

# تعیین موقعیت بهینه کارگذاری مبدل نوسانگر انرژی امواج از نوع نوسانگر دورانی (مطالعه موردی: بندر نوشهر)

سیدتقی امید نائینی<sup>۱</sup>، عرفان امینی<sup>۲\*</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۸

\*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۳

© نشریه صنعت حمل و نقل دریایی ۱۳۹۹، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه صنعت حمل و نقل دریایی است.

## چکیده

هدف اصلی این پژوهش، ارائه 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 است. جهت تعیین موقعیت بهینه مبدل انرژی نوسانگر دورانی بر اساس پارامترهای محیطی (عمق آب، پرید موج و ارتفاع موج)، ابتدا با به‌کارگیری الگوریتم فراابتکاری GWO و کدنویسی در نرم افزار MATLAB اقدام به ایجاد الگوریتمی برای بررسی و ارائه بهینه‌ترین موقعیت در پهنه‌های آبی مختلف شده است. جهت جمع‌آوری اطلاعات از داده‌های ۲۷ ساله پژوهشگاه اقیانوس‌شناسی و علوم جوی استفاده شده است. سپس با طراحی هندسی مبدل و با استفاده از ماژول WEC-Sim عملکرد مبدل در موقعیت بهینه تعیین شده، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین به جهت برآورد نتایج عملگر مطالعه موردی بر روی محدوده بندر نوشهر در سواحل شمالی کشور صورت گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر پاسخ‌های بسیار مناسب الگوریتم GWO پیشنهاد شده، جهت تعیین موقعیت بهینه کارگذاری مبدل انرژی نوسانگر امواج در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها بوده است، علاوه بر این، بر اساس طراحی ابعاد صفحه مبدل و مطالعه موردی انجام شده، ضریب عملکرد مبدل طراحی شده در موقعیت بهینه بدست آمده برابر با ۶۳٪ است، که افزایش آن در مقایسه با پیشینه تحقیقات، خود تاییدی بر نتایج حاصله از تعیین موقعیت بهینه توسط الگوریتم ارائه شده بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** مبدل انرژی امواج، تعیین موقعیت، الگوریتم GWO، مدل‌سازی عددی، نرم‌افزار WEC-Sim.

۱. عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران. Stnaeeni@ut.ac.ir  
۲. کارشناس ارشد سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی. دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران. Erfan.amini@ut.ac.ir

## ۱ - مقدمه

در سالیان اخیر، لزوم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی امواج، اهمیتی دوچندان یافته است. در ایران نیز با توجه به سواحل شمالی و جنوبی کشور که پتانسیل بسیار مناسبی برای استفاده از انرژی امواج فراهم می‌کنند، استفاده از سیستم‌های مبدل انرژی مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق سعی شده است ابتدا با شناخت و بررسی تکنولوژی‌های توسعه داده شده، مبدل و ابزار نرم‌افزاری مناسب جهت مدلسازی سیستم مبدل انرژی از نوع نوسانگر دورانی انتخاب شود. در طراحی این دستگاه از یک صفحه که امکان دوران حول محور خود را دارد استفاده شده است. در پشت این صفحه یک سیستم هیدرولیکی طراحی شده که با عقب و جلو رفتن صفحه، تولید نیرو می‌کند. این نیرو می‌تواند به وسیله مایع هیدرولیک به یک ژنراتور که در ساحل قرار گرفته است، منتقل شود و تولید الکتریسیته نماید.

در مرحله بعد به‌عنوان هسته اصلی پژوهش، برای اولین بار در زمینه بررسی عملکرد مبدل‌های انرژی امواج، مجموعه کدهایی بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی GWO<sup>۱</sup> توسعه داده شد. ابتدا اطلاعات و داده‌های محدوده مورد بررسی از مجموعه داده‌های دریایی استخراج گردید، همچنین نقطه‌ای با بیشترین پتانسیل انرژی امواج در محدوده ساحلی توسط الگوریتم بهینه‌ساز مشخص شد و پارامترهای محیطی آن به‌عنوان پارامترهای اصلی و پایه‌ای برای طراحی هندسی مبدل نوسانگر دورانی ارائه گردید. تا به امروز محققین مختلف پژوهش‌های نسبتاً محدودی روی عملکرد مبدل‌های انرژی امواج دریا انجام داده‌اند، همچنین در راستای به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مباحث مهندسی دریا جز چند مورد که مورد اشاره قرار خواهد گرفت، پژوهشی صورت نگرفته است.

هنری در سال ۲۰۰۸ در پژوهشی به روش آزمایشگاهی روی ارزیابی تأثیر انواع مختلف پارامترهای مؤثر بر عملکرد مبدل‌های باله‌ای امواج در دو مقیاس مدلسازی ۱:۴۰ و ۱:۲۰ بررسی‌هایی را صورت داد. مدل‌های مورد مطالعه در هر یک از این مقیاس‌ها از یک باله شناور که در نزدیکی بستر دریا مفصل شده است به همراه یک سیستم انتقال قدرت به منظور شبیه‌سازی نیروی وارد شده از طرف سیستم استحصال انرژی تشکیل شده‌اند. نتایج حاصل از تحقیقات وی نشان داد که با افزایش پرپود، کارایی دستگاه مبدل امواج کاهش می‌یابد، همچنین افزایش چگالی نسبی باله منجر به بهبود عملکرد دستگاه در امواج با پرپود بزرگ‌تر می‌گردد و برعکس، کاهش چگالی نسبی باله منجر به بهبود عملکرد دستگاه در امواج با پرپود کوتاه‌تر می‌گردد. آزمایشات انجام شده توسط هنری در عمق آب حدوداً ۱۰ متر انجام شده‌اند. او با فرض قرار داشتن مبدل در معرض امواج جزر و مدی با ارتفاع ۲ متر، تأثیر تغییرات عمق آب بر اثر این امواج را بر عملکرد دستگاه مورد بررسی قرار داد تا در صورت وقوع جزر و مد بتوان عملکرد مبدل را پیش‌بینی نمود. مطابق با این پژوهش تغییرات ضریب جذب در یک دوره جزر و مدی ناچیز است. به استثنای شرایط امواج با پرپود کم و توان موج کم که در آن اختلاف ضریب جذب در یک دوره جزر و مدی به ۲۰٪ می‌رسد (هنری، ۲۰۱۸). یو و همکاران در سال ۲۰۱۴ از موسسات NREL<sup>۲</sup> و SNL<sup>۳</sup>، ابتدا WEC-Sim<sup>۴</sup> را به عنوان یک ماژول کد متن باز برای مدلسازی مبدل‌های انرژی امواج در شرایط گوناگون امواج توسعه و ارائه دادند. همچنین در این پژوهش با ارائه صحت‌سنجی و ارزیابی دقیق WEC-Sim از طریق مدلسازی عددی و مطالعات آزمایشگاهی، روش اجزا مرزی<sup>۵</sup> جهت مدلسازی هیدرودینامیکی به صورت متن باز از طریق پلت فرم‌های گوناگون معرفی شد. همچنین این پژوهشگران در سال ۲۰۱۶، با انجام پژوهشی اجزا و قسمت‌های مختلف نرم‌افزار WEC-Sim جهت مدلسازی دو نمونه مبدل نوسانگر دورانی از نوع پایه - ثابت و پایه - شناور تشریح شده است (یو و همکاران، ۲۰۱۴؛ راهول و همکاران، ۲۰۱۶). رنزی و همکاران در سال ۲۰۱۴ تحت پژوهشی به بررسی و تدوین روابط پایه ریاضی و هیدرودینامیکی برای توصیف حرکات مبدل نوسانگر دورانی از نوع پایه - ثابت پرداختند. همچنین در این پژوهش ارزیابی

۱. Gray Wolf Optimization

۲. National Renewable Energy Laboratory

۳. Sandia National Laboratories

۴. Wave Energy Converter Simulator

۵. Boundary Element Method (BEM)

روی تئوری‌های پایه حرکت مبدل‌های انرژی صورت گرفته است. چرا که در یک دیدگاه کلی، معادلات توسعه داده‌شده پیش از این، جهت توصیف حرکت مبدل‌های انرژی امواج از نوع جاذب نقطه‌ای استفاده شده بود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که معادلات ریاضی حاکم بر مبدل‌های نوسانگر انرژی امواج با معادلات حاکم بر سایر مبدل‌ها از نوع «پایان‌دهنده» متفاوت بوده است (رنزی و همکاران، ۲۰۱۴). در پژوهش‌های تام و همکاران سعی به بهبود عملکرد جاذب انرژی صفحه‌ای با تغییر در شکل مقطع آن شده است. نتایج حاصل از این پژوهش ارائه مقطع پیشنهادی (که مبدل نوسانگر دورانی با هندسه کنترل شده نام گرفته است) بوده است. این مطالعه روی امواج خطی صورت گرفته است. ضریب جذب در این مطالعه بهبود یافته است و به علاوه بارهای حاصل از طراحی و بارهای هیدرودینامیکی نیز در این مدل کاهش یافته است. آنها همچنین بیان کردند که این مدل مناسب برای انواع موج‌ها است. البته طبق بیان محققان، این مطالعات نیازمند انجام مطالعات عددی و آزمایشگاهی دقیق‌تری برای امکان‌سنجی طراحی مدل واقعی است (تام و همکاران، ۲۰۱۵). چو و همکاران با انجام مطالعاتی در سال ۲۰۱۸ ابتدا یک معادله عمومی برای تعیین ضریب جذب ( $C_F$ ) با استفاده از مدل تحلیلی «نوسانگر هماهنگ میرا» ارائه کردند. سپس ارتباط این معادله با مدل دو بعدی ایده‌آل برای ضریب جذب بررسی شد. در انتها یک طرح برای توضیح اثر پارامترهای مختلف در مدل سه بعدی (با سه پارامتر کالیبراسیون) معرفی شد. این پارامترها امکان همسان‌سازی سری‌های زمانی مستخرج از مدل‌سازی عددی یا آزمایشگاهی را فراهم می‌کنند. وقتی این پارامترها از همسان‌سازی داده‌ها به دست آید، مقدار حداکثر ضریب جذب ( $C_{Fmax}$ ) و شرایط وقوع آن مشخص می‌گردد. همچنین دو مقدار ضریب جذب به عنوان «ضریب جذب بهینه ( $C_{Fopt}$ )» و «ضریب جذب در حالت تشدید یا رزونانس  $C_{Fres}$ » معرفی شده است. که ضریب جذب بهینه معرف حداکثر مقدار ضریب جذب در حالت رخ ندادن تشدید است. نتیجه این پژوهش نشان داد در حالتی که نسبت عرض صفحه مبدل به طول موج برخوردی ( $B/L$ ) کمتر از  $0.3$  باشد، خواهیم داشت (چو و همکاران، ۲۰۱۸).

$$C_{Fopt} < 1$$

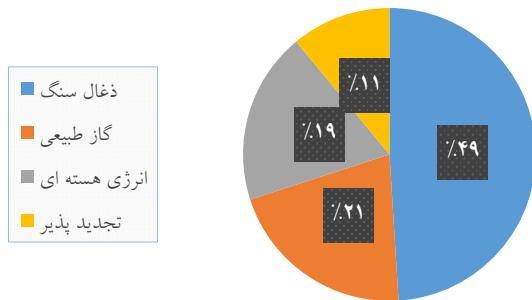
$$C_{Fres} > 1$$

همچنین در بحث به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌ساز در مهندسی دریا رویز و همکاران در سال ۲۰۱۷ در پژوهشی با در نظر داشتن مبدل‌های انرژی امواج متشکل از چند آرایه مبدل، یک روش پیشنهادی بهینه‌سازی را مطرح می‌کند. این روش سعی می‌کند با یافتن حداقل میزان فاصله صفحه مبدل‌های انرژی، مقدار توان استحصال شده از مزرعه انرژی امواج در یک سطح محدود را به حداکثر برساند. مدل پیشنهادی توسط این پژوهش با چهار پارامتر (زاویه ردیف‌های جایگذاری آرایه‌ها)،  $\beta$  (زاویه بین ستون‌ها و ردیف‌ها)،  $a$  (زاویه بین مبدل‌ها در هر ردیف) و  $b$  (زاویه بین مبدل‌ها در هر ستون) معرفی شده است. محققان نتایج حاصل از مدل بهینه‌سازی خود را با سه روش مطرح تطبیق ماتریس کوواریانس، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم گروه کرم شب‌تاب صحت‌سنجی کردند (رویز و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین شارپ و دوپونت در سال ۲۰۱۸ روی مبدل‌های انرژی امواج از نوع اینرسی دورانی متمرکز شدند. ابتدا معادلات دینامیکی حرکت مبدل بررسی شد و سپس سعی شد در سه حالت مختلف از الگوریتم‌های بهینه‌یابی مطرح، برای بهینه‌سازی حرکت مبدل و استخراج حداکثر توان متوسط استفاده شود. این سه حالت عبارت بودند از: الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات، استفاده همزمان از هر دو الگوریتم فوق. هدف اصلی بهینه‌یابی در این مطالعه، یافتن بهترین تطابق بین پارامترهای شرایط محیطی و پارامترهای طراحی مبدل است به گونه‌ای که حداکثر انرژی ممکن از امواج قابل استحصال باشد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد استفاده همزمان از هر دو الگوریتم فوق جواب‌های دقیق‌تری ارائه خواهند داد. اگرچه جواب‌های هر یک از دو الگوریتم به‌طور جداگانه نیز قابل‌پذیرش است (شارپ و دوپونت ۲۰۱۸).

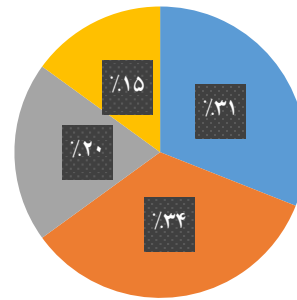
## ۱-۱- بیان مسئله

محدودیت منابع فسیلی، گسترش فزاینده نیاز به انرژی و مهم‌تر از همه فاجعه آلودگی زیست‌محیطی ناشی از سوخت مواد فسیلی سبب روی آوردن دوباره بشریت به انرژی‌های تجدیدپذیر طبیعی شده است. هرچند میزان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار کمتر از سوخت‌های فسیلی است، اما می‌توان گفت یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر مفید، امواج دریاها بوده و وجود دریا در شمال و جنوب ایران، کشور را به یکی از پتانسیل‌های منطقه در بحث جذب انرژی از دریا تبدیل کرده است. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، سهم استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در مقایسه با ۱۰ سال گذشته افزایش پیدا کرده است. که نشان از استقبال تدریجی و روبه‌رشد صنعت از این منبع انرژی دارد.

منابع انرژی در جهان در سال ۲۰۰۷



منابع انرژی در جهان در سال ۲۰۱۷



شکل (۱): منابع انرژی جهان در سال ۲۰۱۷ در مقایسه با سال ۲۰۰۷

یکی از مهم‌ترین منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی‌های اقیانوسی یا دریایی است که با توجه به موقعیت جغرافیایی کشور از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در این پژوهش سعی بر آن است تا با ارائه یک مدل ریاضی مناسب از بین الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف، امکان‌سنجی احداث سیستم مبدل انرژی با عملکرد بهینه در بندر نوشهر ارزیابی، و طراحی مناسب برای مبدل مورد بحث ارائه شود.

## ۱-۲- ضرورت انجام پژوهش

با پیشرفت تکنولوژی و نیاز روزافزون جوامع بشری به انرژی و همچنین کاهش منابع هیدروکربنی و سوخت‌های فسیلی، امروزه شاهد بهره‌برداری بیش از پیش از منابع طبیعی همچون دریاها و اقیانوس‌ها به جهت تأمین انرژی بوده‌ایم. در حوزه تأمین انرژی از دریا استفاده از مبدل‌های انرژی امواج بیش از دو دهه است که به عنوان یک راه‌حل قابل قبول مورد توجه محققین قرار گرفته است. در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان پارامترهای اصلی در طراحی مبدل نوسانگر انرژی امواج را به دو دسته کلی تفکیک نمود: (۱) پارامترهای محیطی (همچون خصوصیات پهنه آبی کارگذاری مبدل، عمق آب، خصوصیات امواج منطقه و...) و (۲) پارامترهای هندسی مبدل (همچون ابعاد هندسی مبدل، نوع و ویژگی‌های متریال مبدل و...). مسئله عملکرد بهینه مبدل‌های انرژی امواج و به تبع آن، برآورد بازده حداکثری به عنوان یکی از چالش‌های اصلی پیش‌روی پژوهشگران این عرصه بوده است، که تعیین موقعیت بهینه کارگذاری مبدل به عنوان اصلی‌ترین پارامتر در تأمین این مهم به حساب می‌آید.

با پیشرفت علم، امروزه به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی رشد چشمگیری در مسائل مختلف مهندسی داشته است و در عمل شاهد نتایج قابل قبول از خروجی‌های این الگوریتم‌های بهینه‌ساز در شاخه‌های مختلف علوم مهندسی بوده‌ایم. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم فراابتکاری<sup>۱</sup> GWO پارامترهای محیطی برای کارگذاری مبدل نوسانگر انرژی امواج مورد ارزیابی قرار گرفته است و در نهایت موقعیت بهینه کارگذاری این مبدل بر اساس بیشترین بازده عملکرد مبدل ارائه شده است.

## ۲- روش تحقیق

مراحل پیاده‌سازی شده در این پژوهش شامل ۵ گام به این شرح بوده است:

گام اول: توسعه کدهای الگوریتم بهینه‌ساز GWO با توجه به ماهیت مسئله در نرم‌افزار<sup>۲</sup> MATLAB

الگوریتم گرگ‌های خاکستری توسط میرجلیلی و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر مبنای شکار دسته جمعی گرگ‌های خاکستری ارائه شده است (میرجلیلی و همکاران، ۲۰۱۴). مراحل و فازهای اصلی شکار گرگ خاکستری به این ترتیب است: مرحله جستجو: ردگیری، وادار به فرار کردن، و نزدیک شدن به شکار،

۱. Gray Wolf Optimization

۲. Matrix Laboratory

مرحله محاصره: تعقیب، محاصره کردن، به هم زدن کارآیی شکار تا اینکه از حرکت بایستد و مرحله حمله: شروع حمله نهایی به سمت شکار. در الگوریتم بهینه‌ساز GWO که بر مبنای فرایند شکار گرگ‌های خاکستری ایجاد شده است، برای مدلسازی ریاضی حکومت اجتماعی گرگ‌ها هنگام طراحی GWO، شایسته‌ترین راه‌حل را گرگ  $\alpha$  نامگذاری می‌کنند. در نتیجه، دومین و سومین راه‌حل‌های بهتر به ترتیب گرگ  $\beta$  و  $\delta$  نامیده شدند. راه‌حل‌های باقیمانده فرض می‌شود که  $\omega$  هستند. لذا در الگوریتم GWO بهینه‌سازی با  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\delta$  رهبری می‌شود و گرگ‌های  $\omega$  از این سه دسته پیروی می‌کنند. مدل ریاضی ارائه‌شده برای این الگوریتم به این شرح می‌باشد:

الف - مرحله جستجوی شکار

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (1)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2)$$

جایی که  $t$  تکرار فعلی،  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  بردار ضرایب،  $\vec{X}_p$  بردار موقعیت طعمه و  $\vec{X}$  بردار موقعیت یک گرگ خاکستری می‌باشد. بردارهای  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4)$$

جایی که مؤلفه‌های  $\vec{a}$  به صورت خطی با بالا رفتن تعداد تکرار (از ۲ تا صفر) کاهش می‌یابد و  $\vec{r}_1$  و  $\vec{r}_2$  بردارهای تصادفی (بین ۰ و ۱) می‌باشند. یک گرگ خاکستری در موقعیت  $(X, Y)$  می‌تواند موقعیت خود را به‌روزرسانی بکند بر اساس موقعیت یک طعمه  $(X^*, Y^*)$  مکان‌های مختلف پیرامون بهترین جواب می‌تواند بر اساس تنظیم مقدار بردارهای  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  به‌دست آید. برای مثال  $(X^* - X, Y)$  می‌تواند با تنظیم  $\vec{A} = (1, 0)$  و  $\vec{C} = (1, 1)$  به‌دست آید (میر جلیلی و همکاران ۲۰۱۴).

ب - مرحله محاصره

گرگ‌های خاکستری این توانایی را دارند تا محل یک طعمه را تشخیص دهند و آنها را احاطه کنند. شکار معمولاً توسط گرگ آلفا هدایت می‌شود. گرگ‌های بتا و دلتا ممکن است در شکار در بعضی مواقع مشارکت داشته باشند. با این حال در یک فضای جستجوی محدود ما هیچ ایده‌ای درباره محل بهینه (طعمه) نداریم. به جهت شبیه‌سازی ریاضی‌وار رفتار شکارگونه گرگ‌های خاکستری، ما فرض می‌کنیم که آلفا (بهترین جواب)، بتا و دلتا اطلاع خوبی درباره پتانسیل محل طعمه دارند. بنابراین ما ۳ جواب بهتر به‌دست آمده تاکنون را ذخیره کرده و بقیه عوامل جستجو را مجبور می‌کنیم تا موقعیت‌های خود را بر اساس موقعیت عوامل بهتر به‌روزرسانی کنند. به این منظور روابط زیر پیشنهاد شده است (گومز و همکاران ۲۰۱۱).

$$\begin{aligned} \vec{D}_\alpha &= \left| \vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X} \right|, \\ \vec{D}_\beta &= \left| \vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X} \right|, \\ \vec{D}_\delta &= \left| \vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X} \right| \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \vec{X}_1 &= \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \\ \vec{X}_2 &= \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \\ \vec{X}_3 &= \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3} \quad (۷)$$

ج - مرحله شکار

گرگ‌های خاکستری شکار را با حمله به طعمه زمانی که از حرکت باز می‌ایستند خاتمه می‌دهند. به منظور اینکه ریاضی‌وار نزدیک شدن به طعمه را مدل کنیم ما مقدار  $\vec{a}$  را کاهش می‌دهیم. توجه شود که محدوده نوسان بردار  $\vec{A}$  نیز بر حسب  $\vec{a}$  کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر  $\vec{A}$  یک مقدار تصادفی است در بازه  $[-2, 2]$  جایی که  $a$  از ۲ تا صفر با بالا رفتن تعداد تکرار کاهش می‌یابد. زمانی که مقادیر تصادفی  $\vec{A}$  در بازه  $[-1, 1]$  هستند، موقعیت بعدی یک عامل جستجو می‌تواند در هر موقعیتی بین موقعیت کنونی و موقعیت طعمه باشد. در نهایت با ارضای شرط  $|A| < 1$  گرگ‌ها را مجبور می‌کند تا به سوی طعمه حمله کنند. با عملگرهای پیشنهاد شده تا کنون، الگوریتم GWO به عوامل جستجوگر خود اجازه می‌دهد تا موقعیت‌های خود را بر اساس محل آلفا، بتا و دلتا به‌روزرسانی کرده و به سوی طعمه حمله کنند. با این حال الگوریتم GWO مستعد است تا با این عملگرها در داخل یکسری جواب‌های محلی گرفتار شوند. واقعیت این است که مکانیزم احاطه کردن پیشنهادی که فاز جستجو را تا میزانی نشان می‌دهد، اما GWO به اپراتورهای بیشتری نیاز دارد تا بر فاز جستجو تأکید کند (گومز و همکاران، ۲۰۱۵).

دیگر مؤلفه الگوریتم GWO که فاز جستجو را حمایت می‌کند بردار  $\vec{C}$  می‌باشد. همان‌گونه که ممکن است از معادله (۸) دیده شود بردار  $\vec{C}$  حاوی مقادیر تصادفی بین  $[0, 2]$  می‌باشد. این مؤلفه وزن‌های تصادفی را برای طعمه فراهم می‌کند تا به ازای  $C > 1$  بر تأثیر طعمه بر یافتن فاصله معادله (۵) تأکید کند و به ازای  $C < 1$  این اثر خنثی می‌باشد. این کار به الگوریتم GWO کمک می‌کند تا یک رفتار تصادفی را در مرحله بهینه‌سازی، حمایت از فاز جستجو و اجتناب از بهینه محلی نشان دهد. باید اشاره شود که  $C$  بر خلاف  $A$  به صورت خطی کاهش نمی‌یابد. ما به طور عمدی به  $C$  نیاز داریم تا مقادیر تصادفی را در همه زمان بهینه‌سازی فراهم کند تا بر فاز جستجو تأکید شود نه فقط در تکرارهای اولیه، بلکه در تکرارهای نهایی نیز این کار صورت گیرد. این امر برای جلوگیری از گیر افتادن در بهینه‌های محلی و مخصوصاً در تکرارهای نهایی بسیار کمک‌کننده است.

در این مرحله با توجه به الگوریتم GWO، کد عددی لازم جهت بهینه‌سازی مسئله با الگوریتم گرگ‌های خاکستری در نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شد. تاکنون برای بررسی عملکرد مبدل انرژی نوسانگر دورانی پارامترهای مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در تمامی این تحقیقات روش پژوهش به گونه‌ای بوده که برای ارزیابی اثر تغییرات یک پارامتر بر بازدهی مبدل، تمامی پارامترها را ثابت در نظر گرفته و پارامتر مورد بررسی را متغیر فرض می‌کردند. این نوع ارزیابی به وضوح با آنچه در عمل اتفاق می‌افتد سازگار نیست. چراکه برای طراحی و مکان‌یابی احداث دستگاه مبدل انرژی، باید تأثیر پارامترهای مختلف را به‌طور همزمان مورد ارزیابی قرار داد. (به عنوان مثال، بر اساس سوابق تحقیقات مورد بررسی، محرز شد که برخورد امواج به‌طور عمودی بر صفحه مبدل و همچنین کاهش میزان پریود امواج برخوردی بر بهبود عملکرد مبدل تأثیرگذار است. اما در منطقه مورد بررسی باید مکانی یافته شود که اثر همزمان این دو پارامتر در محل موجب شود میزان انرژی موج برخوردی حداکثر گردد و صرفاً برخورد عمودی امواج و یا کمینه پریود امواج ممکن است موجب بازدهی بیشینه نگردد). در این پژوهش سعی بر آن است تا تأثیر همزمان پارامترهای محیطی بر بازدهی مبدل انرژی امواج بررسی گردد. به این منظور پارامترهای پریود امواج برخوردی (T)، عمق آب (h)، ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) و زاویه برخورد امواج ( $\alpha$ ) به عنوان متغیرهای مسئله انتخاب می‌گردد. همچنین پارامترهای چگالی آب ( $\rho$ ) و شتاب گرانش (g) مقدار با توجه به منطقه مدنظر به عنوان 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. براساس روابط مطرح‌شده برای مجموعه متغیرها و مجموعه جواب‌ها داریم:

$$X = \{T_i, h_i, \alpha_i, \rho, g, H_{s_i}\} \quad (۸)$$

$$f(X) = E_i(X) \quad (۹)$$

که در معادله فوق مقادیر  $T_i$  و  $h_i$  و  $\alpha_i$  و  $H_{Si}$  و  $E_i$  به ترتیب مقادیر پریود موج، عمق آب، زاویه برخورد امواج، ارتفاع مشخصه امواج و انرژی موج در نقطه موردبررسی در طول و عرض مشخص هستند.

مسئله مورد مطالعه به طور خاص شامل یک معادله اصلی، چهار معادله کمکی و سه معادله حالت حدی (محدودیت‌های مرزی) است. معادله اصلی با توجه به میزان انرژی موج برخوردی و با در نظر گرفتن زاویه برخورد امواج (زاویه بین راستای عرض صفحه و راستای انتشار امواج) بر اساس روابط اشاره شده در [10,11] به شکل زیر در نظر گرفته شد.

$$E_i(X) = \frac{\rho g \omega_i A_i^2}{4 k_i} \left( 1 + \frac{2 k_i d_i}{\sin h(2 k_i d_i)} \right) \sin \alpha_i \quad (10)$$

در معادله فوق  $k$  عدد موج،  $A$  دامنه موج و  $\omega_i$  سرعت زاویه‌ای موج در نقطه موردبررسی هستند. حال با توجه به وابستگی پارامترهای فوق به کمیت‌های اصلی بردار  $X$ ، در نظر داشتن معادلات زیر جهت پیشبرد روند حل کمک‌کننده خواهد بود.

$$k = \frac{2 \pi}{L} \quad (11)$$

$$\omega_i = \frac{2 \pi}{T} \quad (12)$$

$$\omega^2 = gk \tan h(kd) \quad (13)$$

همچنین معادلات حدی مسئله (محدودیت‌های مرزی) بر اساس حداقل و حداکثر پارامترهای متغیر به شرح زیر تعیین می‌گردد:

$$T_{min} < T_i < T_{max} \quad (14)$$

$$H_{min} < H_i < H_{max} \quad (15)$$

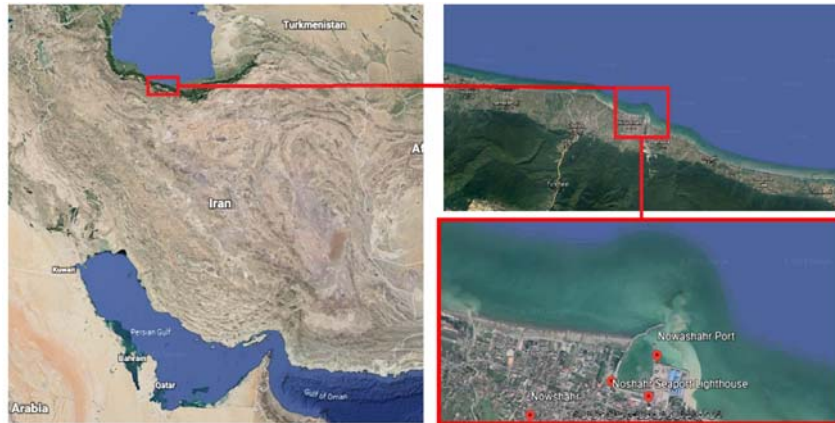
$$h_{min} < h_i < h_{max} \quad (16)$$

$$\alpha_{min} < \alpha_i < \alpha_{max} \quad (17)$$

در شکل بالا ماکزیمم و مینیمم کمیت‌های متغیر نشان داده شده، نشانگر مقادیر بیشینه و کمینه آن کمیت در منطقه موردبررسی بر اساس فراداده‌های جمع‌آوری شده و پروژه‌های پژوهشی مرتبط است.

گام دوم: انتخاب منطقه مورد مطالعه، جمع‌آوری و پردازش داده‌های منطقه مدنظر

با توجه به تحقیقات صورت گرفته توسط چگینی و همکاران در قالب پروژه تحقیقاتی در مؤسسه اقیانوس‌شناسی و علوم جوی ۱۸ سایت مختلف را برای تعیین و بررسی توزیع انرژی امواج و همچنین توان متوسط و بیشینه سالانه در سواحل کشور ایران انتخاب و بررسی شده است (چگینی و همکاران، ۱۳۹۱). براساس نتایج حاصل از این پژوهش دو بندر نوشهر (واقع در سواحل جنوبی دریایی خزر) و سواحل گواتر (واقع در سواحل مکران دریای عمان) با توجه به پتانسیل بالای امواج، مکان مناسبی جهت احداث سیستم مبدل انرژی امواج هستند. بندر نوشهر در مختصات ۵۱،۵۱ شرقی و ۳۶،۶۵ شمالی واقع شده است. که در این پژوهش بندر نوشهر به جهت مطالعه موردی انتخاب شده است. در شکل (۲) موقعیت منطقه مطالعاتی نمایش داده شده است.



شکل (۲): موقعیت منطقه مطالعاتی

با توجه به منطقه مورد مطالعه، داده‌های مورد نیاز از پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی ایران دریافت گردید، این اطلاعات شامل مشخصات عمق سنجی منطقه ( $h$  در هر نقطه)، پریود امواج برخوردی ( $T_i$ )، ارتفاع امواج ( $H_i$ )، جهت امواج در منطقه ( $\alpha$ ) در یک بازه ۲۷ ساله (از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۷) می‌شود. در مرحله بعد به جهت به کارگیری داده‌های دریافتی پردازش روی داده‌های اولیه صورت گرفته است و داده‌ها بر اساس ۶ پارامتر ( $X, Y$ : موقعیت هر نقطه،  $d$ : عمق،  $T$ : پریود موج،  $H$ : ارتفاع موج و  $dr$ : جهت انتشار موج) پالایش و برای ورود به الگوریتم بهینه‌ساز GWO آماده‌سازی شده است. محدوده باند مورد مطالعه در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳): موقعیت و محدوده مطالعاتی در بندر نوشهر

گام سوم: تعیین مقدار بهینه پارامترهای طراحی از الگوریتم بهینه‌سازی

هدف اصلی فرآیند بهینه‌سازی به کارگیری الگوریتم GWO جهت یافتن مقادیر بهینه ۳ پارامتر اصلی پریود موج، عمق آب و زاویه برخورد موج بر مبدل، جهت تعیین موقعیت بهینه مبدل در منطقه مدنظر است. از این رو، با توجه به کمیت‌های تعریف شده، ورودی‌های زیر به مدل وارد می‌گردد:

جدول (۱): ورودی‌های مدل بهینه‌سازی عددی

$\rho$	چگالی سیال
$g$	شتاب گرانش
$H_s$	ارتفاع موج منطقه مدنظر
$T_{min}$	پریود کمینه منطقه مدنظر
$T_{max}$	پریود بیشینه منطقه مدنظر



$d_{min}$	عمق آب کمینه منطقه مدنظر
$d_{max}$	عمق آب بیشینه منطقه مدنظر
$dir_{min}$	زاویه برخورد موج کمینه منطقه مدنظر
$dir_{max}$	زاویه برخورد موج بیشینه منطقه مدنظر

محدوده اولیه برای جستجوی جوابها در قالب معادلات حدی و مقادیر کمینه و بیشینه کمیت‌های اصلی خواهد بود. پس از تعیین منطقه اولیه جوابها، بنا بر سلسله مراتب الگوریتم GWO راه‌حل‌های  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$  و  $\omega$  در طی روند چرخه تکرار کدنویسی شده، بهترین مقادیر پارامترهای پرپود، عمق و زاویه برخورد امواج را به‌گونه‌ای به‌دست می‌آورد که مقدار انرژی موج حداکثر گردد. جدول زیر خروجی‌های پارامتریک الگوریتم بهینه‌سازی توسعه‌داده‌شده را نشان می‌دهد.

#### جدول (۲): خروجی‌های مدل بهینه‌سازی عددی

T	پرپود بهینه جهت کارگذاری مبدل
d	عمق آب بهینه جهت کارگذاری مبدل
dir	زاویه برخورد موج بهینه جهت کارگذاری مبدل
$E_{max}$	بیشینه انرژی موج در منطقه

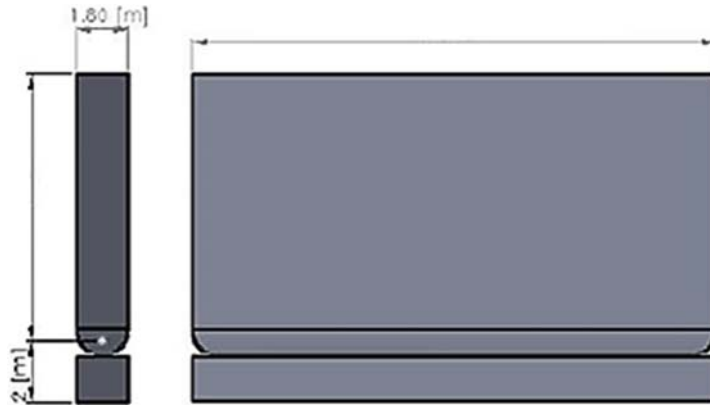
گام چهارم: تعیین موقعیت بهینه مبدل نوسانگر انرژی در منطقه مطالعاتی مدنظر

در این مرحله با توجه به نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌ساز GWO و به‌دست آوردن مقادیر بهینه برای پارامترهای (عمق آب، پرپود امواج و ارتفاع موج) که منجر به ایجاد بیشترین مقادیر در معادله شار انرژی امواج (معادله (۱۰)) گردید، داده‌های اولیه منطقه مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام پردازش منطقه مدنظر و دستیابی به نقطه‌ای که دربردارنده بیشترین میزان انرژی امواج باشد، دسته‌ای دیگر از کدها در نرم‌افزار MATLAB ایجاد شده است، فرایند کلی صورت گرفته در این بخش بر اساس خصوصیات نقاط (عمق، پرپود موج، ارتفاع موج) و مقادیر بهینه به‌دست‌آمده برای پارامترهای محیطی انجام شده و با فیلتر کردن خصوصیات نقاط در ۳ مرحله، مکان بهینه برای کارگذاری مبدل به‌دست آمده است.

گام پنجم: بررسی عملکرد مبدل نوسانگر انرژی امواج در موقعیت بهینه تعیین شده توسط ماژول WEC-SIM

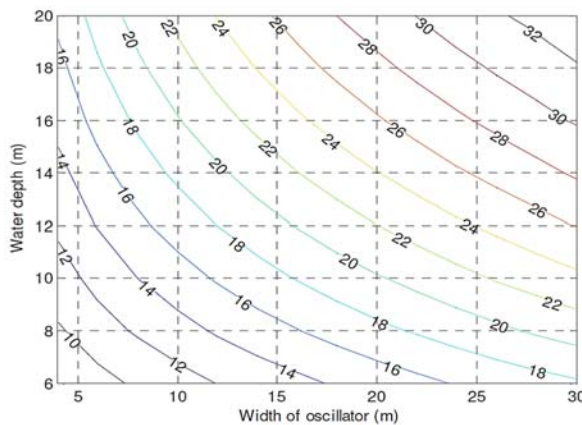
در این مرحله پس از تعیین موقعیت بهینه مبدل در گام چهارم، به هدف ارزیابی عملکرد مبدل نوسانگر انرژی امواج مدلسازی عددی در ماژول WEC-SIM نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. این ماژول به‌صورت یک افزونه روی نرم‌افزار MATLAB سوار شده و دارای ویژگی‌های منحصر به فردی (این سوروس بودن نرم‌افزار) برای ارزیابی عملکرد مبدل‌های انرژی امواج بوده است.

به‌منظور مدلسازی مبدل نوسانگر دورانی در نرم‌افزار WEC-Sim، نیاز به طراحی پایه و صفحه مبدل در نرم‌افزارهای مبتنی بر CAD است. خروجی این نرم‌افزارها در قالب دو فایل جداگانه (در فرمت .stl) به عنوان هندسه مسئله وارد ماژول WEC-Sim می‌گردد. به این منظور با توجه به سادگی عملکرد و همچنین پیشنهاد سازمان توسعه‌دهنده WEC-Sim، نرم‌افزار Abaqus جهت این طراحی‌ها انتخاب شد. ابعاد صفحه طراحی شده بر اساس مدل پایه نرم افزار در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل (۴): شکل هندسی مبدل نوسانگر دورانی طراحی شده

طبق پیشنهاد راهنمای نرم‌افزار و همچنین پیشنهاد (یو و همکاران، ۲۰۱۴)، (هنری، ۲۰۰۸) و همچنین نمونه ساخته شده اویستر در سال ۲۰۰۷ در سواحل اورکنی اسکاتلند، مقدار ارتفاع صفحه مبدل پس از مشخص شدن عمق نقاط بهینه، به مقدار عمق به علاوه یک متر ارتفاع آزاد خواهد بود. ضخامت بهینه در طراحی‌ها ۱/۸ متر در نظر گرفته شده است. جهت بررسی عرض صفحه مبدل و تعیین آن طبق پیشنهاد فولی و ویتاکر نمودار زیر مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۵): تعیین عرض طراحی مبدل بر اساس پریود نوسان آزاد و عمق آب (فولی و همکاران، ۲۰۰۷)

با استفاده از نمودار شکل (۵)، می‌توان با یافتن مقدار پریود نوسان آزاد و با توجه به عمق آب در محل احداث که از الگوریتم بهینه‌سازی به دست آمده است، عرض صفحه مبدل تعیین می‌گردد. پارامتر پریود نوسان آزاد بر اساس مبانی تئوری ارتعاشات از معادله زیر حاصل می‌گردد.

$$T_N = 2\pi \sqrt{I + K_p} \quad (18)$$

در معادل فوق کمیت  $K_p$  سختی دورانی ناشی از سیستم انتقال قدرت و  $I$  مقدار ممان اینرسی دورانی صفحه مبدل خواهد بود.

### ۳- تجزیه و تحلیل نتایج

نتایج حاصل از این پژوهش در دو بخش کلی ارائه شده است: (۱) تعیین موقعیت بهینه کارگذاری مبدل نوسانگر انرژی امواج و (۲) بررسی عملکرد مبدل در موقعیت مدنظر.

#### ۳-۱- تعیین موقعیت کارگذاری مبدل نوسانگر انرژی امواج

ابتدا به جهت برپایی مدل تعیین موقعیت بهینه کارگذاری مبدل در محدوده منطقه مدنظر، شبکه‌بندی بر روی محدوده صورت گرفته (شکل (۶)) و مشخصات مرکز هر شبکه در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل (۶): مشخصات شبکه‌بندی ایجادشده در محدوده بندر نوشهر

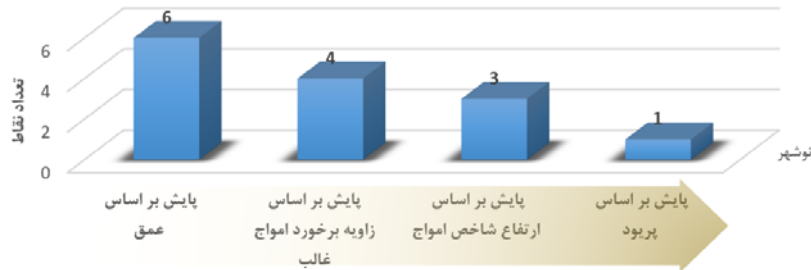
جدول (۳): موقعیت جغرافیایی شبکه‌بندی ایجادشده در محدوده بندر نوشهر

شماره نقاط	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
1	51.4	36.695
2	51.4	36.704
3	51.4	36.708
4	51.516	36.66
5	51.516	36.665
6	51.516	36.67
7	51.516	36.675
8	51.6	36.62
9	51.6	36.625
10	51.6	36.63

در این مرحله با توجه به الگوریتم موجود در معرفی روش GWO، کد عددی لازم جهت بهینه‌سازی مسئله با الگوریتم گرگ‌های خاکستری در زبان برنامه نویسی MATLAB توسعه داده شد. الگوریتم کلی حاکم از روش گرگ‌های خاکستری پیروی می‌کند. در ادامه به منظور تأثیر همزمان پارامترهای محیطی بر باردهی مبدل انرژی امواج، متغیرهای پریود امواج برخوردی ( $T$ )، عمق آب ( $h$ )، ارتفاع موج شاخص ( $H_s$ ) و زاویه برخورد امواج ( $\alpha$ ) به‌عنوان متغیرهای اصلی مسئله انتخاب شد. همچنین پارامترهای چگالی آب ( $\rho$ ) و شتاب گرانش ( $g$ ) به‌عنوان ورودی مشخص وارد الگوریتم شد. در ادامه تغییرات لازم برای تعریف معادله اصلی بهینه‌سازی و معادلات کمکی انجام شد و معادلات حالت حدی نیز در مدلسازی مد نظر قرار گرفت.

کد توسعه‌داده‌شده الگوریتم GWO، ابتدا مقادیر بهینه‌ی چهار پارامتر اصلی ذکر شده را برای ماکزیم‌شدن مقدار انرژی امواج محاسبه می‌کند. سپس در هر مرحله براساس اولویت‌های ذکر شده، داده‌ها با ۲۰٪ خطا پایش می‌شوند. به این صورت که در گام اول ابتدا در بین «عمق»های نقاط موجود، نقاط با عمق نزدیک به عمق بهینه را (۱۰٪ بالاتر و ۱۰٪ پایین‌تر) جدا می‌کند. سپس از بین نقاط حاصل، همین روند را برای متغیر «زاویه برخورد امواج غالب» تکرار می‌کند. و در گام‌های بعدی روند مشابه برای «ارتفاع مشخصه موج» و «پریود پیک» تکرار می‌گردد تا نهایتاً یک نقطه از بین تمامی نقاط موجود در باند انتخابی، به‌عنوان نقطه با مشخصات مناسب برای احداث سیستم مبدل انرژی امواج معرفی گردد. بنابراین در طی یک روند حذف و پایش چهارلایه‌ای، نقطه بهینه با حداکثر انرژی امواج پیدا شده و پارامترهای طراحی محیطی معرفی می‌گردد. روند این انتخاب برای بندر نوشهر در ۰ (۷) نشان داده شده است.

تعداد نقاط باقی مانده پس از هر مرحله پایش و حذف داده های غیربهبینه



شکل (۷): روند پایش و حذف داده‌ها با مشخصات غیربهبینه در الگوریتم بهینه‌سازی

مشخصات موقعیت نهایی بهینه کارگذاری مبدل در محدوده مورد مطالعه بر اساس الگوریتم بهینه‌ساز GWO در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۴): مشخصات منطقه نهایی موقعیت کارگذاری بهینه مبدل

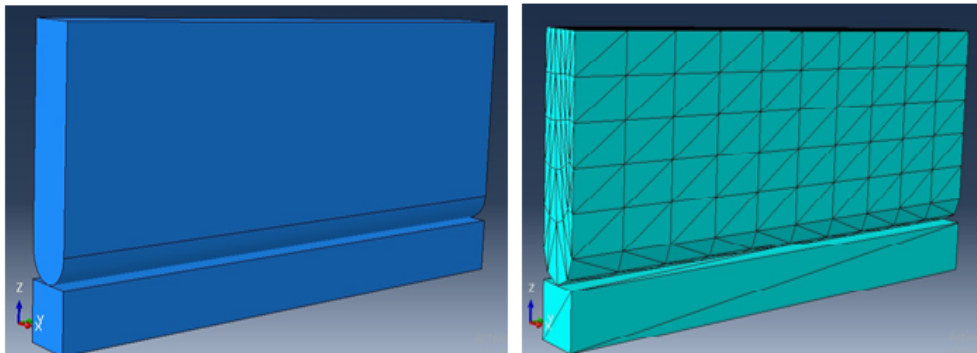
X	Y	d (m)	T (s)	H (m)	Dr (°)	E (KJ)
51.6 E	36.62 N	6.2	4.09	0.7	134	3226

### ۳-۲- بررسی عملکرد مبدل در موقعیت بهینه تعیین شده

در این مرحله پس از دستیابی به موقعیت بهینه کارگذاری مبدل، با استفاده از ماژول WEC-SIM عملکرد مبدل انرژی در موقعیت مدنظر مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس توضیحات ارائه شده، ابعاد هندسی مبدل در جدول (۵) ارائه شده است، همچنین در شکل (۸) نمایی از مدل هندسی مبدل که در نرم افزار آباکوس ایجاد شده ارائه گردیده است.

جدول (۵): مشخصات هندسی پایه و صفحه مبدل طراحی شده در موقعیت بهینه کارگذاری بندر نوشهر

مقدار	نام ابعاد
۲۱	عرض صفحه مبدل (m)
۷/۲	ارتفاع صفحه مبدل (m) از محل دوران
۱/۸	ضخامت صفحه مبدل (m)
۱۸	عرض پایه (m)
۱/۸	ضخامت پایه (m)
۱/۸	ارتفاع پایه (m)
۲	فاصله مرکز دوران از کف (m)
۱۸۵۰۰۰۰	ممان اینرسی دورانی در درجه آزادی Pitch (kg.m <sup>2</sup> )
۱۲۰۰۰	ضریب میرایی سیستم انتقال قدرت (Nsm/rad)
۱۲۷۰۰۰	جرم (kg)
-۳/۹	فاصله مرکز جرم از مرکز سطح صفحه مبدل (m)

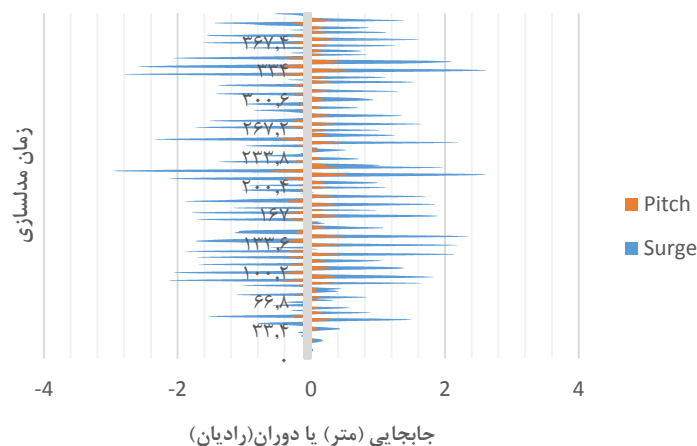


شکل (۸): پایه و صفحه مبدل طراحی شده در موقعیت بندر نوشهر

پس از وارد کردن مدل هندسی طراحی شده از نرم‌افزار آباکوس، و همچنین مشخصات نقطه بهینه از الگوریتم بهینه‌سازی GWO، در ماژول WEC-Sim، مدل نهایی جهت بررسی میزان نوسانات، نیروهای وارده و بازدهی اجرا شده، و مقدار نوسانات صفحه مبدل در دو درجه آزادی Surge و Pitch بررسی می‌گردد. چراکه در بقیه درجات آزادی صفحه مبدل حرکتی نداشته و مقید است. در اجرای مدل زمان کل مدلسازی برابر ۴۰۰ ثانیه و مقدار زمان رمپ (زمان بارگذاری مدل) برابر ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین گام‌های زمانی در اجرای مدل با توجه به عدد کورانت و پیشنهاد نرم‌افزار برابر ۰/۱ ثانیه مدنظر قرار گرفت. مقدار نوسانات برای حرکت در درجه آزادی Surge بر حسب متر و برای حرکت در درجه آزادی Pitch بر حسب رادیان ارائه شده است.

### ۳-۳- جابه‌جایی و دوران مبدل در موقعیت بهینه مدنظر

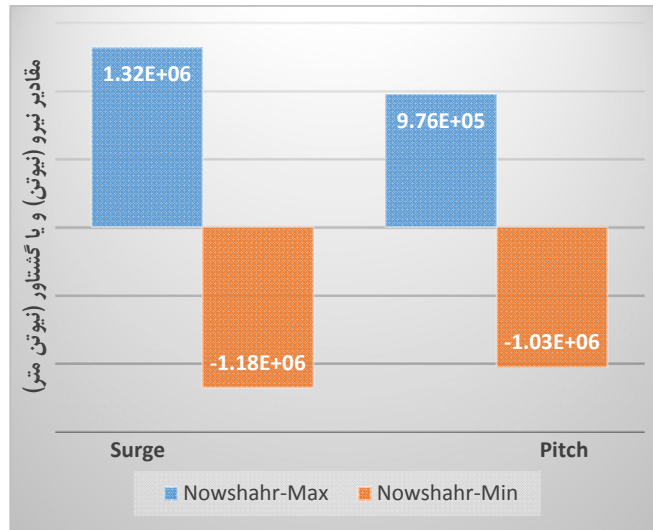
همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، میزان نوسانات مبدل در بندر نوشهر نمایش داده شده است. حداکثر میزان جابه‌جایی صفحه مبدل (در زمان حرکت تحت فشار ناشی از برخورد تاج موج) در بندر نوشهر ۲/۶۲۴ متر (با زاویه بیشینه ۰/۵۴ رادیان) همچنین حداکثر میزان جابه‌جایی صفحه مبدل (در زمان حرکت برگشتی تحت کاهش فشار ناشی از برخورد قعر موج) در بندر نوشهر ۲/۹۶ متر (با زاویه بیشینه ۰/۶۱۹ رادیان) بوده است.



شکل (۹): جابه‌جایی و دوران مبدل در موقعیت بهینه محدوده بندر نوشهر

### ۳-۴- نیروی تحریک موج در برخورد با مبدل

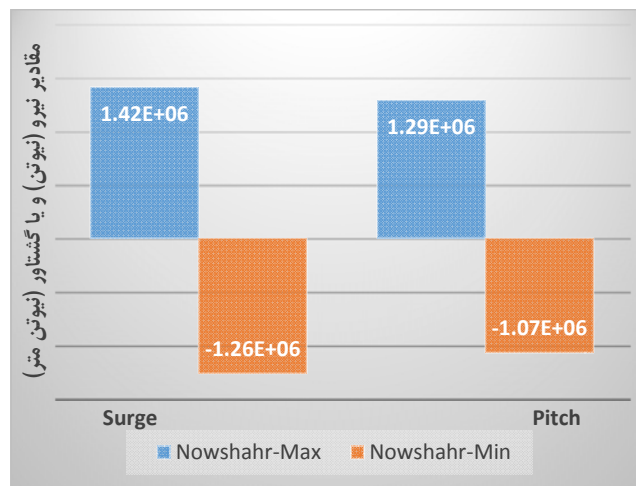
برای بررسی نیروی تحریک موج، در دو حالت حرکت صفحه مبدل به سمت عقب (برخورد تاج موج) و بازگشت صفحه مبدل به جلو (برخورد قعر موج) نیروی تحریک موج مقادیر مختلفی خواهند داشت. برای بندر نوشهر در دو درجه آزادی Pitch و Surge خروجی‌های نرم‌افزار به‌دست آمده و ارائه شده‌اند.



شکل (۱۰): مقادیر نیرو و گشتاور تحریک موج در موقعیت محدوده بندر نوشهر

### ۳-۵- نیروی میرایی تابشی امواج در موقعیت بندر نوشهر

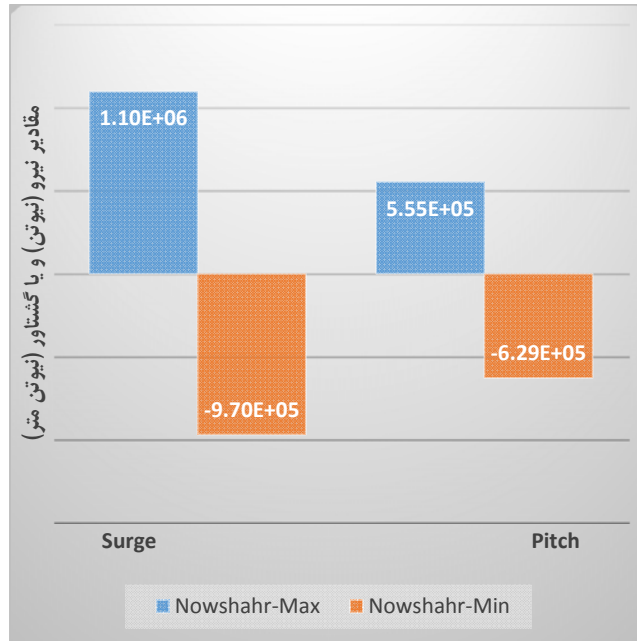
برای بررسی نیروی میرایی تابشی موج، در دو حالت حرکت صفحه مبدل به سمت عقب (برخورد تاج موج) و بازگشت صفحه مبدل به جلو (برخورد قعر موج) این نیرو مقادیر مختلفی خواهند داشت. برای هر بندر در دو درجه آزادی Pitch و Surge خروجی‌های نرم‌افزار به دست آمده و مقادیر در شکل (۱۱) ارائه شده‌اند.



شکل (۱۱): نیرو و گشتاور میرایی تابشی موج در موقعیت محدوده بندر نوشهر

### ۳-۶- نیروی جرم افزوده در موقعیت بندر نوشهر

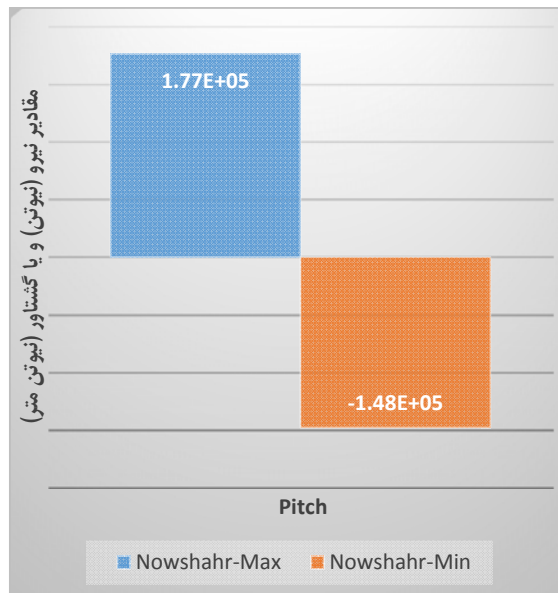
همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر نیروی گشتاور افزوده (در درجه آزادی دورانی) بیشتر از مقادیر جرم افزوده (در درجه آزادی خطی) است. این مطلب با توجه به نوع حرکت مبدل انرژی در درجه آزادی Pitch، نوسانات مطلوبی را جهت استحصال انرژی الکتریکی مهیا می‌کند.



شکل (۱۲): مقادیر نیرو و گشتاور جرم افزوده در موقعیت محدوده بندر نوشهر

### ۳-۷- گشتاور استحصالی توسط سیستم انتقال قدرت<sup>۱</sup>

همانطور که مشاهده می‌شود، گشتاور وارد بر سیستم انتقال قدرت در حالت حرکت رو به جلوی مبدل (افزایش فشار) بیشتر از مقدار گشتاور وارده در زمان حرکت برگشتی (کاهش فشار) است. که این مورد در مقایسه با سایر مبدل‌ها موجب بهبود عملکرد مبدل و همچنین کاهش میرایی نوسانات خواهد شد.

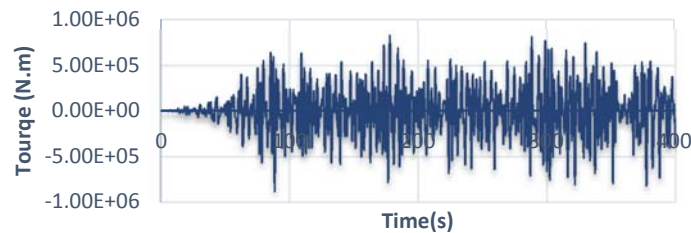


شکل (۱۳): گشتاور سیستم انتقال قدرت در موقعیت محدوده بندر نوشهر

1. Power Take Off System (PTO)

### ۳-۸- گشتاور کل وارد بر صفحه مبدل

مقدار گشتاور کل (که برآیندگیری شده از تمامی نیروهای وارد بر مبدل است) در مبدل در نظر گرفته شده در بندر نوشهر ارزیابی و مقایسه می‌گردد. شکل زیر مقادیر گشتاور وارد بر صفحه مبدل طراحی شده در بندر نوشهر را نشان می‌دهد. این مقادیر برای بنادر امیرآباد و بندر انزلی نیز در پژوهش (امینی ۱۳۹۸) محاسبه و بررسی شده است.

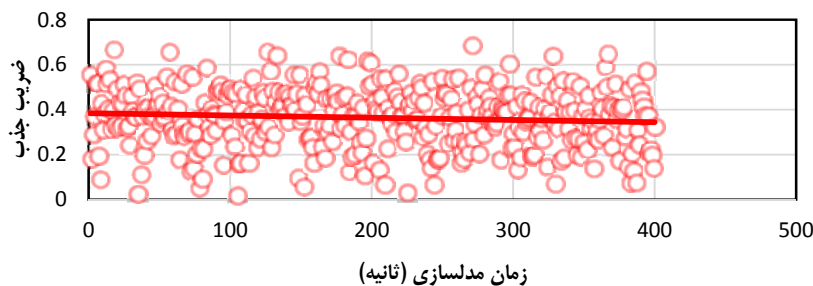


شکل (۱۴): مقادیر گشتاور کل اعمالی بر مبدل بندر نوشهر

با مقایسه این نمودار با مطالعات انجام شده پیشین در بنادر انزلی و امیرآباد مشاهده می‌شود، مقادیر گشتاورهای وارده بر صفحه مبدل بندر نوشهر بیشتر از دو بندر دیگر است. اما باید توجه داشت که صرفاً افزایش مقادیر گشتاورهای وارد بر صفحه مبدل منجر به افزایش انرژی استحصال شده نخواهد شد، و باید تغییر مکان‌های صفحه مبدل نیز به طور همزمان در کنار سایر شرایط محیطی مدنظر قرار گیرد. مقادیر بیشینه گشتاوری محرک مؤثر بر مرکز فشار صفحه مبدل (در زمان حرکت تحت فشار ناشی از برخورد تاج موج) در بنادر نوشهر، انزلی و امیرآباد به ترتیب برابر ۸۳۲ کیلونیوتن متر، ۶۳۰ کیلونیوتن متر و ۶۲۱ کیلونیوتن متر در هر گام زمانی خواهد بود. همچنین مقادیر بیشینه گشتاوری بازگرداننده مؤثر بر مرکز فشار صفحه مبدل (در زمان حرکت برگشتی تحت کاهش فشار ناشی از برخورد قعر موج) در بنادر نوشهر، انزلی و امیرآباد به ترتیب برابر ۸۸۱ کیلونیوتن متر، ۵۹۸ کیلونیوتن متر و ۵۸۸ کیلونیوتن متر در هر گام زمانی خواهد بود.

### ۳-۹- مقایسه ضریب جذب مبدل‌های طراحی شده در بنادر مورد مطالعه با استفاده از ماژول WEC-Sim

با توجه به استفاده از تئوری امواج کوتاه نامنظم، در هر گام زمانی، مقدار ضریب جذب تغییر خواهد یافت. به این منظور مقادیر ضریب جذب در بندر نوشهر در گام‌های زمانی محاسبه شده و در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.



شکل (۱۵): ضریب جذب برای بندر نوشهر در هر گام زمانی

مقادیر دقیق ضریب جذب، مقادیر انرژی کل امواج و انرژی جذب شده توسط مبدل در محدوده بندر نوشهر در جدول زیر بررسی شده است.



جدول (۶): مقادیر انرژی امواج، انرژی جذب شده و ضریب جذب در محدوده بندر نوشهر

نام بندر	ضریب جذب (درصد)	انرژی امواج برخوردی (KJ)	انرژی جذب شده (KJ)
نوشهر	62.99	3226	2031.97

مشاهده می‌شود با توجه به سوابق پژوهش‌های موجود، میزان ضریب جذب (بازدهی) مبدل طراحی شده در این پژوهش تقریباً ۷٪ بالاتر از ضرایب جذب سایر مبدل‌های پیشنهادی موجود (در دسته نوسانگر دورانی) بوده است.

## ۴- نتیجه گیری

جهت مقایسه بین مبدل‌های مختلف انرژی امواج، و با در نظر داشتن شاخص‌هایی همچون افق توسعه پژوهش، هزینه‌های اجرایی و بهره‌برداری، نوع حرکت مبدل در برابر امواج و میزان توسعه تجاری، مبدل نوسانگر دورانی (و انواع تکنولوژی‌های توسعه‌داده شده مرتبط)، به‌عنوان یکی از مبدل‌های مطرح جهت پیشبرد امور تحقیقاتی و طراحی مهندسی به‌دست آمده است. همچنین در هر پروژه احداث مبدل انرژی امواج طراحی پارامترهای هندسی مبدل به پارامترهای محیطی محل احداث آن وابسته است. بنابراین قبل از اقدام به طراحی هندسی مبدل باید مکان‌یابی دقیقی از محل احداث آن صورت گیرد و مقادیر پارامترها برای دست‌یابی به نقطه‌ای با حداکثر پتانسیل انرژی امواج ارزیابی گردد. جهت انجام این امر، استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری به عنوان راه‌حل نوآورانه و با هزینه محاسباتی پایین به‌دست آمده است. هرچند که تاکنون در تحقیقات اثر پارامترهای مختلف بر میزان ضریب جذب مبدل انرژی امواج به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته بود، اما الگوریتم بهینه‌سازی امکان بررسی همزمان اثر تغییرات این پارامترها را روی میزان انرژی امواج امکان‌پذیر می‌کند. الگوریتم توسعه‌داده شده امکان بررسی تعداد نامحدود نقاط را در هر محدود انتخابی در اطراف بندر دلخواه را در زمان مناسبی ممکن می‌سازد.

بررسی مقدار نوسان مبدل و گشتاوری وارده به صفحه مبدل نشان داد در بنداری که مقادیر بیشتری ارتفاع موج به مبدل برخورد می‌کند، مقدار گشتاوری کل وارده به صفحه مبدل هم بیشتر خواهد بود. هرچند این عامل به تنهایی نمی‌تواند موجب افزایش ضریب جذب مبدل گردد و باید در کنار سایر عوامل محیطی در معادله ضریب جذب وارد گردد. به عنوان یک پارامتر تعیین‌کننده می‌توان گفت مقادیر توان کل وارده به صفحه مبدل می‌تواند به‌عنوان معیار بازدهی مبدل نوسانگر دورانی در کنار ضریب جذب، مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نهایی مدلسازی، نقطه با مشخصات داده شده در بندر نوشهر را دارای بیشترین پتانسیل احداث سیستم مبدل انرژی امواج از نوع نوسانگر دورانی معرفی کرده و با بازدهی ۶۳٪، بیشترین ضریب جذب را دارا بوده است. در انتها به نظر می‌رسد روند طی شده در این پژوهش می‌تواند به عنوان روندی منطقی و جامع در طی پروژه‌های دریایی در کنار طرح‌های توجیهی اقتصادی، به پیشبرد و توسعه سیستم‌های مبدل انرژی امواج در سواحل شمالی و جنوبی کشور منجر گردد.

## مراجع

۱. امینی، عرفان. (۱۳۹۸). بررسی اثر تغییر پارامترهای طراحی بر بهبود عملکرد مبدل انرژی امواج دریا از نوع نوسانگر دورانی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد در گروه سواحل، بندر و سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
۲. چگینی، وحید؛ کامران‌زاده، بهرام؛ اخیانی، محمود؛ اعتمادشهبیدی، امیر؛ محموداف، مسعود؛ طباطبائی، سعید. (۱۳۹۱). پتانسیل‌سنجی انرژی تجدیدپذیر امواج و جریان‌های دریایی در دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان. سومین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران. تهران.
3. Chow, Yi-Chih, Yu-Chi Chang, Da-Wei Chen, Chen-Chou Lin, Shiaw-Yih Tzang. (2018). Parametric design methodology for maximizing energy capture of a bottom-hinged flap-type WEC with medium wave resources. *Renewable energy* 126. pp: 605-616.
4. Folley, M., Whittaker, T.J.T., Henry, A. (2007). The effect of water depth on the performance of a small surging wave energy converter. *Ocean Engineering*.
5. Henry, A., Doherty, K., Cameron, L., Whittaker, T., Doherty, R. (2011). Advances in the Design of the Oyster Wave Energy Converter. pp:1-10.
6. Henry, A. (2008). The hydrodynamics of small seabed mounted bottom hinged wave energy converters in shallow water. The Queen's University of Belfast.

7. Mirjalili S., Mirjalili SM., Lewis A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advance Engineering Software*.
8. Renzi E., Doherty K., Henry A., Dias F. (2014). How does Oyster work? the simple interpretation of Oyster mathematics. *European Journal of Fluid Mechanics*. pp 47:124–31.
9. Ruehl K., Michelen C., Bosma B., Yu Y. (2016). WEC-SIM Phase 1 Validation Testing - Numerical Modeling of Experiments. *Proceedings of the ASME , 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2016*. pp 1–9.
10. Ruiz P., Nava V., Topper MBR., Minguela PR., Ferri F., Kofoed J. (2017). Layout optimisation of wave energy converter arrays. *Energies*. Volume 10(9). pp: 1–17.
11. Tom, N., Wright A., Lawson M., Yu Y. (2015) Preliminary Analysis of an Oscillating Surge Wave Energy Converter with Controlled Geometry. *Eur Wave Tidal Energy Conf*. pp1–10.
12. Gomes R., Lopes M., Henriques J. (2011). A Study on the Wave Energy Conversion by Submerged Bottom-hinged Plates. *Eur Wave Tidal Energy Conf*.