

Effect of the Back Wall Draft on the Performance of Oscillating Water Column for Wave Energy Extraction

AFSANEH SHAHSAVARI ZADEH¹, JAVAD ZAHIRI^{*1}, AHMAD JAFARI¹

1. Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Ahvaz, Iran.

(Received: Jan. 15, 2019- Revised: Apr. 28, 2019- May. 5, 2019)

ABSTRACT

There are different methods to extract energy and generating electricity from waves, which one of the simplest and most practical methods is oscillating water column (OWC). The OWC system consists of a chamber in which the wave motion inside the chamber produces a positive and negative dynamic pressure. This pressure causes turbine rotation placed at the end of the duct. In this study, three physical models; without back wall, 50 mm and 100 mm wall draft at different frequencies were used to investigate the effect of the back wall draft on the system performance. In addition, dimensional analysis has been performed to estimate the dynamic pressure based on the effective parameters. In order to evaluate the system efficiency and present the dynamic pressure formula based on dimensional analysis, the dynamic pressure at the end of chamber in both inhale and exhale modes were measured. The results of this research showed that the existence of back wall causes a significant increase in dynamic pressure and as the wall height increases, the system performance improves. In the inhale mode, the presence of the back wall causes an increase in the pressure ratio at some frequencies up to two times and for exhale mode up to four times. Based on the formula derived from dimensional analysis and sensitivity analysis, the wave height and the back wall draft have the most effectiveness on dynamic pressure. The results show in order to obtain the best system efficiency, the height of the back wall draft should be determined according to the wave height and frequency.

Keywords: Wave energy, Oscillating water column, Dynamic pressure, Sensitivity analysis

* Corresponding Author's Email: j.zahiri@asnrukh.ac.ir

بررسی اثر زبانه انتهایی بر کارایی ستون نوسانی آب جهت استحصال انرژی موج

افسانه شهسواری زاده^۱، جواد ظهیری^{*}، احمد جعفری^۱

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۲/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۲/۱۵)

چکیده

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 ستون نوسانی آب می‌باشد. ستون نوسانی آب 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 می‌تواند باعث چرخش توربین قرار گرفته در انتهای مجرا گردد. در این تحقیق جهت بررسی تأثیر زبانه انتهایی بر میزان کارایی سیستم سه مدل فیزیکی بدون زبانه انتهایی، زبانه ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متری در فرکانس‌های مختلف به کار گرفته شد. علاوه بر این از آنالیز ابعادی جهت برآورد فشار دینامیک ایجاد شده با توجه به پارامترهای مؤثر استفاده گردید. جهت بررسی کارایی سیستم و ارائه رابطه نهایی فشار دینامیک تولید شده بر اساس آنالیز ابعادی، فشار دینامیک در مجرای انتهایی در دو حالت دم و بازدم اندازه‌گیری شد. نتایج تحقیق 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. در حالت دم، وجود زبانه انتهایی باعث افزایش نسبت فشار در بعضی از فرکانس‌ها تا ۲ برابر و برای حالت بازدم تا ۴ برابر گردیده است. براساس رابطه به‌دست آمده توسط آنالیز ابعادی و تحلیل حساسیت صورت گرفته مشخص شد که ارتفاع موج و ارتفاع زبانه انتهایی بیشترین تأثیر را بر روی فشار دینامیک دارا هستند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که جهت رسیدن به بهترین کارایی سیستم، می‌بایستی ارتفاع زبانه انتهایی با توجه به فرکانس و ارتفاع امواج تعیین گردد.

واژه‌های کلیدی: انرژی موج، ستون نوسانی آب، فشار دینامیک، تحلیل حساسیت

مقدمه

هر چند در بعضی از مواقع زمان تناوب امواج از ۲۰ ثانیه نیز تجاوز می‌کند (WMO, 1998). انرژی موج نیز عبارت است از انرژی نهفته در ذرات موجود در داخل یک طول موج از سطح تا کف به عرض یک واحد که از مجموع انرژی‌های کششی، جنبشی و پتانسیل ذرات تشکیل شده است (Mahmoudian Shooshtari, 2010). مقدار عمده‌ای از انرژی موج در نواحی نزدیک ساحل تلف می‌شود. انرژی موج به ساحل شکل می‌دهد، دانه‌بندی ذرات رسوبی بستر را تنظیم می‌کند، رسوب بستر را به مناطق دور از ساحل و یا موازات ساحل منتقل می‌کند، همچنین باعث اعمال نیرو بر سازه‌های دریایی می‌شود (Ataie Ashtiani & Najafi, 2016). در حال حاضر روش‌های بسیار متنوعی برای استحصال انرژی و تولید برق از انرژی موج وجود دارد و مطالعات گسترده‌ای در زمینه استفاده از این انرژی تجدیدپذیر در حال انجام است (Soltani Fard & Kakandi, 2012). ستون نوسانی آب (Oscillating Water Column) یکی از دستگاه‌های استحصال انرژی موج بوده که تحقیقات متعددی بر روی آن انجام شده که این امر ناشی از سادگی ساختاری و مکانیکی آن است

انرژی موج یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که با توجه به مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی مرتبط با سوخت‌های فسیلی، روز به روز به اهمیت آن افزوده می‌گردد. این انرژی یکی از انرژی‌های مورد توجه امروز به شمار می‌رود و تکنولوژی‌های وابسته به آن در حال توسعه و پیشرفت سریع هستند (Antonio, 2010). از جمله عوامل مهم توجه به انرژی موج، تجدیدپذیر بودن آن می‌باشد که می‌تواند نیاز بشر در آینده را تأمین کند. جهت استفاده از انرژی موج، می‌بایستی ویژگی‌ها و خصوصیات آن مورد بررسی قرار گیرد. تعاریف زیادی در مورد موج ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به تغییر در اندازه سرعت یا عمق جریان نسبت به زمان یا مکان اشاره نمود. از جمله مشخصه‌های مهم امواج، زمان تناوب آن‌ها می‌باشد که عبارت است از مدت زمان لازم برای عبور یک طول موج کامل از یک نقطه مشخص یا فاصله زمانی بین دو قله موج. عکس زمان تناوب، فرکانس موج نامیده می‌شود که در اغلب تحلیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس مطالعات صورت گرفته زمان تناوب امواج معمولاً بین ۳ تا ۱۵ ثانیه می‌باشد،

را جهت بهینه‌سازی کارایی ستون نوسانی آب متصل به ساحل انجام دادند. در این تحقیق شکل‌های مختلف هندسی برای ستون نوسانی آب جهت بررسی تأثیر هندسه سیستم بر روی میزان جذب انرژی امواج صورت پذیرفت. براساس نتایج به‌دست آمده ابعاد ستون نوسانی آب و مشخصات موج بیشترین تأثیر را بر روی کارایی سیستم دارند. (Lari et al., 2012) به بررسی مبدل‌ها و روش‌های مختلف برآورد انرژی قابل استحصال از موج، از قبیل محاسبه توان و چگالی انرژی قابل استحصال از موج ماهانه در بندر انزلی پرداختند. چگالی توان باد در بندرانزلی نشان می‌دهد که یکی از مزایای عمده استفاده از انرژی امواج نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر، مقدار چگالی بالای توان آن بر واحد سطح است. بر اساس نتایج این تحقیق، با توجه به شرایط بندر انزلی، مبدل پلامیس (Pelamis) جهت استحصال انرژی از امواج پیشنهاد گردید. (Alamian et al., 2017) از مدل آزمایشگاهی مبدل انرژی موج جهت مطالعه و ارزیابی تجربی بازه وسیعی از شرایط امواج دریا استفاده کردند. هدف از این تحقیق بررسی حرکت پیچ سامانه بوده تا مشخصات امواجی که در آن سامانه با حرکت پیچ مناسب، انرژی الکتریکی قابل قبولی تولید می‌نماید، مشخص گردد. بر اساس آزمایش‌ها صورت گرفته، مقیاس مناسب جهت ساخت مدل واقعی برای به‌کارگیری در دریای مازندران و میزان توان قابل استحصال از آن محاسبه گردید. جهت بررسی مکانیزم جریان در اطراف دستگاه OWC، (Zhang et al., 2012) اقدام به شبیه‌سازی ویژگی‌های جریان در محفظه یک سیستم OWC با استفاده از نرم‌افزار فلونت (Fluent) نمودند. نتایج مدل-سازی با استفاده از نرم‌افزار فلونت نشان داد که میزان کارایی سیستم در حالت دم بیشتر از حالت بازدم است. شیب دستگاه OWC بر میزان حجم آب درون محفظه OWC تأثیر مستقیم دارد. بر همین اساس (Ram et al., 2016) به بررسی تأثیر زاویه ستون نوسانی آب بر روی مشخصات جریان اطراف سیستم و کارایی دستگاه پرداختند. در این تحقیق از زوایای ۴۵، ۵۵، ۶۵، ۷۵ و ۹۰ درجه استفاده گردید. نتایج آزمایشگاهی این تحقیق نشان داد که با کاهش زاویه سیستم میزان سرعت هوای خروجی در مجرای دستگاه افزایش می‌یابد. علاوه بر این در زوایای کم، حجم بیشتری از محفظه سیستم توسط موج جریان ایجاد شده اشغال می‌گردد. (Ning et al., 2016) کارایی هیدرودینامیکی یک دستگاه OWC نوع ثابت را در شرایط مختلف موج و پارامترهای هندسی در فلوم دارای موج‌ساز مورد آزمایش قرار دادند. اندازه-گیری ارتفاع سطح آب و فشار هوا در محفظه مرکزی و بازده هیدرودینامیکی سیستم OWC به خوبی با نتایج مدل عددی توسعه یافته توسط این محققین مطابقت داشت. پس از آن

(Antonio, 2010). سیستم OWC به دو نوع ثابت و شناور تقسیم‌بندی می‌شود که شباهت بسیاری به هم داشته و از دو بخش اصلی تشکیل می‌شوند: بخش محفظه مانند که دور از کف زمین و تا حدی غوطه‌ور در آب ساخته می‌شود و بخش دوم که یک قسمت باز در زیر سطح آب است و برای به دام انداختن امواج آب استفاده می‌شود. نوع شناور دستگاه معمولاً با فاصله از ساحل قرار می‌گیرد، بر این اساس عمق جریان معمولاً بیشتر از نصف طول موج بوده و موج مورد استفاده از نوع ساحلی نخواهد بود. در اکثر اوقات محل نصب این دستگاه به گونه‌ای است که امواج از نوع عمیق باشند چون با تبدیل امواج از عمیق به ساحلی قسمت اعظم انرژی موج تلف می‌گردد (Morrison & Greated, 1992). امواج مورد استفاده در نوع ثابت ستون نوسانی آب که در ساحل ساخته می‌شود، معمولاً از نوع موج ساحلی است که میزان انرژی نسبتاً پایینی را در مقایسه با امواج عمیق دارا هستند (Guo, 2010). حرکت امواج به داخل دستگاه به صورت حرکت نوسانی باعث تغییر فشار هوا در محفظه دستگاه می‌گردد. زمانی که موج وارد محفظه دستگاه می‌گردد باعث فشرده شدن هوای درون محفظه شده که هوای فشرده شده به سمت مجرای خروجی جریان می‌یابد. این جریان هوا که اصطلاحاً بازدم گفته می‌شود باعث ایجاد فشار دینامیکی مثبت شده و پس از حرکت به سمت مجرای خروجی موجب چرخش توربین می‌شود (Morris et al., 2007). با پایین آمدن موج در درون محفظه، مکش در درون محفظه دستگاه ایجاد می‌گردد که باعث ایجاد فشار دینامیکی منفی می‌گردد که به عنوان حالت دم شناخته می‌شود. در این حالت، هوای بیرون سیستم به درون محفظه وارد شده و باعث چرخش توربین عکس حالت قبل می‌گردد. در این حالت می‌توان از یک توربین دو جهته مناسب برای تبدیل انرژی جنبشی به برق استفاده نمود (Delauré & Lewis, 2003). از جمله پارامترهای کلیدی مورد توجه در تحلیل نظری یک دستگاه OWC می‌توان به ارتفاع دیواره جلویی غوطه‌ور شده، اندازه محفظه و ارتفاع موج اشاره کرد (Evans & Porter, 1995). علاوه بر این کارایی دستگاه استحصال انرژی موج بستگی شدیدی به فرکانس امواج دارد (Torresi et al., 2008). (Nazari Berenjkoob & Ghasemi, 2011) به بررسی و آنالیز مشخصه‌های امواج منطقه عسلویه در استان بوشهر جهت طراحی یک دستگاه مبدل جاذب نقطه‌ای انرژی امواج پرداختند. نتیجه این تحقیق دستگاهی است که انرژی جذب شده توسط آن بوسیله سیستم‌های داخلی، جذب و تبدیل به فشار هیدرولیکی ثابت در انباشتگر می‌گردد که نتیجه آن، تولید برق متناوب بدون تغییرات فرکانسی با توان ۱۰ کیلووات می‌باشد. (Dizadji and Sajadian, 2011) آزمایش‌هایی

توجه به تغییرات ناگهانی شکل دستگاه در مجرا شود. این دستگاه از یک محفظه مستطیل شکل و یک مجرای انتقال تشکیل شده است. جهت بررسی تأثیر زبانه انتهایی بر روی کارایی دستگاه OWC، سه مدل فیزیکی در سه حالت بدون زبانه و با زبانه‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شد. علاوه بر این جهت بررسی تأثیر فرکانس امواج بر روی کارایی دستگاه OWC از دستگاه موج‌ساز با فرکانس ۰/۵ تا ۱/۱۱ هرتز استفاده گردید. شکل (۲) دستگاه OWC را بدون زبانه و با افزایش دو زبانه انتهایی ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متری در قسمت انتهایی آن نشان می‌دهد.

برای اندازه‌گیری فشار دینامیک، در قسمت مجرای مستطیلی شکل دستگاه OWC محلی جهت اندازه‌گیری فشار دینامیک تعبیه گردید. در این تحقیق جهت اندازه‌گیری فشار دینامیک از یک دستگاه فشارسنج دیجیتالی مدل MP110 شرکت کیمو فرانسه که دارای صفحه نمایش و دو پرآب برای اندازه‌گیری فشار مثبت و منفی استفاده گردید. با اتصال لوله پیتوت نوع S به پرآب‌های دستگاه فشار-سنج، می‌توان فشارهای مثبت و منفی را در هر نقطه اندازه‌گیری کرد. از این دستگاه می‌توان جهت اندازه‌گیری طیف وسیعی از فشار با بازه ± 1000 پاسکال با دقت ۱ پاسکال استفاده نمود. منظور از فشار دینامیکی، فشار ناشی از سرعت جریان سیال بوده که جهت اندازه‌گیری آن علاوه بر مانومتر نیاز به لوله پیتوت نوع S نیز می‌باشد. این نوع لوله پیتوت قادر است که فشار ناشی از سرعت سیال و فشار محیط را در هر لحظه اندازه‌گیری کرده که تفاضل آن نشان‌دهنده فشار دینامیکی سیال خواهد بود. در این تحقیق از یک لوله پیتوت نوع S به طول ۱۵ سانتی‌متر و قطر لوله ۵ میلی‌متر و فاصله دو سر لوله ۲/۴ سانتی‌متر به صورت عمود در مرکز مجرای مستطیل شکل استفاده گردید. دو سر لوله پیتوت به دو پرآب دستگاه فشارسنج متصل می‌شود، تا بتوان فشارهای مثبت و منفی را اندازه‌گیری نمود. نمایی از لوله پیتوت نوع S مورد استفاده جهت اندازه‌گیری فشار دینامیک به همراه نحوه عملکرد آن در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به شکل (۳)، لوله پیتوت نوع S قادر به اندازه‌گیری فشار ناشی از سرعت بوده که به آن فشار دینامیکی نیز اطلاق می‌شود.

محققین به بررسی اثر پارامترهای مختلف از جمله تابع دامنه موج، عرض محفظه، طرح دیواره‌های جلویی، مقیاس روزنه و شیب در راندمان هیدرودینامیکی دستگاه OWC پرداختند. مساحت نسبت باز $\varepsilon = S/S_0$ که در آن S_0 و S به ترتیب سطح مقطع روزنه و محفظه هوا هستند) تأثیر قابل توجهی در حداکثر راندمان هیدرودینامیکی دستگاه OWC داشته است. نتایج حاصل نشان داد که حرکت موج در محفظه به شدت تابع نسبت طول موج λ/B که در آن λ طول موج و B عرض محفظه است، می‌باشد. بر اساس مطالعات صورت گرفته، چنانچه بتوان قسمت اعظم انرژی امواج آب را به سمت محفظه دستگاه هدایت نمود، به همان نسبت می‌توان کارایی هیدرودینامیکی دستگاه را افزایش داد. بر همین اساس در این تحقیق سعی گردید تا تأثیر زبانه انتهایی بر روی میزان فشار دینامیکی تولید شده در مجرای دستگاه OWC تحت فرکانس‌های مختلف موج‌ساز مورد بررسی قرار گیرد و کارایی دستگاه با توجه به ارتفاع زبانه تعیین گردد. علاوه بر این رابطه‌ای جهت برآورد فشار دینامیک در انتهای مجرای دستگاه OWC ارائه گردد. جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی فشار دینامیکی ایجاد شده نیز از آنالیز حساسیت عام استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از فلوم آزمایشگاهی مدل HM162 گنت آلمان به طول ۱۶/۵۲ متر، عرض ۰/۳۱ متر و ارتفاع ۰/۴۷ متر با دیواره شیشه-ای و کف فلزی در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان استفاده گردید. نمایی از فلوم مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است. برای ایجاد جریان در فلوم، یک پمپ گریز از مرکز با دبی ۱۶۵ مترمکعب بر ساعت و ارتفاع ۱۶ متر مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق جهت ساخت مدل OWC، از پلکسی گلاس شفاف به ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده گردید. دستگاه OWC به صورت عمود (۹۰ درجه) برای جلوگیری از تلفات ناشی از خمیدگی مجرا ساخته شد تا این امکان را فراهم کند که جریان آب در مجرا یک مسیر آزاد را طی کند و مانع افزایش تلفات انرژی با



شکل ۱. فلوم آزمایشگاهی مدل HM162 گنت آلمان



Z=100 mm



Z=50 mm



Z=0 mm

شکل ۲. مبدل OWC بدون زبانه و با زبانه‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متری



شکل ۳. لوله پیتوت نوع S مورد استفاده در آزمایش‌ها و نحوه قرارگیری آن در مدل آزمایشگاهی



و زبانه‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متری انجام شد. نوسانات فشار در محفظه OWC نشان‌دهنده جرم هوای ورودی به محفظه و جریان هوای خروجی از توربین بوده که می‌توان با استفاده از روابط ترمودینامیک مورد مطالعه قرار گیرد. اثر فشردگی در محفظه سیستم OWC بویژه در مقیاس‌های واقعی از اهمیت بالایی برخوردار بوده (Falcão & Henriques, 2016) که جهت بیان آن معمولاً از روابط میان فشار هوا و چگالی استفاده می‌شود (Sheng *et al.*, 2013):

$$\frac{P_c}{\rho_c \gamma_a} = \frac{P_{atm}}{\rho_{atm} \gamma_a} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه بالا P_c و ρ_c به ترتیب فشار و چگالی هوای درون محفظه و P_{atm} و ρ_{atm} معرف فشار و چگالی اتمسفریک

در کلیه آزمایش‌های صورت گرفته عمق جریان ثابت و برابر با ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. علاوه بر این فاصله دستگاه OWC نسبت به سطح آب در حالت بدون موج، ثابت و برابر با ۲۰ میلی‌متر انتخاب شد. جهت بررسی تأثیر فرکانس امواج بر روی میزان کارایی دستگاه از ۶ فرکانس ۰/۵۶، ۰/۶۴، ۰/۷۲، ۰/۸، ۰/۹۵ و ۱/۱۱ هرتز استفاده شد. بعد از رسیدن موج ناشی از دستگاه موج‌ساز به دستگاه OWC، جریان در داخل دستگاه شروع به نوسان می‌کند. در این حالت با استفاده از حسگر فشار (لوله پیتوت نوع S) در محفظه دستگاه، فشارهای مثبت و منفی توسط دستگاه فشارسنج ثبت می‌شود. همچنین نوسان سطح آب درون محفظه دستگاه نیز در کلیه حالت‌ها اندازه‌گیری گردید. کلیه آزمایش‌ها با استفاده از سه مدل دستگاه OWC بدون زبانه انتهایی

می‌باشند. γ_a ، نسبت گرمای ویژه هوا ($\gamma_a = 1.4$) است. بر این اساس تغییرات فشار داخل محفظه را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود (Henriques et al., 2016):

$$\Delta P_c = -\gamma_a P_c \frac{\dot{V}_c}{V_c} - \gamma_a P_c^f \frac{P_{atm}^{\frac{1}{\gamma_a}} \dot{m}_t}{\rho_{atm} V_c} \quad (\text{رابطه } ۲)$$

که V_c نشان‌دهنده حجم هوا، m_t معرف جرم هوای عبوری از توربین و $f = \frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}$ است. حجم هوای محفظه متناسب است با جابجایی ستون آب و تغییرات حجم هوا که با سرعت ستون آب نسبت مستقیم دارد. جرم هوا در مرحله دم وارد محفظه شده و در مرحله بازدم از طریق توربین خارج می‌گردد. زمانی که $P_c > P_{atm}$ ، هوای داخل محفظه فشرده شده و هوا از محفظه خارج می‌گردد. در حالت عکس، زمانی که $P_c < P_{atm}$ باشد، هوای محفظه از حالت فشرده خارج شده و هوا به درون محفظه کشیده می‌شود (Penalba & Ringwood, 2016).

معادله کلی حرکت موج با دامنه a ، طول موج λ و سرعت c به صورت زیر خواهد بود (Twidell & Weir, 2012):

$$y(x, t) = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \quad (\text{رابطه } ۳)$$

در رابطه بالا y نشان‌دهنده حرکت ذرات آب در راستای قائم می‌باشد. ارتفاع موج H از نقطه قله موج تا پایین‌ترین نقطه آن، دو برابر دامنه موج خواهد بود ($H = 2a$). با در نظر گرفتن شماره موج به صورت $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ و سرعت موج به صورت $c = \frac{\omega}{k}$ رابطه (۳) را می‌توان به صورت رابطه (۴) بازنویسی نمود. ω معرف فرکانس زاویه‌ای می‌باشد.

$$y(x, t) = \frac{H}{2} \sin(kx - \omega t) \quad (\text{رابطه } ۴)$$

جهت محاسبه حجم هوا در هر لحظه $V(t)$ ، می‌توان حجم اشغال شده توسط آب $V_w(t)$ را از کل حجم محفظه سیستم OWC، V_c ، کم نمود:

$$V(t) = V_c - V_w(t) = V_c - \iint y(x, t) dA \quad (\text{رابطه } ۵)$$

امواج ورودی به محفظه حالت سینوسی دارد. چنانچه طول محفظه در جهت عمود بر راستای موج با w و موازی با جهت موج با l نشان‌داده شوند، انتگرال دوگانه در رابطه (۵) به انتگرال ساده تبدیل شده و حجم هوای درون محفظه از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$V(t) = V_c - w \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} y(x, t) dx = V_c + \quad (\text{رابطه } ۶)$$

عبارت مثلثاتی درون براکت در رابطه (۶) را می‌توان براساس قانون تجزیه کسینوس به صورت رابطه (۷) ساده نمود:

$$V(t) = V_c + \frac{wH}{k} \sin \frac{kl}{2} \sin \omega t \quad (\text{رابطه } ۷)$$

با در نظر گرفتن رابطه پیوستگی برای حجم کنترل انتخابی

می‌توان رابطه زیر را برای هوای درون محفظه نوشت:

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{dm_{CV}}{dt} \quad (\text{رابطه } ۸)$$

به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات زمانی جرم ورودی و خروجی به درون حجم کنترل می‌باشند. با در نظر گرفتن جریان تراکم‌ناپذیر جریان آب، نرخ تغییرات حجم هوا $\dot{V}_a(t)$ که نشان‌دهنده تغییرات حجم هوای عبوری از توربین خواهد بود به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\dot{V}_a(t) = \frac{dV(t)}{dt} = \frac{wH\omega}{k} \sin \frac{kl}{2} \cos \omega t = wHc \sin \frac{kl}{2} \cos \omega t \quad (\text{رابطه } ۹)$$

جهت محاسبه حجم هوای عبوری (V_a) می‌توان از معادله فوق در بازه یک دوره تناوب نسبت به زمان انتگرال گرفت (Sameti & Farahi, 2014):

(رابطه ۱۰)

$$V_a = \int_0^T wHc \sin \frac{kl}{2} \cos \omega t dt = \frac{wHc}{\omega} \sin \frac{kl}{2} \sin \omega T$$

با داشتن حجم هوای عبوری می‌توان تولید شده توسط موج (P_t) را از حاصل ضرب رابطه (۱۰) در فشار دینامیک اندازه-گیری شده (P_{dyn}) محاسبه نمود.

$$P_t = P_{dyn} V_a \quad (\text{رابطه } ۱۱)$$

در این تحقیق از توان تولید شده توسط موج جهت بررسی کارایی ستون نوسانی آب تحت تأثیر ارتفاع زبانه خروجی استفاده شده است. علاوه بر توان تولید شده، جهت بررسی راندمان دستگاه OWC در دو حالت دم و بازدم از نسبت فشار تولید شده در مجرای دستگاه استفاده گردید که به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{pressure ratio} = \frac{P_{dyn}}{H}$$

در رابطه (۱۲)، pressure ratio نسبت فشار است که یک پارامتر بدون بعد بوده و معیار مناسبی جهت تعیین کارایی دستگاه در حالات مختلف است.

جهت مدل‌سازی فشار دینامیک در محفظه سیستم OWC از آنالیز ابعادی استفاده گردید. بر این اساس پارامترهای مؤثر بر روی میزان فشار دینامیکی درون محفظه مشخص شده و سپس بر اساس تئوری باکینگهام پارامترهای بی‌بعد استخراج گردید. پارامترهای مهم و مؤثر بر روی فشار دینامیکی به شرح زیر می‌باشند:

$$f(\lambda, H, T, f, \omega, k, c, g, \rho, w, l, Z) \quad (\text{رابطه } ۱۳)$$

در رابطه بالا T زمان تناوب موج، f فرکانس موج، g شتاب گرانشی، ρ چگالی آب، q چگالی هوا و Z ارتفاع زبانه انتهایی می‌باشد. تعدادی از پارامترهای ارائه شده از قبیل ابعاد محفظه به دلیل ثابت بودن در کلیه آزمایش‌ها حذف گردید. با در نظر گرفتن سه پارامتر ρ ، g و H به عنوان متغیرهای تکراری، چهار پارامتر

(رابطه ۱۶)

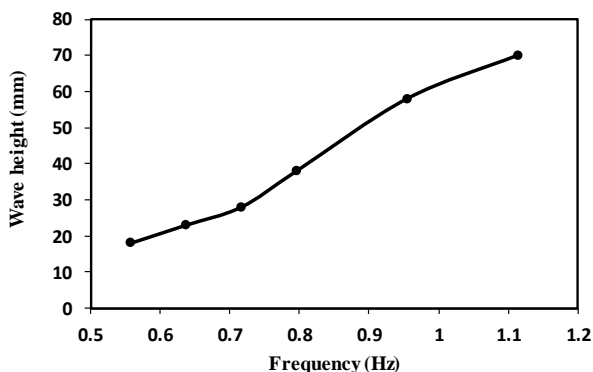
$$S_{T_i} = 1 - \frac{V[E(Y|X_{\sim i})]}{V(Y)} = 1 - \frac{y_B \cdot y_{C_i} - f_0^2}{y_A \cdot y_A - f_0^2} = 1 - \frac{(1/N) \sum_{j=1}^N y_B^{(j)} \cdot y_{C_i}^{(j)} - f_0^2}{(1/N) \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)})^2 - f_0^2}$$

در روابط فوق، $f_0^2 = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_A^{(j)}\right)^2$ و y_B, y_A, y_{C_i} سه بردار مربوط به خروجى مدل بر اساس متغیرهای ورودی در سه ماتریس A, B, C_i می‌باشند.

بحث و نتایج

تأثیر ارتفاع زبانه بر روی فشار دینامیک

در این تحقیق از فرکانس‌های مختلف جهت بررسی کارایی دستگاه OWC استفاده گردید. شکل (۴) تغییرات ارتفاع موج در کانال نسبت به فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد. ارتفاع موج درون محفظه با افزایش فرکانس موج‌ساز از ۰/۵۶ تا ۱/۱۱ هرتز از مقدار ۱۸ میلی‌متر به ۷۰ میلی‌متر افزایش یافته است. با توجه به این شکل رابطه مستقیم میان ارتفاع و فرکانس موج وجود دارد.



شکل ۴. تغییرات ارتفاع موج در کانال نسبت به فرکانس

تغییرات فشار دینامیک نسبت به زمان در فرکانس‌های مختلف موج‌ساز در شکل (۵) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در فرکانس‌های ۰/۵۶، ۰/۶۴ و ۰/۷۲ هرتز مقدار فشار دینامیک نزدیک به صفر است. به عبارت دیگر در فرکانس‌های مذکور، فشار دینامیک ایجاد شده به‌گونه‌ای بوده است که توسط حس‌گر فشار نصب شده در مجرای سیستم OWC قابل اندازه‌گیری نبوده است. بیشترین مقدار فشار دینامیک در فرکانس ۱/۱۱ هرتز است که حداقل و حداکثر آن برابر ۲- و ۱ پاسکال است. فشارهای حداکثر ایجاد شده توسط فرکانس‌های ۰/۸ و ۰/۹۵ هرتز دارای مقادیر ۱- و ۱ پاسکال بوده و برخلاف فرکانس ۱/۱۱ هرتز به‌صورت گسسته می‌باشند. بر این اساس با افزایش

بی‌بعد به صورت $\pi_4 = \frac{Z}{H}$ و $\pi_3 = \frac{c}{\sqrt{gH}}$ $\pi_2 = \frac{\lambda}{H}$ $\pi_1 = \frac{P_{dyn}}{\rho_w g H}$ ایجاد گردید. با توجه به اینکه اغلب معادلات ارائه شده در این زمینه توانی هستند، بر همین اساس معادله پیشنهادی که براساس رگرسیون غیرخطی به‌دست می‌آید، با فرم توانی فرض گردید. از آنجا که متغیر $\frac{Z}{H}$ دارای مقادیر صفر می‌باشد، در معادله پیشنهادی از تابع سکانت هایپربولیک (Sech) برای این متغیر استفاده شد. با در نظر گرفتن فشار دینامیکی به عنوان متغیر خروجی، می‌توان معادله مربوط به تحلیل ابعادی را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{P_{dyn}}{\rho_w g H} = \alpha \left(\frac{\lambda}{H}\right)^\beta \left(\frac{c}{\sqrt{gH}}\right)^\gamma \left(\text{sech} \frac{Z}{H}\right)^\delta \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

در رابطه (۱۴) پارامترهای $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ضرایب معادله بوده که با توجه به آزمایش‌ها صورت گرفته و از طریق رگرسیون غیرخطی محاسبه می‌گردند.

در این تحقیق جهت آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر روی فشار دینامیکی ایجاد شده در مجرای خروجی سیستم OWC از روش حساسیت عام^۱ معرفی شده توسط Saltelli et al. (2008) استفاده گردید. این روش علاوه بر نشان دادن تأثیر هر پارامتر بر روی خروجی مدل، قادر خواهد بود که اثرات متقابل بین پارامترهای مختلف را نیز محاسبه نماید. براساس پارامترهای مؤثر در مرحله آنالیز ابعادی، حساسیت عام بر روی چهار متغیر ارتفاع موج، طول موج، سرعت موج و ارتفاع زبانه انجام گردید. بر همین اساس دو ماتریس A و B با ابعاد (N,4) براساس داده‌های تصادفی ایجاد گردید. N تعداد داده‌های تصادفی ایجاد شده برای هر متغیر (V_i) بوده که در این مطالعه برابر ۱۰۰۰۰ عدد در نظر گرفته شد. علت استفاده از داده‌های تصادفی، محدود بودن داده‌های واقعی می‌باشد. نکته مهم در ایجاد داده‌های تصادفی، شباهت میان این داده‌های و داده‌های واقعی است، بر همین اساس از میانگین و انحراف استاندارد هر کدام از متغیرها جهت ایجاد داده‌های تصادفی آن متغیر استفاده گردید. در این روش می‌بایستی برای هر کدام از متغیرهای مورد نظر (V_i)، ماتریس دیگری ایجاد کرد که تمام ستون‌های آن به‌جز ستون نام که از ماتریس A انتخاب می‌شود، از ماتریس B باشند. در این روش شاخص‌های حساسیت مرتبه اول (S_i)، نشان‌دهنده تأثیر هر متغیر بر روی متغیر خروجی می‌باشند و شاخص‌های کلی (S_{T_i}) بیان‌گر تأثیرات متقابل مربوط به هر متغیر می‌باشد که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

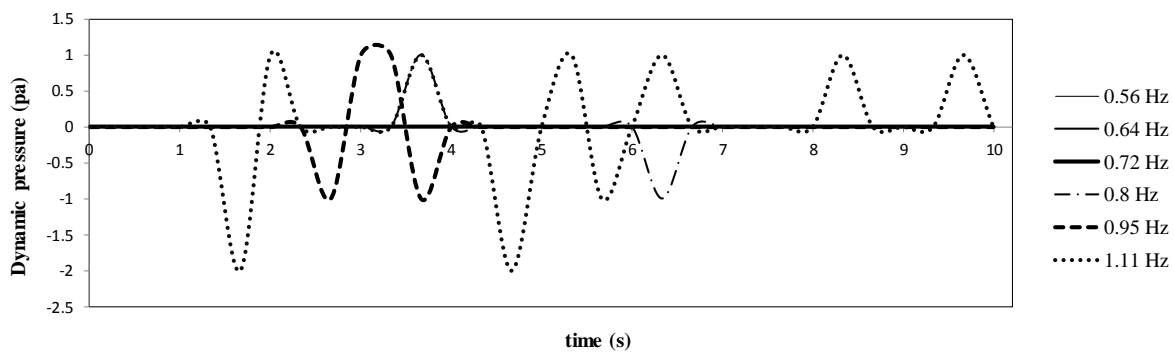
(رابطه ۱۵)

$$S_i = \frac{V[E(Y|X_i)]}{V(Y)} = \frac{y_A \cdot y_{C_i} - f_0^2}{y_A \cdot y_A - f_0^2} = \frac{(1/N) \sum_{j=1}^N y_A^{(j)} \cdot y_{C_i}^{(j)} - f_0^2}{(1/N) \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)})^2 - f_0^2}$$

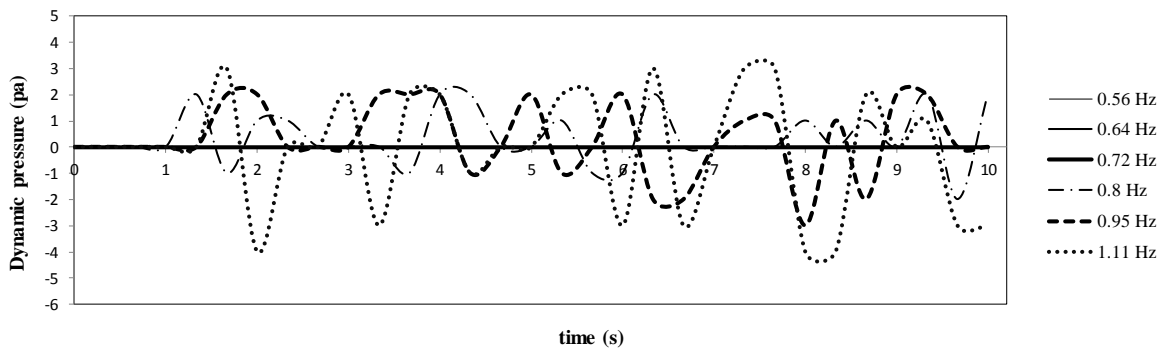
هرتز توسط دستگاه، قابل اندازه‌گیری نبوده که نشان‌دهنده فشار دینامیکی پایین تولید شده توسط فرکانس‌های مذکور می‌باشد. فشارهای دینامیکی اندازه‌گیری شده در فرکانس‌های ۰/۸، ۰/۹۵ و ۱/۱۱ هرتز نسبت به حالت بدون زبانه افزایش چشمگیری داشته است به گونه‌ای که حداکثر فشار دینامیکی تولید شده در فرکانس ۱/۱۱ هرتز برابر با ۴- و ۳ پاسکال می‌باشد که نسبت به حالت بدون زبانه به میزان ۱۰۰ و ۲۰۰ درصد در دو حالت دم و بازدم افزایش نشان می‌دهد.

فرکانس، فشار دینامیکی ایجاد شده در مجرای سیستم جهت تولید انرژی افزایش یافته و از پیوستگی بیشتری برخوردار می‌شود.

یکی از روش‌های افزایش کارایی سیستم OWC استفاده از زبانه انتهایی می‌باشد. بر همین اساس در این تحقیق از دو زبانه ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متری استفاده شده است. در شکل (۶) تأثیر زبانه ۵۰ میلی‌متری بر روی میزان فشار دینامیکی در فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است. بر این اساس به مانند حالت بدون زبانه، میزان فشار دینامیکی به ازای فرکانس‌های کمتر از ۰/۸



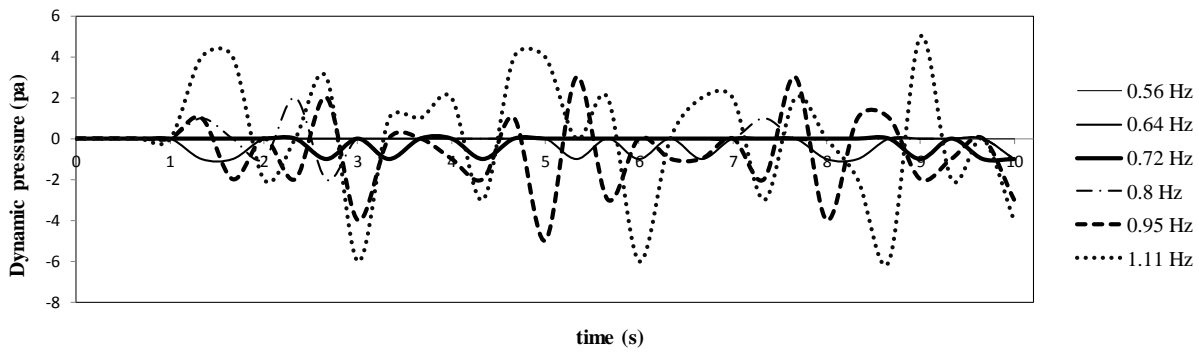
شکل ۵. تغییرات فشار دینامیک دستگاه OWC بدون زبانه نسبت به زمان



شکل ۶. تغییرات فشار دینامیک نسبت به زمان با زبانه ۵۰mm

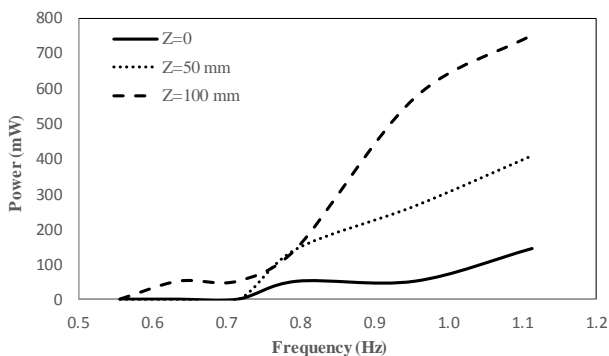
حداقل و حداکثر فشار دینامیک اندازه‌گیری شده برابر با ۴- و ۴ پاسکال می‌باشد. در فرکانس‌های ۰/۶۴ تا ۰/۷۲ هرتز روند تغییرات فشار دینامیک مشابه هم هستند. همچنین در فرکانس ۰/۵۶ هرتز فشار دینامیک تولید شده نزدیک به صفر است. مقایسه زبانه ۱۰۰ میلی‌متر با دو حالت قبل در فرکانس ۱/۱۱ هرتز نشان‌دهنده افزایش ۲۰۰ و ۵۰ درصدی فشار دینامیک تولید شده نسبت به حالت بدون زبانه و زبانه ۵۰ میلی‌متری در حالت دم می‌باشد. این میزان افزایش برای حالت بازدم به ترتیب برابر با ۴۰۰ و ۶۷ درصد می‌باشد.

تغییرات فشار دینامیکی سیستم تحت تأثیر زبانه ۱۰۰ میلی‌متری و فرکانس‌های مختلف در شکل (۷) ارائه شده است. افزودن زبانه ۱۰۰ میلی‌متری به دستگاه OWC باعث افزایش فشار دینامیکی در همه فرکانس‌ها (به جز فرکانس ۰/۵۶ هرتز) گردید. این اثر در فرکانس‌های بالا نسبت به مبدل بدون زبانه و با زبانه ۵۰ میلی‌متری به خوبی قابل مشاهده است. به طوری که در شکل (۷) بیشترین مقدار فشار دینامیک در این حالت در فرکانس ۱/۱۱ هرتز است. حداقل و حداکثر فشار دینامیک در این فرکانس به ترتیب ۶- و ۵ پاسکال می‌باشد. در فرکانس ۰/۹۵ هرتز مقدار



شکل ۷. تغییرات فشار دینامیک نسبت به زمان با زبانه ۱۰۰mm

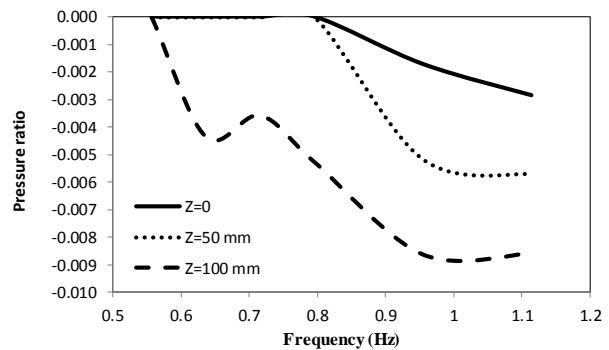
ایجاد نماید. در زبانه ۱۰۰ میلی‌متر، نسبت فشار در فرکانس ۰/۶۴ هرتز مقدار بیشتری را نسبت به فرکانس ۰/۷۲ هرتز نشان می‌دهد که دلیل آن افزایش ناگهانی عمق موج در فرکانس ۰/۷۲ هرتز بوده بدون آن که موج ایجاد شده بتواند فشار دینامیکی بالایی را ایجاد کند. با این حال در فرکانس‌های بالای ۰/۷۲ هرتز، نسبت فشار حالت صعودی به خود گرفته و مقدار آن در فرکانس ۰/۹۵ هرتز به ۰/۰۸۶- رسیده است. پس از فرکانس ۰/۹۵ هرتز برای هر دو زبانه مورد استفاده نسبت فشار به مقدار ثابتی رسیده است. مقادیر توان تولید شده توسط ستون نوسانی آب در فرکانس‌های مختلف و تحت تأثیر زبانه‌های خروجی در شکل (۹) ارائه شده است. براساس شکل ارائه شده، تغییرات توان تولید شده در حالت بدون زبانه زیاد نبوده و با افزایش فرکانس، میزان توان تولید شده با شیب ملایمی افزایش یافته است. این در حالی است که برای زبانه ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر، توان تولید شده با افزایش فرکانس امواج با شیب بسیار تندی افزایش یافته است. بیشترین توان تولید شده در تمام حالت‌ها در فرکانس ۱/۱۱ هرتز اتفاق افتاده است و مقدار آن بین ۰/۱۴ وات برای حالت بدون زبانه تا ۰/۷۵ وات برای زبانه ۱۰۰ میلی‌متر متغیر می‌باشد.



شکل ۹. تغییرات توان تولید شده نسبت به فرکانس در حالت دم در سه حالت بدون زبانه، زبانه ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر

تغییرات نسبت فشار در حالت بازدم به ازای فرکانس‌های مختلف در شکل (۱۰) ارائه شده است. در حالت بازدم، زبانه‌ها در

تغییرات نسبت فشار و توان تولید شده در دو حالت دم و بازدم
در این تحقیق جهت بررسی کارایی سیستم OWC تحت زبانه‌های مختلف از نسبت فشار و توان تولید شده استفاده گردید. بر این اساس برای کلیه حالت‌ها از حداکثر فشار دینامیکی تولید شده جهت محاسبه نسبت فشار استفاده شد. این مقایسه برای دو حالت فشارهای منفی و فشارهای مثبت که اصطلاحاً دم و بازدم گفته می‌شوند، صورت گرفته است. نسبت فشار محاسبه شده برای فرکانس‌های مختلف با زبانه‌های متفاوت در حالت دم در شکل (۸) ارائه شده است.



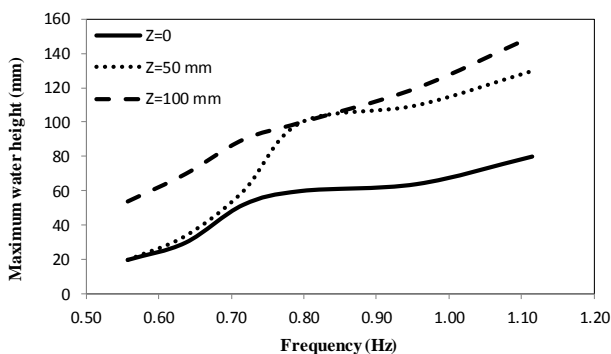
شکل ۸. تغییرات نسبت فشار به فرکانس در حالت دم در سه حالت بدون زبانه، زبانه ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر

با توجه به این شکل و براساس نتایج قبلی نسبت فشار برای حالت بدون زبانه به ازای فرکانس‌های کمتر از ۰/۸ بسیار ناچیز بوده در حالیکه با استفاده از زبانه ۱۰۰ میلی‌متری، فرکانس‌های بالای ۰/۵۶ هرتز نیز دارای پتانسیل تولید انرژی می‌باشند. در حالت دم، نسبت فشار برای زبانه ۵۰ میلی‌متری تا فرکانس ۰/۸ هرتز تأثیر چندانی نداشته ولی با افزایش فرکانس، نسبت فشار افزایش یافته و نسبت به حالت بدون زبانه تفاوت معنی‌داری را نشان می‌دهد. افزودن زبانه در قسمت انتهایی دستگاه باعث ورود بیشتر امواج به درون محفظه دستگاه و بالا رفتن نوسانات سطح آب می‌شود که به نوبه خود می‌تواند فشار دینامیکی بالاتری را

بوده با این تفاوت که مقادیر مربوط به نسبت فشار در حالت دم از مقادیر بیشتری برخوردار می‌باشند که با نتایج حاصل از تحقیقات Zhang et al. (2012) و Ram et al. (2016) که به ترتیب از مدل‌های عددی و آزمایشگاهی جهت بررسی کارایی سیستم OWC استفاده نمودند، مطابقت دارد.

بررسی نوسانات حجم آب درون محفظه دستگاه OWC

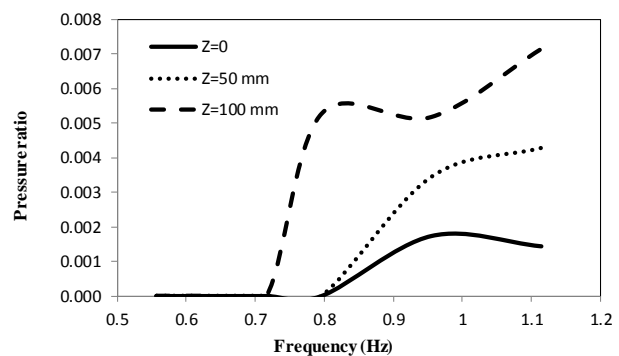
محفظه مستطیل شکل دستگاه OWC، وظیفه ضبط امواج را بر عهده دارد. فشار هوای ایجاد شده از نوسان آب درون محفظه دستگاه OWC، جهت استحصال انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در نهایت باعث به حرکت درآوردن توربین و تولید انرژی می‌گردد. شکل (۱۲) تغییرات نوسانات ارتفاع آب درون محفظه OWC برای حالات بدون زبانه و زبانه ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. نوسانات حجم آب درون محفظه OWC تحت زبانه‌های مختلف

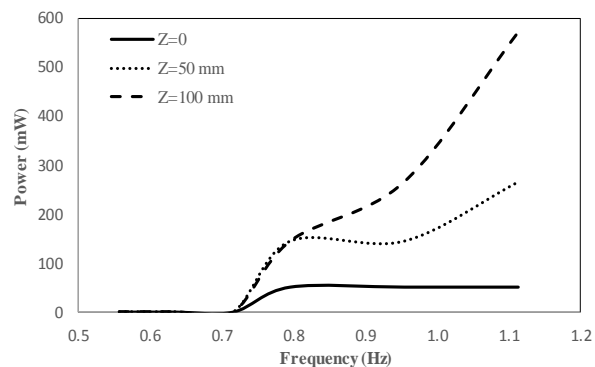
با توجه به رابطه (۱۰)، حجم آب درون محفظه دستگاه OWC که از حاصل ضرب ارتفاع آب درون محفظه در سطح مقطع آن به دست می‌آید، تحت تأثیر ارتفاع موج و سرعت موج می‌باشد. با توجه به فرمول سرعت موج، این پارامتر نسبت مستقیم با فرکانس موج دارد. از طرفی بر اساس شکل (۴)، ارتفاع موج رابطه مستقیمی با فرکانس موج دارد. بر این اساس، ارتفاع آب درون محفظه دستگاه OWC نیز تابعی از فرکانس موج خواهد بود که این امر در شکل (۱۲) برای هر سه منحنی ترسیم شده به وضوح قابل مشاهده است. برخورد موج به زبانه انتهایی باعث انکسار موج شده و از طرفی انرژی جنبشی موج تبدیل به انرژی فشاری شده که در نهایت باعث بالا رفتن سطح آب در محفظه دستگاه می‌گردد. نکته قابل توجه در شکل (۱۲)، برابر شدن مقادیر ارتفاع آب در محفظه در دو حالت زبانه ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر به ازای فرکانس ۰/۸ هرتز می‌باشد. ارتفاع موج در این فرکانس برابر با ۴۰ میلی‌متر است که نزدیک بودن مقدار ۴۰ میلی‌متر به ارتفاع زبانه ۵۰ میلی‌متر باعث شده است که کارایی دستگاه افزایش یافته و

فرکانس‌های پایین تأثیر چندانی بر روی کارایی سیستم نداشته‌اند، با این حال در فرکانس ۰/۸ هرتز، زبانه ۱۰۰ میلی‌متر باعث افزایش ناگهانی کارایی سیستم شده است. در این فرکانس نسبت فشار اندازه‌گیری شده در دو حالت بدون زبانه و زبانه ۵۰ میلی‌متر نزدیک به صفر بوده ولی زبانه ۱۰۰ میلی‌متر باعث افزایش نسبت فشار به میزان ۰/۰۵۳ شده است. با افزایش فرکانس تأثیر زبانه ۵۰ میلی‌متری افزایش پیدا کرده که روند افزایشی آن پس از فرکانس ۰/۹۵ هرتز حالت ملایم پیدا کرده است. کارایی سیستم OWC به ازای زبانه‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متری به ترتیب ۲ و ۴ برابر نسبت به حالت بدون زبانه افزایش داشته است.



شکل ۱۰. تغییرات نسبت فشار به فرکانس در حالت بازدم در سه حالت بدون زبانه، زبانه ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر

توان تولید شده در ستون نوسانی آب در حالت بازدم تحت فرکانس‌ها و زبانه‌های مختلف در شکل (۱۱) ارائه شده است. بر اساس این شکل، تغییرات توان در حالت بازدم شبیه به حالت دم بوده و تفاوت چندانی بین دو حالت مشاهده نمی‌شود. در حالت بازدم تأثیر وجود زبانه نسبت به حالت دم بیشتر است به گونه‌ای که در حالت بدون زبانه با تغییر فرکانس از ۰/۸ به ۱/۱۱ هرتز تغییری در توان تولید شده مشاهده نمی‌شود. علاوه بر این در حالت بازدم، میزان توان تولید شده نسبت به حالت دم کمتر است.



شکل ۱۱. تغییرات توان نسبت به فرکانس در حالت بازدم در سه حالت بدون زبانه، زبانه ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر

مقایسه شکل‌های (۸ و ۱۰) نشان می‌دهد که روند تغییرات نسبت فشار در دو حالت دم و بازدم از شباهت بالایی برخوردار

با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۷) می‌توان با داشتن مشخصات امواج، میزان توان تولید شده توسط ستون نوسانی آب با ابعاد مشخص را تعیین نمود. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط Parvaresh *et al.* (2005) بر روی موج‌های سواحل بندر بوشهر مشخص گردید که ارتفاع موج‌ها در ساحل بین ۰/۱ تا ۱/۰۲ متر و زمان تناوب امواج بین ۳/۶ تا ۵ ثانیه متغیر می‌باشد. بر این اساس چنانچه ارتفاع امواج به صورت متوسط برابر با ۰/۵ متر در نظر گرفته شود، می‌توان نیروگاه ۴ کیلوواتی را با در نظر گرفتن ابعاد ۶ متر برای محفظه OWC احداث نمود. با احداث دیواره انتهایی به اندازه یک متر ($\frac{Z}{H} = 2$) می‌توان توان تولید شده را به ۱۰ کیلووات افزایش داد. بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط *Lari et al.* (2012)، ارتفاع موج در بندر انزلی بین ۰/۱ تا ۱ متر متغیر بوده که بر اساس تحلیل فراوانی صورت گرفته، موج‌های با ارتفاع ۰/۲۵ تا ۰/۵ متر بیشترین فراوانی را داشته‌اند. زمان تناوب امواج نیز بین ۳ تا ۸ ثانیه متغیر بوده که زمان تناوب ۵ ثانیه بیشترین احتمال وقوع را داشته است. بر این اساس با توجه به روابط ارائه شده می‌توان نیروگاه با توان ۲/۵ کیلووات در نزدیکی ساحل به ابعاد ۶ متر احداث نمود و با ایجاد دیواره انتهایی به ارتفاع یک متر ($\frac{Z}{H} = 2.6$) می‌توان توان تولیدی را به ۹ کیلووات افزایش داد.

آنالیز حساسیت

در این تحقیق از روش حساسیت تعریف شده توسط *Saltelli et al.* (2008) جهت بررسی تأثیر هر کدام از متغیرها بر روی فشار دینامیکی ایجاد شده استفاده گردید. نتایج آنالیز حساسیت مربوط به شاخص‌های مرتبه اول و شاخص‌های کلی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. شاخص‌های حساسیت متغیرهای مؤثر بر روی میزان فشار دینامیکی

S_i				$\sum S_i$	S_T			
H	λ	c	Z		H	λ	c	Z
۰/۲۶	۰/۰۱۵	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۵۵	۰/۷۱	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۵۹

دینامیکی تأثیرگذاری بالایی دارد، به عبارتی نزدیک به ۴۵٪ واریانس خروجی تحت تأثیر اثرات متقابل خواهد بود. ارتفاع زبانه علاوه بر اینکه به صورت مستقیم بر روی فشار دینامیکی مؤثر است، بعد از ارتفاع موج نیز بیشترین تأثیر متقابل را داراست.

نتیجه‌گیری

ستون نوسانی آب یکی از سیستم‌های استحصال انرژی موج است که به دلیل سادگی ساختاری و مکانیکی آن می‌تواند به عنوان یکی از سیستم‌های مهم استحصال انرژی مورد توجه قرار گیرد.

به مانند زبانه ۱۰۰ میلی‌متر گردد.

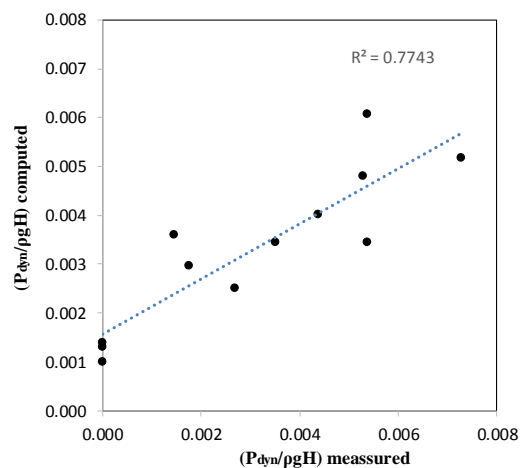
نتایج آنالیز ابعادی

با توجه به آزمایش‌ها صورت گرفته، ضرایب رابطه‌ای که توسط تحلیل ابعادی به دست آمد بر اساس رگرسیون غیر خطی به صورت زیر محاسبه گردید:

(رابطه ۱۷)

$$\frac{P_{dyn}}{\rho g H} = 0.003 \left(\frac{\lambda}{H}\right)^{0.08} \left(\frac{c}{\sqrt{gH}}\right)^{-0.77} \left(\text{sech}\frac{Z}{H}\right)^{-0.46}$$

با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته، در شرایط یکسان، فشار دینامیکی ایجاد شده در دو حالت دم و بازدم تفاوت چندانی با هم نداشته به همین دلیل جهت محاسبه ضرایب مربوط به رابطه (۱۷) تنها از اطلاعات مربوط به فشارهای مثبت استفاده گردید. تطابق فشارهای محاسبه شده از رابطه (۱۷) با فشارهای دینامیکی اندازه‌گیری شده در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۳. تطابق فشار دینامیکی بدون بعد محاسباتی و اندازه‌گیری شده

بر اساس جدول (۱) ارتفاع موج بیشترین اثر اصلی را بین سایر متغیرها داراست به طوریکه ۲۶٪ واریانس خروجی تحت تأثیر اثر مستقیم ارتفاع موج می‌باشد. بعد از ارتفاع موج، ارتفاع زبانه بیشترین اثر اصلی را دارد. حدود ۱۶٪ از واریانس خروجی تحت تأثیر مستقیم این پارامتر بوده این در حالی است که طول موج کمتر از ۲٪ به صورت مستقیم بر روی واریانس خروجی مؤثر می‌باشد. این امر نشان‌دهنده تأثیر بالای ارتفاع زبانه بر روی فشار دینامیکی ایجاد شده می‌باشد. مجموع اثرات اصلی برابر ۵۵٪ بوده که نشان می‌دهد اثرات متقابل پارامترها بر روی فشار

تولید شده در هر دو حالت دم و بازدم گردد. بیشترین نسبت فشار و توان تولیدی در دو حالت دم و بازدم مربوط به زبانه ۱۰۰ میلی‌متری است که در فرکانس ۱/۱۱ هرتز اتفاق افتاده است. حداکثر فشار ایجاد شده در زبانه ۱۰۰ میلی‌متری در دو حالت دم و بازدم به ترتیب ۲ و ۴ برابر حالت بدون زبانه بوده که نشان‌دهنده تأثیر وجود زبانه بر روی کارایی دستگاه OWC می‌باشد. با توجه به روابط ارائه شده جهت محاسبه توان تولیدی و بر اساس اطلاعات مربوط به مناطق ساحلی ایران مشخص گردید که چنانچه از ستون نوسانی آب جهت استحصال انرژی در سواحل بوشهر و بندر انزلی استفاده گردد می‌توان تا توان ۱۰ کیلووات را با ایجاد زبانه انتهایی به دست آورد. بر اساس آنالیز حساسیت صورت گرفته ارتفاع موج و ارتفاع زبانه انتهایی بیشترین تأثیر را بر روی فشار دینامیکی داشته به گونه‌ای که ۰.۲۶٪ و ۰.۱۶٪ واریانس خروجی تحت تأثیر این دو پارامتر می‌باشد. بر این اساس، با انتخاب درست ارتفاع زبانه انتهایی می‌توان کارایی سیستم OWC را به میزان قابل توجهی افزایش داد.

در این پژوهش، تأثیر زبانه انتهایی بر روی کارایی سیستم OWC به صورت آزمایشگاهی با سه حالت بدون زبانه، زبانه ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متری در فرکانس‌های بین ۰/۵۶ تا ۱/۱۱ هرتز مورد بررسی قرار گرفت. در کلیه حالت‌ها عمق جریان و فاصله قرارگیری سیستم نسبت به سطح آب ثابت در نظر گرفته شد. نتایج این مطالعه نشان داد که در هر سه حالت بدون زبانه و با زبانه، با افزایش فرکانس موج‌ساز، ارتفاع موج نیز افزایش یافته به گونه‌ای که حداکثر ارتفاع موج در فرکانس ۱/۱۱ هرتز اتفاق می‌افتد. نتایج آزمایش‌ها صورت گرفته نشان می‌دهد که در حالت بدون زبانه، فشار دینامیکی اندازه‌گیری شده تنها برای فرکانس‌های بالای ۰/۸ هرتز معنی‌دار می‌باشد. علاوه بر این فشارهای قرائت‌شده از پیوستگی لازم برخوردار نبوده و گسستگی زیادی بین قرائت‌ها مشاهده می‌شود. این در حالی است که در زبانه ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر، این گسستگی به کمترین مقدار خود رسیده و فشارهای قرائت‌شده حالت پیوسته دارند. نتایج کارایی سیستم OWC نشان می‌دهد که زبانه انتهایی می‌تواند باعث افزایش نسبت فشار و توان

REFERENCES

- Alamian, R., Shafaghat, R., Khazaei, A.M., & Yousefi, A. (2017). *Experimental evaluation of a point absorber wave energy converter in a laboratory wave tank*, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 49(1), 93-100. (In Farsi).
- Antonio, F. d. O. (2010). *Wave energy utilization: A review of the technologies*. Renewable and sustainable energy reviews, 14(3), 899-918.
- Ataie Ashtiani, B., & Najafi Jilani, A. (2016). *Coastal Engineering (Coastal Hydrodynamics)*. Jahad University Press, Amir Kabir Industrial Unit. (In Farsi).
- Delauré, Y., & Lewis, A. (2003). 3D hydrodynamic modelling of fixed oscillating water column wave power plant by a boundary element methods. Ocean engineering, 30(3), 309-330.
- Dizadji, N. and Sajadian, S.E., 2011. *Modeling and optimization of the chamber of OWC system*. Energy, 36(5), pp.2360-2366.
- Evans, D., & Porter, R. (1995). *Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device*. Applied Ocean Research, 17(3), 155-164.
- Falcão, A.F.O., & Henriques, J.C.C. (2016) *Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review*. Renewable Energy, 85, 1391-1424.
- Guo, L. (2010). *Applicability and potential of wave power in China*. MSc. dissertation, University in Gävle, Sweden.
- Henriques, J.C.C., Gato, L.M.C., Lemos, J.M., Gomes, R.P.F. & Falcão, A.F.O. (2016). *Peak-power control of a grid-integrated oscillating water column wave energy converter*. Energy, 109, 378-390.
- Lari, K., Abasian, G., & Mohseni, A. (2012). *Investigating the energy conversion systems of sea waves in Anzali Port*, Journal of Marine Science & Technology Research, 6(4), 55-68. (In Farsi).
- Mahmoudian Shooshtari, M. (2010). *Principles of flow in open channels (Volume II)*. Shahid Chamran University Press, Ahvaz. (In Farsi).
- Morris-Thomas, M. T., Irvin, R. J., & Thiagarajan, K. P. (2007). *An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water column*. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 129(4), 273-278.
- Morrison, I.G. and Greated, C.A. (1992). *Oscillating water column modelling*. Coastal Engineering Proceedings, 1(23).
- Nazari Berenjkooob, B., & Ghasemi, H. (2011). Design of 10 kWatt convertor of energy-absorbing point of sea waves in the Asalouyeh port in Persian Gulf, Iranian Energy Journal, 14(3), 1-16. (In Farsi).
- Ning, D.-Z., Wang, R.-Q., Gou, Y., Zhao, M., & Teng, B. (2016). *Numerical and experimental investigation of wave dynamics on a land-fixed OWC device*. Energy, 115, 326-337.
- Penalba, M. & Ringwood, J., 2016. A review of wave-to-wire models for wave energy converters. Energies, 9(7), 506.
- Ram, K. R., Ahmed, M. R., Zullah, M. A., & Lee, Y.-H. (2016). *Experimental studies on the flow characteristics in an inclined bend-free OWC device*. Journal of Ocean Engineering and Science, 1(1), 77-83.
- Sameti, M. & Farahi, E. (2014). *Output power for an oscillating water column wave energy conversion device*. Ocean and Environmental Fluid Research, 1(2), 27-34.
- Sheng, W., Alcorn, R., & Lewis (2013), A. On

thermodynamics in the primary power conversion of oscillating water column wave energy converters. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5, 023105.

- Soltani Fard, A., & Kakandi, N. (2012). *Energy extraction technologies from ocean waves*. Khajeh Nasir Toosi University of Technology. (In Farsi).
- Torresi, M., Camporeale, S., Strippoli, P., & Pascazio, G. (2008). *Accurate numerical simulation of a high solidity Wells turbine*. *Renewable Energy*, 33(4), 735-747.
- Twidell, J., & Weir, T. (2012). *Renewable energy*

resources ED2. Taylor & Francis, London Hearn G, Pace C (2006) Value-creating ecologies: understanding next generation business systems. *Foresight*, 8(1),55-65.

- World Meteorological Organization. & World Meteorological Organization. 1998, *Guide to wave analysis and forecasting*. Geneva, second edition, Switzerland
- Zhang, Y., Zou, Q.-P., & Greaves, D. (2012). Air–water two-phase flow modelling of hydrodynamic performance of an oscillating water column device. *Renewable Energy*, 41, 159-170.