

## مدل سازی تحلیلی فرش مصنوعی دریایی انعطاف پذیر جاذب انرژی امواج دریا در شرایط خلیج فارس

عارف حسین معلمی<sup>۱</sup>، محمد جواد کتابداری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی دریا، تهران rfmoalemi@aut.ac.ir

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی دریا، تهران ketabdar@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۴

تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۲۸

### چکیده

تاکنون روش‌های مختلفی برای استخراج انرژی امواج، ابداع شده که اکثر این روش‌ها بازده مناسبی در آب‌های کم عمق و موج‌های کم ارتفاع ندارند. گل ولای بستر دریا قابلیت جذب بخش درخور توجهی از انرژی موج عبوری را در طول موج‌های مختلف دارد. با الهام گیری از این ویژگی طبیعی می‌توان ایده یک مبدل جدید انرژی امواج را با قابلیت کار با راندمان بالا در آب‌های کم عمق مطرح کرد. اگر در نزدیکی سواحل، کف دریا به وسیله مبدلی پوشانده شود، می‌توان بخش شایان توجهی از انرژی موج عبوری را جذب کرد. این مبدل با توجه به جزء اصلی سازنده‌اش که صفحه‌ای ویسکوالاستیک و انعطاف پذیر و فرش مانند است، فرش مبدل انرژی امواج (CWEC) نامیده می‌شود. در این مقاله با استفاده از مدل سازی تحلیلی، قابلیت این فرش در جذب انرژی امواج در شرایط مختلف دریایی بررسی شده و به مقایسه این مبدل با دیگر مبدل‌های انرژی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که به دلیل بازدهی فراوان این فرش در آب‌های کم عمق با دامنه موج کم و مکانیزم عملکردی کاملاً مغروق آن و ایجاد نکردن هرگونه خطر برای حیات زیر آب، می‌توان آن را به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای استفاده در خلیج فارس مطرح کرد. سپس ایده جدید استفاده از المان‌های پیروالکتتریک در دستگاه CWEC جهت افزایش بازدهی آن، طرح و بررسی شد. نتایج نشان داد که ترکیب پیروالکتتریک به CWEC می‌تواند بازده این دستگاه مبدل انرژی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد.

**واژه‌های کلیدی:** آب کم عمق، انرژی‌های نو، راندمان، فرش دریایی انعطاف پذیر مبدل انرژی امواج، مدل تحلیلی.

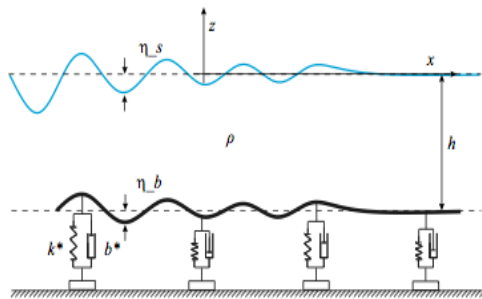
### ۱. مقدمه

القا کند، می‌توان بخش قابل توجهی از انرژی امواج عبوری را جذب کرد. به همین منظور باید مبدلی را متشکل از یک صفحه انعطاف پذیر ویسکوالاستیک و مجموعه‌ای از فنرها و ژنراتورها که به صفحه انعطاف پذیر متصل هستند، تشکیل داد که به اختصار فرش دریایی انعطاف پذیر یا CWEC<sup>۱</sup> نامیده می‌شود (شکل ۲). CWEC به صورت کاملاً مغروق عمل می‌کند؛ بنابراین هیچ خطری را متوجه شناورهای عبوری و حیات زیر آب نمی‌سازد. علاوه بر این به دلیل قابلیت این فرش در میراسازی امواج سطحی عبوری، می‌توان از آن برای ایجاد منطقه‌ای امن در دریاها و لنگرگاه‌ها و همچنین به عنوان یک سیستم

خلیج مکزیک به دلیل داشتن بستری با گودال‌های وسیع مکان مناسبی برای انباشته شدن گل ولای موجود در آب است. در محل قرارگیری این گودال‌ها واکنش متقابل بین امواج سطحی و گل ولای بستر دریا بسیار قوی است؛ به طوری که در مواقعی حتی باعث میرایی کامل امواج قدرتمند عبوری با طول موج کم می‌شود (شکل ۱). به همین دلیل زمانی که دریا طوفانی است ماهی گیران شناورهای خود به این مناطق منتقل می‌کنند [۱]. با ایده گیری از این ویژگی طبیعی اگر کف دریا به وسیله سیستمی پوشانده شود که بتواند خاصیت ویسکوالاستیک گل ولای کف دریا را



شکل ۱. تفاوت دامنه امواج در قسمتی از دریا که جنس بستر از نوع گل ولایی است (ناحیه تیره) با دیگر نواحی در خلیج مکزیک



شکل ۲. شماتیکی از فرش ویسکوالاستیک مصنوعی در بستر دریا

## ۲. معادلات حاکم

در اینجا برای سیال در سطح آزاد و بالای فرش انعطاف پذیر مشخصات غیر چرخشی، همگن و تراکم ناپذیر فرض گردیده است. فرش در عمق  $z = -h$  بررسی شده است. با این فرضیات و با صرف نظر از کشش سطحی، معادلات خطی سازی شده حاکم مطابق زیر هستند:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

$$\eta_{s,t} + \eta_{s,x} \phi_x = \phi_z, \quad z = \eta_s \quad (2)$$

جلوگیری کننده از فرسایش ناشی از امواج استفاده کرد. از الکتریسیته تولیدی توسط این مبدل می توان برای تصفیه و شیرین سازی آب دریا و همچنین برای تأمین الکتریسیته مورد نیاز پمپ ها در نیروگاه های برق آبی، که یکی از پر بازده ترین راه ها برای ایجاد تعادل در شبکه الکتریکی است، استفاده کرد. معادلات حاکم بر این سیستم شامل معادلات کوپل و معادلات غیرخطی است که این معادلات خود شامل معادله دینامیک امواج گرانشی و معادلات بسستر ویسکوالاستیک کف دریا هستند. فرم خطی شده این معادلات، مد سطح و کف دریا را ارضا می نماید. میرایی امواج در مد سطحی به ازای طول موج های بلندتر بیشتر است (دیدگاه کلاسیک)؛ در حالی که این رویه برای مد بسستر برعکس است و به ازای طول موج های کوتاه میرایی بیشتر است. علاوه بر این محاسبات مربوط به اثر متقابل غیرخطی امواج سطحی و فرش نشان می دهد که جذب انرژی موج عبوری توسط فرش، با افزایش شیب موج سطحی، افزایش می یابد [۲]؛ بنابراین ایده موجود در آب کم عمق پر بازده تر است ولی تأثیرات غیرخطی با کاهش عمق آب افزایش می یابد؛ بنابراین در اینجا ابتدا فرمول هایی برای در نظر گرفتن این مسئله به ازای طول موج های بلند در آب کم عمق اضافه گردیده است، سپس معادلات حاکم از درجه دوم به صورت کامل تشریح شده اند. در قسمت بعد در رابطه با بازدهی مدل در شرایط دریایی مختلف بحث شده و بازده زیاد این مبدل اثبات گردیده است. سپس با اعمال شرایط خلیج فارس میزان انرژی جذبی این مبدل در خلیج فارس بررسی شده و در بخش انتهایی به مقایسه کارایی این مبدل با دیگر مبدل های انرژی امواج رایج پرداخته شده است.

$$\begin{aligned} \overline{E_p} &= \int_0^T F_p \cdot v_p dt \quad (12) \\ &= \int_0^T b\omega^2 a_b^2 \cos^2(\omega t) dt = \frac{2\pi^2 b a_b^2}{T} \end{aligned}$$

که در آن  $v_p = \omega a_b \cos(\omega t)$

میرایی پمپ است.  $F_p = b\omega a_b \cos(\omega t)$  ، دامنه کف و  $b$  ضریب

انرژی ذخیره شده در فرش در واحد سطح برای حالتی که از میرایی صرف نظر شود، از دو قسمت انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی تشکیل شده است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$E_{tot} = E_{kin} + E_{pot} = \frac{1}{2} \rho g a_s^2 D \quad (13)$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \rho g a_s^2 \left\{ \frac{\sinh 2kh}{2} \left( \frac{\omega^2}{gk} + \frac{gk}{\omega^2} \right) - 2 \sinh^2(kh) \right\} \quad (14)$$

$$E_{pot} = \frac{1}{2} \rho g (a_s^2 - a_b^2) + \frac{k^* a_b^2}{4} \quad (15)$$

در رابطه ۱۳،  $D$  یک ثابت بی بعد است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$D = \frac{\sinh 2kh}{2} \left( \frac{\omega^2}{gk} + \frac{gk}{\omega^2} \right) - 2 \sinh^2(kh) + \frac{a_s^2 - a_b^2}{a_s^2} + \frac{k^* a_b^2}{2\rho g a_s^2} \quad (16)$$

به این ترتیب انرژی کل برابر است با:

$$E_{tot} = \frac{1}{2} \rho g a_s^2 \left\{ \frac{\sinh 2kh}{2} \left( \frac{\omega^2}{gk} + \frac{gk}{\omega^2} \right) - 2 \sinh^2(kh) + \rho g (a_s^2 - a_b^2) + k^* a_b^2 \right\} \quad (17)$$

علاوه بر این رابطه پراکنده گی<sup>۲</sup> در فرم بی بعد مطابق زیر است:

$$\begin{aligned} \gamma \Omega^4 \tanh(\mu) + i\mu\gamma\zeta\Omega^3 - \mu\Omega^2 \\ - i\mu^2\gamma\zeta\Omega \tanh(\mu) \\ + \mu^2(1-\gamma)\tanh(\mu) \\ = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\phi_t + \frac{1}{2}(\phi_x^2 + \phi_z^2) + g\eta_s = 0, \quad z = \eta_s \quad (3)$$

$$\eta_{b,t} + \eta_{b,x}\phi_x = \phi_z, \quad z = -h + \eta_b \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \phi_t + \frac{1}{2}(\phi_x^2 + \phi_z^2) + g\eta_b + \frac{P_b}{\rho} = 0, \quad z \\ = -h + \eta_b \end{aligned} \quad (5)$$

$$b^*\eta_{b,t} + k^*\eta_b + P_b = 0, \quad z = -h + \eta_b \quad (6)$$

در اینجا  $g$  شتاب گرانشی زمین،  $\rho$  چگالی سیال،  $P_b$  فشار در بستر دریا یا  $b^*$  ضریب لزجت میرایی و  $k^*$  ضریب سختی کف ویسکوالاستیک در واحد سطح و  $\eta_{b,t}$  و  $\eta_{s,t}$  به ترتیب تغییرات دامنه در سطح و کف است. از فرم خطی شده معادلات حاکم معادله امواج سطحی و موج عمقی ایجاد شده در فرش (شکل ۲) و تابع پتانسیل به صورت زیر به دست می آید:

$$\eta_s = a_s e^{i(kx - \omega t)} \quad (7)$$

$$\eta_b = a_b e^{i(kx - \omega t)} \quad (8)$$

$$\phi = (A e^{kz} + B e^{-kz}) e^{i(kx - \omega t)} \quad (9)$$

که در اینجا:

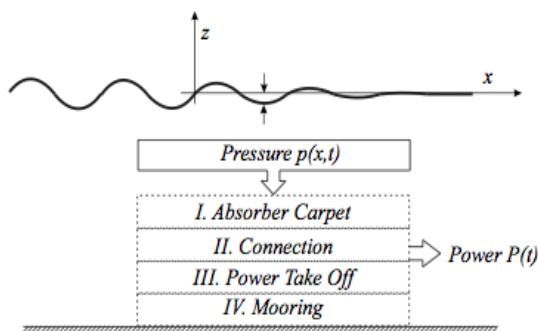
$$a_b = a_s \cosh kh \left( 1 - \frac{gh \tanh kh}{\omega^2} \right) \quad (10)$$

$$A = -i a_s \frac{\omega^2 + gk}{2k\omega}, B = i a_s \frac{\omega^2 - gk}{2k\omega} \quad (11)$$

$a_b$  و  $a_s$  به ترتیب دامنه موج سطح و کف هستند. میانگین انرژی ذخیره شده در هر پیستون در یک پرئود موج برابر است با:

استخراج انرژی، مدل شده است. فاصله بین هر ماژول فنر میراگر خیلی کوچک تر از طول موج های معمول عبوری فرض می شود. با این فرض پیوستگی فنریت و میرایی معتبر است. طراحی سیستم این مبدل انرژی شامل چهار مؤلفه اصلی، فرش جاذب انرژی، اتصالات، سیستم انتقال قدرت<sup>۴</sup> (PTO) و مهارکننده هاست.

فرش جاذب انرژی موج عبوری را جذب و آن را به اتصالات منتقل می کند. اتصالات انرژی دریافتی را به واحد هیدرولیک PTO منتقل می کند و در آنجا این واحد انرژی جنبشی موج عبوری را به انرژی مکانیکی قابل استفاده تبدیل می کند. در نهایت مهارکننده ها وظیفه اتصال سیستم PTO را به بستر دریا بر عهده دارند. با این مشخصات، چهار مؤلفه اصلی ذکر شده به شکل زیر در کنار یکدیگر عمل می کنند (شکل ۳) و ویژگی های هر کدام به شرح زیر است [۳]:



شکل ۳. مؤلفه های اصلی تشکیل دهنده مبدل، فرش جاذب انرژی

۱. فرش جاذب انرژی: در اینجا برای اینکه فرش پیوستگی خود را حفظ کند، لازم است به صورت همگن ساخته شود. فرش باید در امتداد محور x رفتار الاستیک داشته باشد، به همین منظور مدول یانگ<sup>۵</sup> ماده سازنده فرش باید پایین باشد تا به فرش اجازه تغییر طول نسبت به طول اولیه اش را بدهد. مدول یانگ پایین تنها به وسیله پیوستگی در مواد سازنده فرش به دست می آید و در اینجا به منظور برقراری پیوستگی، صفحه انعطاف پذیر از جنس پلاستیک طبیعی با ضخامت 6.35 mm و با مدول یانگ

که در آن  $\Omega = \omega\sqrt{h/g}$  فرکانس بی بعد،  $\zeta = \frac{b^*}{\rho\sqrt{hg}}$  میرایی بی بعد،  $\gamma = \frac{\rho g}{k^*}$  نیروی بازگرداننده بی بعد و  $\mu = kh$  ضریب کم عمقی<sup>۳</sup> است. با حل رابطه ۱۶ در شرایطی که میرایی برای سیستم در نظر گرفته شده است، می توان قسمت موهومی  $\Omega = \Omega_r + i\Omega_i$  را به دست آورد و سپس ثابت بی بعد  $D$  را به فرم  $D_d$  تعریف کرد:

$$D_d = \frac{1}{2} \left( \frac{\sinh(2\mu)}{2} \left( \frac{\Omega_r^2}{\mu} + \frac{\mu}{\Omega_r^2} \right) - 2\sinh(\mu)^2 \right) + \frac{1-\alpha}{\alpha} + \frac{2\alpha}{\gamma} \quad (19)$$

در رابطه بالا  $\Omega_r$  قسمت حقیقی بی بعد  $\Omega$  و  $\alpha = \frac{a_s^2}{a_b^2} = \cosh^2 \left( 1 - \frac{\mu \tanh \mu}{\Omega^2} \right)$  نسبت مجذور دامنه موج سطح به موج کف است. با بی بعد سازی انرژی به فرم زیر:

$$\epsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{1}{2} e^{2\Omega_i \tau} D_d \quad (20)$$

که  $E_0 = 1/2\rho g a_s^2$  و  $\tau = t\sqrt{g/h}$  در نهایت می توان انرژی ذخیره شده در فرش را برای یک پریود زمانی به فرم زیر تعریف کرد:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho g a_s^2 \epsilon A_c \quad (21)$$

که  $A_c$  نماینده سطح فرش است.

### ۳. تحلیل اجزای سیستم

این فرش به منظور استخراج انرژی امواج گرانشی سطحی به کار می رود. در این سیستم مجموعه ای از فنرها که دارای ضرایب سختی  $k^*$  هستند، به صورت خطی ترکیب شده اند. در واقع نقش این فنرها فراهم آوردن نیروی بازگرداننده برای فرش است. در اینجا ژنراتور به وسیله میراسازهای از نوع dashpot با ضریب میرایی  $b^*$  به منظور

$$P_{wave} = \frac{1}{2} \rho g C_g a_{in}^2 W \quad (24)$$

که در آن  $W$  عرض فرش،  $a_{in}$  دامنه موج سطحی در آستانه ورود به حجم کنترل بالای فرش،  $g$  شتاب گرانشی زمین و  $\rho$  چگالی آب است. سرعت جمعی موج، با پارامتر  $C_g$  نشان داده می شود و برابر است با:

$$C_g = \frac{g \tanh(kh) - gkh(\tanh^2(kh) - 1)}{2\sqrt{gk \tanh(kh)}} \quad (25)$$

با استفاده از معادلات ۲۱ و ۲۲ بازدهی میانگین کلی انرژی را می توان به فرم زیر محاسبه کرد:

$$\eta_{total} = \frac{4\dot{V}h_p \sqrt{gk \tanh(kh)}}{gW a_{in}^2 (\tanh(kh) - kh(\tanh^2(kh) - 1))} \quad (26)$$

در نهایت می توان بازدهی کلی سیستم را به توانایی آن در تبدیل انرژی موج سطحی عبوری به انرژی هیدرولیکی قابل استفاده مربوط دانست. علاوه بر این راندمان جذب، به قابلیت مبدل در جذب انرژی موج و میراسازی آن اشاره دارد که برابر است با:

$$\eta_{ABS} = \frac{E_{in} - E_{out}}{E_{in}} = \frac{a_{in}^2 - a_{out}^2}{a_{in}^2} \quad (27)$$

در اینجا به منظور محاسبه راندمان، پارامترهای مؤثر در ویژگی های یک موج را می توان به صورت ضرایب بی بعد کم عمقی  $^6 (kh)$ ، تیزی  $^7 (ka)$  و دامنه  $(a/h)$  خلاصه کرد. برای برقراری خطی بودن مسئله، مقادیر ضرایب  $kh$  و  $a/h$  باید کمتر از  $0.3$  باشند. محاسبه راندمان دستگاه به ازای امواج مختلف به متغیرهای  $b^*$  و  $k^*$  وابستگی زیادی دارد. برای نشان دادن این موضوع دو فرش  $(b1, b2)$  از جنس فایبرگلاس با ضرایب سختی و میرایی متفاوت استفاده شده است. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده، ضریب

به عنوان فرش جاذب انرژی فرض شده است. میزان انرژی تبدیل شده، با جابه جایی فرش در محل قرارگیری پیستون ها در واحد PTO رابطه مستقیم دارد ولی در کل هیچ انرژی ای در این قسمت تبدیل نمی شود. ۲. اتصالات: میله هایی هستند که به منظور اتصال مستقیم فرش به PTO استفاده می شوند؛ در اینجا این میلهها از جنس آلومینیوم انتخاب شده اند.

۳. سیستم انتقال قدرت (PTO): واحد PTO برای ایفای دو وظیفه مستقل در سیستم قرار داده شده است: ۱. میراسازی حرکت فرش جاذب انرژی؛ و ۲. ایجاد نیروی بازگرداننده در جهت عمودی برای پیستون ها به منظور مقابله با جابه جایی مثبت ایجاد شده در پمپ ها.

۴. مهارکننده ها: مهارکننده ها وظیفه اتصال واحد PTO را به بستر دریا دارند. در عین حال، آن ها باید اجازه چرخش را به PTO در جهت محور  $y$  بدهند. علت این موضوع را می توان به این صورت تفسیر کرد که با حرکت موج سطحی که سبب تغییر شکل فرش می شود، قسمت بالایی پیستون و اتصالات در جهت محور  $x$  ها و  $z$  ها جابه جا می شود. به همین علت PTO باید بتواند در جهت محور  $y$  چرخش کند.

#### ۴. بررسی راندمان جذبی سیستم و بازدهی واحد PTO

راندمان کلی سیستم را می توان به فرم زیر تعریف کرد:

$$\eta_{total} = \frac{P_{PTO}}{P_{wave}} \quad (28)$$

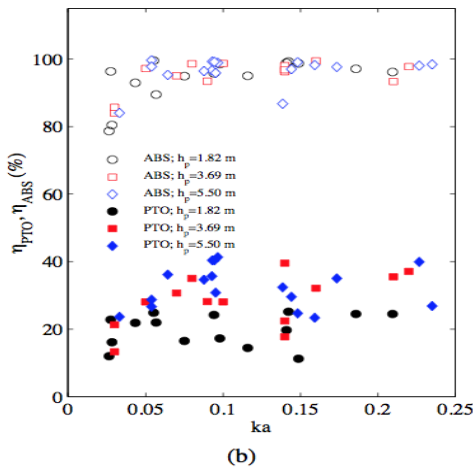
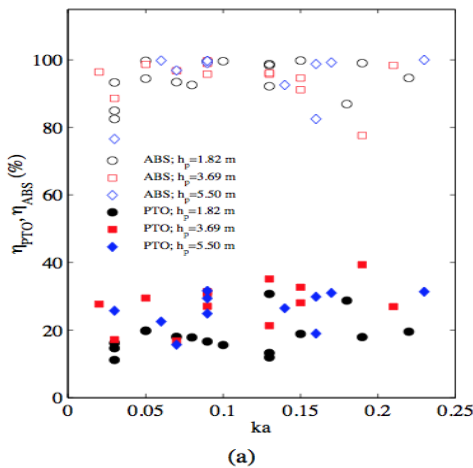
که در آن:

$$P_{PTO} = P_{pot} + P_{kin} = \rho \dot{V} g h_p + \frac{1}{2} \rho \dot{V} v_{free}^2 \quad (29)$$

قدرت امواج وارد شده به حجم کنترل مفروض به منظور محاسبه راندمان سیستم مطابق زیر محاسبه می شود:

عمق بیشتر نیاز دارند، مناسب نیست و نمی توان بازدهی قابل قبولی را از آن ها انتظار داشت. در خلیج به مبدلی نیاز است که مکانیزم کاملاً مغروق داشته باشد و بتواند در عمق و ارتفاع موج کم، بازده خوبی داشته باشد. با توجه به موارد مطرح شده می توان سیستم CWEC را گزینه ای مناسب در محدوده خلیج فارس مطرح کرد.

با استفاده از معادله ۲۱ با فرض امواجی با ارتفاع بین ۰ تا ۲ متر و دوره تناوب ۴ ثانیه، برای محدوده ۱۰ کیلومتری سواحل ایران در خلیج فارس و اطراف جزیره قشم و تنگه هرمز می توان انرژی ذخیره شده در فرش را در این منطقه در هر متر محاسبه کرد. با توجه به شکل ۷ حداکثر انرژی ذخیره شده در فرش برای ارتفاع موج ۱/۶ متر در حدود ۳۰ کیلووات بر متر مربع است.



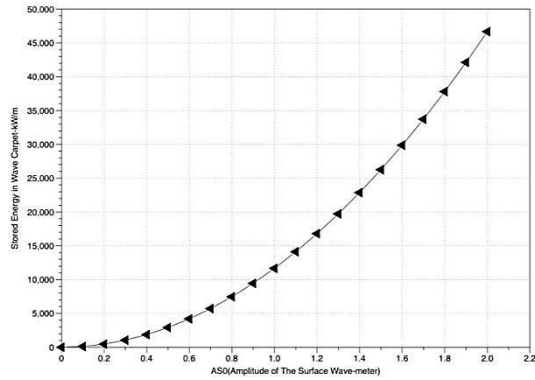
شکل ۴. مقادیر اندازه گیری شده راندمان جذب و PTO برای سه ارتفاع مختلف پمپ ( $h_p$ ) به ازای مقادیر مختلف تیزی  $ka$ . شکل a. فرش b1، شکل b. فرش b2

میراساز  $b^*$  در هد پمپ  $h_p = 5.5$  m، در مقایسه با هدهای  $h_p = 1.82$  m و  $h_p = 3.69$  m عملکرد بهتری دارد و بیشترین بازدهی PTO در  $b_2$  برای  $h_p = 5.5$  m اتفاق می افتد که برابر با 42.3 درصد است. علاوه بر این از شکل ۴ می توان نتیجه گرفت که برای مقادیر کم  $b^*$ ، بازدهی هر دو دستگاه  $b_1$  و  $b_2$  با توجه به تفاوت سختی ( $k^*$ ) آن ها در یک حدود است. ولی برای مقادیر زیاد  $b^*$ ، بازدهی بیشتر به ازای ضریب سختی ( $k^*$ ) بیشتر به دست می آید؛ بنابراین برای بیشترین ضریب میرایی  $b^*$  در  $(h_5)$ ، بازدهی بیشتر به ازای ضریب سختی بیشتر در  $b_2$  به دست می آید. برخلاف راندمان PTO، با تغییر  $kh$  هیچ رابطه خاصی بین راندمان جذب و پارامترهای  $b^*$  و  $k^*$  برقرار نمی شود و راندمان جذب در محدوده ۸۵ درصد تا ۹۹ درصد است که در اینجا بیشترین مقدار آن ۹۹/۶ درصد در  $h_p = 5.5$  m است [۴].

در شکل ۵ رابطه بین راندمان جذب ( $\eta_{ABS}$ ) و راندمان PTO ( $\eta_{PTO}$ ) به ازای مقادیر مختلف تیزی موج ( $ka$ ) و ارتفاع موج ( $a/h$ ) نشان داده شده است. مطابق نمودار برای افزایش ضریب میرایی، شیب موج تأثیر بیشتری بر بازدهی سیستم دارد. مانند قسمت قبل با تغییر شیب موج، رابطه دقیقی بین راندمان جذبی و پارامترهای  $b^*$  و  $k^*$  برقرار نمی شود [۴].

#### ۵. بررسی شرایط خلیج فارس برای استفاده از CWEC

انرژی ذخیره شده در موج با ارتفاع موج رابطه مستقیم دارد. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، ارتفاع امواج در نزدیکی سواحل ایران بیشتر از دیگر نقاط است. از غرب خلیج فارس تا جزیره قشم و به طور ویژه تنگه هرمز ارتفاع موج صدساله در محدوده ۵ کیلومتری سواحل ایران برابر ۴/۵ تا ۵ متر است؛ از این رو مکان مناسبی برای احداث مبدل های انرژی فراهم آمده است [۵]. اما در این ناحیه ترافیک دریایی زیاد است و در عمل، به کارگیری مبدل های سطحی در محدوده وسیع امکان پذیر نیست. علاوه بر این در محدوده ۱۰ کیلومتری سواحل این مناطق، میانگین عمق آب بیشتر از ۱۰ متر نیست؛ از این رو می توان گفت اکثر مناطق این محدوده برای نصب مبدل هایی که به ارتفاع موج زیاد یا



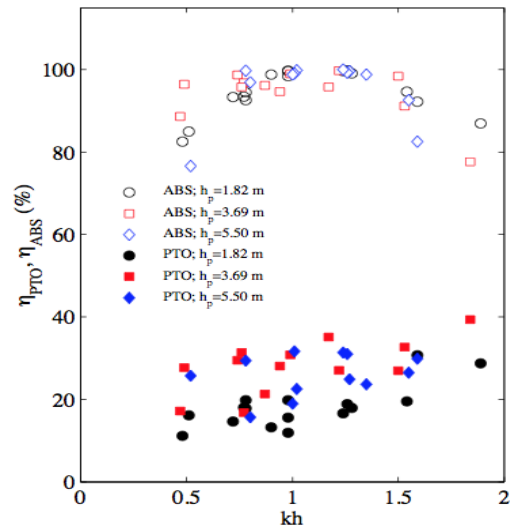
شکل ۷. انرژی ذخیره شده در فرش بر حسب کیلووات بر مترمربع برای محدوده دامنه امواج خلیج فارس

### ۶. مزایای CWEC

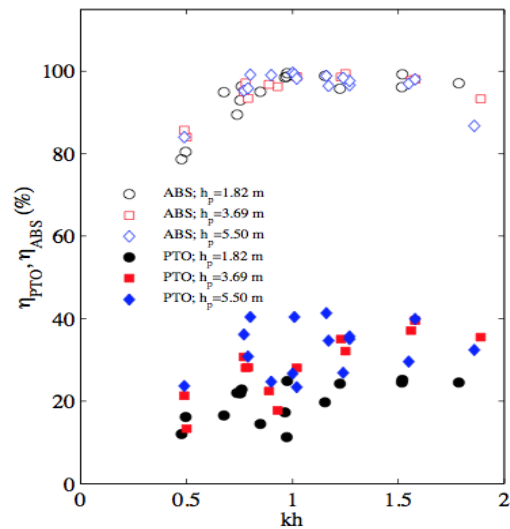
فرش مبدل انرژی امواج اساساً در آب کم عمق پر بازده تر است و با توجه به مشخصات فیزیکی اجزای سازنده فرش و شرایط محیطی، توانایی جذب انرژی موج را تا راندمان ۹۹ درصد دارد. این فرش قابلیت جذب چند جهته انرژی امواج عبوری را نیز دارد. فرش به صورت کاملاً مغروق عمل می کند، از این رو خطری برای شناورهای عبوری و حیات ایجاد نمی کند. کاربرد چند منظوره فرش برای ایجاد منطقه ای امن در دریاها، برای شناورها و ماهیگیران و همچنین میراسازی امواج در اطراف لنگرگاه ها و سکوها از دیگر مزایای CWEC است.

### ۷. مقایسه CWEC با دیگر مبدل های رایج

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه جاذب های انرژی امواج صورت گرفته است. از میان آنها تعدادی از قبیل سیستم Wave Gen، Wave Dragon، Pelamis، Oceanlinx به مرحله تجاری سازی رسیده اند [۶]. این دستگاه ها به ترتیب از تکنولوژی پلامیس، جاذب سرریزی، ستون نوسانگر و ستون نوسانگر استفاده می کنند. سیستم پلامیس از مجموعه ای از استوانه ها تشکیل شده است که هریک از آنها به صورت مفصلی به یکدیگر متصل شده اند. در دریا به علت برخورد امواج نامنظم، بدنه در درجات آزادی از پیش تعیین شده حول مفصل ها حرکت کرده و این حرکت به کمک

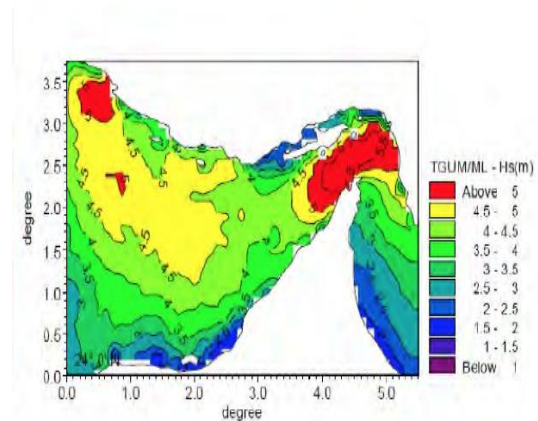


(a)



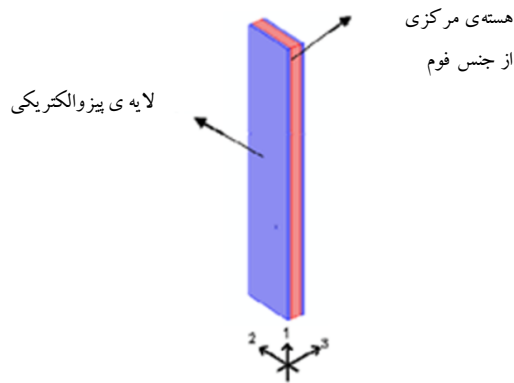
(b)

شکل ۵. مقادیر اندازه گیری شده راندمان جذب و PTO برای سه ارتفاع مختلف پمپ ( $h_p$ ) بر حسب  $kh$ . شکل a فرش b1، شکل b2 فرش b2



شکل ۶. حداکثر ارتفاع موج در خلیج فارس برای دوره صدساله [۵]

مربع است. به همین دلیل تبدیل انرژی از ارتعاشات امواج دریا برای تولید انرژی الکتریکی یکی از اهداف مهم در سال های اخیر بوده است. تیلور سلول پیزوالکتریکی به نام پلی فلوراید انعطاف پذیری (PVDF) را طراحی کرد (شکل ۸). این قطعه قادر به تبدیل انرژی سیال و جریان های دریایی به الکتریسیته است [۹].



شکل ۸ ژنراتور پیزوالکتریکی، لایه آبی رنگ از جنس PVDF، قسمت قرمز رنگ از جنس فوم

### ۹. مشخصات ژنراتورهای پیزوالکتریک

با فرض تنش و کرنش مکانیکی در یک جهت و جابه جایی میدان الکتریکی در سه جهت، معادله ساختاری زیر را می توان تعریف کرد:

$$\begin{cases} S_1 = s_{11}^E \cdot T_1 + d_{31} \cdot E_3 \\ D_3 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{33}^T \cdot E_3 + d_{31} \cdot T_1 \end{cases} \quad (28)$$

$S$  بردار کرنش مکانیکی،  $s^E$  تانسور الکتریکی،  $T$  بردار تنش مکانیکی با واحد  $N/m^2$ ،  $\epsilon^T$  بردار میدان الکتریکی با واحد  $V/M$  و  $\epsilon$  ثابت عایق با واحد  $Farad/m$  برای  $T$  ثابت است. همچنین  $d$  ثابت پیزوالکتریک با واحد  $C/N$  یا  $m/V$  و  $D$  بردار جابه جایی الکتریکی با ثابت  $C/m^2$  در نظر گرفته می شود. شکل ۹ نحوه قرار گیری سلول پیزوالکتریک زیر فرش الاستیک جاذب انرژی موج را نشان می دهد:

ماشین آلات هیدرولیکی قرار گرفته در مفاصل به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. نمونه ای از این مبدل به طول ۱۸۰ متر و قطر ۴ متر که در اسکاتلند از آن برای تولید الکتریسیته استفاده می شود، توانایی تولید ۷۵۰ کیلووات انرژی را دارد. ستون نوسانگر متداول ترین سامانه جذب انرژی امواج است. در این سیستم، برخورد موج به محفظه جذب سبب می شود سطح آب درون محفظه به صورت نوسانی بالا و پایین برود. این حرکت نوسانی سطح آب سبب ورود و خروج هوا از دریچه خروجی شده و توربین دو طرفه انرژی جریان هوا با سرعت بالا را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند [۷]. با این همه سیستم های نوسانگر مبدل انرژی حداکثر راندمان تئوری جذب ۵۰ درصد را دارند [۸].

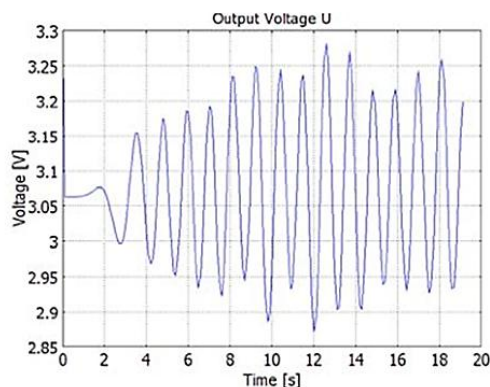
در نوع جاذب انرژی سرریزی انرژی موج، محفظه ای در سطح دریا، موج را در مسیر از پیش تعیین شده هدایت می کند. این سیستم طرز کاری شبیه به سیستم هیدرولیک دارد و انرژی حاصل از سرریز موج از روی دستگاه به کمک توربین هایی که در مسیر سرریز قرار گرفته اند به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. همان طور که واضح است بازده و انعطاف پذیری عملکرد CWEC در مقایسه با سیستم های موجود بسیار بیشتر است، به طوری که این سیستم می تواند انرژی موج عبوری را به طور کامل جذب کند و علاوه بر تبدیل انرژی محدود گسترده تری از امکانات و مزایا را در اختیار قرار دهد.

### ۸. به کار گیری المان های پیزوالکتریکی در CWEC

امواج در آب کم عمق باعث اندرکنش سیال با بستر دریا می شوند. با توجه به این موضوع و از آنجا که CWEC یک مبدل الاستیک است، می تواند در برابر جریان های زیر سطحی و اختلاف فشار ناشی از امواج سطحی تغییر شکل یابد و به کار گیری المان های پیزوالکتریک  $w$  در آن می تواند به عنوان یک عامل ثانویه تولید الکتریسیته و افزایش راندمان در نظر گرفته شود. قدرت تولید شده توسط حرکات امواج دریا بیش از ۵۰ کیلووات بر متر

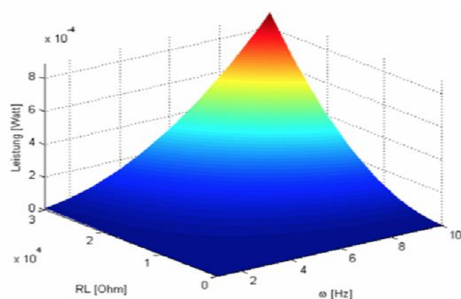


ولتاژ حاصل از بستر الاستیک در اثر حرکت این امواج در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱. ولتاژ تولیدشده در واحد زمان

میانگین توان خروجی تئوری نیز در شکل ۱۲ آمده است. این توان، تابعی از فرکانس موج و مقاومت بار ناشی از سطح آب بالای مبدل است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش فرکانس و مقاومت، توان به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد.

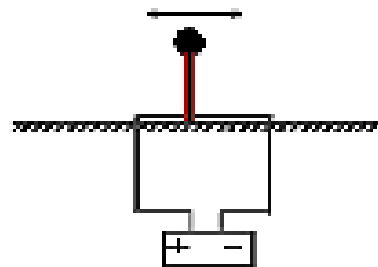


شکل ۱۲. توان خروجی تئوری متوسط حاصل از ژنراتورهای پیزوالکتریکی

نتایج حاصل از استخراج انرژی با استفاده از سلول‌های پیزوالکتریک در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱. ولتاژ خروجی به دست آمده در یک سیکل باز از مبدل

$X=1.25$ (mm)	PVDF (nanofarad)
$C(nf)$	0.147
$U_{peak}(V)$	3.28
$U_{RL}(V)$	2.44

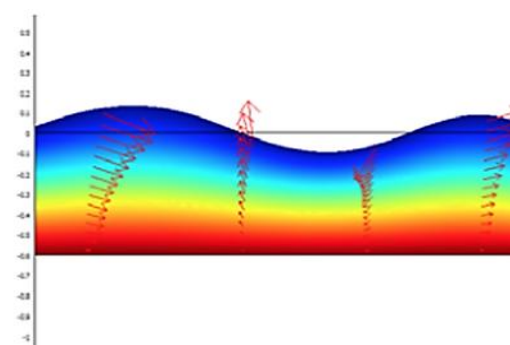


شکل ۹. شمایی از قرارگیری قطعه پیزوالکتریک در بستر دریا

## ۱۰. شبیه‌سازی موج و اندرکنش آن با سلول‌های

### پیزوالکتریک بستر

در این قسمت جهت بررسی کارایی سلول پیزوالکتریک زیر فرش الاستیک در بستر، از یک موج‌ساز عددی در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شده است. بدین منظور موجی با ارتفاع ۰/۰۳ متر و طول ۱۰ متر، در کانالی به عمق ۰/۶ متر در نظر گرفته شده است. برای کاهش تأثیرات غیرخطی، تیزی موج باید کمتر از ۲ درصد باشد. شکل ۱۰ سرعت ذرات آب در ستون آب را نشان می‌دهد:



شکل ۱۰. سرعت ذرات آب در ستون آب کانال مدل با فرش الاستیک و سلول پیزوالکتریک در بستر

با استفاده از المان‌های مستطیل شکل پیزوالکتریک PVDF در زیر فرش مبدل انرژی امواج در یک شرایط دریایی مشخص می‌توان به تولید الکتریسیته پرداخت.

- Rio de Janeiro, Brazil. American Society of Mechanical Engineers; 2012. P.839-46.
- [4] Lehmann M, Elandt R, Shakeri M, Alam MR. The Wave Carpet: Development of a Submerged Pressure Differential Wave Energy Converter. In 30th Symposium on Naval Hydrodynamics; 2014 Nov 2-7; Hobart, Tasmania, Australia.
- [5] Faiz J, Ebrahimi-salari M. Wave Power Resource in Iran for Electrical Power Generation. In World Renewable Energy Congress-Sweden; 2011 May 8-13; Linköping, Sweden. Linköping: Linköping University Electronic Press; 2011. p.3412-19(No.057).
- [6] Mac pherson H, and Kurup PG. Wave damping at the Kerala mud banks, southwest India. Indian journal of Marine Sciences. 1981;10:154-160.
- [7] Renzi E, Dias F. Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean. European Journal of Mechanics-B/Fluids. 2013 Oct 31;41:1-10.
- [8] Gao X, Shih WH, Shih WY. Flow energy harvesting using piezoelectric cantilevers with cylindrical extension. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013; 60(3):1116-8.

### پی نوشت

1. Carpet of Wave Energy Conversion
2. Dispersion relation
3. Shallowness
4. Power Take-off
5. Young Module
6. Shallowness
7. Steepness
8. Polyvinylidene Fluoride

که در آن  $C(nf)$  ظرفیت PVDF بر حسب نانوفاراد،  $U_{peak}$  ولتاژ بیشینه تولیدی توسط VDF، URL میانگین ولتاژ تولیدی PVDF و  $X$  ضخامت صفحه PVDF است.

### ۱۱. بحث و نتیجه گیری

در این مقاله به شرح ایده‌ای جدید برای جذب انرژی امواج پرداخته شد. از حل تحلیلی معادلات حرکت و دیفرانسیل فشار، مقدار انرژی تبدیل شده توسط مبدل محاسبه شد. چهار مؤلفه اصلی سازنده این مبدل شامل فرش جاذب انرژی، اتصالات، سیستم بالابرنده PTO و مهارکننده هاست. فرش جاذب وظیفه جذب انرژی موج و بقیه سیستم‌ها وظیفه انتقال و تبدیل انرژی را در سیستم دارند. مدل تحلیلی که در اینجا فرض شده است، دو فرش از جنس فایبرگلاس با ضرایب سختی و میرایی متفاوت است؛ نتایج حاصل از تحلیل، برای واحد PTO حداکثر راندمان  $42/3$  درصد و برای سیستم راندمان جذبی  $99/33$  درصد را نشان می‌دهد. در انتها به عنوان یک طرح نوآورانه پیشنهادی CWEC به المان‌های پیزوالکتریک PVDF مجهز شد. محاسبات نشان داد که تولید الکتریسیته با استفاده از این سیستم ترکیبی افزایش می‌یابد. مقدار این افزایش به راندمان و نوع المان پیزوالکتریک وابسته است.

### مراجع

- [1] Gade HG. Effects of a non-rigid, impermeable bottom on plane surface waves in shallow water. Journal of Marine Research. 1958;16:61-82.
- [2] Alam MR. Nonlinear analysis of an actuated seafloor-mounted carpet for a high-performance wave energy extraction. Proceedings of The Royal Society A. 2012 Oct 8;468(2146): 3153-71.
- [3] Alam MR. A flexible seafloor carpet for high-performance wave energy extraction. In 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering; 2012 Jul 1;