



Improving the power outputs of oscillating water column wave energy converters by optimizing the geometrical parameters

Mohammad Hossein Jahangir¹✉, Mohammad Sharafi²

¹ Corresponding Author, Associate Professor, Faculty of New Sciences Technologies, Tehran University, Tehran, Iran. Email: mh.jahangir@ut.ac.ir

² M. Sc student of Renewable Energy Engineering, Faculty of New Sciences Technologies, Tehran University, Tehran, Iran. Email: mohammad.sharafi@ut.ac.ir

ABSTRACT

Introduction

There are currently a variety of methods for extracting energy and generating electricity from wave energy, one of the simplest and most practical methods is to use a water oscillating column. The oscillating water column (OWC) consists of a chamber in which the rising and falling of the wave inside the chamber produces positive and negative dynamic pressure, which in turn can cause the turbine to rotate at the end of the duct. Our study on OWC has a chamber with a front wall that is oriented against the direction of flow.

Methodology

In this research, a two-dimensional numerical study on the geometric optimization of an ocean wave energy converter (WEC) to electrical energy is presented, the main factor of which is OWC. To do this, the geometric parameter of the OWC chamber length was optimized, while the other parameters (height-to-length ratio) were kept constant. In this study, a regular wave with dimensions on a laboratory scale was considered. The main purpose was to optimize the geometry of the device with the aim of maximizing the absorbed power in conditions that are exposed to the defined wave environmental conditions. A multi-phase volume of fluid model was used to investigate climate interaction. The computational amplitude was represented by an OWC device with a wave tank.

The main purpose of this study is to present a mathematical model for optimal design and study of the converter under study. To determine the optimal energy converter parameter based on environmental parameters (water depth, wave period and altitude), first using the Particle Swarm Optimization (PSO) meta-processing algorithm and coding in MATLAB software to create an algorithm to study and provide the most optimal chambers with the widest range of text and waves We did different depths.

PSO algorithm

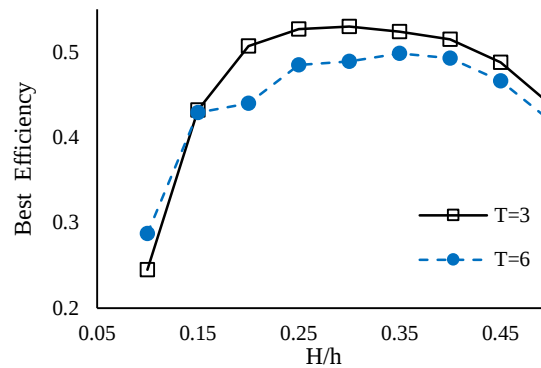
A meta-heuristic optimization algorithm modeled on the movements of a group of birds or a group of fish that live in groups. The PSO algorithm shows flying birds to accurately detect motion and analyzes flight patterns. This algorithm, like other evolutionary techniques, uses a population that contains potential solutions to a problem that it uses to explore the search space. The main difference between this method and other methods is that each particle has a velocity vector that by its changes continuously searches in the decision space. They are selected randomly with an initial velocity of zero. In the next steps, the particles have acceleration and velocity, so that the movement and displacement of each particle and the position of the particle in the new position is calculated according to the previous position and velocity.

In this study, an attempt is made to investigate the simultaneous effect of environmental parameters on the efficiency of wave energy converters. For this purpose, the parameters of the period of impact waves (T), water depth (h), and the height of the index wave (H) are selected as the problem variables. Also, the water density parameter (ρ) enters the algorithm according to the region as a specific input. Also, the necessary changes were made to define the main optimization equation and auxiliary equations, and the limit state equations were added to the algorithm. The problem under study specifically includes a principal equation, auxiliary equations, and limit state equations (boundary constraints). The main equation was considered according to the amount of impact wave energy and considering the angle of impact based on the mentioned relations. Also, the limit equations of the problem (boundary constraints) are determined based on the minimum and maximum parameters of the variable. Therefore, according to the defined quantities, the initial range for searching for answers will be in the form of limit equations and the minimum and maximum values of the original quantities. After determining the initial region of the answers, according to the hierarchy of the algorithm during the process of the coded iteration cycle, it obtains the best values of the mentioned parameters in such a way that the amount of wave energy is maximized.

Simulation and Results

Changes in efficiency under geometric ratio change

The optimal efficiency is shown in Figure 1. According to the diagram, the changes in maximum efficiency with increasing H/h ratio increase at first, then remain almost constant and finally decrease. Considering $T = 3s$, the highest efficiency was 54% when $H/h = 0.3$, considering $T = 6s$, the highest efficiency value was 49%.



Conclusions

The results of this study indicate the very appropriate answers of the proposed PSO algorithm to determine the parameter of the optimal operating chamber of the wave oscillator energy converter in comparison with other algorithms. The performance of the designed converter in the obtained optimal state is equal to 54%, which increase in comparison with the research background is a self-confirmation of the results obtained from the determination of the optimal state by the proposed algorithm.

Keywords: Wave energy converter, OWC, Geometric Optimization, PSO

Article Type: Research Article

Article history: Received: 09 April 2022 Revised: 21 May 2022 Accepted: 29 May 2022 ePublished: 23 August 2022

Cite this article: Jahangir, M.H., & Sharafi, M. (2022). Improving the power outputs of oscillating water column wave energy converters by optimizing the geometrical parameters, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(2), 14-27. DOI: 10.22126/ATWE.2022.7855.1019

Publisher: Razi University

© The Author(s).





ارتقای تولید توان مبدل موج ستون نوسانی آب از طریق بهینه سازی ابعاد هندسی

محمدحسین جهانگیر^۱ ✉، محمد شرفی^۲ ID

^۱ نویسنده مسئول، دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mh.jahangir@ut.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی های تجدید پذیر، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mohammad.sharafi@ut.ac.ir

چکیده

در حال حاضر روش های متنوعی برای استحصال انرژی و تولید برق از انرژی امواج وجود دارد که یکی از ساده ترین و کاربردی ترین روش ها استفاده از ستون نوسانی آب است. ستون نوسانی آب (OWC) از یک محفظه تشکیل شده که بالا و پایین آمدن موج در داخل محفظه به ترتیب باعث تولید فشار دینامیکی مثبت و منفی شده که به نوبه خود می تواند باعث چرخش توربین قرار گرفته در انتهای مجرا گردد. تحقیق حاضر بر روی OWC دارای محفظه با دیوار جلویی است که جهت گیری آن در مقابل جهت جریان بوده است. در این پژوهش یک مطالعه عددی دوبعدی در مورد بهینه سازی هندسی یک مبدل انرژی امواج اقیانوسی به انرژی الکتریکی ارائه می شود که عامل اصلی آن OWC است. برای انجام این کار، پارامتر هندسی طول محفظه OWC بهینه می شد، در حالی که پارامترهای دیگر (نسبت ارتفاع به طول)، ثابت نگه داشته شد. در این مطالعه یک موج منظم با ابعاد در مقیاس آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. از مدل چند فازی حجم سیال برای بررسی برهم کنش آب و هوا استفاده شد. دامنه محاسباتی توسط یک دستگاه OWC همراه با مخزن موج نشان داده شد. هدف اصلی این پژوهش ارائه مدلی ریاضی جهت بررسی و سپس طراحی بهینه مبدل به منظور به حداکثر رساندن توان جذب شده آن در معرض شرایط محیطی موج تعریف شده است. جهت تعیین پارامتر بهینه مبدل انرژی بر اساس پارامترهای محیطی (عمق آب، پریود موج و ارتفاع)، ابتدا با به کارگیری الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات PSO^۲ و کد نویسی در نرم افزار MATLAB اقدام به ایجاد الگوریتمی برای بررسی و ارائه بهینه ترین محفظه برای امواج با پارامترهای متنوع و در اعماق مختلف شده است. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر پاسخ مناسب الگوریتم پیشنهادی جهت تعیین پارامتر بهینه کارگذاری مبدل انرژی نوسانگر امواج بوده است علاوه بر این، بر اساس طراحی ابعاد صفحه مبدل و مطالعه موردی انجام شده، ضریب عملکرد مبدل طراحی شده در حالت بهینه به دست آمده برابر با ۵۴٪ است، که افزایش آن در مقایسه با پیشینه تحقیقات، خود تأییدی بر نتایج حاصله از تعیین حالت بهینه توسط الگوریتم ارائه شده بوده است.

واژه های کلیدی: مبدل انرژی امواج، OWC، بهینه سازی هندسی، الگوریتم PSO

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۰ فروردین ۱۴۰۱ اصلاح: ۳۱ اردیبهشت ۱۴۰۱ پذیرش: ۰۸ خرداد ۱۴۰۱ چاپ الکترونیکی: ۰۱ شهریور ۱۴۰۱

استناد: جهانگیر، م.ج. و شرفی، م. (۱۴۰۱). ارتقای تولید توان مبدل موج ستون نوسانی آب از طریق بهینه سازی ابعاد هندسی، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۱۴-۲۷، (۲)، 10.22126/ATWE.2022.7855.1019 شناسه دیجیتال: ۱۴-۲۷، (۲)



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

¹ Oscillating Water Column

² Particle Swarm Optimization

مقدمه

انرژی امواج دریا به واسطه روش‌های استحصال آن، پاک‌ترین و غیر آلاینده‌ترین نوع انرژی، در بین انرژی‌های دریایی است. انرژی امواج به‌طور متوسط ۵ برابر انرژی باد و ۱۲/۵ برابر انرژی استحصالی از خورشید است. بنابراین بحث طراحی دستگاه‌های جاذب انرژی امواج، در چند دهه گذشته یکی از مهم‌ترین مباحث چالش‌برانگیز مهندسی، در عرصه انرژی‌های تجدید پذیر بوده است. این فناوری‌ها همواره در حال بهینه‌سازی است تا هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیر، نگهداری و تولید انرژی توسط آن‌ها کاهش یابد. مبدل‌های انرژی امواج معمولاً بر اساس موقعیت نصب مبدل و روش استحصال انرژی موج، طبقه‌بندی می‌شوند. موقعیت نصب مبدل‌های انرژی امواج به سه گروه فراساحل، نزدیک به ساحل و روی خط ساحل تقسیم‌بندی می‌شود. روش استحصال انرژی موج یا نوع عملکرد دستگاه معمولاً بر پنج گروه، شامل روش تجمع امواج، روش ستون نوسانگر آب، بالاروی موج بر یک سطح شیب‌دار، روش نوسان رول-سرچ و روش تضعیف انرژی موج تقسیم می‌شود (محسن و همکاران، ۲۰۲۰).

در حال حاضر روش‌های متنوعی برای استحصال انرژی و تولید برق از انرژی امواج وجود دارد که یکی از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌ها استفاده از OWC است. OWC از یک محفظه تشکیل شده که بالا و پایین آمدن موج در داخل محفظه به ترتیب باعث تولید فشار دینامیکی مثبت و منفی شده که به‌نوبه خود می‌تواند باعث چرخش توربین قرارگرفته در انتهای مجرا گردد. ساخت تأسیسات موردنیاز این مبدل‌ها در کنار ساحل و یا نقاط دوردست نیازمند صرف هزینه زیاد است. از این‌رو تلاش می‌گردد تا با افزایش بازده این مبدل‌ها و همچنین بهره‌برداری از آن‌ها در سازه‌های فراساحلی، هزینه نهایی تولید انرژی را کاهش داد. هندسه‌ی عمومی در طرح‌های مختلف واحدهای نیروگاهی OWC عبارت است از محفظه‌ای با دو انتهای باز که به‌صورت ایستا در معرض امواج قرار می‌گیرد. سطح آزاد آب، حجم داخلی استوانه را به دو ناحیه تقسیم می‌کند، به‌گونه‌ای که هر دو ناحیه تنها در یک انتهای خود دارای بازشدگی می‌باشند. به این ترتیب حجم اصلی محفظه هم‌زمان محل نوسان دو ستون نوسانگر سیال (آب‌وها) خواهد بود. وضعیت نصب سازه به شکلی است که مقطع بازشدگی تحتانی (با ابعاد به‌مراتب بزرگ‌تر) در معرض میدان امواج قرار داشته و در نتیجه در هنگام کار دستگاه، سطح آب داخل محفظه متأثر از تلاطم خارجی موج، به نوسان درمی‌آید. در اثر این حرکت رفت و بازگشتی سطح آب داخل محفظه، حجم ناحیه ی فوقانی (مرز ستون نوسانگر هوا) به‌صورت متناوب تغییر نموده و متناسب با دو مشخصه‌ی سرعت نوسان سطح آب و افت مقطع فوقانی خروج هوا، فشار نسبی ستون هوا در این ناحیه، به‌صورت ضربانی حول مقدار فشار سطح آزاد آب (فشار هوای داخل محفظه در حالت غیر برانگیخته) نوسان می‌نماید. بازشدگی تعبیه‌شده در انتهای ناحیه فوقانی، جریان تحت‌فشار هوای داخل محفظه را به سمت یک توربین هوایی هدایت می‌سازد. طراحی این توربین به این صورت است که بر اثر هر دو جهت نوسان سیال (رفت یا برگشت)، در یک‌جهت می‌چرخد. حاصل این فرایند، انتقال انرژی تراکمی جریان هوای خروجی به محور یک مولد الکتریکی و در نهایت تولید الکتریسیته خواهد بود.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مبدل‌های مختلفی برای بهره‌برداری از انرژی امواج دریا معرفی شده‌اند که OWC یکی از پرطرفدارترین آن‌هاست؛ به‌طور کلی مطالعات صورت گرفته روی OWC را می‌توان به دودسته‌ی مطالعات تئوری و تجربی دسته‌بندی نمود. تلاش‌های متعددی برای بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی مشخصات هیدرودینامیکی OWC انجام شده است. سورسو^۲ (۲۰۰۵) کارایی OWC را برای دو هندسه متفاوت و نیز شرایط گوناگون امواج برخوردی موردبررسی تجربی قرارداد. نتایج نشان داد، شرایط مختلف موج از جمله پریود و ارتفاع موج برخوردی بر فشار درون محفظه اثرگذار بوده، منجر به افزایش فشار درون محفظه می‌شود، همچنین تغییر هندسه می‌تواند با تغییر الگوی جریان منجر به افزایش بازدهی گردد. موریس و همکاران^۳ (۲۰۰۷) به‌صورت تجربی تأثیر پارامترهای هندسی دستگاه OWC را در توان خروجی موردبررسی قراردادند. آب‌خور دیوار جلویی، ضخامت و شکل دریچه مغروق پارامترهای اصلی تحقیق بودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش آب‌خور دیوار 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.

رام و همکاران^۴ (۲۰۱۰) باهدف بهینه‌سازی انرژی جنبشی هوای گذرنده از اوریفیس، سطح مقطع اوریفیس را تا حد امکان کاهش دادند. نتایج نشان داد که همواره با تغییر پارامترهای موج از جمله فرکانس و عمق آب مقدار قدر مطلق سرعت هوای گذرنده از اوریفیس،

¹ Oscillating Water Column

² Sorso

³ Moris et al

⁴ Ram et al

در طول حرکت رو به پایین آب همواره کوچکتر از مقدار قدر مطلق فشار آن در طول حرکت رو به بالا است. دیزاجی و سجادیان (۲۰۱۱) مشخصه‌های هندسی محفظه از جمله زاویه دیوارهای جلویی و عقبی را بهینه‌سازی نمودند؛ نتایج نشان دادند که با افزایش ارتفاع و طول موج، نرخ جریان خروجی هوا افزایش می‌یابد. همچنین نشان دادند که رفتار هیدرودینامیکی سامانه حساسیت شدیدی به هندسه آن دارد. یکی از روش‌های افزایش بازدهی سامانه OWC، تغییر هندسه کانال خروجی هوا از حالت عمودی به افقی است؛ این موضوع توسط پاتل و همکاران^۱ (۲۰۱۳) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد وقتی محور مقطع خروجی جریان افقی باشد، بازدهی محور توان دهی افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که برای موقعیت افقی، دور توربین ۲۰٪ الی ۳۰٪ بیشتر می‌شود. تیکسیرا و همکاران (۲۰۱۳) یک کد عددی بر مبنای حل معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز برای تحلیل مبدل OWC امواج که در ساحل نصب شده است، ارائه نمودند. 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. رضا نژاد و همکاران (۲۰۱۳) اثر وجود پله در بستر آب را بر عملکرد یک مبدل OWC که در نزدیک ساحل نصب شده را مورد ارزیابی قرار دادند. 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. حداد پور و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند، برای دستیابی به حداکثر بازدهی مبدل انرژی جاذب نقطه‌ای در بندر انزلی، ارتفاع موج باید به ۲ متر و پریود آن به ۴ تا ۷ ثانیه برسد. عالیمیان و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی و تحلیل پتانسیل انرژی امواج کل دریای مازندران پرداختند. آن‌ها بر مبنای پتانسیل امواج دریای مازندران انواع مبدل‌های انرژی را برای گزینش مبدل بهینه ارزیابی کردند.

کامات و همکاران^۲ (۲۰۱۵) عملکرد هیدرودینامیکی مبدل OWC با استفاده از یک تحلیل عددی دوبعدی، اثر امواج با طول و شیب موج‌های متفاوت را بر بازده مبدل بررسی کرده و نتایج خود را با داده‌های آزمایشگاهی معتبر مقایسه نمودند. فایرهورست^۳ (۲۰۱۵) به مطالعه تئوری و تجربی OWC در مقیاس ۱:۲۵ با امواج در محدوده پریود نوسانات ۱/۵ تا ۳/۲۵ ثانیه پرداخت. آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌ها برای دو حالت کاملاً مغروق و سطحی انجام شدند. نتایج تجربی نشان دادند که حداکثر بازده دستگاه در حالت سطحی ۲۶٪ و در حالت مغروق ۲۲٪ است؛ اما مدل‌سازی ریاضی در این مطالعه، بازده مبدل را به این ترتیب برای حالت سطحی و مغروق ۱۰٪ و ۱۵٪ پیش‌بینی کرد. هو و همکاران^۴ (۲۰۱۷) با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی، آثار تغییر هندسه ورودی را برای مبدل انرژی امواج بر مبنای OWC در دو حالت مبدل تنها و یا نصب شده بر روی یک موج‌شکن بررسی نموده‌اند. نتایج 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 طرفی نصب این مبدل بر روی موج‌شکن، علاوه بر بهبود عملکرد آن، می‌تواند هزینه‌های نصب و انتقال انرژی را تا حد زیادی کاهش دهد. سیمونتی و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل تجربی برای بهینه‌سازی متغیرهای طراحی یک OWC ثابت ارائه نمودند. آن‌ها اطلاعات موجود از تحلیل‌های آزمایشگاهی و حل عددی سایر محققان را بررسی نموده و یک مدل تجربی برای تعیین حالت بهینه به دست آوردند. اشلین و همکاران با استفاده از روش آزمایشگاهی، آثار قرارگیری چندین OWC در عرض یکدیگر را که در یک موج‌شکن تعبیه شده‌اند مورد بررسی قرار دادند. با این کار، آن‌ها بازده کلی این مبدل را نسبت به یک مبدل افزایش دادند.

سلیک و همکاران^۵ (۲۰۱۹) اثر پارامتر بی‌بعد بازشدگی نسبی را تحت شرایط امواج مختلف بر بازدهی OWC مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که با افزایش این پارامتر بازدهی مبدل افزایش می‌یابد. اشلین و همکاران^۶ (۲۰۱۹) به بررسی اثر ضریب دمپینگ بر رفتار OWC پرداختند و نشان دادند با افزایش نسبت مساحت اوریفیس به سطح مبدل، میزان میرایی کاهش می‌یابد و در نتیجه می‌توان گفت که با افزایش نسبت مساحت سطح میزان تغییرات سطح آزاد آب زیادتر می‌شود ولی از طرف دیگر فشار در محفظه کاهش می‌یابد. رضانژاد و همکاران (۲۰۱۹) عملکرد هیدرودینامیکی یک OWC که به شکل L ساخته شده را بررسی نموده‌اند. آن‌ها توانستند در عمق کمتر به بازده بیشتری دست پیدا کنند. در مطالعه شهسواری زاده و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر زبانه انتهایی بر میزان کارایی سیستم OWC در پریود مختلف امواج مورد بررسی گرفته شد. نتایج نشان داد که وجود زبانه باعث افزایش قابل توجه فشار دینامیکی در مجرای سیستم می‌گردد و با افزایش ارتفاع زبانه، کارایی سیستم نیز افزایش می‌یابد. راج و همکاران^۷ (۲۰۱۹) با استفاده از روش آزمایشگاهی آثار وجود

¹ Patel et al

² Texiera

³ Comos et al

⁴ Fier horst

⁵ Hu et al

⁶ Simunti

⁷ Celic et al

⁸ Eshlin et al

⁹ Raj et al

دیواره‌های جانبی در مجاورت مبدل امواج را بررسی نموده‌اند. آن‌ها توانستند با چیدمان مناسب این دیوارها، بازده چنین مبدل‌هایی را تا حد بسیار زیادی افزایش دهند. نائینی و امینی (۱۳۹۹)، مدلی ریاضی جهت مکان‌یابی محل احداث مبدل انرژی امواج و همچنین طراحی و بررسی مبدل مورد مطالعه در قالب یک مطالعه موردی، در بندر نوشهر ارائه کردند. جهت تعیین موقعیت بهینه مبدل انرژی نوسانگر دورانی بر اساس پارامترهای محیطی ابتدا با به‌کارگیری الگوریتم گرگ خاکستری اقدام به ایجاد الگوریتمی برای بررسی و ارائه بهینه‌ترین موقعیت در پهنه‌های آبی مختلف شده است. ضریب عملکرد مبدل طراحی شده در موقعیت بهینه به دست آمده برابر با ۶۳٪ است. لی و همکاران^۱ (۲۰۲۱) یک مبدل انرژی صفحه‌ای شناور پیشنهاد نمودند. این مبدل انرژی، متشکل از دو صفحه بوده که با یک لولا به یکدیگر متصل شده و در جهت خلاف یکدیگر نوسان می‌کنند. آن‌ها با شبیه‌سازی عددی نتیجه گرفتند که توان دستگاه با افزایش عرض، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. آن‌ها گزارش دادند که وجود سازه‌های حفاظتی ساحلی، از طریق افزایش انعکاس امواج، موجب بهبود عملکرد می‌گردد. همچنین در شرایطی که عمق اولیه آب کمتر از ارتفاع صفحه باشد عملکرد مبدل انرژی بهبود پیدا می‌کند.

روش پژوهش

مدل‌سازی و روابط

در این بخش، یک محفظه مستطیل شکل در نظر گرفته شده است که در سمت بالا، یک دریچه مستطیلی دارد. دیوار جلویی در آب غوطه‌ور است و با توجه به جهت جریان در یک زاویه دلخواه جهت‌گیری می‌کند. مشخصات هندسی دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به دامنه موج بالادست و طول موج مربوط به نظریه مرتبه دوم استوکس، بنابراین، مؤلفه‌های سرعت ارائه شده توسط این نظریه به عنوان شرایط مرزی بر موج ساز تحمیل می‌شود. مشخصه‌های موج طوری انتخاب می‌شوند که به خوبی توسط راه حل مرتبه دوم استوکس نشان داده می‌شود. مناطق مختلف اعتبار برای نظریه‌های مختلف توسط توصیف شده است. موج در نظر گرفته شده در این مطالعه دارای دوره ثابت T ، طول موج λ و ارتفاع موج ورودی H است. طبق نظریه مرتبه دوم، معادله ارتفاع سطح آزاد بدین صورت است (دین، ۱۹۸۴):

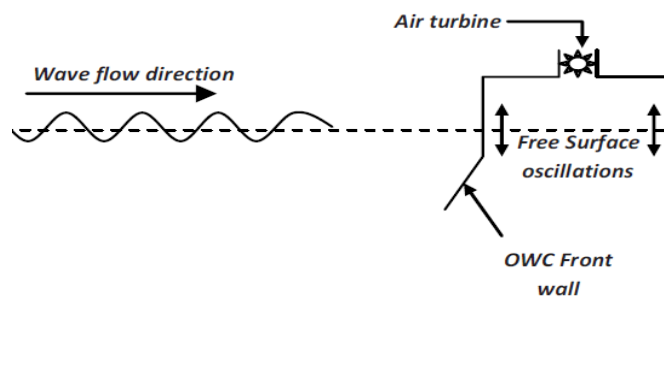
$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh) \cos(2kx - 2\omega t)] \quad (1)$$

که t زمان، h عمق آب، k عدد موج و λ فرکانس زاویه‌ای است. مؤلفه افقی u و مؤلفه عمودی w سرعت سیال محلی با روابط زیر به دست می‌آیند (دین، ۱۹۸۴):

$$u = \frac{Hgk \cosh k(z+h)}{2\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3H^2}{16} \omega k \frac{\cosh 2k(z+h)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t)$$

$$w = \frac{Hgk \sinh k(z+h)}{2\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3H^2}{16} \omega k \frac{\sinh 2k(z+h)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (2)$$

رابطه پراکندگی و انتشار موج به صورت زیر ارائه می‌شود: (بوعلی و لربی، ۲۰۱۳):



شکل ۱. شماتیکی از مبدل انرژی امواج OWC

¹ Li et al

² Din

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (۳)$$

از طرفی توان برخورد موج متناظر در واحد عرض برابر است با (مک کورمیک، ۲۰۱۳):

$$P_{in} = \frac{\rho g \lambda}{16T} H^2 \left(1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{k^4 h^6}\right) \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right] \quad (۴)$$

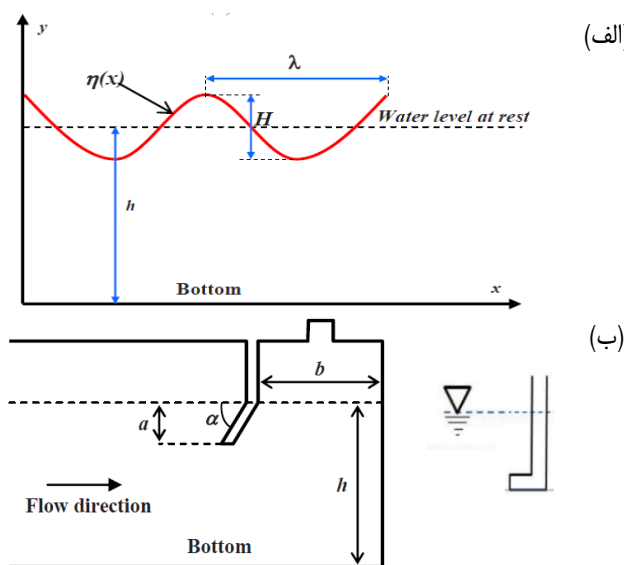
با فرض این که سطح بدون آب در OWC به صورت یک صفحه مسطح رفتار می کند، توان هیدرودینامیکی منتقل شده به ستون هوای داخل محفظه را می توان به صورت زیر تعیین کرد (بوعلی و لربی، ۲۰۱۳):

$$P_{hyd} = p_a b \frac{dz_p}{dt} \quad (۵)$$

که p_a فشار ستون هوا، b اندازه محفظه و Z_p ارتفاع سطح آزاد داخل محفظه است. نهایتاً بازده OWC با نسبت توان هیدرودینامیکی به توان ورودی $\varepsilon = \frac{P_{hyd}}{P_{in}}$ محاسبه می شود. مطابق شکل ۲ (ب)، حالت $\alpha = 0$ انتخاب شده است و مطابق منابع، این پیکربندی که جهت گیری مخالف جریان است، بهترین آرایش برای به حداکثر رساندن کارایی دستگاه است (بوعلی و لربی، ۲۰۱۳).

بهینه سازی به کمک الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات: الگوریتم بهینه سازی ذرات، یک الگوریتم بهینه سازی فرا اکتشافی است که از حرکات گروهی از پرندگان یا دسته ای از ماهیان که به شکل گروهی زندگی می کنند، الگوبرداری شده است. این الگوریتم از مفهوم اثر متقابل اجتماعی برای حل کردن مسئله استفاده می کند. درواقع این الگوریتم از مفهوم اثر متقابل اجتماعی برای حل کردن مسئله استفاده می کند. الگوریتم ازدحام ذرات اولین بار توسط کندی و همکاران^۳ (۱۹۹۵) معرفی و توسط شی و همکاران^۴ (۱۹۹۸) توسعه یافت. این الگوریتم ابتدا برای حل مسائل مهندسی برق، الکترونیک و مخابرات مورد استفاده قرار گرفت. الگوریتم PSO جهت کشف دقیق حرکت، پرندگان در حال پرواز را نشان داده و با تجزیه و تحلیل الگوهای پروازی، شکل بهینه ای به خود می گیرد. مطالعات نشان می دهد، تغییر مسیر هر ذره، از روی الگوی پروازی ذرات همسایه بوده و هر ذره، ذرات دیگر را الگو قرار می دهد. تغییر وضعیت ذرات با توجه به تجربه و دانش خود و دیگر ذرات است.



شکل ۲. الف) پارامترهای مختلف موج دوبعدی (ب) پارامترهای هندسی مبدل و نحوه قرارگیری پیکربندی مخالف جریان

¹ Mc Cormic

² Buali and Larbi

³ Kennedy et al

⁴ Shi et al

نتیجه مدل‌سازی این رفتار اجتماعی، فرآیند جستجویی است که ذرات به سمت موقعیت بهتر میل می‌کنند. ذرات با به‌کارگیری از دانش یکدیگر، از هم می‌آموزند و هر ذره با توجه دانش به‌دست‌آمده، به‌سوی بهترین ذره می‌رود و اگر در زمان جستجو، ذره موقعیت بهتری از ذره مورد جستجو پیدا کرد، باقی ذرات خود را با آن هم‌سو می‌کنند.

این الگوریتم مانند سایر فن‌های تکاملی، از یک جمعیت که شامل راه‌حل‌های بالقوه مسئله است که به‌منظور اکتشاف در فضای جستجو استفاده می‌کند. تفاوت اساسی این روش با سایر روش‌ها این است که هر ذره دارای یک بردار سرعت است که به‌وسیله تغییرات آن به جستجوی پیوسته در فضای تصمیم می‌پردازد. این بردار دارای دو جزء است که شامل حرکت ذره به سمت بهترین موقعیتی که تاکنون ملاقات کرده و همچنین بهترین موقعیتی که ذره در کل جمعیت به آن رسیده است. ذرات به سمت مکانی که بهترین تناسب برای خود ذره و همچنین بهترین موقعیت ذره در بین کل جمعیت را تأمین نماید جذب می‌شوند (ترلا^۱؛ ۲۰۰۳).

روند کار در الگوریتم ازدحام ذرات، بدین صورت است که جهت دستیابی به پاسخ بهینه، در ابتدا ذرات به صورت تصادفی و با سرعت اولیه صفر انتخاب می‌شوند. در مراحل بعد، ذرات دارای شتاب و سرعت می‌باشند، بدین ترتیب که حرکت و جابجایی هر ذره و قرارگرفته ذره در موقعیت جدید با توجه به موقعیت و سرعت قبلی محاسبه می‌شود. در الگوریتم PSO سرعت و موقعیت هر ذره، بر اساس برابری ذرات تغییر می‌کند (شی و ابرهات^۲؛ ۱۹۹۸). فرمول سرعت و موقعیت ذره، کاملاً متناظر با یک‌ذره از میان کل جمعیت است (بای^۳؛ ۲۰۱۰). پس از مقداردهی، در مرحله بعد ذرات از نظر برازندگی و ارزشی که مدنظر است موردبررسی قرار می‌گیرند. سپس با توجه به مکان هر ذره در گروه و بهترین مکان سراسر، ذرات باهم مقایسه شده و بهترین ارزش هر ذره و بهترین ارزش سراسر در بین گروه، مشخص می‌شود. در ادامه، در صورت احقاق هدف مدنظر، جستجوی ذرات خاتمه یافته و در غیراین صورت بار دیگر، ذره مورد ارزیابی قرارگرفته تا در ادامه فرآیند، معیار موردبررسی محقق گردد. موقعیت ذره X_d و تغییرات آن را بر اساس رابطه زیر ارائه نمودند.

$$X_{k+1}^d = X_k^d + v_{k+1}^d \quad (6)$$

سرعت V_d به صورت رابطه زیر بروز می‌شود.

$$v_{k+1}^d = v_k^d + c_1 r_1 (p_k^d - x_k^d) + c_2 r_2 (p_k^g - x_k^g) \quad (7)$$

ثابت k برای افزایش شمارنده شبه زمانی بکار برده می‌شود. p_k^d بهترین موقعیت قبلی ذره d در زمان k باشد. همچنین p_k^g بهترین موقعیت سراسر ذره در زمان k را بیان می‌کند. r_1 و r_2 اعداد اتفاقی بین ۰ و ۱ هستند (شی و ابرهات^۲، ۱۹۹۸) فوری و همکاران^۴ (۲۰۰۲) در راستای تولید میانگین ۱ پیشنهاد دادند که $c_1 = c_2 = 2$ باشد نتیجه استفاده از این مقادیر پیشنهادی این است که پرنده‌ها از زمان مورد هدف را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند. سپس ضریب φ جهت اصلاح رابطه فوق به آن افزوده شد و فرم اصلاح شده به صورت زیر ارائه شد:

$$v_{k+1}^d = \varphi v_k^d + c_1 r_1 (p_k^d - x_k^d) + c_2 r_2 (p_k^g - x_k^g) \quad (8)$$

شی و ابرهات^۲ (۱۹۹۸) پیشنهاد دادند که مقدار W می‌بایست بین ۰/۸ تا ۱/۴ باشد. بدین ترتیب آن‌ها نرخ همگرایی رازمانی که W صورت خطی در فرآیند بهینه‌سازی کاهش می‌یابد، بهبود بخشیدند. در الگوریتم PSO محلی، هر ذره موقعیت بهینه در اطراف خود را بسته به سرعت و موقعیت خود می‌یابد (بای^۳؛ ۲۰۱۰). مراحل پیاده‌سازی در این پژوهش به این شرح بوده است:

الف) توسعه کدهای الگوریتم بهینه‌ساز PSO با توجه به ماهیت مسئله در نرم‌افزار MATLAB: همان‌طور که گفته شد در این پژوهش سعی بر آن است تا تأثیر هم‌زمان پارامترهای محیطی بر تابع هدف که بازدهی مبدل انرژی امواج است، بررسی گردد. به این منظور پارامترهای پریود امواج برخوردی (T) عمق آب (h)، ارتفاع موج شاخص (H) به‌عنوان متغیرهای تصمیم مسئله انتخاب می‌گردد. همچنین پارامتر چگالی آب (ρ) با توجه به منطقه مدنظر به‌عنوان ورودی مشخص وارد الگوریتم می‌گردد. همچنین تغییرات لازم برای تعریف معادله اصلی بهینه‌سازی و معادلات کمکی انجام شد و معادلات حالت حدی نیز به الگوریتم اضافه گردید. بر اساس روابط مطرح‌شده برای مجموعه متغیرها و مجموعه جواب‌ها داریم.

$$X = \{T, h, H, \rho\} \\ f(X) = \varepsilon(X) \quad (9)$$

¹ Terla

² Shi and Eberhart

³ Bai

⁴ Furi et al

مسئله مورد مطالعه به طور خاص شامل یک معادله اصلی، چندین معادله کمکی و معادلات حالت حدی (محدودیت های مرزی) است. معادله اصلی با توجه به میزان انرژی موج برخوردی و با در نظر گرفتن زاویه برخورد بر اساس روابط اشاره شده در نظر گرفته شد. همچنین معادلات حدی مسئله (محدودیت های مرزی) بر اساس حداقل و حداکثر پارامترهای متغیر تعیین می گردد:

$$\begin{aligned} T_{\min} < T_i < T_{\max} \\ h_{\min} < h_i < h_{\max} \\ H_{\min} < H_i < H_{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

ب) تعیین مقدار بهینه پارامترهای طراحی از الگوریتم بهینه سازی: هدف اصلی فرآیند بهینه سازی به کارگیری الگوریتم PSO جهت یافتن مقادیر بهینه پارامتر اندازه محفظه، جهت تعیین کارائی بهینه مبدل برای موج معین است. از این رو، با توجه به کمیت های تعریف شده، ورودی های مناسب به مدل وارد می گردد. محدوده اولیه برای جستجوی جواب ها در قالب معادلات حدی و مقادیر کمینه و بیشینه کمیت های اصلی خواهد بود. پس از تعیین منطقه اولیه جواب ها، بنا بر سلسله مراتب الگوریتم در طی روند چرخه تکرار کد نویسی شده، بهترین مقادیر پارامترهای مذکور را به گونه ای به دست می آورد که مقدار انرژی موج حداکثر گردد.

ج) اعتبار سنجی الگوریتم بهینه سازی: برای سنجش الگوریتم مورد بررسی، تعدادی از توابع تست مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه الگوریتم ازدحام ذرات کارائی بسیار خوبی را از خود در حل مسائل بهینه سازی نشان داده است، اما همانند بسیاری از فن های جستجوی تصادفی ممکن است گرفتار هم گرایی زودرس شود. این مشکل در موارد بسیاری به پاسخ های بهینه محلی برای مسئله منجر می شود. برای حل این مشکل رویکردهای متنوعی وجود دارد که در بعضی موارد تنظیمات مناسب الگوریتم توسط کاربر منجر به هم گرایی به پاسخ بهینه می شود. در جدول ۱ توابع تستی که الگوریتم ازدحام ذرات با آن صحت سنجی شده اند معرفی شده است. صحت سنجی الگوریتم PSO با توابع محک مذکور انجام شده است. مشاهده می شود که کد عددی نوشته شده برای پیاده سازی الگوریتم ازدحام ذرات به خوبی توانسته مقدار بهینه تحلیلی را ره گیری کند (پانت و همکاران، ۲۰۰۹).

جدول ۱. جزئیات توابع محک

معادله تابع	بازه مورد بررسی	مقدار کمینه	مقدار الگوریتم PSO
$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	(-۵/۱۲، ۵/۱۲)	۰	$1/439 \times 10^{-12}$
$f_2(x) = (x_2 + x_1^2 - 11)^2 + (x_1 + x_2^2 - 7)^2 + x_1$	(-۵، ۵)	-۳/۷۸۳۹۶	-۳/۷۸۳۸
$f_3(x) = \sum_{j=1}^5 [j \cos((j+1)x_1 + j)] \sum_{j=1}^5 [j \cos((j+1)x_2 + j)]$	(-۱۰، ۱۰)	-۱۸۶/۷۳۰۹	-۱۸۶/۷۳۰۸
$f_4(x) = - \sum_{j=1}^n x_j \sin \sqrt{ x_j }$	(-۵۰۰، ۵۰۰)	-۸۳۷/۹۶۵۸	-۸۳۷/۹۶۵۸
$f_5(x) = - \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	(-۵/۱۲، ۵/۱۲)	۰	$7/3558 \times 10^{-9}$

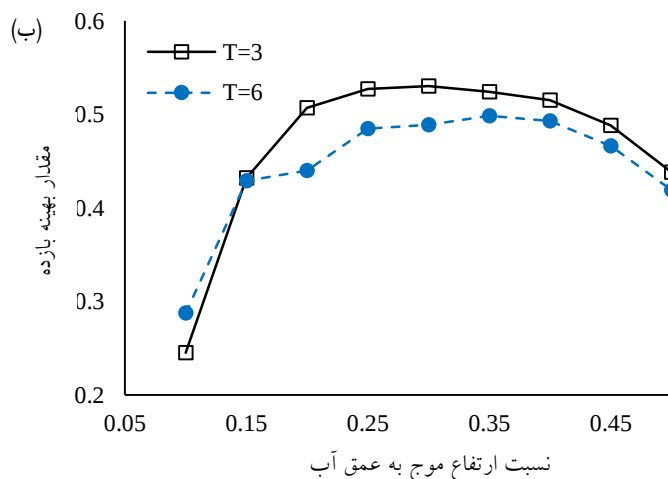
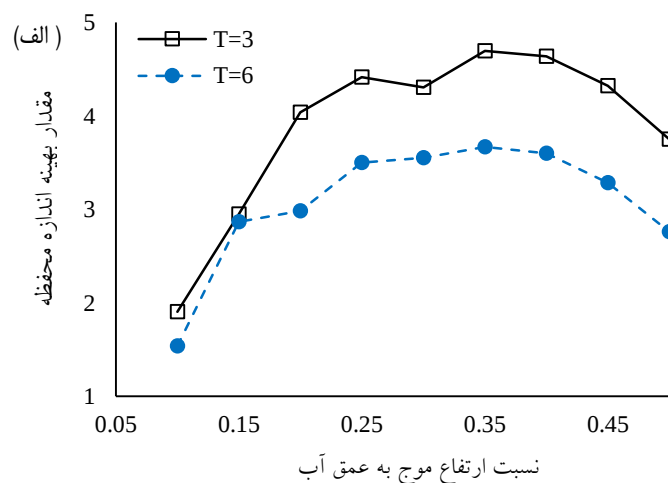
یافته ها

دقت و صحت متد ارائه شده برای بررسی مدل محاسباتی و فرمولاسیون ارائه شده مسئله ما قبلاً توسط مقالات متعددی از طریق تست آزمایشگاهی (آشیلین و همکاران، ۲۰۱۶) و شبیه سازی نرم افزاری دینامیک سیالات محاسباتی (بوعلی و لربی، ۲۰۱۳) ارائه شده است و به همین دلیل صحت سنجی مدل بررسی شده برای سیستم ارائه نشده است. جدول ۲ نشان دهنده حالت های متعددی بوده است که برای ویژگی های محیطی موج لحاظ شده و مطابق آن ها الگوریتم بهینه سازی به کار رفته می شود. در این مطالعه پارامترهای $a=2.4m$ و $\alpha=0$ ثابت باقی می ماند و بر اساس تغییرات H, t, h ، هجده حالت مختلف در نظر گرفته می شود

جدول ۲. تغییرات پارامترهای هندسی و محیطی OWC برای حالت‌های مختلف

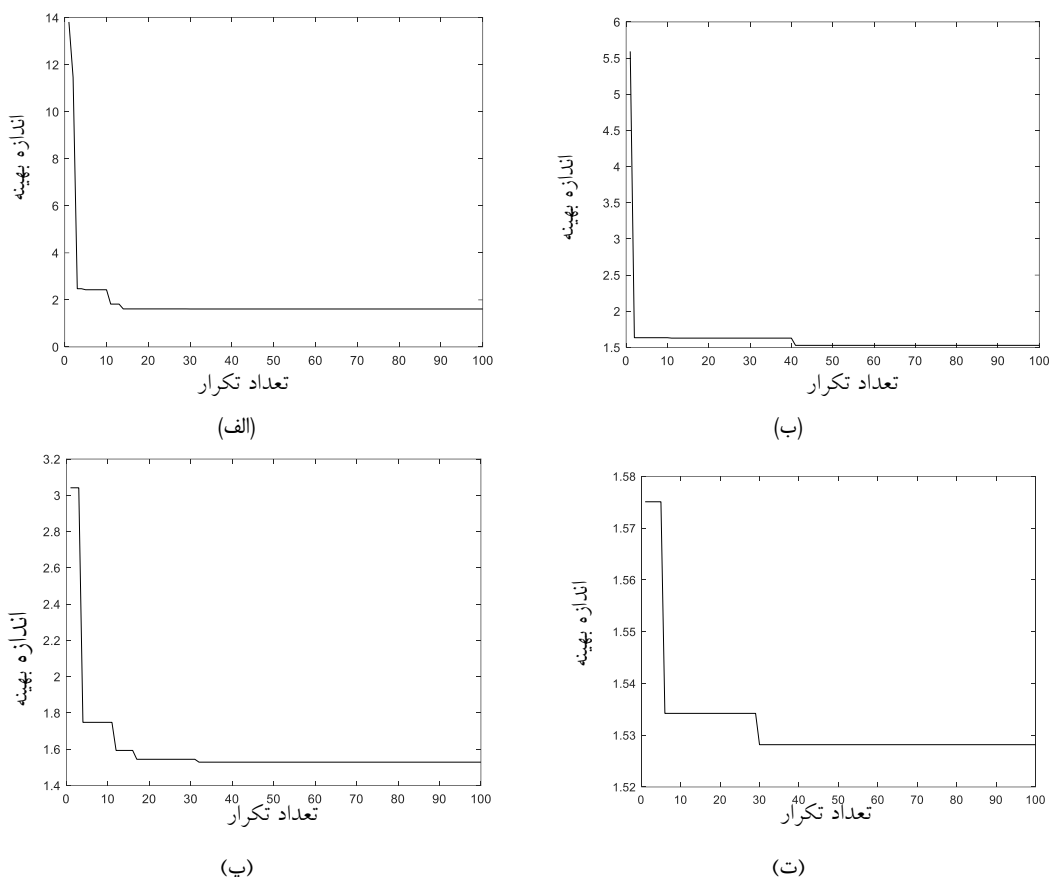
شماره حالت‌ها	a/h	h(m)	H/h	H(m)	T(s)
۲و۱	۰/۶	۴	۰/۱	۰/۴	۶و۳
۴و۳	۰/۵۳	۴/۵	۰/۱۵	۰/۶۸	۶و۳
۶و۵	۰/۴۸	۵	۰/۲	۱	۶و۳
۸و۷	۰/۴۴	۵/۵	۰/۲۵	۱/۳۸	۶و۳
۱۰و۹	۰/۴	۶	۰/۳	۱/۸	۶و۳
۱۲و۱۱	۰/۳۷	۶/۵	۰/۳۵	۲/۲۸	۶و۳
۱۴و۱۳	۰/۳۲	۷/۵	۰/۴	۳	۶و۳
۱۶و۱۵	۰/۳	۸	۰/۴۵	۳/۶	۶و۳
۱۸و۱۷	۰/۲۸	۸/۵	۰/۵	۴/۲۵	۶و۳

مطابق شکل ۳ (الف)، مقدار بهینه محفظه b برای حصول بیشترین بازده مبدل، در هر حالت با استفاده از الگوریتم PSO ارائه شده است. با استفاده از این مقدار بهینه برای هر ۱۸ حالت، بازده بهینه در شکل ۳ (ب) نمایش داده شده است. مطابق نمودار، تغییرات بازدهی بیشینه به افزایش نسبت H/h ابتدا روند افزایش داشته، سپس تقریباً ثابت مانده و نهایتاً کاهشی می‌شود. با در نظر گرفتن $T=3s$ بیشترین بازدهی برای حالت ۵ بوده ($H/h=0.3$) و مقدار آن ۵۴٪ است، با در نظر گرفتن $T=6s$ بیشترین بازدهی در حالت ۱۵ رخ داده و مقدار آن ۴۹٪ است.



شکل ۳. نمودار تغییرات پارامترهای بهینه مبدل برحسب پارامتر H/h ؛ (ا) اندازه محفظه بهینه، (ب) بازدهی بهینه

در شکل ۴، نحوه هم‌گرایی پاسخ الگوریتم PSO برای حالت ۱۰، در ۱۰۰ تکرار برای مقادیر مختلف تعداد ذرات استفاده شده در فرآیند بهینه‌سازی ارائه شده است. مشخص است که هر چه تعداد ذرات در الگوریتم بیشتر باشد، محدوده جواب کوچک‌تر یا سخ در تعداد تکرار کمتری به هم‌گرایی نهائی می‌رسد. لازم به ذکر است که افزایش تعداد ذرات، به سخت‌افزار قوی‌تر و زمان بیشتر برای پردازش احتیاج دارد.



شکل ۴. هم‌گرایی نتایج PSO برای اندازه بهینه b در حالت ۱۰ با تعداد ذرات مختلف؛ (الف) ۵، (ب) ۱۰، (پ) ۲۰، (ت) ۴۰

نتیجه‌گیری

مسئله عملکرد بهینه مبدل‌های انرژی امواج و برآورد بازده حداکثری آن به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی پژوهش‌گران بوده است، تعیین موقعیت بهینه کارگذاری مبدل به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین پارامترها در تأمین این مهم به‌حساب می‌آید. امروزه به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی رشد چشم‌گیری در مسائل مختلف مهندسی داشته است و در عمل شاهد نتایج قابل قبول از پارامترهای PSO خروجی‌های این الگوریتم‌های بهینه‌ساز در شاخه‌های مختلف علوم مهندسی بوده‌ایم. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم PSO محیطی برای کارگذاری مبدل انرژی امواج مورد ارزیابی قرار گرفته است و در نهایت پارامترهای بهینه این مبدل بر اساس بیشترین بازده عملکرد مبدل ارائه شده است. نوآوری اصلی پژوهش، بهینه‌سازی بازده مبدل موج از نوع OWC دارای محفظه با دیوار جلویی و جهت‌گیری خلاف جریان، با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات است که با به دست آوردن حالت بهینه ابعاد محفظه آن انجام گرفته است.

در این مطالعه تأثیر ابعاد یک محفظه مبدل انرژی OWC بر کارایی این دستگاه بررسی شده است. هدف اصلی این مطالعه بهینه‌سازی هندسه و ابعاد مبدل انرژی برای به دست آوردن حداکثر توان موجود در یک موج پیش‌رونده با دوره و طول موج ثابت است. مخزن موج عددی مورد استفاده در این مدل فرض می‌شود که مجهز به مولد موج مرتبه دوم استوکس است. جریان سیال به صورت دوفازی (هوا/آب)، مدل دوبعدی و آشفتگی تنظیم شده است. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر پاسخ مناسب الگوریتم PSO، جهت محاسبه اندازه محفظه بهینه برای مبدل OWC دارای محفظه با دیوار جلویی و برخلاف جریان بوده است. علاوه بر این، بر اساس طراحی ابعاد مبدل و مطالعه انجام شده، ضریب عملکرد مبدل طراحی شده در بهترین حالت برابر با ۵۴٪ به دست آمده که افزایش آن در مقایسه با پیشینه تحقیقات، خود تأییدی بر نتایج تعیین حالت بهینه توسط الگوریتم شده است.

منابع

- شهسواری زاده، افسانه، ظهیری، جواد، و جعفری، احمد. (۱۳۹۸). بررسی اثر زبانه انتهایی بر کارایی ستون نوسانی آب جهت استحصال انرژی موج. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰ (۸)، ۱۹۳۷-۱۹۴۹. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2019.273724.668094>
- نائینی، سید تقی امید، و امینی، عرفان. (۱۳۹۹). تعیین موقعیت بهینه کارگذاری مبدل نوسانگر انرژی امواج از نوع نوسانگر دورانی (مطالعه موردی: بندر نوشهر). صنعت حمل و نقل دریایی، ۶ (۱)، ۳۷-۲۵. <https://doi.org/10.30474/JMTI.2020.110562>

References

- Alamian, R., Shafaghat, R., Miri, S. J., Yazdanshenas, N., & Shakeri, M. (2014). Evaluation of technologies for harvesting wave energy in Caspian Sea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 468–476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.036>
- Ashlin, S. J., Sannasiraj, S. A., & Sundar, V. (2018). Performance of an array of oscillating water column devices integrated with an offshore detached breakwater. *Ocean Engineering*, 163, 518–532. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.043>
- Ashlin, S. J., Sundar, V., & Sannasiraj, S. A. (2016). Effects of bottom profile of an oscillating water column device on its hydrodynamic characteristics. *Renewable Energy*, 96, 341–353. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.091>
- Bai, Q. (2010). Analysis of particle swarm optimization algorithm. *Computer and Information Science*, 3(1), 180. <https://doi.org/10.5539/cis.v3n1p180>
- Bouali, B., & Larbi, S. (2013). Contribution to the geometry optimization of an oscillating water column wave energy converter. *Energy Procedia*, 36, 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.065>
- Çelik, A., & Altunkaynak, A. (2019). Experimental investigations on the performance of a fixed-oscillating water column type wave energy converter. *Energy*, 188, 116071. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116071>
- Dean, R. G. (1984). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Adv.Series on Ocean Engineering, 2, 353. <https://doi.org/10.1142/1232>
- Dizadji, N., & Sajadian, S. E. (2011). Modeling and optimization of the chamber of OWC. *Energy*, 36(5), 2360–2366. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.010>
- Fairhurst, J., & Van Niekerk, J. (2016). Modelling, Simulation and Testing of a Submerged Oscillating Water Column. *International Journal of Marine Energy*, 16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijome.2016.07.005>
- Fourie, P. C., & Groenwold, A. A. (2002). The particle swarm optimization algorithm in size and shape optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 23(4), 259–267. <https://doi.org/10.1007/s00158-002-0188-0>
- Hadadpour, A., Jabbari, E., & Kamranzad, B. (2014). Wave energy and hot spots in Anzali port. *Energy*, 74, 529–536. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.018>
- Howe, D., & Nader, J.-R. (2017). OWC WEC integrated within a breakwater versus isolated: Experimental and numerical theoretical study. *International Journal of Marine Energy*, 20, 165–182. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.036>
- John Ashlin, S., Sannasiraj, S. A., Sundar, V., Kamath, A., & Bihs, H. (2019). Effects of power take-off

- damping and model scaling on the hydrodynamic performance of OWC device.(ICOE2018), 807–821. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-3134-3_60
- Kamath, A., Bihs, H., & Arntsen, Ø. A. (2015). Numerical investigations of the hydrodynamics of an oscillating water column device. *Ocean Engineering*, 102, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.043>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*, 4, 1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Lia, Q., Mia, J., Lia, X., Chena, S., & Zuoa, L. (2014). A self-floating oscillating surge wave energy converter. *Energy*, 230, 120668. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120668>
- McCormick, M. E. (2013). *Ocean wave energy conversion*. Courier Corporation. published by wiley, c. <https://books.google.sc/books?id=wkDDAgAAQBAJ&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Morris-Thomas, M. T., Irvin, R. J., & Thiagarajan, K. P. (2007). An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water column. <https://doi.org/10.1115/1.2426992>
- Naeeni, S., Amini, E. (2020). Numerical Optimization of Positioning and Performance of Oscillating Surge Wave Energy Converter, Case study: Nowshahr, Anzali and Amirabad Ports. *Journal of Maritime Transport Industry*, 6(1), 25-37. <https://doi.org/10.30474/JMTI.2020.110562> [in persian]
- Pant, M., Thangaraj, R., & Abraham, A. (2009). Particle swarm optimization: performance tuning and empirical analysis. In *Foundations of Computational Intelligence*, 3, 101–128. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01085-9_5
- Patel, S. K., Ram, K., & Ahmed, M. R. (2013). Effect of turbine section orientation on the performance characteristics of an oscillating water column device. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 642–648. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.09.004>
- Raj, D. D., Sundar, V., & Sannasiraj, S. A. (2019). Enhancement of hydrodynamic performance of an Oscillating Water Column with harbour walls. *Renewable Energy*, 132, 142–156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.089>
- Ram, K., Faizal, M., Rafiuddin Ahmed, M., & Lee, Y.H. (2010). Experimental studies on the flow characteristics in an oscillating water column device. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(10), 2043–2050. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-010-0621-z>
- Rezanejad, K., Bhattacharjee, J., & Soares, C. G. (2013). Stepped sea bottom effects on the efficiency of nearshore oscillating water column device. *Ocean Engineering*, 70, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.05.029>
- Rezanejad, K., Souto-Iglesias, A., & Soares, C. G. (2019). Experimental investigation on the hydrodynamic performance of an L-shaped duct OWC wave energy converter. *Ocean Engineering*, 173, 388–398. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.009>
- S. Mohsen, P., Pourfayaz, F., Shirmohamadi, R., Moosavi, S., & Khalilpoor, N. (2021). Potential, Current Status, and Applications of Renewable Energy in Energy Sector of Iran: A Review. *Renewable Energy Research and Applications*, 2(1), 25-49. <https://doi.org/10.22044/rera.2020.8841.1008>
- Shahsavarizadeh, A., Zahiri, J., & Jafari, A. (2019). Effect of the Back Wall Draft on the Performance of

- Oscillating Water Column for Wave Energy Extraction. Iranian Journal of Soil and Water Research, 50(8), 1937–1949. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2019.273724.668094> [In Persian]
- Shi, Y., & Eberhart, R. (1998). A modified particle swarm optimizer. 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. (Cat. No. 98TH8360), 69–73. <https://doi.org/10.1109/ICEC.1998.699146>
- Simonetti, I., Cappietti, L., & Oumeraci, H. (2018). An empirical model as a supporting tool to optimize the main design parameters of a stationary OWC wave energy converter. Applied Energy, 231, 1205–1215. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.100>
- Suroso, A. (2005). Hydraulic model test of wave energy conversion. Jurnal Mekanikal, 19, 84–94. http://eprints.utm.my/id/eprint/8252/1/AriefSuroso2005_Hydraulic_model_test_of_wave_energy.pdf
- Teixeira, P. R. F., Davyt, D. P., Didier, E., & Ramalhais, R. (2013). Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier--Stokes equations. Energy, 61, 513–530. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.062>
- Trelea, I. C. (2003). The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection. Information Processing Letters, 85(6), 317–325. [https://doi.org/10.1016/S0020-0190\(02\)00447-7](https://doi.org/10.1016/S0020-0190(02)00447-7)
- Xu, C., & Huang, Z. (2019). 3D 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, 176, 184–198. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.02.010>