

# بررسی عددی عملکرد دستگاه ستون نوسان گر آب (OWC) تحت امواج موجود در سواحل جنوبی ایران

میلاذ هاشمی

دانشجوی کارشناسی ارشد، نانو فناوری، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

صادق صادق زاده\*

استادیار، نانو فناوری، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

## چکیده

در این تحقیق روش حجم محدود برای شبیه‌سازی عددی دستگاه ستون نوسان گر آب به کار گرفته شده است. برای این منظور از دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه معادلات ناویر استوکس استفاده شد. دستگاه ستون نوسان گر آب استوانه ای مورد استفاده قرار گرفت و این نوع دستگاه دارای قابلیت تقارنی در برخورد با امواج می‌باشد. بررسی‌ها در دو بخش انجام گرفته‌اند. در بخش اول، از مقایسه بین مقادیر آزمایشگاهی و عددی با امواج شبیه‌سازی شده، مطابقت مناسبی حاصل شد. در بخش دوم از تحقیق، به بررسی میزان اثر ابعاد و هندسه دستگاه، مشخصات امواج مختلف موجود در سواحل جنوبی ایران و عمق‌های مختلف استغراق به منظور یافتن بهترین عملکرد دستگاه پرداخته شد. نتایج نشان داد که تغییر در مشخصات امواج و میزان عمق استغراق دستگاه ستون نوسان گر آب، دارای اثرات ناچیزی بر روی عملکرد دستگاه می‌باشد. در واقع برای یک دستگاه با قطر ثابت، تغییر در دامنه موج و دوره تناوب، در حدود ۲/۹۴ درصد تغییر در عملکرد دستگاه داشته است. همچنین در مطالعه قطر دستگاه مشخص شد که ابعاد و هندسه بیشترین تاثیر را بر عملکرد آن دارد به گونه‌ای که با افزایش دو و چهار برابری در قطر دستگاه، عملکرد آن به ترتیب ۲/۵۴ و ۱۰/۲۷ برابر می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** ستون نوسان گر آب، دینامیک سیالات محاسباتی، موج، شبیه‌سازی.

## Numerical Investigation of the Performance of Oscillating Water Column (OWC) Device under the Waves Character on the Southern Coast of Iran

M. Hashemi  
S. Sadeghzadeh

Schoole of New Technologies, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

Schoole of New Technologies, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

### Abstract

In this study, numerical simulation of oscillating water column device is presented using a finite-volume method. For this purpose, the computational fluid dynamic model based on Navier-Stokes equations, was used. The cylindrical OWC was used and this kind of device has a symmetric ability for dealing with the waves. Analyses are divided into two sections. In the first section, the waves variables obtained from both experimental and numerical research with simulated waves are compared and similar results are obtained. In the second section, an investigation of the chamber geometry, the wave characters on the southern coast of Iran and different depths of submergence of OWC that provide the best device performance is carried out. It is found that both the different wave characters and depths of submergence of OWC tests indicate little influence over the device performance. Indeed, the device performance with a constant diameter has improved about 2.94 percent, with changes in amplitude and period. Also, the chamber diameter tests indicated that the device geometry has greatest influence in its performance, so that, when the device diameter has increased two and four times, the device performance has increased by 2.54 and 10.27 times, respectively.

**Keywords;** Oscillating Water Column (OWC), Computational Fluid Dynamics (CFD), Wave, Simulation.

### ۱- مقدمه

و ... استفاده می‌شود. فالکائو<sup>۱</sup> (۲۰۱۲) روش‌های مختلف تولید انرژی از امواج که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند را در سه دسته کلی تقسیم‌بندی کرده است:

۱- ستون نوسان گر آب<sup>۲</sup> (تولید انرژی با استفاده از توربین هوا) ۲- اجسام نوسان گر ۳- سیستم سرریز کننده<sup>۳</sup>.

ستون نوسان گر آب که یکی از انواع مبدل‌های انرژی امواج دریا می‌باشد، بعد از تحقیقاتی در سال ۲۰۱۰ نامگذاری شد [۲]. در این روش که یک ساختار زیر آبی است، هوای بالای سطح آب بدام می‌افتد و امواج ورودی باعث نوسان ستون آب شده که باعث به حرکت درآمدن توربین می‌شود. توان تولیدی این دستگاه با توجه به ابعاد و محل اجرا متفاوت، اما در نمونه اجرا شده در جنوب هندوستان توانی معادل ۱۲۵ کیلووات در ابعاد واقعی ایجاد گردید [۲]. با توسعه مدل‌های عددی در

امروزه با گسترش تقاضای انرژی، تحقیقات گسترده‌ای در مورد منابع جدید انرژی صورت گرفته است. یکی از منابع جدید انرژی، دریاهای می‌باشند. در میان منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی نهفته در دریاهای و اقیانوس‌ها برای استحصال انرژی الکتریکی مورد تحقیقات گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. به دلیل شرایط جغرافیایی ایران و داشتن خط ساحلی وسیع و مرزهای گسترده آبی در شمال و جنوب کشور و جزایر مستعد، کشورمان می‌تواند به یکی از پتانسیل‌های منطقه در جذب انرژی دریا تبدیل شود [۱]. لازمی جذب انرژی امواج، وجود دستگاهی است که بتواند با برخورد صحیح امواج با آن حداکثر انرژی موجود در آنها را جذب نماید.

در طراحی سیستم‌های استحصال انرژی امواج دریاهای و اقیانوس‌ها، از ویژگی‌های مختلف موج، مانند بالاروی موج، پایین روی موج، ضربه زنی موج، فشار هیدرولیکی، حرکت نوسانی، خاصیت جاری بودن موج

<sup>1</sup> Falcao

<sup>2</sup> Oscillating Water Column

<sup>3</sup> Overtopping

حال حاضر نرم‌افزارهای زیادی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی در سرتاسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های عددی براساس ابعاد واقعی عمل نموده و از شرایط خاص جهت تعیین سرعت جریان آشفتنه و تولید موج استفاده می‌نمایند. نرم‌افزار فلو تری‌دی<sup>۱</sup> نرم‌افزاری چند جانبه و سازگار با شرایط پیچیده جریان در مدل‌سازی به صورت دو بعدی و سه بعدی است. این نرم‌افزار توانایی حل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت یا معادلات ناویر استوکس را داراست بطوریکه میدان جریان را به صورت حجم کنترل‌های مجزا در نظر می‌گیرد و از معادلات حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال گرفته می‌شود.

در این مطالعه شبیه‌سازی با استفاده از مدل عددی دینامیک سیالات محاسباتی نرم‌افزار فلو تری‌دی و بر اساس نتایج آزمایشگاهی لویز و همکاران (۲۰۰۹) [۳] و نتایج شبیه‌سازی سن تورک و همکاران (۲۰۱۱) [۴] انجام می‌گیرد. از نتایج لویز و همکاران (۲۰۰۹) برای صحت‌سنجی نرم‌افزار و کالیبراسیون با یک مدل آزمایشگاهی و از نتایج شبیه‌سازی سن تورک و همکاران (۲۰۱۱) برای کالیبراسیون با یک مدل در ابعاد واقعی استفاده شد. در ادامه و بعد از شناسایی مدل آشفتگی و شبکه مناسب، به بررسی عملکرد دستگاه ستون نوسان‌گر آب تحت امواج موجود در سواحل ایران و با ابعاد مختلف دستگاه پرداخته و نتایج ارائه می‌گردد.

در سال‌های اخیر، با افزایش توانایی‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری کامپیوترها، دینامیک سیالات محاسباتی برای تشخیص رفتار سیالات به طور گسترده در صنعت و محیط زیست مورد استفاده قرار گرفته است. برخی از پیشرفت‌های استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی برای مطالعه جریان‌های موجی دریا در سال‌های اخیر صورت گرفته است. بیشتر تلاش‌های صورت گرفته در زمینه تبدیل کننده‌های انرژی موج<sup>۲</sup> بر پایه روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی استوار می‌باشند. در ادامه به بررسی مطالعات صورت گرفته پرداخته می‌شود. الکساندر و همکاران (۱۹۸۷) به بررسی عددی سیستم ستون نوسانی آب پرداختند. آنها اظهار داشتند که بیشترین انرژی خروجی از دستگاه در شرایط رزونانس<sup>۳</sup> (تشدید) صورت می‌گیرد [۵]. ایوانس و پورتر (۱۹۹۵) خصوصیات هیدرودینامیکی یک دستگاه ستون نوسانی آب را مورد بررسی قرار دادند. آنها روشی دقیق و کارآمد برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیک و بهینه‌سازی حداکثر بهره‌وری نظری دستگاه تبدیل کننده انرژی موج را بر اساس مدل توزیع فشار ارائه کردند [۶]. تکزیرا و همکاران (۲۰۱۳) به شبیه‌سازی دستگاه ستون نوسان‌گر آب نصب شده در کنار ساحل با استفاده از معادلات ناویر استوکس پرداختند. آنها برای شبیه‌سازی از امواج با دوره تناوب بین ۴ تا ۱۵ ثانیه استفاده کردند. همچنین در مطالعات خود به بررسی الگوی سرعت و خطوط جریان در اطراف دیواره جلویی ستون نوسان‌گر آب و در دو دوره تناوب ۷ و ۱۲ ثانیه پرداختند. آنها در مشاهدات خود اظهار داشتند که جریان‌ات در جلوی دیواره دستگاه و در دوره تناوب ۷ ثانیه دارای تلاطم بیشتری نسبت به دوره تناوب ۱۲ ثانیه می‌باشند [۷]. بوعلی و لاری (۲۰۱۳) به بررسی اثر تغییر در ابعاد هندسی ستون نوسان‌گر آب تحت موج منظم

بر میزان خروجی دستگاه و با استفاده از دو مدل عددی انسیس آی سی ای ام<sup>۴</sup> و سی اف ایکس<sup>۵</sup> پرداختند. انسیس آی سی ای ام برای ترسیم هندسه و شبکه بندی و انسیس سی اف ایکس برای حل مدل عددی جریان مورد استفاده قرار گرفتند. جریان در یک شبکه دو بعدی و با استفاده از مدل آشفتگی k-ε شبیه‌سازی شد. آنها اظهار داشتند که اندازه اتاق، عمق غوطه‌وری دیواره جلوی دستگاه و زاویه آن در مقابل مسیر جریان بیشترین اثر را در خروجی دستگاه دارند [۸]. کتابداری و احمدی (۱۳۹۱) به بررسی امکان‌سنجی جذب انرژی امواج دریا در سواحل جنوبی ایران به وسیله سیستم ستون نوسان‌گر آب در کنار ساحل پرداختند. آنها در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع موج ورودی، سرعت موج ورودی افزایش یافته و این عمل باعث افزایش توان دستگاه می‌شود. همچنین آنها اظهار داشتند که با افزایش ارتفاع امواج ورودی به سیستم به میزان ۱۰٪، سرعت ورودی به توربین دستگاه نیز ۱۰٪ افزایش می‌یابد (برای امواج منظم). که این افزایش ده‌درصدی منجر به افزایش توان دستگاه به میزان ۴۰٪ می‌شود [۱]. صاحب‌الزمانی و منتظری یمین (۱۳۹۲) به بررسی عددی اندرکنش موج با یک واحد نیروگاهی ستون نوسان‌گر آب در فضای دوبعدی قائم پرداختند. در پایان در بررسی فشار و تراز آب درون دستگاه اظهار داشتند که برای موج‌های مختلف با افزایش دوره تناوب، فشار و تراز آب درون دستگاه کاهش می‌یابد [۹]. صاحب‌الزمانی و منتظری یمین (۱۳۹۳) همچنین به بررسی عددی اندرکنش موج با واحد نیروگاهی ستون نوسان‌گر آب در فضای یک‌بعدی پرداختند. بررسی‌ها توسط آنها نشان داد 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 توسط آنها نشان داد که افزایش بازشدگی اثر مثبتی در راندمان دستگاه دارد [۱۰].

## ۲- حل عددی مسئله

نرم‌افزار فلو تری‌دی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در محیط سه بعدی قادر به پیش‌بینی جریان سیال با سطح آزاد می‌باشد. این نرم‌افزار دارای توانایی‌های بسیاری است. با استفاده از تغییر در داده‌های ورودی، محققین قادر به بررسی مشخصات گوناگون سیال در دامنه بسیار وسیع خواهند بود [۱۱].

این نرم‌افزار می‌تواند معادلات دیفرانسیلی را در دو قالب مختصات کارتزینی و استوانه‌ای مورد حل قرار دهد. ناحیه محاسباتی با استفاده از سیستم مختصات کارتزینی به یک شبکه متشکل از سلول‌های شش وجهی با اندازه‌های متغیر تقسیم‌بندی می‌شود. برای هر سلول، مقادیر متوسط پارامترهای جریان (نظیر سرعت و فشار) در زمانهای مجزا و در مرکز هر سلول محاسبه می‌شوند. برنامه‌ی مذکور محل موانع جریان را با اجرای روش تخلخل سلولی بنام نسبت سطح به حجم مانع ارزیابی

<sup>4</sup> ANSYS ICEM CFD  
<sup>5</sup> CFX  
6 FAVOR

<sup>1</sup> Flow-3D  
<sup>2</sup> Wave Energy Converters  
<sup>3</sup> Resonant

ضریب مربوط به فشار سطحی سیال می‌باشد و مقادیر ۰ و ۱ را اختیار می‌کند.  
معادله حجم جریان:

$$V_F \frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (AUF) = 0 \quad (5)$$

که در این رابطه (A) متوسط نسبت مساحت جریان در جهات (x,y,z)، (U) متوسط سرعت در جهات (x,y,z)، (F) تابع نسبت سیال که مقادیری بین (۰ و ۱) دارد. در این پژوهش از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای  $k - \epsilon$  و RNG استفاده شده است. در مدل دو معادله‌ای  $k - \epsilon$  انرژی جنبشی آشفتگی و  $\epsilon$  اتلاف آن می‌باشد. در این مدل یک معادله انتقال اضافی برای اتلاف آشفتگی باید حل شود. مدل آشفتگی دیگر (مدل RNG) بر پایه گروه‌های مجدداً نرمال شده می‌باشد. مدل RNG از معادلاتی مشابه مدل  $k - \epsilon$  استفاده می‌کند و به عنوان مدلی شناخته شده است که با دقت بیشتری جریان‌هایی با شدت آشفتگی کم و جریان‌هایی که نواحی برشی قوی دارند را بررسی می‌کند [۱۲].

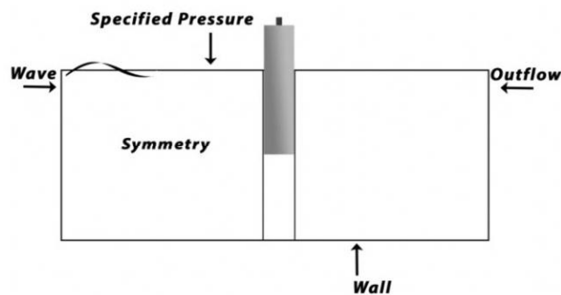
### ۳-۲- انتخاب شرایط مرزی

شرایط مرزی برای شبکه محاسباتی به گونه‌ای انتخاب گردید که در مرز ورودی شرط موج مورد استفاده قرار گرفت. معادله پتانسیل سرعت  $\phi(x, z, t)$  و ارتفاع سطح آزاد جریان  $\eta(x, t)$  موج خطی که از عمق میانگین محاسبه می‌شود به صورت روابط زیر می‌باشد:

$$\eta = A \cos(kx - \omega t + \phi) \quad (6)$$

$$\phi(x, z, t) = xU + \frac{A\omega \cosh[k(z+h)] \sin(kx - \omega t + \phi)}{k \sinh(kh)} \quad (7)$$

که در این روابط A دامنه موج، k عدد موج،  $\omega$  بسامد زاویه‌ای، t زمان،  $\phi$  زاویه تغییر فاز، U مولفه سرعت در جهت انتشار موج و h عمق میانگین جریان می‌باشد. در بستر شبیه‌سازی شرط مرزی دیوار ثابت<sup>۲</sup>، در دو طرف جانبی از شرط مرزی تقارن، در خروجی شرط مرزی جریان خروجی و در مرز بالایی فشار مشخص استفاده شد که در شکل ۱ نمای شماتیک شرایط مرزی در اطراف دستگاه ستون نوسان‌گر آب نمایش داده شده است. همچنین برای افزایش سرعت محاسبات، منطقه عبور جریان<sup>۳</sup> برای سیال در نرم‌افزار تعریف شد. برای کاستن از حجم و زمان محاسبات با در نظر گرفتن منطقه عبور جریان می‌توان قسمتی از فضای داخل شبکه حل را به سیال اختصاص داد [۱۲].



شکل ۱- شرایط مرزی شبیه‌سازی در اطراف ستون نوسان‌گر آب

می‌کند. همچنین سطح آزاد آب با استفاده از روش اصلاح شده حجم سیال<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود.

### ۳-۱- معادلات حاکم

معادلات حرکت سیال شامل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و بقای انرژی است.

معادله بقای جرم یا معادله پیوستگی:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = \text{RDIF} + \text{RSOR} \quad (1)$$

که در این معادله (VF) مقدار نسبت حجم باز به جریان،  $\rho$  جرم مخصوص سیال، (u,v,w) به ترتیب سرعت در راستای (x,y,z)، (A<sub>x</sub>, A<sub>y</sub>, A<sub>z</sub>) به ترتیب مقادیر کسره‌های سطحی برای جریان در راستای (x,y,z)، R و  $\xi$  مربوط به سیستم مختصات انتخابی بطوریکه در مختصات کارتزین (مستطیلی)، R برابر ۱ و  $\xi$  برابر صفر است. RDIF تابع دیفیوژن و RSOR تابع چشمه و نیز مربوط به محیط‌های متخلخل و ورود سیال ثانویه به محیط محاسبات با مقادیر و زمان‌های تعیین شده، و یا به عبارتی مسائل با دو نوع سیال می‌باشد.

معادلات اندازه حرکت:

معادلات اندازه حرکت، جزئی از معادلات ناور-استوکس هستند. معادلات ناور-استوکس با توجه به روش‌های استفاده شده در نرم‌افزار از روابط زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{\text{SOR}}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = - \frac{1}{\rho} \left[ R \frac{\partial p}{\partial y} \right] + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{\text{SOR}}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{\text{SOR}}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \quad (4)$$

که در این روابط (G<sub>x</sub>, G<sub>y</sub>, G<sub>z</sub>) شتاب ثقل در جهات (x,y,z) و (f<sub>x</sub>, f<sub>y</sub>, f<sub>z</sub>) شتاب‌های لزجت می‌باشند. (b<sub>x</sub>, b<sub>y</sub>, b<sub>z</sub>) افت‌های جریان در محیط متخلخل و عبارت آخر سمت راست مربوط به تزریق جرم از یک منبع احتمالی موجود با مولفه هندسی مشخص می‌باشد. (u<sub>w</sub>, v<sub>w</sub>, w<sub>w</sub>) و (u<sub>s</sub>, v<sub>s</sub>, w<sub>s</sub>) به ترتیب سرعت‌های جزء متحرک و سرعت سیال نسبت به جزء متحرک و در سه جهت می‌باشند.  $\delta$

<sup>2</sup> Wall

<sup>3</sup> Fluid region

<sup>1</sup> VOF

### ۳- صحت سنجی مدل

#### ۴-۱- صحت سنجی با مدل آزمایشگاهی

برای کالیبراسیون مدل از نتایج آزمایشگاهی لویز و همکاران (۲۰۰۹) استفاده شد. فلوم آزمایشگاهی دارای ۲۰ متر طول و ۷۰ سانتی متر عرض بوده و عمق آب ۵۰ سانتی متر در زمان آزمایش تنظیم شده است.

یک لوله ثابت شده با مقطع دایره‌ای به عنوان دستگاه ستون نوسان‌گر آب در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. این دستگاه در فاصله ۹ متری از ابتدای فلوم قرار داده شد. قطر داخلی دستگاه ۲۶ میلی‌متر و ضخامت لوله مورد استفاده ۴ میلی‌متر، ارتفاع کلی آن ۵۱ سانتی‌متر و عمق مستغرق آن ۱۸ سانتی‌متر می‌باشد. انتهای لوله باز و از طریق اتصال در بالای آن به صورت مستغرق نگهداشته شده است. مدل آزمایشگاهی از محدوده فرکانسی ۰/۵ تا ۱/۵ هرتز و ارتفاع موج بین ۷ تا ۵۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است که در مدل شبیه‌سازی شده دوره تناوب ۱/۵ ثانیه و ارتفاع موج ۳ سانتی‌متر به کار برده شد. نرم‌افزار فلو تری‌دی از شبکه مش‌بندی راست گوشه کارترین و استوانه‌ای استفاده می‌کند. هندسه مورد استفاده در مسئله، درون این شبکه راست گوشه قرار گرفته که این امر موجب تعریف مجزایی از شبکه و هندسه مسئله می‌گردد و در نتیجه تغییر در مشخصات هندسی مسئله تاثیری بر مش‌بندی نخواهد داشت. در همین راستا از مطالعات آزمایشگاهی لویز و همکاران (۲۰۰۹) به منظور آنالیز شبکه محاسباتی با یک مدل حقیقی در این تحقیق استفاده می‌گردد. در این تحقیق برای شبیه‌سازی، از شبکه مش‌بندی کارترین استفاده شد. همچنین برای دقت بیشتر شبیه‌سازی در اطراف مانع (ستون نوسانگر) و به دلیل ابعاد کوچک دستگاه در مدل آزمایشگاهی، فشردگی مش‌بندی، که نرم‌افزار قابلیت تولید آن را دارد به کار گرفته شد. در ابتدای این تحقیق برای مطالعه میزان حساسیت شبکه محاسباتی (استقلال حل از شبکه مش) و همچنین پیدا کردن شبکه‌ای مطلوب، از سه شبکه L1، L2 و L3 که دارای تعداد مش متفاوت می‌باشند استفاده شده و نتایج آنها با هم مقایسه گردیده است. مشخصات این شبکه‌ها در جدول ۱ مشاهده می‌گردد.

جدول ۱- مشخصات شبکه‌های محاسباتی

شبکه	Nc			δC			NT	NCD
	x	y	Z	x	y	z		
L1	۱۳۰۰	۱	۶۹	۰/۱۳۰	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۸۹۷۰۰	۱۳
L2	۱۷۳۳	۱	۹۲	۰/۱۰۰	۰/۲۴۶	۰/۲۴۶	۱۵۹۴۳۶	۱۷
L3	۲۶۰۰	۱	۱۳۸	۰/۰۶۶	۰/۱۶۶	۰/۱۶۶	۳۵۸۸۰۰	۲۶

که در جدول فوق Nc تعداد سلول در جهات مختلف، δC کوچکترین بعد سلول در جهات مختلف که نسبت به قطر دستگاه بی‌بعد شده است، NT تعداد کل سلول‌های شبکه محاسباتی و NCD تعداد سلول موجود در مقطع عرضی دستگاه در جهت X هستند. عمق آب به دلیل اهمیت در این تحقیق و اینکه تابعی از سرعت و گرانشی سیال است به عنوان پارامتر مورد مطالعه در بررسی میزان خطا مورد استفاده قرار گرفت. برای این امر میزان اختلاف در مقادیر حداکثر و

حداقل ارتفاع در دامنه موج درون دستگاه با مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). هر سه شبکه دارای خطای حداکثر کمی هستند اما در دو حالت شبکه متوسط (L2) و درشت (L1) مقدار خطای حداقل بسیار زیاد بوده و با توجه به این معیار و در نظر گرفتن زمان محاسبات می‌توان از شبکه ریز (L3) با شرط اینکه خصوصیات جریان با شرایط آزمایشگاهی مطابقت مناسبی داشته باشد، در محاسبات استفاده کرد. همچنین از نمودارهای توزیع اندازه سرعت درون دستگاه در فاز ۱۶۰ درجه برای روندیابی مطالعه شبکه محاسباتی استفاده گردید (شکل ۲). همانطور که در نمودار شکل ۲ مشاهده می‌شود نمودار توزیع اندازه سرعت برای شبکه درشت با دیگر شبکه‌ها کمی تفاوت را نشان می‌دهد، اما بین دو شبکه متوسط و ریز اختلاف حداقل وجود دارد و دو شبکه دارای روند همگرایی می‌باشند.

جدول ۲- مقادیر شبیه‌سازی شده حداکثر و حداقل ارتفاع در دامنه موج درون دستگاه و مقدار خطای شبیه‌سازی برای شبکه بندی‌های مختلف

شبکه	نوع شبکه بندی	دامنه موج شبیه سازی شده (متر)		درصد خطا در میزان حداکثر و حداقل دامنه موج شبیه سازی شده نسبت به مدل آزمایشگاهی (%)	
		حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
L1	درشت	-۰/۰۴۷۱	۰/۰۳۹۱	۱۷/۷۵	-۲/۲۵
L2	متوسط	-۰/۰۴۲۷	۰/۰۳۸۸	۶/۷۵	-۳/۰۰
L3	ریز	-۰/۰۳۹۱	۰/۰۴۰۷	-۲/۲۵	۱/۷۵

در ادامه و بعد از مشخص شدن شبکه مناسب (L3)، به منظور مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای  $k - \epsilon$  و RNG، نمودار شبیه‌سازی شده تغییرات سطح آب در درون دستگاه با استفاده از این دو مدل با نمودار نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۳). همچنین از روش‌های آماری خطای مجذور میانگین مربعات<sup>۱</sup> و خطای نسبی<sup>۲</sup> برای مقایسه نتایج دو مدل آشفتگی استفاده گردید. خطای مدل‌های آشفتگی در جدول ۳ نمایش داده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (O_i - P_i)^2} \quad (8)$$

$$RE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \left( \frac{O_i - P_i}{P_i} \right)^2} \quad (9)$$

که در این روابط  $O_i$  و  $P_i$  به ترتیب مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده هستند.

1 RMSE  
2 RE

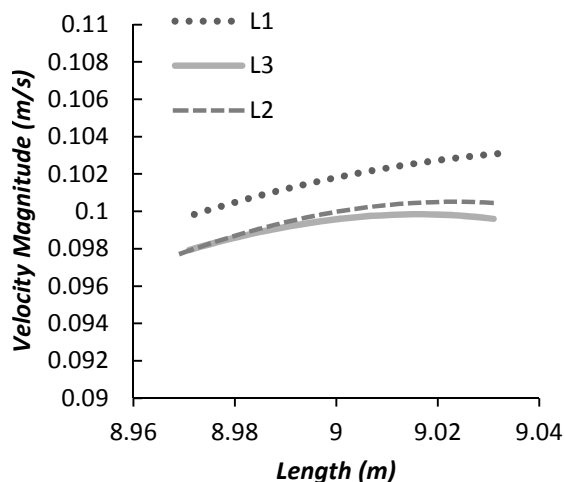
برآورد و میزان حداکثر، مدل دو معادله‌ای  $k - \epsilon$  تطابق نسبتاً بهتری را با مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

#### ۴-۲- صحت سنجی با مدل عددی و ابعاد واقعی

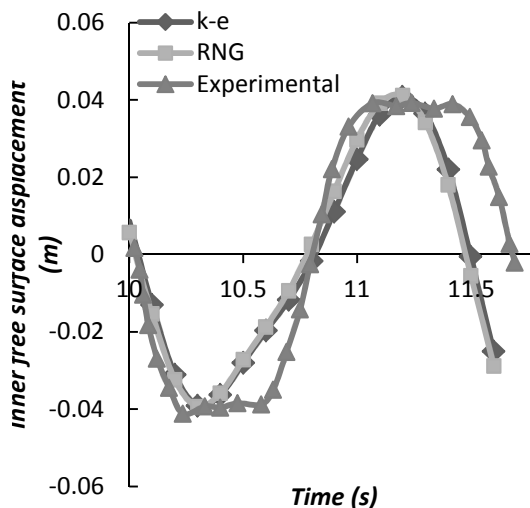
برای کالیبراسیون مدل در ابعاد واقعی از نتایج مطالعات عددی سن تورک و همکاران (۲۰۱۱) که با به کارگیری نرم‌افزار فلونت بدست آمده و با استفاده از مدل واقعی کایمی<sup>۱</sup> (۱۹۷۸) صحت سنجی شده و دارای ابعاد واقعی است، استفاده شد. شبیه‌سازی توسط سن تورک و همکاران (۲۰۱۱) با به کارگیری حدود ۷۰۰۰۰ سلول محاسباتی و در زمان شبیه سازی ۱۲۵ ثانیه انجام گرفت. دستگاه ستون نوسان‌گر آب شبیه‌سازی شده در این تحقیق دارای ارتفاع و قطر ۱۰ متر و عمق استخرق دستگاه ۵ متر بوده است که امواجی با دامنه ۱/۲ متر و دوره تناوب ۵ ثانیه در اطراف دستگاه مورد شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند. در این بخش از تحقیق برای شبیه‌سازی، از شبکه مش‌بندی کارترین استفاده شد. همچنین به دلیل ابعاد واقعی و بزرگ دستگاه در مدل، و جلوگیری از افزایش زمان محاسبات، فشردگی مش‌بندی، در اطراف دستگاه به کار برده نشد. همچنین برای مطالعه میزان حساسیت شبکه محاسباتی (استقلال حل از شبکه مش) و همچنین پیدا کردن شبکه‌ای مطلوب، از سه شبکه S1، S2 و S3 که دارای تعداد مش متفاوت می‌باشند استفاده شده و نتایج آنها با هم مقایسه گردیده است. مشخصات این شبکه‌ها در جدول ۴ مشاهده می‌گردد. که در جدول فوق  $N_C$  تعداد سلول در جهت مختلف،  $\delta_C$  کوچکترین بعد سلول در جهت مختلف که نسبت به قطر دستگاه بی‌بعد شده است،  $N_T$  تعداد کل سلول‌های شبکه محاسباتی و  $N_{CD}$  تعداد سلول موجود در مقطع عرضی دستگاه در جهت X هستند. برای مقایسه شبکه‌ها، میزان اختلاف در مقادیر حداکثر و حداقل ارتفاع در دامنه موج درون دستگاه با مدل شبیه‌سازی شده توسط سن تورک و همکاران (۲۰۱۱) مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۵). همانگونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، هر سه شبکه دارای خطای حداکثر نسبتاً زیادی هستند اما در دو حالت شبکه متوسط (S2) و ریز (S3) این مقدار کمتر است. همینطور در دو حالت شبکه متوسط (S2) و درشت (S1) مقدار خطای حداقل بسیار زیاد بوده و با توجه به این معیار و در نظر گرفتن زمان محاسبات می‌توان از شبکه ریز (S3) با شرط اینکه سایر خصوصیات جریان با نتایج شبیه‌سازی شده توسط سن تورک و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت مناسبی داشته باشد، در محاسبات استفاده کرد.

جدول ۴- مشخصات شبکه‌های محاسباتی

شبکه	Nc	$\delta_C$			Nc			شبکه
		z	y	x	z	y	x	
S1	۶۳۰	۱	۶۰	۱/۳۹	۱/۴۰	۱/۴۰	۳۷۸۰۰	
S2	۱۲۵	۱	۱۲	۱/۱۹	۱/۲۰	۱/۲۰	۱۵۶۲۵	
S3	۲۵۰	۱	۲۵	۱/۰۹	۱/۱۰	۱/۱۰	۶۲۵۰۰	



شکل ۲- نمودار شبیه‌سازی شده توزیع اندازه سرعت در درون دستگاه در سه نوع شبکه محاسباتی

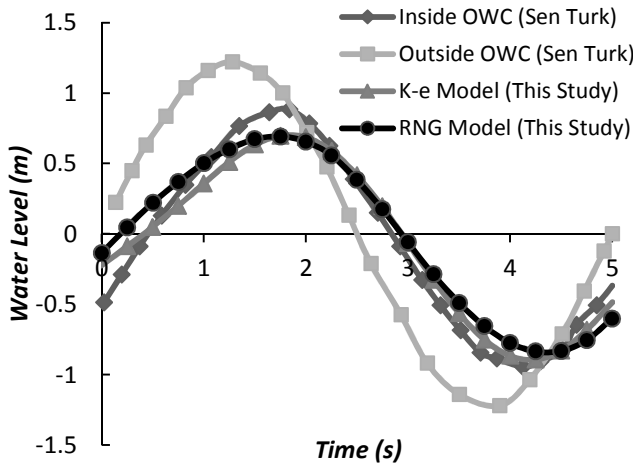


شکل ۳- نمودار شبیه‌سازی شده تغییرات سطح آب در درون دستگاه با استفاده از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای  $k - \epsilon$  و RNG و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی لویز و همکاران (۲۰۰۹)

جدول ۳- خطای مدل‌های آشفتگی

مدل آشفتگی	شبکه	میزان خطا		درصد خطا در میزان حداکثر و حداقل دامنه موج شبیه سازی شده نسبت به مدل آزمایشگاهی (%)	
		RMSE	RE	حداقل	حداکثر
$k - \epsilon$	L3	۰/۱۶	۱/۹۸	-۲/۲۵	۱/۷۵
RNG	L3	۰/۱۸	۲/۰۰	-۱/۵۲	۲/۶۰

همانطور که در شکل ۳ و جدول ۳ دیده می‌شود هر دو مدل تطابق مناسبی را با مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد اما در خطای



شکل ۵- نمودار شبیه‌سازی شده تغییرات سطح آب در درون دستگاه با استفاده از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای  $k - \epsilon$  و RNG و مقایسه آن با نمودار شبیه‌سازی شده توسط سن تورک و همکاران (۲۰۱۱)

جدول ۶- خطای مدل‌های آشفتگی

مدل آشفتگی	شبکه	میزان خطا		درصد خطا در میزان حداکثر و حداقل دامنه موج شبیه سازی نسبت به مدل شبیه‌سازی شده توسط سن تورک و همکاران (%)	
		RMSE	RE	حداقل	حداکثر
$k - \epsilon$	S3	۰/۲۴۰	۱/۷۴	-۰/۷۷	۱۳/۱۲
RNG	S3	۰/۲۵۸	۱/۸۰	-۱۱/۴۷	۱۲/۷۸

#### ۴- نتایج

با توجه به نتایج به دست آمده در صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی، در این مرحله از تحقیق، در ابتدا به بررسی عملکرد موجود در ابعاد مختلف دستگاه پرداخته، سپس مطالعه تاثیر امواج با مشخصات مختلف بر روی خروجی دستگاه صورت گرفته شد و در نهایت اثر اعماق استغراق متفاوت بر روند جابجایی سطح آب در درون دستگاه مورد مطالعه قرار گرفت.

#### ۵-۱- مطالعه ابعاد مختلف دستگاه

در این مرحله به بررسی مهمترین فاکتور فیزیکی دستگاه ستون نوسان‌گر آب، یعنی قطر داخلی دستگاه پرداخته شد. به این منظور از سه قطر داخلی ۲.۵، ۵ و ۱۰ متر استفاده گردید. مطالعات مربوط به قطر ۱۰ متر در مرحله صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی انجام شد، و این مطالعه مبنایی برای بررسی دستگاه با دو قطر دیگر قرار گرفت.

با توجه به اینکه هندسه مورد استفاده در مسئله، درون شبکه راست گوشه (کارتزین) قرار گرفته و این امر موجب تعریف مجزایی از شبکه و هندسه مسئله می‌گردد، در نتیجه تغییر در مشخصات هندسی مسئله تاثیری بر مش‌بندی نخواهد داشت و می‌توان از شبکه مورد استفاده برای دستگاه با قطر داخلی ۱۰ متر (S3) و همچنین مدل

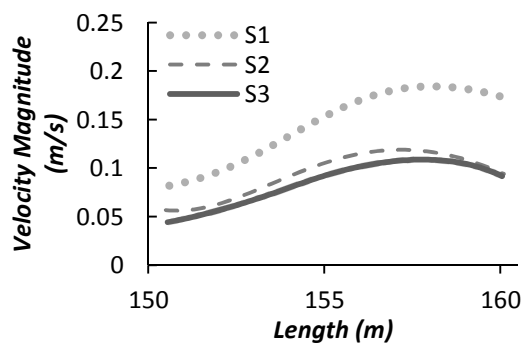
جدول ۵- مقادیر حداکثر و حداقل ارتفاع در دامنه موج درون دستگاه و مقدار خطای شبیه‌سازی برای شبکه بندی‌های مختلف

شبکه	نوع شبکه‌بندی	مقادیر حداکثر و حداقل دامنه موج شبیه‌سازی شده (متر)		درصد خطا نسبت به مدل شبیه‌سازی شده در (۲۰۱۱) (%)	
		حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
S1	درشت	-۰/۹۶۳	۰/۵۹۸	۷/۰۰	-۲۵/۲۵
S2	متوسط	-۱/۰۴۰	۰/۷۱۲	۱۵/۵۵	-۱۱/۰۰
S3	ریز	-۰/۸۹۳	۰/۶۹۵	-۰/۷۷	۱۳/۱۲

همچنین از نمودارهای توزیع اندازه سرعت درون دستگاه در فاز ۲۸۰ درجه برای روندیابی مطالعه شبکه محاسباتی استفاده گردید (شکل ۴). همانطور که در نمودار شکل ۴ مشاهده می‌شود، در نمودارهای توزیع اندازه سرعت در هر سه شبکه روند همگرایی به سمت شبکه ریزتر وجود دارد.

در ادامه و بعد از مشخص شدن شبکه مناسب (S3)، به منظور مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای  $k - \epsilon$  و RNG، نمودار شبیه‌سازی شده تغییرات سطح آب در درون دستگاه با استفاده از این دو مدل با نمودار نتایج بدست آمده توسط سن تورک و همکاران (۲۰۱۱) مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۵).

همانطور که در شکل ۵ و جدول ۶ دیده می‌شود هر دو مدل تطابق مناسبی را با مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد اما در روند تغییرات و همچنین مقدار حداقل، مدل دو معادله‌ای  $k - \epsilon$  تطابق نسبتاً بهتری را با مدل ارائه شده توسط سن تورک و همکاران (۲۰۱۱) نشان می‌دهد. با توجه به صحت عملکرد مناسب در مقایسه نتایج بدست آمده با مدل آزمایشگاهی انجام شده توسط لویز و همکاران (۲۰۰۹) و با شناخت شبکه و مدل آشفتگی مناسب در ابعاد واقعی (مقایسه با نتایج سن تورک و همکاران، ۲۰۱۱)، در ادامه به بررسی عملکرد دستگاه ستون نوسان‌گر آب تحت امواج موجود در سواحل ایران و با ابعاد مختلف دستگاه پرداخته و نتایج ارائه می‌گردد.

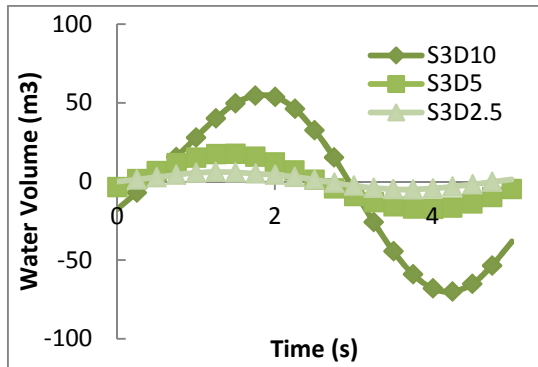


شکل ۴- نمودار شبیه‌سازی شده توزیع اندازه سرعت در درون دستگاه در سه نوع شبکه محاسباتی

ناچیز بودن اختلاط هوا و آب ترسیم شد که در شکل ۸ نشان داده شده است. مقادیر منفی در این نمودار نشان دهنده خروج هوا از دستگاه یا هوادهی و مقادیر مثبت نشان دهنده ورود هوا یا هواگیری می‌باشد. مقدار تغییرات هوا در دستگاه که مهمترین عامل در تولید انرژی در اینگونه نیروگاه‌ها هست، می‌تواند ویژگی موثری در مقایسه عملکرد هر یک از دستگاه‌ها باشد. فشار مجتمع درون دستگاه با توجه به نوسانات نسبت به سطح متوسط آب درون دستگاه و هوای جابجا شده به صورت زیر می‌باشد:

$$P_c = \delta Q_m = -\omega \delta \iint_{Si} n ds \quad (11)$$

که در این رابطه  $P_c$  فشار مجتمع درون دستگاه،  $\delta$  ضریب استهلاک پنیوماتیک که با توجه به دستگاه و توربین به کار رفته تعیین می‌گردد،  $Q_m$  جریان هوای خروجی و  $Si$  سطح متوسط آب درون دستگاه می‌باشد. همانطور که در شکل ۸ مشخص است همانند حالت تغییر حجم آب، در این حالت نیز تغییرات در دستگاه S3D10 به مراتب بیشتر از دیگر حالت‌ها بوده است. حجم آب و هوای جابجا شده در هر دستگاه برابر در نظر گرفته شده است.



شکل ۷- نمودار تغییرات حجم آب در درون هر سه دستگاه با قطر داخلی متفاوت

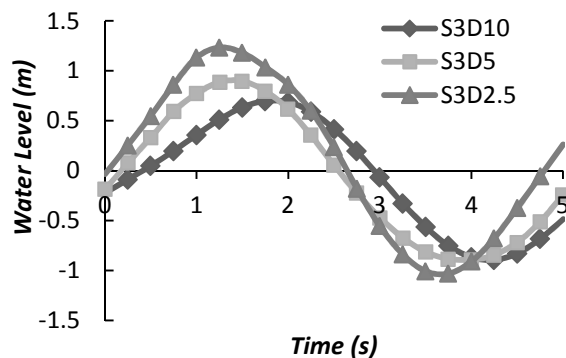
#### ۵-۲- مطالعه امواج مختلف

در این مرحله از تحقیق به بررسی اثر امواج ناشی از باد با مشخصات مختلف بر روی دستگاه ستون نوسان‌گر آب پرداخته شد. برای این منظور از امواج موجود در سواحل ایران استفاده شد. با توجه به اینکه دوره تناوب امواج در سواحل جنوبی ایران در حدود ۳ تا ۱۰ ثانیه می‌باشد [۱] و همچنین با در نظر گرفتن حداکثر ارتفاع موج که در سواحل ایران ۳ متر می‌باشد (بررسی داده‌های مرکز مطالعات طبیعی سرویس ملی هواشناسی آمریکا)، از سه موج مشخص در شبیه‌سازی استفاده شد. به دلیل تغییر در مشخصات جریان از آنالیز شبکه محاسباتی و روندیابی نتایج در هر سه نوع موج استفاده شد که در هر سه حالت پس از صحت ایجاد روند به سمت شبکه ریزتر از آن شبکه برای شبیه‌سازی استفاده شد. مشخصات شبکه‌های مورد استفاده در این روندیابی دقیقاً همانند شبکه‌های S1، S2 و S3 که در جدول ۴ قابل مشاهده است، به کار گرفته شد. همچنین برای کاهش محاسبات و انجام حالتی میانه از دستگاه ستون نوسان‌گر نوع دوم یعنی S3D5 برای شبیه‌سازی مقایسه تاثیر امواج استفاده گردید. نام

آشفتگی دو معادله‌ای  $\epsilon - k$  که دارای خطای کمتری نسبت به مدل آشفتگی RNG می‌باشد (با توجه به نتایج به دست آمده در بخش صحت‌سنجی مدل)، برای سایر ابعاد دستگاه نیز استفاده کرد. برای اطمینان بیشتر از صحت نتایج، از امواج مدل شده در حالت S3 برای تمامی ابعاد استفاده شد و نتایج با هم مورد مقایسه قرار گرفت. به این منظور امواجی با دامنه ۱/۲ متر و دوره تناوب ۵ ثانیه در اطراف هر سه دستگاه مورد شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند. همچنین برای سهولت در بررسی از نام‌های S3D5، S3D10، S3D2.5 به ترتیب برای دستگاه‌ها با قطر داخلی ۱۰، ۵ و ۲/۵ متر استفاده شد. در شکل ۶ نمودار نتایج تغییرات سطح آب درون دستگاه و بدست آمده از شبیه‌سازی برای هر سه اندازه دستگاه S3D10، S3D5 و S3D2.5 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد تغییرات سطح آب با کاهش قطر داخلی دستگاه افزایش می‌یابد. همچنین نقطه عطف نمودار سینوسی تغییرات سطح آب به دلیل افزایش شیب قسمت میانی نمودار، با کاهش در قطر داخلی دستگاه، در زمان سریع‌تری اتفاق می‌افتد که این شرایط خود باعث جابجایی سریع‌تر از حالت هوادهی<sup>۱</sup> به حالت هواگیری<sup>۲</sup> می‌شود. با استفاده از معادله ۱۰ به بررسی تغییرات حجم آب در زمان‌های مختلف و در درون دستگاه ستون نوسان‌گر آب پرداخته شد.

$$V(t) = A_{owc} \eta(t) \quad (10)$$

در این رابطه  $V(t)$  حجم آب درون دستگاه در زمان‌های مختلف،  $A_{owc}$  مساحت مقطع داخلی دستگاه و  $\eta(t)$  تغییرات سطح آب درون دستگاه و در زمان‌های مختلف می‌باشد.



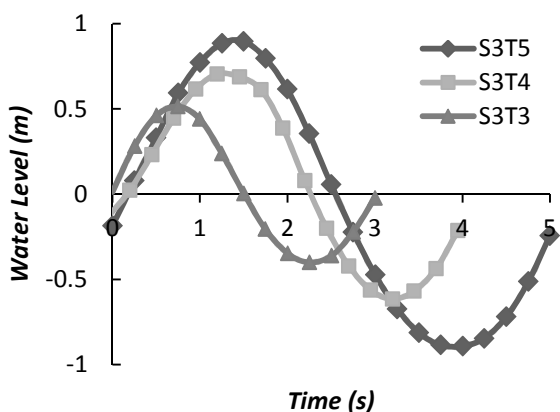
شکل ۶- نمودار شبیه‌سازی شده تغییرات سطح آب در درون هر سه دستگاه با قطر داخلی متفاوت

در شکل ۷ نمودار مربوط به این تغییرات نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد تاثیر سطح مقطع بر روی جابجایی حجم آب بسیار بالا بوده به طوری که در حالت S3D10، حجم آب جابجا شده در یک دوره زمانی ۵ ثانیه‌ای و در درون دستگاه با قطر داخلی ۱۰ متر، ۱۲۴ متر مکعب بوده، حال آنکه این جابجایی برای دو دستگاه S3D5 و S3D2.5 برای همان دوره زمانی و قطر داخلی ۵ و ۲/۵ متر، به ترتیب ۳۵ و ۱۱ متر مکعب بوده است. اما برای درک بهتر مسئله نمودارهای تغییرات حجم هوا در درون هر سه دستگاه و با فرض

<sup>1</sup> Exhalation

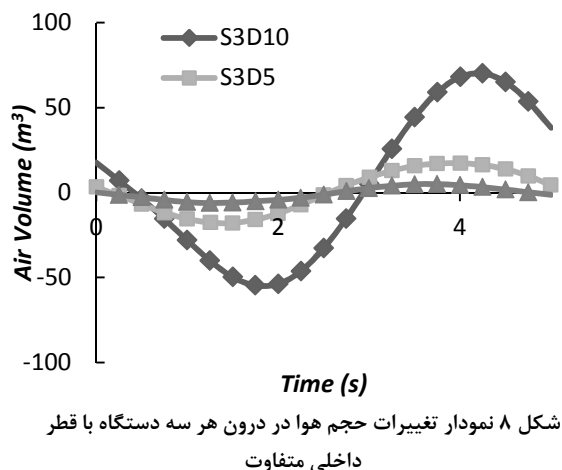
<sup>2</sup> Inhalation

یکدیگر ندارند. البته باید به این مطلب اشاره کرد که با کاهش دوره تناوب امواج ورودی و یا افزایش در ارتفاع موج به تنهایی عملکرد دستگاه افزایش پیدا می‌کند. در این بخش از تحقیق سعی بر این بود که با تغییر در مشخصات امواج به صورت یکنواخت و تحت شرایط امواج موجود در سواحل ایران نحوه عملکرد دستگاه مورد ارزیابی قرار گیرد.



شکل ۸- نمودار شبیه‌سازی شده تغییرات سطح آب در درون دستگاه حاصل از امواج متفاوت

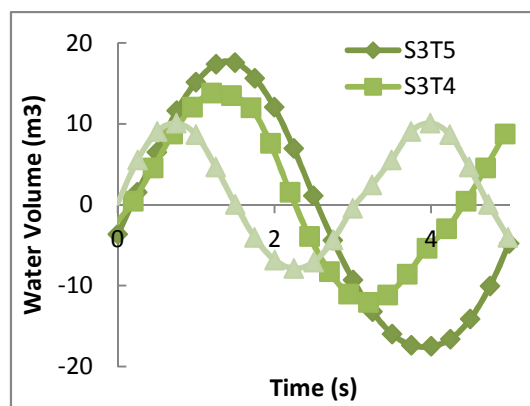
آزمایش و خصوصیات امواج مورد استفاده در این شبیه‌سازی در جدول ۷ نمایش داده شده است.



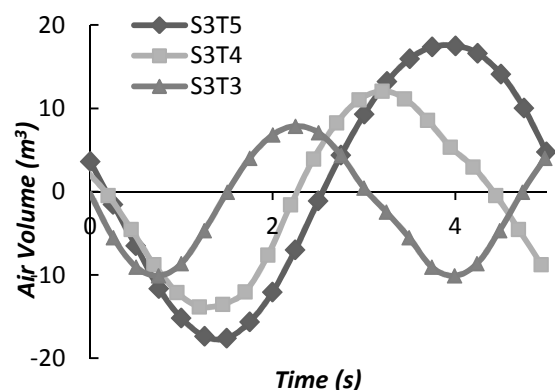
شکل ۹- نمودار تغییرات حجم هوا در درون هر سه دستگاه با قطر داخلی متفاوت

جدول ۷- نام آزمایش و خصوصیات امواج

نام آزمایش	S3T3	S3T4	S3T5
مشخصه موج	ارتفاع دوره تناوب (متر)	ارتفاع دوره تناوب (متر)	ارتفاع دوره تناوب (متر)
مقدار	۱	۳	۵



شکل ۱۰- نمودار تغییرات حجم آب در درون دستگاه حاصل از امواج متفاوت

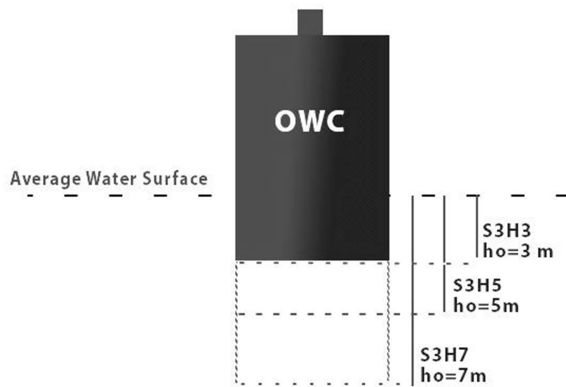


شکل ۱۱- نمودار تغییرات حجم هوا در درون دستگاه حاصل از امواج متفاوت

در شکل ۹ نمودارهای تغییرات سطح آب در درون دستگاه ستون نوسان گر آب برای هر حالت S3T5 و S3T4، S3T3 نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود به دلیل اختلاف در میزان دوره تناوب و ارتفاع موج ورودی، روند تغییرات سطح آب در درون دستگاه با یکدیگر متفاوت می‌باشند. اما نکته قابل توجه میزان اختلاف نمودار نوسانی درون دستگاه با میزان موج ورودی است که همانطور که مشاهده می‌گردد با کوچکتر شدن ارتفاع موج و کاهش دوره تناوب مقدار اختلاف بین موج ورودی و تغییرات سطح آب درون دستگاه کاهش می‌یابد تا جاییکه مشاهده می‌گردد در حالت S3T3 مقدار حداکثر نوسان در درون دستگاه با دامنه حداکثر موج ورودی که ۰.۵ متر می‌باشد برابری می‌کند. برای درک بهتر مسئله نمودارهای تغییرات حجم آب و هوا در درون دستگاه برای هر سه نوع موج و با فرض ناچیز بودن اختلاط هوا و آب ترسیم شد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). برای این منظور و مقایسه با سایر حالت‌ها روند تغییرات در هر سه نوع موج در بازه زمانی موج بزرگتر یعنی ۵ ثانیه در نظر گرفته شد و نوسانات در بازه مربوطه برای هر سه حالت ترسیم گردید. اما میزان تغییرات حجم هوا در فرایند هواگیری و هوادهی در داخل دستگاه در هر سه حالت اندازه‌گیری شد. در حالت S3T5 این مقدار برابر ۳۵ متر مکعب بدست آمد و برای حالت‌های S3T3 و S3T4 به ترتیب مقادیر ۳۴ و ۳۲ متر مکعب محاسبه شد. همانطور که از مقادیر بدست آمده مشخص است با تغییر در مشخصات موج وارد شده به دستگاه، حجم هوای جابه‌جا شده در فرایند هواگیری و هوادهی و در واقع عملکرد دستگاه برای تمام حالت‌ها تقریباً یکسان بوده و اختلاف زیادی در یک بازه مشخص با

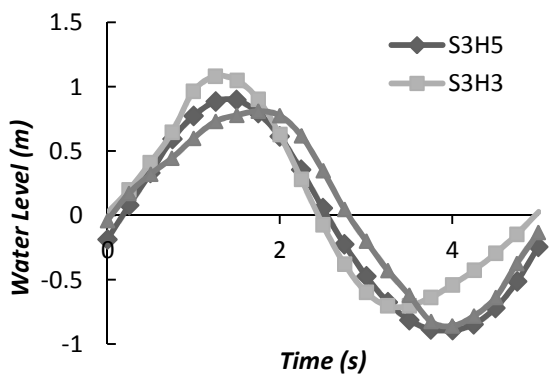


### ۳-۵- مطالعه میزان استغراق دستگاه (ho)



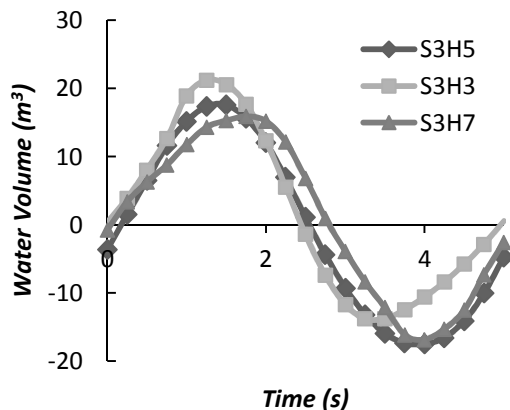
شکل ۱۲- نمای شماتیک دستگاه ستون نوسان گر آب با عمق‌های استغراق مختلف مورد استفاده در شبیه‌سازی

در ادامه برای بررسی عملکرد دستگاه در عمق‌های مختلف استغراق از نمودارهای تغییرات حجم آب در درون دستگاه و حجم هوای درون دستگاه استفاده شد که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمایش داده شده است. در نهایت میزان جابجایی هوا در درون دستگاه تحت دو عمل هواگیری و هوادهی در یک دوره زمانی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱۳- نمودار شبیه‌سازی شده تغییرات سطح آب در درون دستگاه حاصل از عمق‌های استغراق مختلف

دستگاه با استغراق‌های ۳، ۵ و ۷ متر به ترتیب دارای جابجایی هوا به مقدار ۳۵، ۳۵ و ۳۳ متر مکعب می‌باشد. مشاهده می‌گردد که تغییر در عمق استغراق تاثیر زیادی در عملکرد دستگاه نخواهد داشت.



شکل ۱۴- نمودار تغییرات حجم آب در درون دستگاه حاصل از عمق‌های استغراق مختلف

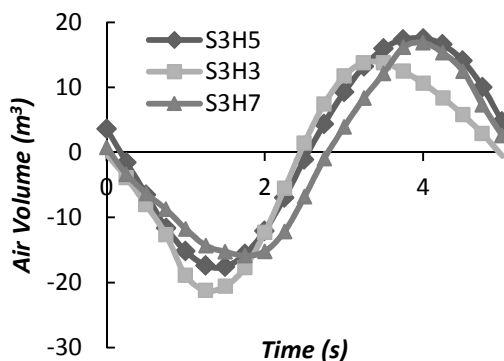
در این مرحله از تحقیق به بررسی اثر میزان استغراق بر عملکرد دستگاه ستون نوسان گر آب پرداخته شد. بدین منظور سه عمق استغراق ۳، ۵ و ۷ متری که در شکل ۱۲ نمایش داده شده است بر روی حالت S3D5 مورد آزمایش قرار گرفت. تمام معادلات با تابع تخلخل حجم و مساحت فرموله می‌شوند. این روش فرموله کردن که به روش نماینده کسر مساحت-حجم مانع نامیده می‌شود برای مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده استفاده می‌شود. همانطور که جزء حجمی سیال در داخل هر سلول شبکه برای تعیین موقعیت سطح سیال بکار برده می‌شود، یک کمیت جزء حجمی نیز می‌تواند برای تعیین سطح بدنه صلب استفاده شود. از طرفی این کمیت می‌تواند در مشخص کردن حجمی از سلول که توسط بدنه صلب اشغال نشده است (VF) نیز استفاده شود. زمانیکه، در هر سلول، حجم اشغال شده توسط بدنه صلب مشخص باشد با روشی مشابه روش تابع حجم سیال می‌توان مرز صلب را در داخل شبکه ثابت مشخص کرد. این مرز برای تعیین شرایط مرزی دیواره که جریان باید از آن تبعیت کند، به کار برده می‌شود. در این حالت با افزایش میزان استغراق دستگاه، مرز جامد در عمق بیشتری شناسایی شده و تاثیر جریان بیرونی بر جریان داخل دستگاه کاهش می‌یابد. در این حالت نیز با توجه به اینکه هندسه مورد استفاده در مسئله، درون شبکه راست گوشه (کارتزین) قرار گرفته و این امر موجب تعریف مجزایی از شبکه و هندسه مسئله می‌گردد، در نتیجه تغییر در مشخصات هندسی مسئله تاثیری بر مش‌بندی نخواهد داشت و می‌توان از شبکه مورد استفاده برای دستگاه با قطر داخلی ۵ متر (S3D5) استفاده نمود. برای سهولت کار از نام‌های S3H3، S3H5 و S3H7 به ترتیب برای حالت‌های با استغراق ۳، ۵ و ۷ متر مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱۲). پس از انجام شبیه‌سازی‌ها، نمودار مربوط به تغییرات عمق در داخل دستگاه ترسیم شد که در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است دو حالت استغراق ۵ و ۷ متر دارای مقدار حداکثر و حداقل نزدیک به هم بوده اما در حالت استغراق ۳ متر (S3H3) کمی تفاوت با دو حالت دیگر مشاهده می‌شود. این تفاوت به گونه‌ای است که مقدار حداکثر در حالت استغراق ۳ متر کمی بیشتر از دو حالت دیگر بوده است که به دلیل کمتر بودن فاصله انتهای دستگاه با سطح متوسط آب و تاثیر بیشتر امواج اطراف دستگاه بر روی نوسانات داخلی آن می‌باشد. همچنین در مقدار حداقل نیز نوسان در حالت استغراق ۳ متر نسبت به دو حالت دیگر کمتر می‌باشد که این امر نیز به دلیل کمتر بودن فاصله انتهای دستگاه با سطح آب و تاثیرپذیری بیشتر نوسان داخلی دستگاه از جریان خروجی بوده است.

## ۶- سپاسگزاری

این کار با حمایت‌های مرکز رشد فناوری دریا به انجام رسیده است. لازم است در اینجا از حمایت‌های بی دریغ این مرکز کمال تشکر و قدردانی صورت پذیرد.

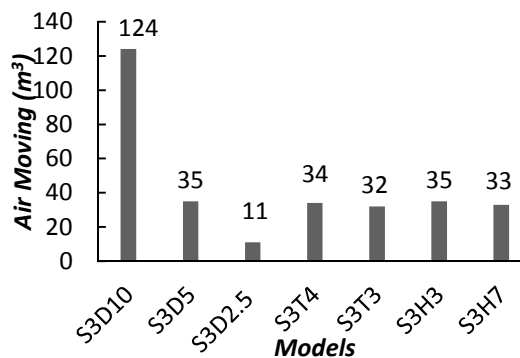
## ۷- مراجع

- [1] Ketabdari M. J., Ahmadi M. A., Feasibility study of energy absorbing from sea waves on the southern coast of Iran using numerical modeling, *Iranian Journal of Marine Science And Technology*, 60.60: pp. 20-29, 2012. (in Persian)
- [2] Falcão A., *Wave energy utilization: a review of technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 899-918, 2010.
- [3] Lopes M. F. P., Hals J., Gomes R. P. F., Moan T., Gato L. M. C., & Falcao A. D. O., Experimental and numerical investigation of non-predictive phase-control strategies for a point-absorbing wave energy converter. *Ocean Engineering*, 36(5), pp. 386-402, 2009.
- [4] Şentürk U., Özdamar A., & Bornova I., Modelling the interaction between water waves and the oscillating water column wave energy device. *Mathematical and computational applications*, 16(3), 630, 2011.
- [5] Alexander H. C., Watts K. C., & Graham J. W., Numerical analysis of the oscillating water column wave energy extraction system. *Mathematical Modelling*, 8, pp. 524-531, 1987.
- [6] Evans D. V., & Porter R., Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device. *Applied Ocean Research*, 17(3), pp. 155-164, 1995.
- [7] Teixeira P. R., Davy D. P., Didier E., & Ramalhais R., Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier-Stokes equations. *Energy*, 61, pp. 513-530, 2013.
- [8] Bouali B., & Larbi S., Contribution to the geometry optimization of an oscillating water column wave energy converter, *Energy procedia*, 36, pp. 565-573 2013.
- [9] Sahebalzamani S. H., & Montazeri Namin M., Numerical simulation of wave interaction with one oscillating water column in two dimensional vertical plane, *International Journal of Maritime Technology*, 9(18), pp. 13-21, 2014. (in Persian)
- [10] Sahebalzamani S. H., & Montazeri Namin M., Numerical simulation of wave interaction with oscillating water column in one dimension, *International Journal of Maritime Technology*, 1(20), pp. 61-68, 2015. (in Persian)
- [11] Mao H., *A Numerical Study Of Externally Solidified Products In The Cold Chamber Die Casting Process*, Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, The Ohio State University, 2004.
- [12] Flow Science, Inc. *Flow-3D user's manuals*, version 10.0.1.7, Santa Fe, NM, 2011.



شکل ۱۵- نمودار تغییرات حجم هوا در درون دستگاه حاصل از عمق‌های استغراق مختلف

همانطوری که در نمودار شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، سطح مقطع دستگاه بیشترین اثر را در عملکرد دستگاه دارد.



شکل ۱۶- مقایسه اثر مدل‌های مختلف بر عملکرد دستگاه ستون نوسان گر آب

## ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج تحقیق اثر عمق استغراق و تغییر در مشخصات امواج تاثیر زیادی بر عملکرد دستگاه نداشته و بیشترین اثر را سطح مقطع و ابعاد دستگاه ستون نوسان گر آب خواهد داشت به طوریکه با افزایش ۴ برابری در قطر داخلی دستگاه، میزان عملکرد دستگاه حدود ۱۱ برابر می‌شود (شکل ۱۶). البته باید توجه داشت که در این نوع از تبدیل کننده‌های انرژی به دلیل شکل استوانه‌ای، جهت امواج تاثیر زیادی بر عملکرد آن نخواهد داشت و تقریباً می‌توان شرایط شبیه‌سازی شده را در عمل نیز انتظار داشت. در واقع می‌توان گفت برای سواحل جنوبی ایران که دارای امواج با ارتفاع زیادی نیستند، این دستگاه اگر در ابعاد بزرگتر ساخته شود می‌تواند دارای عملکرد به مراتب بهتری نسبت به سایر حالت‌ها باشد. زیرا همانطور که در نمودار شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد و در بخش ۵-۲ نیز بحث شد، تاثیر ابعاد امواج بر روی عملکرد دستگاه ناچیز می‌باشد. تنها در صورتی می‌توان عملکرد بالایی را در امواج مشاهده کرد که همراه با افزایش ارتفاع، دوره تناوب امواج کاهش یافته باشد.