D., Sundar, V., Sannasiraj, S.A., “Enhancement of Hydrodynamic Performance of an Oscillating Water Column with Harbour Walls”, *Renewable Energy*, Vol.132, pp.142-156, 2019.
- [21]Rezanejad, K., Gadelho, J.F.M., Guedes Soares, C., “Hydrodynamic Analysis of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter in the Stepped Bottom Condition using CFD”, *Renewable Energy*, Vol.135, pp.1241-1259, 2019.
- [22]Elhanafi, A., “Prediction of Regular Wave Loads on a Fixed Offshore Oscillating Water Column-Wave Energy Converter using CFD”, *Journal of Ocean Engineering and Science*, Vol.1, No.4, pp.268-283, 2016.
- [23]Kamath, A., Bihs, H., Arntsen, Q.A., “Numerical Investigations of the Hydrodynamics of an Oscillating Water Column Device”, *Ocean Engineering*, Vol.102, pp.40-50, 2015.
- [24]Morris-Thomas, M.T., Irvin, R.J., Thiagarajan, K.P., “An Investigation Into the Hydrodynamic Efficiency of an Oscillating Water Column”, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 129, pp. 273-278, 2007.
- [25]Jasak, H., “Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows”, Imperial College, London, UK, Ph.D.thesis, 1996.
- [26]Rusche, H., “Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-phase Flows at High Phase Fractions”, Imperial College, London, UK, Ph.D.thesis, 2002.
- [27]Berberović, E., Van Hinsberg, N., Jakirlić, S., Roisman, I., Tropea, C., “Drop Impact onto a Liquid Layer of Finite Thickness: Dynamics of the Cavity Evolution”, *Physical Review E*, Vol.79, No.3, pp.36306, 2009.
- [28]Menter, F.R., “Review of the Shear-Stress Transport Turbulence Model Experience from