

برداشت انرژی از امواج آب با تیر پیزوالکتریک باله‌دار و بدون باله: مطالعه تجربی

حمیدرضا ادب زاده، محمد مصطفی محمدی*، جعفر غضنفریان

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۲۴
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

کلمات کلیدی:

برداشت‌کننده انرژی
تیر یکسرگیردار باله‌دار
زاویه انحراف
مدل‌سازی تجربی

خلاصه: در این مقاله، برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک از نوع تیرهای یک‌سرگیردار با قابلیت زاویه‌دار شدن نسبت به راستای عمودی و همچنین همراه با بالهای مستطیلی شکل متصل به انتهای برداشت‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از مطالعه حاضر، بررسی اثر پارامترهای طراحی مانند زاویه تمایل برداشت‌کننده انرژی، فاصله آن از منبع موجی، عمق فرورفتگی تیر و وجود یا عدم وجود باله در انتهای تیر، روی ولتاژ مؤثر خروجی برداشت‌کننده انرژی است. بازدهی پایین مهم‌ترین محدودیت پیشروی برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک است و به همین دلیل استفاده از روشهای مبتنی بر طراحی آزمایش و بهینه‌سازی با هدف افزایش بازدهی برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک، ضروری است. جهت اجرای مطالعه تجربی، طراحی آزمایشها با استفاده از روش مرکب مرکزی و آنالیز مدل تجربی و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی با استفاده از روش روبه‌های پاسخ صورت گرفته است. همچنین اثر تجهیز برداشت‌کننده انرژی به باله روی ولتاژ نهایی بررسی شده است. مشاهده شد که شرایط بهینه برای هر دو حالت برداشت‌کننده باله‌دار و بدون باله، معادل فاصله تیر از موجساز برابر با ۲۰ سانتیمتر و عمق نفوذ ۶ سانتیمتر است. همچنین زاویه تمایل بهینه در حالت بدون باله برابر با ۶/۷ درجه و در حالت باله‌دار برابر با ۸/۵ درجه است.

۱- مقدمه

به کمک مواد پیزوالکتریک به شمار می‌رود. در این روش، انرژی مکانیکی امواج آب به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. از میان انواع پیکربندی‌های برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک، شامل برداشت‌کننده‌های دیافراگمی^۱، پوسته‌ای^۲، سیمیل^۳، استک^۴ و ستونیک سری یکسرگیردار^۵، نوع آخر یعنی برداشت‌کننده‌هایی که به شکل ستون‌های یکسرگیردار هستند از رایج‌ترین پیکربندی‌ها به شمار می‌روند. محققان بسیاری از این نوع پیکربندی برای برداشت‌کننده پیزوالکتریک آبی استفاده کرده‌اند [۲]. تلاش برای افزایش بازدهی برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک ستونی، فصل مشترک اکثر این تحقیقات بوده است. در این میان، با توجه به فرکانس پایین امواج آب دریاها و اقیانوس‌ها در برخی از تحقیقات، تلاش‌هایی برای ایجاد گردابه‌های موضعی در مقابل تیر شده است [۳-۵]. به واسطه ایجاد گردابه‌های موضعی، فرکانس ارتعاشات تیر متصل به ماده پیزوالکتریک افزایش یافته و مقدار ولتاژ خروجی

مزایای برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک شامل ساختار مکانیکی ساده، دوستدار محیط‌زیست بودن، قابلیت حمل و نقل ساده، امکان استفاده در قالب اجزای پوشیدنی، عدم نیاز به منبع تغذیه بیرونی، قابلیت هماهنگ شدن با ساختارهای مِمز، چگالی توان خروجی بالا نسبت به سایر روش‌های برداشت انرژی، هزینه ساخت نسبتاً پایین و قابلیت زیاد کوچک‌سازی، باعث مطرح شدن آن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های برداشت انرژی قابل‌جایگزینی با باتری‌های معمولی شده است. با وجود این مزایای نسبی مهم، همچنان محدودیت مهم کوچک بودن انرژی الکتریکی تولید شده، باعث شده این سیستم‌ها نتوانند در بسیاری از کاربردها جایگزین باتری‌ها شوند. از همین رو، اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک به روی افزایش بازدهی توانی این سیستم‌ها تمرکز دارند [۱].

برداشت انرژی از امواج آب، یکی از روش‌های نوین تولید انرژی پاک

- 1 - circular diaphragm
- 2 - shell type
- 3 - cymbal
- 4 - stack type
- 5 - cantilever

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: dr.mohammadi@znu.ac.ir



دو حالت برداشت‌کننده با باله و بدون باله انجام می‌شود و اثر وجود باله در انتهای برداشت‌کننده بررسی می‌شود. مدل تجربی حاکمه با استفاده از روش سطح پاسخ^۲، استخراج شده و بر اساس آن بهینه‌سازی پارامترهای ورودی جهت دستیابی به بیشترین ولتاژ مؤثر صورت می‌گیرد. روش سیستماتیک مطالعه تجربی حاضر که مشخص‌کننده برهم‌کنش اثرات پارامترهای طراحی و تنظیمی با یکدیگر در ولتاژ مؤثر خروجی است از دیگر نوآوری‌های مقاله محسوب می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

کلیه آزمایش‌ها در یک کانال آب با طول ۳/۷ متر، عرض و ارتفاع ۰/۶ متر و از جنس پلکسی گلاس صورت گرفته است. از دو نوع تیر یکسرگیردار با باله و بدون باله مطابق با شکل ۱ در آزمایش‌ها استفاده شد. در این شکل، طول تیر با L ، عرض تیر با w ، قطر دیسک پیزوالکتریک با d ، طول باله با m و عرض باله با n نشان داده شده است. در هر دو تیر دیسک پیزوالکتریک در وسط عرض تیر و با فاصله ثابت نسبت به لبه تیر قرار گرفته است.

در میان این پارامترهای هندسی، تنها طول تیر متغیر و باقی پارامترها ثابت در نظر گرفته شدند که در جدول ۱ مقدار پارامترهای ثابت آزمایش نشان داده شده است. نقطه مرکزی سطح باله به کمک پیچی به تیر استیل بسته شد به نحوی که لبه انتهایی باله با لبه انتهایی تیر مماس گشت. بدین ترتیب طول مؤثر تیر با قرار دادن باله تغییری نمی‌کرد.

شکل ۲ تصویر برداشت‌کننده پیزوالتریک بدون باله را در کانال آب نشان می‌دهد. برداشت‌کننده انرژی که به شکل یک تیر یکسرگیردار متصل به دیسک پیزوالکتریک است، به وسیله یک فیکسچر که قابلیت چرخش و تنظیم زاویه نسبت به محور عمودی را دارد، در فاصله ۱ متری از محور مرکزی موج ساز نشان داده شده در شکل ۲ قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری ولتاژ مؤثر خروجی از اسیلوسکوپ با مدل جی-پی-اس لمیتید^۳ دوکاناله استفاده شد. این اسیلوسکوپ قابلیت ذخیره خروجی ولتاژی و محاسبه برخط ولتاژ مؤثر را داشت.

۳- روش طراحی آزمایش و بهینه‌سازی

پارامترهای متغیر طراحی در تمامی آزمایش‌ها نسبت فاصله تیر از موج‌ساز به فاصله بیشینه یک متر به درصد، نسبت عمق فرورفتگی تیر در آب به عمق آب در موج‌ساز (۵۰ سانتی‌متر) به درصد و زاویه تیر با محور

بهبود می‌یابد. تغییرات پارامترهای طراحی از جمله جهت فضایی قرارگیری تیر یک سرگیردار، ابعاد تیر، موقعیت مکانی تیر یکسرگیردار، هندسه تیر و جنس و ابعاد ماده پیزوالکتریک نیز موضوع آنالیز و بهینه‌سازی و شبیه‌سازی عددی محققان بوده است [۶-۹]. در بیشتر تحقیقات صورت گرفته از شبیه‌سازی عددی و مدلسازی ریاضی، برای پیش‌بینی رفتار برداشت‌کننده، از ماده پیزو استفاده شده است و مطالعات تجربی به نسبت کمتری برای آنالیز پارامترهای طراحی برداشت‌کننده‌های انرژی پیزو انجام شده است. علت این امر نیاز به انجام تعداد زیاد آزمایش‌های تجربی برای آنالیز کامل رفتار سیستم برداشت‌کننده انرژی در داخل آب، و همچنین غیرخطی بودن اثرات پارامترهای طراحی روی خروجی برداشت‌کننده پیزوالکتریک و برهم‌کنش احتمالی پارامترهای طراحی با یکدیگر است که باعث دشواری مدلسازی تجربی سیستم می‌شود. از میان مطالعات تجربی سیستماتیک روی طرح برداشت‌کننده، می‌توان به مقاله الرشدان اشاره کرد که در آن اثر متغیرهای طراحی شامل مقدار و ابعاد جرم متصل به انتهای ستون پیزوالکتریک، ضخامت، طول و عرض لایه پیزوالکتریک، جنس لایه پیزوالکتریک و عایق بستر را روی چگالی توان و ولتاژ خروجی برداشت‌کننده پیزوالکتریک میکروبعدی بصورت تجربی بررسی نموده است. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از آرایه L18 روش تاگوچی صورت گرفته و جنس ماده پیزوالکتریک و ضخامت آن به ترتیب به عنوان مهمترین فاکتورهای طراحی تعیین شده‌اند [۱۰]. السادی و عبدالله شیرازدر با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی، مطالعه‌ای روی اثرات پارامترهای طراحی بر خروجی برداشت‌کننده پیزوالکتریک با پیکربندی ستونی دو طرفه^۱ انجام دادند. آنها اثرات ضخامت لایه پیزوالکتریک، شتاب و فرکانس تحریک ورودی را روی توان خروجی برداشت‌کننده سنجیدند. در میان پارامترهای طراحی مورد مطالعه، ضخامت لایه پیزوالکتریک بیشترین اثر را روی توان خروجی داشت [۱۱].

در مقاله حاضر مطالعه تجربی جدیدی روی پارامترهای طراحی و تنظیمی برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک ستونی صورت می‌گیرد. برداشت‌کننده انرژی تحت مطالعه، از نوع ستونی یکسرگیردار با اتصال یک‌طرفه ماده پیزوالکتریک است و فاصله برداشت‌کننده از موج‌ساز، عمق فروروی آن در آب و همچنین زاویه قرارگیری برداشت‌کننده نسبت به محور عمودی، متغیرهای اصلی ورودی را در بر می‌گیرد. در مطالعات پیشین اثر متغیرهای فوق‌الذکر روی خروجی برداشت‌کننده بررسی نشده است. همچنین از یک باله مستطیلی در انتهای برداشت‌کننده استفاده می‌شود و کلیه آزمایش‌ها در

2 - Response surface methodology (RSM)

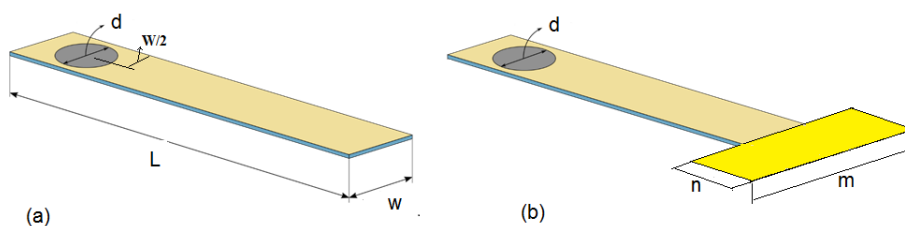
3 - GPS-1072B

1 - Bimorph cantilever configuration

جدول ۱. پارامترهای ثابت در برداشت کننده‌های پیزوالکتریک باله‌دار و بدون باله

Table 1. Constant design parameters of finned and finless cantilever piezoelectric energy harvestes

مقدار	پارامتر
PZT4	جنس ماده پیزوالکتریک
۰/۱ میلیمتر	ضخامت دیسک پیزوالکتریک
۳ سانتیمتر	قطر دیسک پیزوالکتریک (d)
برنج	جنس بستر دیسک پیزوالکتریک
فولاد زنگ‌نزن ۴۳۰	جنس تیر یکسرگیردار
۴ سانتیمتر	عرض تیر یکسرگیردار (w)
۰/۴ میلیمتر	ضخامت تیر یکسرگیردار
۱۰ سانتیمتر	طول باله
۳ سانتیمتر	عرض باله
۱ متر	بیشترین فاصله تیر از موج‌ساز



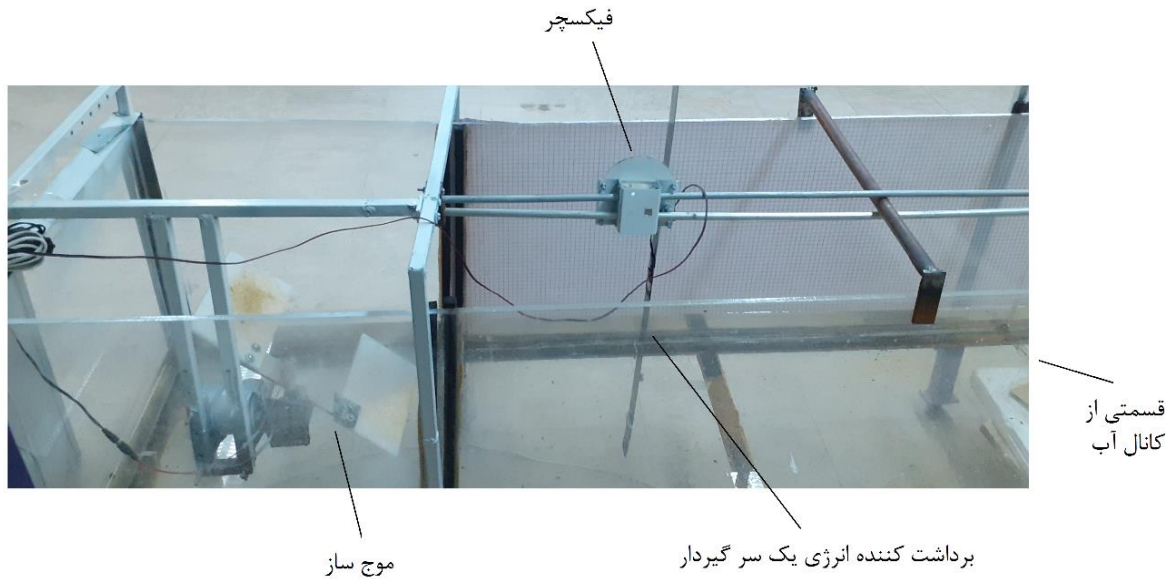
شکل ۱. تصویر شماتیک برداشت کننده‌های یکسرگیردار بدون باله (a)، با باله (b).

Fig. 1. Schematic picture of finless (part a) and finned cantilever energy harvester (part b)

برخوردی با آب نخواهد داشت. بازه تغییرات زاویه تمایل تیر نیز به گونه‌ای انتخاب شده است که تیر از حالت عمودی (با زاویه تمایل صفر) حداکثر به میزانی تمایل پیدا کند که در آستانه خروج از آب قرار گیرد و این حد بحرانی در زاویه تمایل ۶۰ درجه برای تیر فوق‌الذکر رخ داده است.

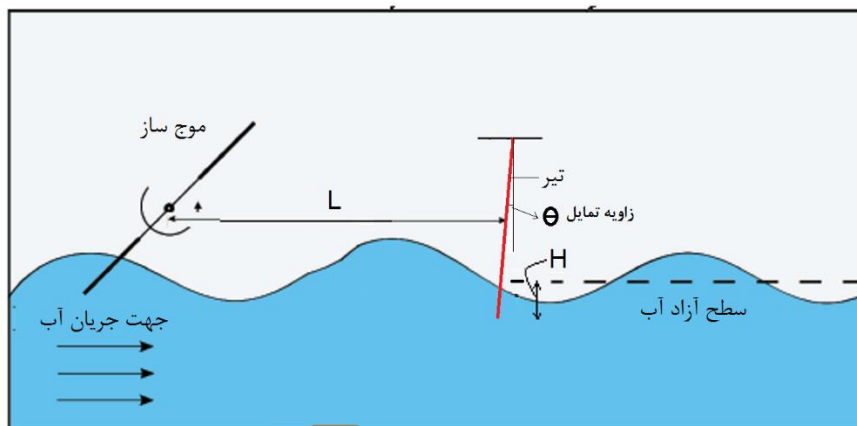
متدولوژی سطح پاسخ یکی از روش‌های ریاضی مهم برای مشخص کردن نحوه اثرات پارامترهای ورودی یک مسئله روی متغیر خروجی آن است. در روش سطح پاسخ، فرض می‌شود که ارتباط میان متغیرهای ورودی و خروجی را می‌توان با استفاده از چند جمله‌ای‌های مرتبه ۱ یا ۲ برقرار نمود. صحت این فرض با استفاده از روش‌های آماری مانند آنالیز واریانس سنجیده می‌شود. در بیشتر مسائل، ارتباط میان متغیرهای ورودی (x_i) و پاسخ خروجی

عمودی هستند. تغییرات نسبت فاصله تیر از موج‌ساز در بازه ۲۰ الی ۱۰۰ درصد، تغییرات زاویه تمایل از ۰ تا ۶۰ درجه و تغییرات عمق از ۳ الی ۱۲ درصد در نظر گرفته شد. حد پایینی فاصله تیر از موج‌ساز (۲۰ درصد) -به گونه‌ای انتخاب شده است که تیر با وجود اعمال زاویه تمایل برخوردی به موج‌ساز نداشته باشد تا از آسیب مکانیکی ناشی از برخورد دو سازه محافظت شود. از طرفی در فواصل بیش از ۱۰۰ سانتیمتر امواج به طور چشمگیری ضعیف هستند؛ لذا حد بالایی نسبت فاصله ۱۰۰ درصد انتخاب شده است. مقدار عمق تیر با توجه به عمق کانال آب و ارتفاع فیکسچر تیر پیزوالکتریک نسبت به کانال اخذ شده است. ارتفاع امواج آب به گونه‌ای است که در صورت تنظیم عمق تیر کمتر از ۱/۵ سانتی متر، عملاً تیر پیزو در لحظاتی از زمان



شکل ۲. برداشت کننده بدون باله در کانال آب.

Fig. 2. Finless cantilever piezoelectric energy harvesters in water channel



شکل ۳. تصویر شماتیک پارامترهای طراحی.

Fig. 3. Schematic representation of the design parameters

در این رابطه، کلیه ضرایب β ضرایب مجهول مسئله‌اند و ε خطای مدل است. یکی از اهداف اصلی روش سطح پاسخ، محاسبه ضرایب β در کنار کمینه‌سازی خطای مدل‌سازی است. سؤال مهمی که در این گام مطرح است تعداد آزمایش‌های لازم است. مشخصات نقاط آزمایش برای محاسبه ضرایب مجهول در عین حداقل بودن خطای مدل‌سازی می‌باشد و روش‌های طراحی آزمایش مانند فاکتوریل کامل، فاکتوریل جزئی، باکس بنکن، مرکب

یا رابطه مرتبه ۲ نظیر رابطه (۱) برقرار می‌گردد.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

جدول ۲. پارامترهای ورودی در آزمونهای طراحی شده با روش مرکب مرکزی برای هر دو حالت با باله و بدون باله

Table 2. Input parameters in the experiments designed with the CCD method for both finned and finless cantilever energy harvesters

ترتیب استاندارد	شماره	زاویه	نسبت عمق (درصد)	نسبت طول (درصد)
۱۷	۱	۳۰	۶	۶۰
۱۵	۲	۳۰	۶	۶۰
۱۶	۴	۳۰	۶	۶۰
۵	۴	۴۵	۳	۴۰
۱۴	۵	۶۰	۱۲	۶۰
۱۱	۶	۳۰	۰	۶۰
۱۲	۷	۳۰	۱۲	۶۰
۶	۸	۴۵	۳	۸۰
۲۰	۹	۳۰	۶	۶۰
۱۳	۱۰	۰	۶	۶۰
۱۹	۱۱	۳۰	۶	۶۰
۳	۱۲	۱۵	۹	۴۰
۱۸	۱۳	۳۰	۶	۶۰
۲	۱۴	۱۵	۳	۸۰
۷	۱۵	۴۵	۹	۴۰
۹	۱۶	۳۰	۶	۲۰
۴	۱۷	۱۵	۹	۸۰
۸	۱۸	۴۵	۹	۸۰
۱۰	۱۹	۳۰	۶	۱۰۰
۱	۲۰	۱۵	۳	۴۰

می‌باشد. برای آنالیز واریانس و سنجش دقت مدلسازی، لازم است که در یک نقطه از آزمایش، چند مرتبه آزمایش‌ها را تکرار نمود. در این مقاله در نقطه مرکزی، آزمایش‌ها به تعداد ۵ مرتبه تکرار شده‌اند و با توجه به وجود ۳ متغیر ورودی و ۵ تکرار، تعداد آزمایش‌ها برابر با ۲۰ عدد می‌باشد. آزمون‌های طراحی شده با روش مرکب مرکزی در جدول ۲ برای هر دو حالت بدون باله و با باله نشان داده شده است. ستون‌های جدول شامل ترتیب استاندارد آزمایش‌ها، شماره آزمون و متغیرهای ورودی هستند. نقطه مرکزی آزمون‌ها با پارامترهای تنظیمی طول ۶۰ سانتی‌متر، عمق ۳ سانتی‌متر و زاویه ۳۰ درجه به تعداد پنج مرتبه تکرار شده است.

مرکزی^۱ و سایر روش‌های مشابه فضای آزمایش‌های لازم برای محاسبه ضرایب مجهول معادله (۱) را تعریف می‌کنند. روش مرکب مرکزی یکی از بهترین روش‌های طراحی آزمایش برای مدل‌های مرتبه ۲ مانند مدل تعریف شده در رابطه (۱) است [۱۲].

این روش، فضای آزمایش‌ها را به یک نقطه مرکزی، تعدادی نقاط عاملی و تعدادی نقاط محوری افزاز می‌کند. فاصله نقاط محوری از نقطه مرکزی برابر با $\pm\alpha$ واحد بوده که در این مقاله مقدار α برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. تعداد آزمایش‌ها در روش مرکب مرکزی حداقل برابر با $(2k + 1) + 2k$ عدد است که در این رابطه k تعداد فاکتورهای ورودی

1 - Central composite design (CCD)

جدول ۳. خلاصه آنالیز واریانس سنجش کفایت دقتی مدل استخراج شده

Table 3. Results of ANOVA for analyzing the precision adequacy of the empirical model

آماره	S	R^2	$R^2_{adjusted}$	$R^2_{predicted}$
بدون باله	-۰/۳۵۳۵۵۳	%۹۹/۹۴	%۹۹/۸۹	%۹۹/۵۴
باله‌دار	-۰/۱۵۷۵۹۲	%۹۹/۹۸	%۹۹/۹۷	%۹۹/۸۷

۴- نتایج مدل‌سازی تجربی

با اندازه‌گیری ولتاژ مؤثر برای هر یک از آزمایش‌ها در حالت باله‌دار و بدون باله و وارد کردن آن به نرم‌افزار مینی‌تب، مدل‌سازی تجربی با روش متدولوژی رویه‌های پاسخ و بر اساس چند جمله‌ای‌های مرتبه دوم صورت گرفت و مدل‌های تجربی مربوط به حالت بدون باله و باله‌دار استخراج شد. روابط (۱) و (۲) به ترتیب مدل‌های ریاضی استخراج شده را نشان می‌دهند. مقادیر متغیرهای نسبت عمق و نسبت طول بر حسب درصد وارد شده‌اند.

$$V_{ms} = 104.88 - 1.2563L + 0.041H - 0.1583\theta + 0.005000L^2 + 0.0832H^2 - 0.005556\theta^2 + 0.0083L \times H + 0.005L \times \theta + 0.01111H \times \theta \quad (2)$$

$$V_{ms} = 87.801 - 1.0571L + 0.242H - 0.1098\theta + 0.004307L^2 + 0.069H^2 - 0.005288\theta^2 + 0.0043L \times H + 0.004458L \times \theta + 0.00916H \times \theta \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳) ولتاژ بر حسب میلی‌ولت بوده و L ، H و θ به ترتیب نسبت فاصله از موج‌ساز، نسبت عمق فرورفتگی و زاویه تمایل می‌باشند. برای بررسی کفایت مدل از آنالیز واریانس استفاده شده و خلاصه آنالیز واریانس در جدول ۳ برای حالات باله‌دار و بدون باله گزارش شده است. آماره S نشان دهنده مجذور خطاهای باقی مانده، R^2 ضریب دترمینان چندگانه نام داشته و معیاری از مقدار کاهش تغییر پذیری یا پراکندگی در پاسخ خروجی بر اثر تغییر متغیرهای ورودی است. مقدار R^2 مابین صفر و یک است و بدین معنی است که با افزایش آن میزان پراکندگی خروجی‌ها

کمتر می‌شود. البته مقدار زیاد و نزدیک به یک این پارامتر لزوماً به معنای مناسب بودن مدل رگرسیونی نیست. با اضافه شدن یک متغیر به مدل، مقدار R^2 افزایش می‌یابد. هر چند که این متغیر از نظر آماری اثر مهمی در خروجی نداشته باشد. بنابراین ممکن است مدل‌هایی شامل متغیرهای متعدد بوده و R^2 شان بالا باشد ولی مدل در کل ضعیف باشد. برای رفع این نقیصه، از آماره‌های $R^2_{adjusted}$ و $R^2_{predicted}$ استفاده می‌شود و اگر تفاوت این دو آماره کمتر از ۰/۲ باشد مدل دقت بالایی خواهد داشت [۱۲].

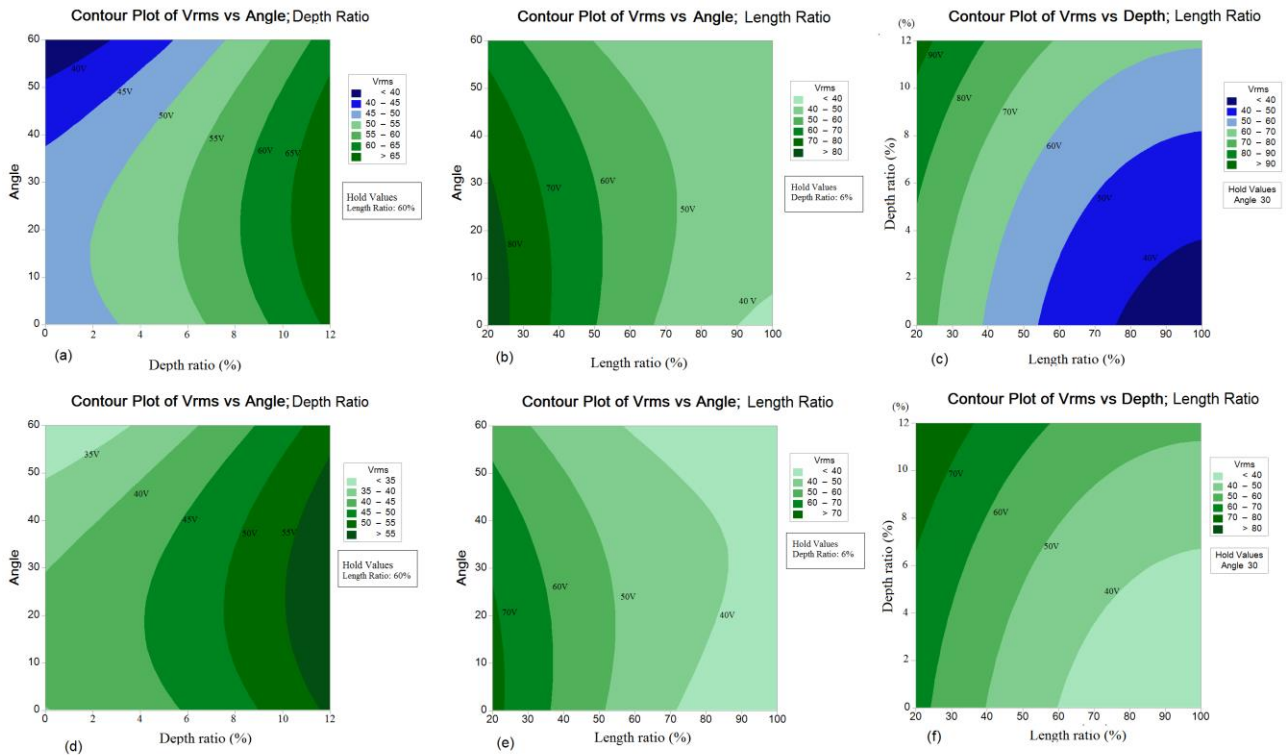
مقدار بالای R^2 و اختلاف بسیار کم $R^2_{adjusted}$ و $R^2_{predicted}$ نشان دهنده دقت مناسب مدل‌سازی است [۱۲]. کانتورهای دوبعدی اثرات پارامترهای آزمایش در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. سه تصویر بالای شکل مربوط به تیر یکسرگیردار بدون باله و سه تصویر پایینی مربوط به تیر یکسرگیردار با باله است. همان‌طور که مشهود است، روند تأثیر پارامترهای آزمایش روی ولتاژ مؤثر خروجی برای هر دو حالت با باله و بدون باله یکسان است و اتصال باله رفتار برداشت‌کننده پیزوالکتریک را تغییر نداده است. نتایج تفصیلی آنالیز واریانس ۱ برای تیرهای یکسرگیردار بدون باله و با باله در جداول ۴ گزارش شده است. پارامترهایی از جدول ۴ که مقدار آماره پارامتر احتمالی p آنها کمتر از ۰/۰۵ و مقدار آماره احتمالی F آنها بیش از ۰/۰۵ است پارامتری مؤثر در مدل بحساب می‌آیند.

در شکل (۵) رویه‌های پاسخ سه‌بعدی برازش شده بر اساس روابط (۱) و (۲) نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که مشهود است پارامترهای فاصله از موج‌ساز و عمق فرورفتگی تیر، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در ولتاژ خروجی هستند. کاهش فاصله از موج‌ساز و افزایش عمق فرورفتگی باعث افزایش ولتاژ مؤثر در برداشت‌کننده پیزوالکتریک شده است. اثر زاویه تمایل، کمتر از دو پارامتر دیگر است و زاویه‌ای برای دستیابی به بیشترین ولتاژ مؤثر وجود دارد. اثر هر سه پارامتر، غیرخطی بوده و بر اساس آنالیز واریانس

جدول ۴. آنالیز واریانس متغیرهای طراحی برای دو حالت با باله و بدون باله.

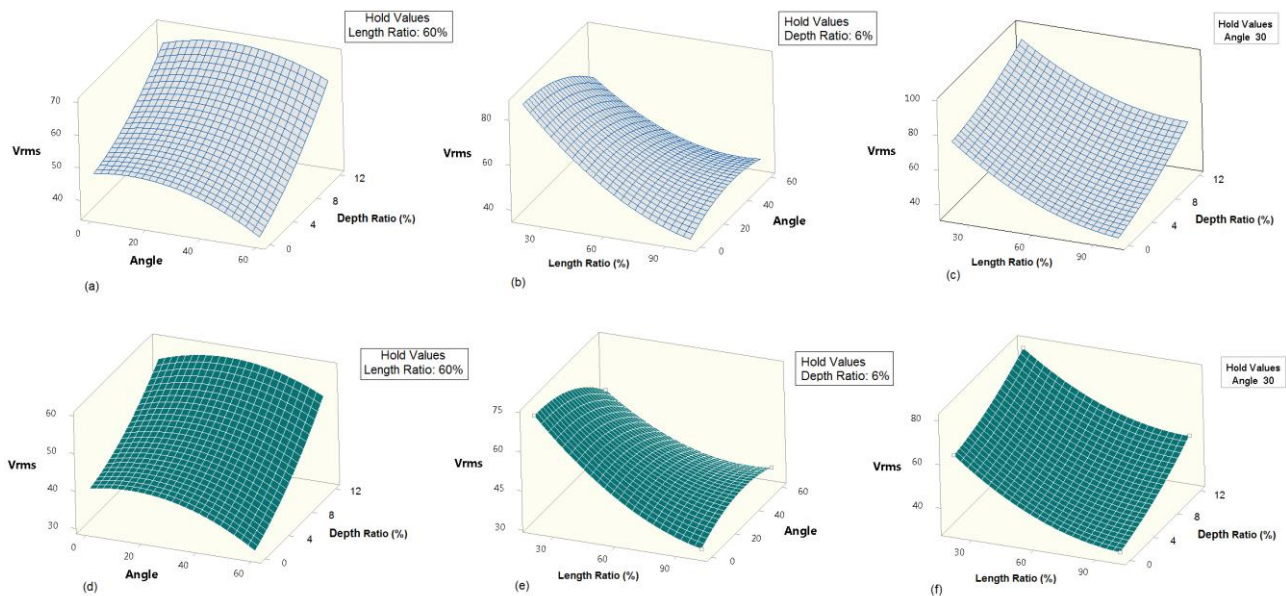
Table 4. Results of ANOVA for the design parameters of both types of cantilever energy harvesters

آماره p	حالت با باله				حالت بدون باله				درجه آزادی	آماره
	مجموع مربعات تنظیم شده	میانگین مربعات تنظیم شده	آماره F	درجه آزادی	مجموع مربعات تنظیم شده	میانگین مربعات تنظیم شده	آماره F			
۰/۰۰۰	۱۵۰/۱۰۰	۱۶۶/۷۷۸	۶۷۱۵/۳۸	۹	۰/۰۰۰	۲۱۰/۱/۹۵	۲۳۳/۵۵	۱۸۶۸/۴۰	۹	مدل
۰/۰۰۰	۱۳۳۸/۵۱	۴۴۶/۱۷۱	۱۷۹۶۵/۲۳	۳	۰/۰۰۰	۱۸۹۴/۷۵	۶۳۱/۵۸	۵۰۵۲/۶۷	۳	خطی
۰/۰۰۰	۹۲۵/۶۸	۹۲۵/۶۸۱	۳۷۲۷۲/۸۹	۱	۰/۰۰۰	۱۳۳۲/۲۵	۱۳۳۲/۲۵	۱۰۶۵۸/۰۰	۱	L
۰/۰۰۰	۳۷۳/۴۶	۳۷۳/۴۵۶	۱۵۰۳۷/۳۳	۱	۰/۰۰۰	۵۰۶/۲۵	۵۰۶/۲۵	۴۰۵۰/۰۰	۱	H
۰/۰۰۰	۳۹/۳۸	۳۹/۳۷۶	۱۵۸۵/۴۷	۱	۰/۰۰۰	۵۶/۲۵	۵۶/۲۵	۴۵۰/۰۰	۱	θ
۰/۰۰۰	۱۴۶/۲۷	۴۸/۷۵۵	۱۹۶۳/۱۵	۳	۰/۰۰۰	۱۸۵/۲۰	۶۱/۷۳	۴۹۳/۸۷	۳	مرتبه دو
۰/۰۰۰	۷۴/۶۲	۷۴/۶۱۹	۳۰۰۴/۵۵	۱	۰/۰۰۰	۱۰۰/۵۷	۱۰۰/۵۷	۸۰۴/۵۷	۱	L*L
۰/۰۰۰	۹/۷۵	۹/۷۵۰	۳۹۲/۵۹	۱	۰/۰۰۰	۱۴/۱۴	۱۴/۱۴	۱۱۳/۱۴	۱	H*H
۰/۰۰۰	۳۵/۵۹	۳۵/۵۹۱	۱۴۳۳/۰۹	۱	۰/۰۰۰	۳۹/۲۹	۳۹/۲۹	۳۱۴/۲۹	۱	$\theta * \theta$
۰/۰۰۰	۱۶/۲۲	۵/۴۰۸	۲۱۷/۷۵	۳	۰/۰۰۰	۲۲/۰۰	۷/۳۳	۵۸/۶۷	۳	برهمکنش دو تایی
۰/۰۰۱	۰/۵۵	۰/۵۵۱	۲۲/۲۰	۱	۰/۰۰۳	۲/۰۰	۲/۰۰	۱۶/۰۰	۱	L*H
۰/۰۰۰	۱۴/۳۱	۱۴/۳۱۱	۵۷۶/۲۵	۱	۰/۰۰۰	۱۸/۰۰	۱۸/۰۰	۱۴۴/۰۰	۱	L* θ
۰/۰۰۰	۱/۳۶	۱/۳۶۱	۵۴/۸۱	۱	۰/۰۰۳	۲/۰۰	۲/۰۰	۱۶/۰۰	۱	H* θ
۰/۰۰۱	۰/۲۵	۰/۰۲۵		۱۰		۱/۲۵	۰/۱۲		۱۰	خطا
۰/۰۰۱	۰/۲۴	۰/۰۴۸	۲۸/۸۰	۵	*	۱/۲۵	۰/۲۵	*	۵	کمبود برازش
	۰/۰۱	۰/۰۰۲		۵		۰/۰۰	۰/۰۰		۵	خطای خالص
	۱۵۰/۱/۲۵			۱۹		۲۱۰۳/۲۰			۱۹	کل



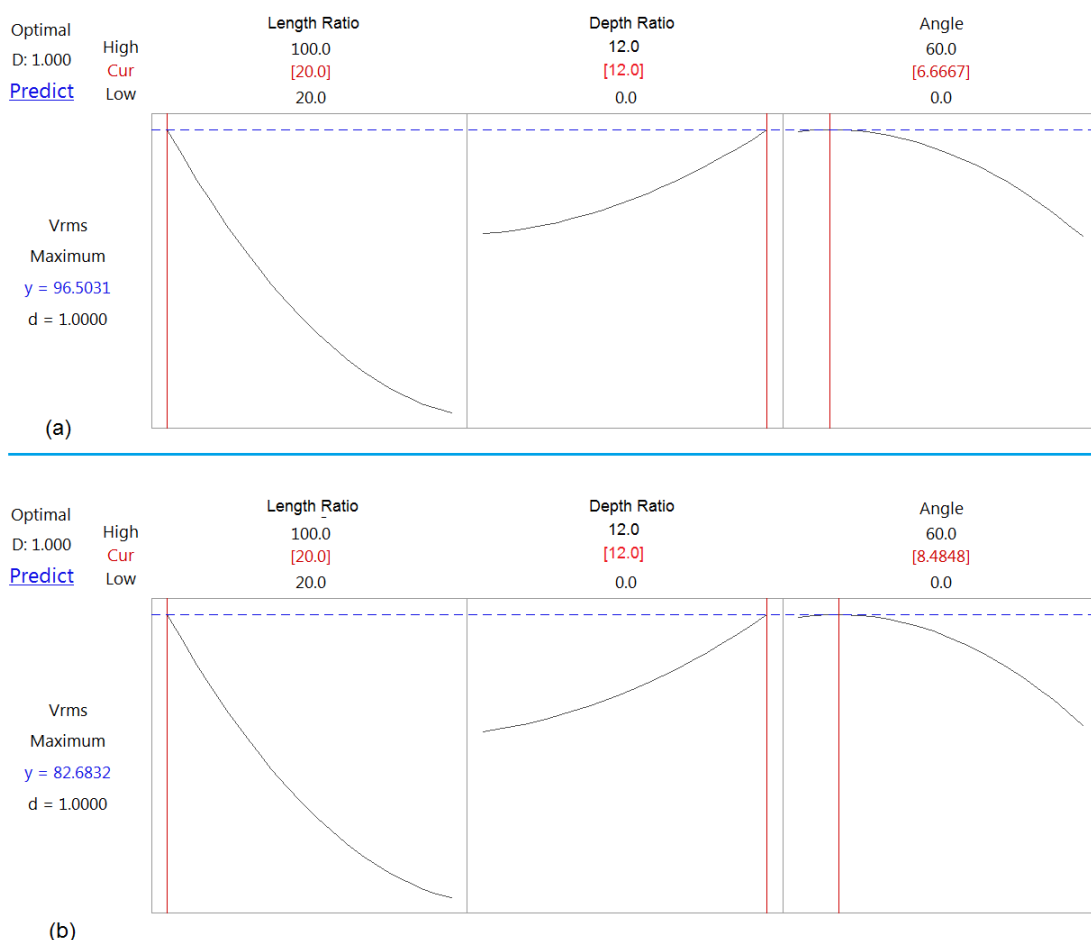
شکل ۴. نمودارهای کانتوری تغییرات ولتاژ مؤثر نسبت به پارامترهای طراحی زاویه تمایل، طول تیر، و عمق فرورفتگی (a, b, c) مربوط به تیر بدون باله و (d, e, f) مربوط به تیر با باله.

Fig. 4. Contour diagrams of effective voltage changes in relation to the design parameters of tilt angle, distance ratio, and depth ratio related to the finless cantilever (a, b, c) and related to the finned cantilever (d, e, f)



شکل ۵. نمودارهای رویه‌های پاسخ ولتاژ مؤثر برای حالت بدون باله (a تا c) و حالت با باله (d تا f)

Fig. 5. response surfaces of effective voltage changes related to the finless cantilever energy harvester (a, b, c) and to the finned cantilever energy harvester (d, e, f)



شکل ۶. نمودارهای نتایج بهینه سازی برای حالت بدون باله (a) و حالت با باله (b).

Fig. 6. Optimization of input parameters for the finless cantilever (a) and finned cantilever energy harvester (b)

حالت بدون باله است. مقدار تابع مطلوبیت در هر دو بهینه‌سازی برابر با ۱ است که بیشترین مقدار این پارامتر، کیفی بوده و نشان از صحت بهینه‌سازی دارد.

با افزایش میزان فرورفتگی تیر در داخل آب و نیز افزوده‌شدن باله به انتهای تیر، سطح در تماس تیر با آب (سطح خیس‌شده) و نیز مساحت در مقابل جریان افزایش می‌یابند. این دو پارامتر به‌صورت نیروی پسای وارده به تیر از طرف امواج آب ظاهر می‌شوند و با افزایش نیروی وارده میزان تعامل سازه با سیال و خمیدگی تیر تشدید می‌شوند. این روند زمانی که تیر با زاویه مخالف صفر در داخل آب وارد می‌شود، مهم‌تر است. از این رو میزان تورفتگی تیر در حالتی که زاویه فرورفتگی مخالف صفر باشد، دارای اهمیت

گزارش شده در جدول ۴ تمامی پارامترهای ورودی با هم برهم‌کنش دارند. بهینه‌سازی پارامترهای طراحی و تنظیمی با هدف بیشینه‌کردن ولتاژ مؤثر و به‌وسیله روش متدولوژی سطح پاسخ، برای هر دو حالت باله‌دار و بدون باله، صورت گرفت و نتایج بهینه‌سازی در قالب نمودارهای شکل ۶ گزارش شدند. همان‌طور که مشهود است در شرایط بهینه برای هر دو حالت برداشت‌کننده باله‌دار و بدون باله، نسبت فاصله تیر از موج‌ساز برابر با ۲۰ درصد و نسبت عمق ۱۲ درصد است. از طرفی، زاویه تمایل بهینه در حالت بدون باله برابر با ۶/۷ درجه و در حالت باله‌دار برابر با ۸/۵ درجه است. مقدار بیشینه ولتاژ مؤثر در حالت بدون باله برابر با ۹۶/۵ میلی‌ولت و در حالت باله‌دار برابر با ۸۲/۶ میلی‌ولت است که در حدود ۱۴/۵ درصد کمتر از ولتاژ بیشینه

۸ درجه باشد. از طرفی ولتاژ بیشینه تیر باله‌دار به میزان ۱۶/۵ درصد کمتر از تیر بدون باله است. به کاربردن باله، رفتار برداشت‌کننده انرژی را تغییر نداده است. آنالیز واریانس نشان‌دهنده دقت بالای مدل تجربی بوده و تمامی پارامترهای طراحی ورودی، اثرات غیرخطی روی خروجی داشته و برهمکنش این پارامترها نیز در خروجی مشاهده می‌شوند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از بنیاد علم ایرانیان بابت اعطای گرنت با شماره ۹۸۰۱۷۶۰۶ به پژوهش حاضر تشکر می‌نمایند.

منابع

- [1] J. Ghazanfarian, M.M. Mohammadi, K. Uchino, Piezoelectric Energy Harvesting: A Systematic Review of Reviews, *Actuators*, MDPI, 10(12) (2021) 312.
- [2] A. Naqvi, A. Ali, W.A. Altabay, S.A. Kouritem, Energy Harvesting from Fluid Flow Using Piezoelectric Materials: A Review, *Energies*, 15(19) (2022) 7424.
- [3] P. Karami, A. Ariaei, K. Hasanpour, Optimum network configuration design of a multi-beam vortex-induced vibration piezoelectric energy harvester, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 177 (2022) 109186.
- [4] X. Du, Y. Wang, H. Chen, C. Li, Y. Han, D. Yurchenko, J. Wang, H. Yu, Vortex-induced piezoelectric cantilever beam vibration for ocean wave energy harvesting via airflow from the orifice of oscillation water column chamber, *Nano Energy*, 104 (2022) 107870.
- [5] X. Li, D. Zhang, D. Zhang, Z. Li, H. Wu, Y. Zhou, B. Wang, H. Guo, Y. Peng, Solid-Liquid Triboelectric Nanogenerator Based on Vortex-Induced Resonance, *Nanomaterials*, 13(6) (2023) 1036.
- [6] Y. Belkourchia, H. Bakhti, L. Azrar, Optimization approach for piezoelectric energy harvesting from ocean waves and beams, in: 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), IEEE, 2019, pp. 1-5.
- [7] W.S. Hwang, J.H. Ahn, S.Y. Jeong, H.J. Jung, S.K. Hong, J.Y. Choi, J.Y. Cho, J.H. Kim, T.H. Sung, Design of piezoelectric ocean-wave energy harvester using sway
- بیشتری است. زاویه برخورد امواج در سطح آزاد به سطح تیر یکی از عوامل مهم در تعیین میزان ولتاژ مؤثر خروجی سیستم است. یکی از پارامترهایی که در تعیین زاویه اصابت امواج به تیر مهم است زاویه فرورفتگی تیر در داخل آب است. پارامترهای دیگر، فاصله تیر از موج‌ساز و همچنین قدرت موج تولیدشده است. میزان استهلاک دامنه موج که به طور مستقیم با فاصله طی شده توسط موج رابطه دارد و نیز قدرت اولیه موج تولیدشده توسط موج‌ساز، باعث ایجاد تغییر در زاویه برخورد موج با سطح بیرونی تیر پیژو خواهد شد. از طرف دیگر با توجه به طبیعت وابسته به زمان نیروی وارده از طرف امواج به تیر، جرم مجازی یا جرم افزوده نیز دارای اهمیت است. جرم افزوده تابعی از شکل هندسی تیر است که با افزودن باله دچار تغییر می‌شود. نیروی پسای وارده به تیر از نتایج لزج بودن جریان است و پدیده جرم افزوده یک پدیده مستقل از لزج سیال است. با افزودن باله به تیر، حجم بزرگ‌تری از سیال پشت تیر باید همراه با حرکت شتاب‌دار تیر، جابه‌جا شود. با توجه به چگالی بالای آب و شکل غیرآیرودینامیک تیر، ضریب جرم افزوده دارای اهمیت است. از این رو با تغییر شکل تیر به کمک افزودن باله، دو روند خلاف هم ناشی از افزایش هم‌زمان نیروی پسا و ضریب جرم افزوده روی ولتاژ مؤثر خروجی مشاهده می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از روش مرکب مرکزی و متدولوژی سطح پاسخ برای مطالعه اثرات پارامترهای طراحی و تنظیمی برداشت‌کننده انرژی پیژوالکتریک از امواج آب استفاده شد. با استفاده از این روش سیستماتیک، اولاً مدل تجربی حاکم بر مسئله برای دو نوع برداشت‌کننده انرژی باله‌دار و بدون باله استخراج شد و در ادامه، میزان تأثیرات متغیرهای ورودی روی ولتاژ مؤثر مورد بررسی قرار گرفت.

آنالیز واریانس انجام شده، نشان می‌دهد هر سه متغیر ورودی زاویه تمایل، نسبت فاصله و نسبت عمقی فرورفتگی به صورت غیرخطی روی خروجی مسئله اثر گذارند و از طرفی، هر سه پارامتر ذکر شده با هم برهم‌کنش دارند. در این میان، اثر نسبت فاصله نسبت به دو متغیر دیگر روی ولتاژ مؤثر بیشتر است. اتصال باله، رفتار کلی برداشت‌کننده انرژی را تغییر نداده است؛ ولی در مجموع به میزان ۱۴/۵ درصد خروجی بیشینه برداشت‌کننده را کاهش داده است. در هر دو حالت برداشت‌کننده بدون باله و با باله، بیشترین ولتاژ مؤثر زمانی بدست می‌آید که نسبت عمق فرورفتگی بیشترین حد و نسبت فاصله طولی از موج‌ساز در کمترین حد خود و مقدار زاویه تمایل بین ۶ و

- harvester physical parameter optimization, simulation, and fabrication for extremely low frequency and low vibration level applications, *Microelectronics Journal*, 104 (2020) 104894.
- [11] N. Alsaadi, M.A. Sheeraz, Design and optimization of bimorph energy harvester based on Taguchi and ANOVA approaches, *Alexandria Engineering Journal*, 59(1) (2020) 117-127.
- [12] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, John Wiley & sons, 2017.
- movement, *Sensors and Actuators A: Physical*, 260 (2017) 191-197.
- [8] S. Kazemi, M. Nili-Ahmadabadi, M.R. Tavakoli, R. Tikani, Energy harvesting from longitudinal and transverse motions of sea waves particles using a new waterproof piezoelectric waves energy harvester, *Renewable Energy*, 179 (2021) 528-536.
- [9] X. Xie, Q. Wang, A study on an ocean wave energy harvester made of a composite piezoelectric buoy structure, *Composite Structures*, 178 (2017) 447-454.
- [10] M.H. Alrashdan, MEMS piezoelectric micro power

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. R. Adabzadeh, M. M. Mohammadi, J. Ghazanfarian, *Energy harnessing from water waves using a piezoelectric energy harvester with and without ore-like tip: an experimental study*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(10) (2024) 1195-1206.

DOI: 10.22060/mej.2023.22347.7604



