

Evaluation of wave energy in Chabahar under a high-resolution mid class CMIP6 climate change scenario

Mahmoud Pourali¹, Mohamad Reza Kavianpour^{2*}

1- PhD Student, Civil Engineering dept. K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- PhD, Civil Engineering dept. K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Using sea wave as an energy resource is growing in the world because of its cleanliness and recyclability. Wave energy depends on significant wave height and wave period. These parameters depend on the specification of some other parameters especially the wind field. Blowing the wind over the sea water produces waves and makes them one of the best sources of energies. Hence wave climate depends to wind climate. Variation of the wind climate in the future climate, changes the hydrodynamic of waves including the wave power specification. The CNRM-CM6-SSP2-45 of CMIP6 is one of the middle classes carbon dioxide climate changes and has much application in managing and programing purposes. In this research the effect of this high-resolution climate scenario has been evaluated on the wave power in Chabahar in Sistan and Balouchestan province in the Gulf of Oman. For this, the improved Weibull downscaling technique has been used for downscaling of wind field. Using a calibrated wave model, it has been derived that in a period of ten years leading to 2100, the wave power will increase 0.22 kW/m (equal to 3%) in average. Seasonal variation is more sensible. Fall and Winter have most increasement in decrease. Average seasonal wave power will change in Fall and Winter by +2.27 kW/m (+42%) and -2.24 kW/m (-27%) respectively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 October 2022

Revise Date: 23 February 2023

Accept Date: 06 April 2023

Keywords:

Wave energy

Climate change

Gulf of Chabahar

Emission scenario

Weibull downscaling technique

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.366525.2955>

*Corresponding author: Mohamad Reza Kavianpour.

Email address: kavianpour@kntu.ac.ir

ارزیابی انرژی امواج در چابهار تحت سناریوی اقلیم میانی با مدل وضوح بالای CMIP6

محمود پورعلی^۱، محمدرضا کاویانپور^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

موج یکی از منابع پاک انرژی در دنیا است و استفاده از آن رو به افزایش است. انرژی امواج ناشی از وزیدن باد بر سطح دریاها است. الگوی میدان باد متأثر از شرایط اقلیمی تغییر می‌کند. از این رو و با توجه به تغییرات احتمالی میدان باد در هر یک از سناریوهای اقلیمی، شرایط هیدرودینامیکی امواج و در نتیجه انرژی آنها در آینده تغییر می‌کند. سناریوی CNRM-CM6-SSP2-45 از CMIP6 یک سناریوی اقلیمی میانی و حد وسط با درصد انتشار کربن و افزایش دمای محدود شده و از سناریوهای محتمل اقلیمی است. این سناریو برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی کاربرد فراوان دارد. در این مطالعه اثر تغییرات اقلیم این سناریو بر روی انرژی امواج در محدوده چابهار در سواحل سیستان و بلوچستان ارزیابی شده است. به منظور ریزمقیاس‌سازی از تکنیک ویبول اصلاح شده به روش استاتیکی استفاده شد. با استفاده از یک مدل واسنجی شده موج نتیجه‌گیری شد که انرژی امواج در دوره ده ساله منتهی به سال ۲۱۰۰ نسبت به دوره مشابه خود در صد سال گذشته، افزایش ۰/۲۲ کیلووات در هر متر از موج (معادل ۳ درصد) خواهد داشت. این در حالی است که مقدار فصلی انرژی امواج در چابهار تغییرات محسوستری دارد و از ۲/۲۷ کیلووات (معادل ۴۲ درصد) کاهش در زمستان تا ۲/۲۴ کیلووات در متر (معادل ۲۷ درصد) افزایش در پائیز متغیر است.

کلمات کلیدی: انرژی امواج، تغییر اقلیم، خلیج چابهار، سناریوی انتشار، ریزمقیاس‌سازی ویبول

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.366525.2955
۱۴۰۱/۰۸/۰۱	۱۴۰۱/۱۲/۰۴	۱۴۰۲/۰۱/۱۷	۱۴۰۲/۰۱/۱۷	۱۴۰۲/۱۰/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2023.366525.2955
*نویسنده مسئول:		محمدرضا کاویانپور			
پست الکترونیکی:		kavianpour@kntu.ac.ir			

۱- مقدمه

انرژی موج، به عنوان یک منبع کاملاً تجدیدپذیر، از پاکترین منابع انرژی است. در دهه اخیر استفاده از این نوع انرژی در نواحی نزدیک به دریا مورد استقبال قرار گرفته است. این انرژی به ویژه در نواحی با امواج با ارتفاع بلندتر و پریود بزرگتر می‌تواند به عنوان یکی از اصلی‌ترین جایگزین‌های انرژی فسیلی مدنظر قرار گیرد. چابهار در محدوده سواحل دریای عمان در بین دریا‌های ایران پتانسیل بالایی از این نظر دارد. بلندتر بودن ارتفاع امواج در این ناحیه، تداوم امواج بلند به ویژه در تابستان و نیز همزمانی این امواج با زمان اوج مصرف برق در نواحی جنوبی کشور از عواملی هستند که استفاده از این امواج را به عنوان یک منبع انرژی تأیید می‌کنند. از عوامل مهم دیگر هزینه تولید انرژی الکتریکی به روش تبدیل انرژی فسیلی سوختی به الکتریکی است. انرژی الکتریکی در کشور ایران غالباً با انتقال انرژی فسیلی به موقعیتی نزدیک به محل استفاده و سپس تبدیل آن به انرژی الکتریکی توسط نیروگاه‌های فسیلی انجام می‌شود. بدیهی است در موقعیتی همچون چابهار در استان سیستان و بلوچستان هزینه تمام شده انرژی الکتریکی بالاتر از هزینه آن در نواحی نزدیکتر به منبع انرژی فسیلی است.

انتخاب موقعیت دستگاه‌های استحصال انرژی موسوم به WECs^۱، حایز اهمیت بسیار زیادی است [۱]. نوع دستگاه، عمق در موقعیت نصب و میزان انرژی حاصله به یکدیگر مرتبط هستند و با توجه به یکدیگر انتخاب می‌شوند. بدیهی است نقاط با ارتفاع موج بلندتر و پریود بزرگتر، حاوی انرژی بیشتری هستند. تغییر انرژی موج در اثر تغییر مشخصات مولفه‌های موج در فصول مختلف، امری اجتناب‌ناپذیر است. به طور کلی نقاط با پایداری انرژی بیشتر، برای استحصال انرژی بهتر هستند [۲]. یکی از عواملی که حایز اهمیت فراوانی است، اثر تغییرات اقلیم بر میزان انرژی امواج است. از این رو مطالعات فراوانی در خصوص تغییرات انرژی امواج در اثر تغییر اقلیم انجام شده است [۳-۷].

مدلهای GCM^۲ مدل‌های هواشناسی بزرگ‌مقیاسی هستند که متغیرهای جوی موثر بر اقلیم را در شرایط آینده شبیه‌سازی می‌کنند. این مدل‌ها بر اساس سناریوهای مختلف هستند و با توجه به بزرگ‌مقیاس بودنشان به صورت مستقیم قابل استفاده در مدل‌های مقیاس محلی نیستند. بر اساس آخرین آپدیتی که IPCC^۳ که برای مدل‌های CMIP6^۴ ارائه نمود، متغیرهای اقلیمی تحت SSP^۵های مختلف ارائه شده‌اند. منبع باد تحت شرایط اقلیمی و سناریوهای متفاوت CMIP6 در اروپا و شمال آمریکا توسط Martinez و Iglesias [۸ و ۹] ارزیابی شده‌اند. این در حالی است که متغیرهای موج همچون ارتفاع، پریود و ... به صورت مستقیم در مدل‌های GCM ارائه نمی‌شوند. با توجه به اینکه موج از وزش باد تشکیل می‌شود، به یک مدل موج واسط برای محاسبه مشخصات موج با استفاده از میدان باد نیاز است. برای اینکار در یک شبیه‌سازی عددی از مولفه‌های میدان باد در دو راستای محور x و y با نامهای u و v (و یا سرعت و راستای باد) به عنوان نیروی ایجاد کننده موج در شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

با توجه به بزرگ‌مقیاس بودن داده‌ها، نیاز به ریزمقیاس‌سازی داده‌های مورد استفاده وجود دارد. مدل‌های رگرسیونی، هوش مصنوعی و توزیع ویبول قبلاً به عنوان روش‌های ریزمقیاس‌سازی^۶ باد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در روش ویبول ترتیب و توالی رخدادها دستکاری نمی‌شود و این موضوع برای شبیه‌سازی امواج بسیار حایز اهمیت است. با توجه به اینکه رابطه ویبول ذاتاً به خاطر دو ضریب فرم^۷ به صورت ضربی است، روش ویبول اولیه، که به حالت جمع ارائه شده بود، اصلاح شده است [۱۰]. این کار منجر به مقادیر آماری بهتر در نتایج نسبت به تکنیک مرسوم ویبول می‌شود. در این مطالعه از روش ویبول اصلاحی استفاده شده است.

¹ Wave Energy Converter

² Global Circulation Model

³ Intergovernmental Panel on Climate Change

⁴ Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

⁵ Shared Socio-economic Pathway

⁶ Downscaling

⁷ Form Factors

خلیج عمان در نزدیکی اقیانوس هند شامل محدوده‌ای است که امواج Swell از نواحی جنوب اقیانوس به آن می‌رسد. این ناحیه همچنین در معرض امواج تشکیل شده از بادهای مانسون است. از طرفی در خلیج چابهار یک محدوده ایمن برای پهلوگیری شناورها پدید آمده است و این امر باعث تجمع سکنه و تمرکز انسانی شده است. با توجه به مشخصات گفته شده، این ناحیه پتانسیل بالایی برای استحصال انرژی دارد. پیش از این مطالعاتی بر انرژی امواج در این ناحیه شده است [۱۱ و ۱۲] این مطالعات بر اساس میانگین انرژی امواج بوده‌اند. در [۱۳] یک رویکرد چند عامله برای انتخاب ترکیبی از WECها و موقعیتهای انتخابی در دریای کاسپین (خزر)، خلیج فارس و خلیج عمان ارائه شده است. در مطالعه یادشده عوامل متعددی از جمله انرژی قابل استحصال، میزان قابل دسترس بودن، کل انرژی حاصله و تغییرات میان-فصلی مورد توجه بوده است.

یکی از عواملی که به شدت بر نتایج به دست آمده اثرگذار است، تهیه یک مدل واسنجی شده موج در محدوده مورد مطالعه است. به این منظور از مدل طیفی^۸ نسل سوم MIKE 21 [۱۴] برای شبیه‌سازی امواج استفاده شد. با استفاده از این مدل، مشخصات امواج اعم از ارتفاع، پریود، راستا و انرژی موج محاسبه گردید.

در بخش ۰ در خصوص داده و روش انتخابی توضیح داده شده است. بخش ۰ به ارائه یافته‌های حاصل از این تحقیق می‌پردازد. در بخش ۰ نتایج به دست آمده در این تحقیق ارائه شده است.

۲- داده و روش انتخابی

مراحل کلی متدولوژی این تحقیق به صورت زیر است:

- انتخاب موقعیت مورد مطالعه
- جمع‌آوری داده از دیتاست مورد نظر
- اصلاح (ریزمقیاس‌سازی) میدان باد
- ارزیابی میدان باد حاصله
- تهیه مدل موج واسنجی شده و مدلسازی امواج
- استخراج انرژی موج در گذشته و آینده
- پردازش و ارزیابی تغییرات انرژی

برای محاسبه انرژی موج از مدل عددی MIKE21 SW استفاده شده است. این مدل که بر پایه نسل سوم معادلات موج و به صورت طیفی به حل مسئله می‌پردازد، به صورت مستقیم پارامترهای موج را در هر گام زمانی محاسبه می‌کند. از این رو اثر تغییر اقلیم به صورت غیرمستقیم و با استفاده از میدان باد ریزمقیاس‌سازی شده بر امواج محدود مورد مطالعه دیده می‌شود.

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

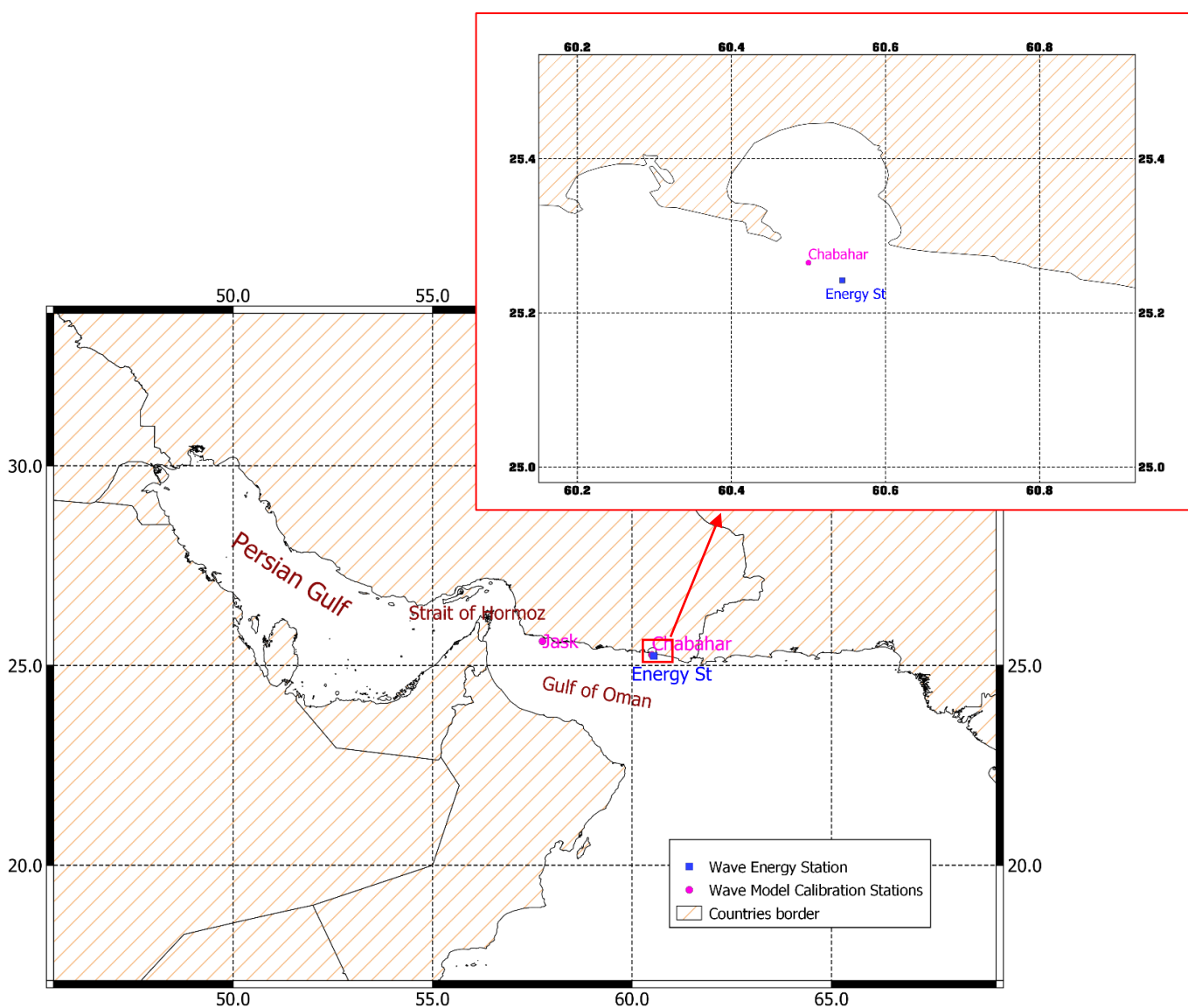
منطقه مورد مطالعه، محدوده سواحل بندر چابهار به عنوان یکی از نواحی پرتانسیل انرژی موج در بخش جنوب شرقی سواحل ایران در خلیج عمان است. به این منظور مدل موج تهیه شده در دو نقطه نزدیک به این موقعیت واسنجی و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفت تا از صحت نتایج مدل اطمینان حاصل شود. ارزیابی انرژی امواج در نقطه‌ای به عمق ۲۹ متر از سواحل خلیج چابهار صورت پذیرفته است. موقعیت نقاط مورد استفاده در مدلسازی و بررسی انرژی موج در

جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است.

⁸ DHI MIKE 21 Spectral Wave

جدول ۱: موقعیت نقاط واسنجی مدل موج

نام ایستگاه	عمق (متر)	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	کاربرد
Jask	۲۵	۲۵/۶۰۸	۵۷/۷۵۳	واسنجی مدل موج
Chabahar	۱۷	۲۵/۲۶۷	۶۰/۵	واسنجی مدل موج
Energy St.	۲۹	۲۵/۲۴۲	۶۰/۵۴۴	بررسی انرژی موج



شکل ۱: موقعیت نقاط واسنجی مدل موج

۲-۲- داده‌های باد مورد استفاده

در این مطالعه از داده‌های دیتاست CNRM-CM6-SSP2-45 از CMIP6 استفاده گردید. این دیتاست علاوه بر همخوانی خوب با داده‌های باد اندازه‌گیری شده، دارای رزولوشن مکانی بالاتری نسبت به سایر GCMها نیز می‌باشد. دیتاست یادشده مربوط به یک سناریوی میانی است. به این معنی که در آن پارامترهای هواشناسی در آینده با میزان کربن حد وسط و میانی (و نه بدبینانه یا خوشبینانه) محاسبه و ارائه شده است. با توجه به هدف کلی این تحقیق که ارزیابی تغییرات انرژی در درازمدت است، تغییرات انرژی امواج طی دو دوره زمانی ده ساله با اختلاف صد سال در گذشته و آینده مورد ارزیابی قرار گرفت. این دوره‌ها شامل سالهای ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ به عنوان دوره گذشته و سالهای ۲۰۹۱ تا ۲۱۰۰ به عنوان دوره آینده هستند.

رزولوشن زمانی داده‌های باد ۳ ساعته و رزولوشن مکانی آنها $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ درجه در هر دو دوره گذشته و آینده موجود است. این داده‌ها به شیوه ویبول اصلاح شده، آنالیز و ریزمقیاس‌سازی شدند. به این منظور از داده‌های ERA5 که مربوط به مدل Reanalysis است، استفاده شد. تجربه نشان داده است که داده‌های ERA5 همخوانی و سازگاری بسیار خوبی با داده‌های اندازه‌گیری داشته است و به همین علت به عنوان داده‌های مرجع برای تصحیح میدان باد استفاده شده است. اصلاح باد بر اساس داده‌های دوره سالهای ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ صورت پذیرفت.

۲-۳- روش مورد استفاده

در این مطالعه، نسخه بهبود یافته‌ی تکنیک ویبول برای تصحیح نامتقارنی آماری داده‌ها بر میدان باد استفاده شد. نسخه اولیه این تکنیک توسط علیزاده و همکاران [۱۵] و نسخه بهبود یافته توسط پورعلی و همکاران در [۱۰] پیشنهاد شده است. در حالت کلی رابطه ویبول به صورت رابطه (۱) است:

$$f(w) = \frac{k}{A} \left(\frac{w}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{w}{A}\right)^k\right] \quad (1)$$

که در آن w سرعت باد و A و k ضرایب مقیاس و شکل در توزیع ویبول هستند. از این رو با استفاده از روابط ۲ و ۳ بر اساس داده‌های گذشته، محاسبه می‌شوند و با استفاده از روابط ۴ و ۵ بر داده‌های باد CNRM اعمال می‌شوند. این ضرایب در تحقیقی توسط پورعلی و همکاران در [۱۰] ارائه شده است.

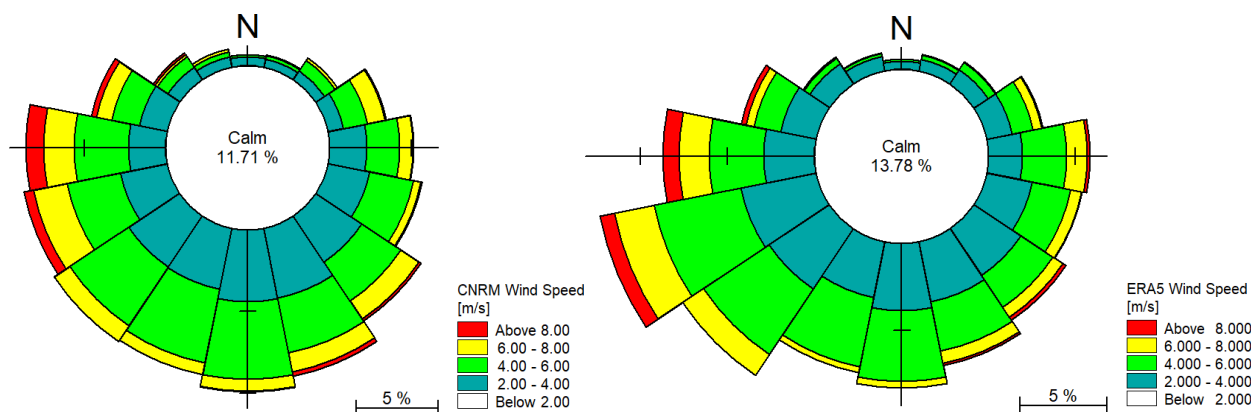
$$D_{A(i)} = \frac{A_{ERA5(i)}^{His}}{A_{CNRM(i)}^{His}} \quad (2)$$

$$D_{k(i)} = \frac{k_{ERA5(i)}^{His}}{k_{CNRM(i)}^{His}} \quad (3)$$

$$A_{CNRM(i)}^{Future} = A_{CNRM(i)}^{Future} \times D_{A(i)} \quad (4)$$

$$k_{CNRM(i)}^{Future} = k_{CNRM(i)}^{Future} \times D_{k(i)} \quad (5)$$

نمونه‌ای از گلباد میدان باد اصلاح شده در شکل ۲ ارائه شده است. این گلباد مربوط به نقطه روبروی خلیج چابهار در دریا است.



شکل ۲: گلباد اصلاح شده CNRM توسط تکنیک ویبول اصلاحی (راست) و گلباد مرجع ERA5 (چپ)

۳- نتایج مدل موج و انرژی امواج

۳-۱- مدل موج

در این مطالعه از مدل موج MIKE 21 SW که یک مدل طیفی نسل سوم است، استفاده شد. این مدل، محاسبات را بر روی یک شبکه محاسباتی مثلثی و نامظم حل می‌کند و به خوبی می‌تواند پدیده‌های هیدرودینامیکی همچون موج نزدیک به ساحل^۹ و فراساحل^{۱۰} را شبیه‌سازی کند. معادله اصلی این مدل به صورت رابطه ۶ است.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \phi} C_{\phi} N + \frac{\partial}{\partial \lambda} C_{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_{\sigma} N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_{\theta} N = \frac{S}{\sigma} \quad (6)$$

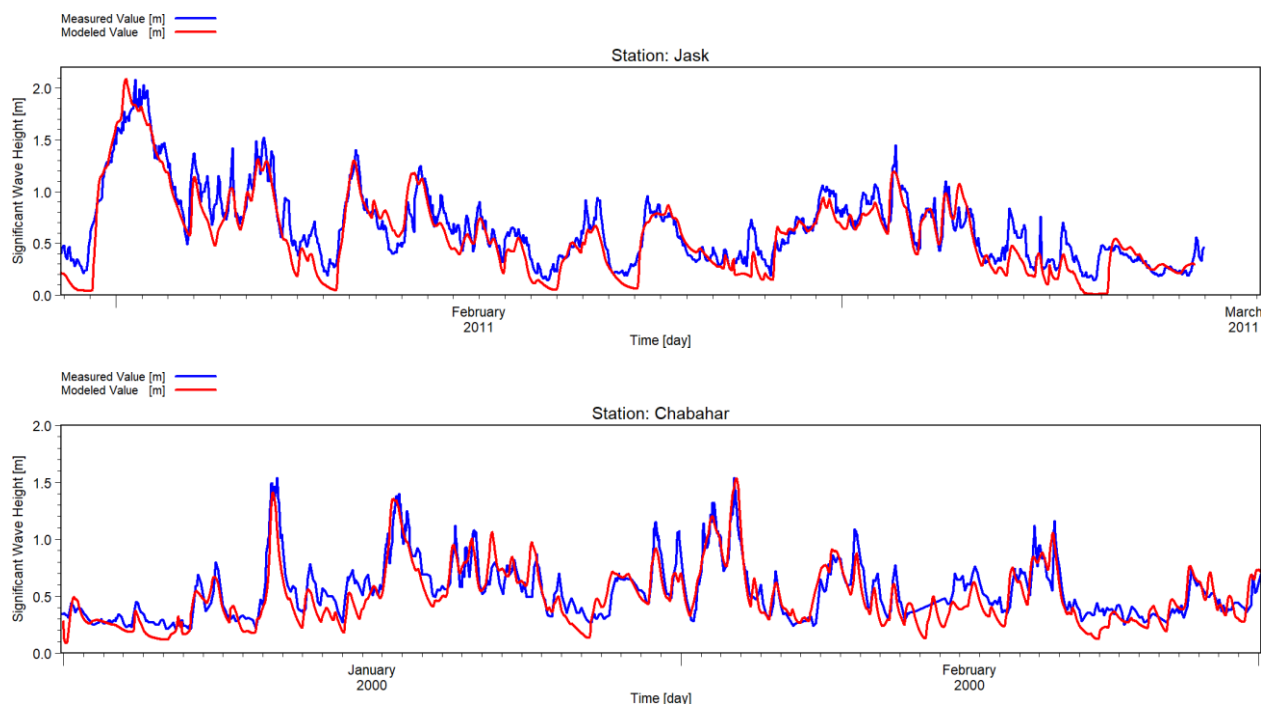
در این رابطه N چگالی^{۱۱}، t زمان، λ و ϕ طول و عرض جغرافیایی، σ فرکانس، C سرعت موج و θ راستای موج است.

مدل موج با مقادیر مختلف برای پارامترهای مورداستفاده در شبیه‌سازی بررسی و در نقاط دارای اندازه‌گیری با مقادیر ثبت شده مقایسه شد و در نهایت مقادیر ۲، ۰/۵ و ۰/۰۰۱ به ترتیب برای پارامتر Cd ، δ و ضریب زبری نکورازده، انتخاب و مدل واسنجی شد. شکل ۳ سری زمانی نتایج به دست آمده را در ایستگاه‌های جاسک و چابهار نشان می‌دهد.

⁹ Near shore

¹⁰ Offshore

¹¹ Action density



شکل ۳: سری زمانی ارتفاع موج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در ایستگاههای جاسک و چابهار

به منظور بررسی دقت مدل واسنجی شده، پارامترهای آماری مقادیر مدلسازی شده نسبت به داده‌های اندازه‌گیری محاسبه شد. روابط آماری ارزیابی شده به صورت معادلات ۶ تا ۹ هستند.

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (X_p - X_m)^2}}{\bar{X}_m} \quad (6)$$

$$CC = \frac{\sum (X_p - \bar{X}_p)(X_m - \bar{X}_m)}{\sqrt{\sum (X_p - \bar{X}_p)^2 \sum (X_m - \bar{X}_m)^2}} \quad (7)$$

$$BIAS = \sum \frac{1}{n} (X_p - X_m) \quad (8)$$

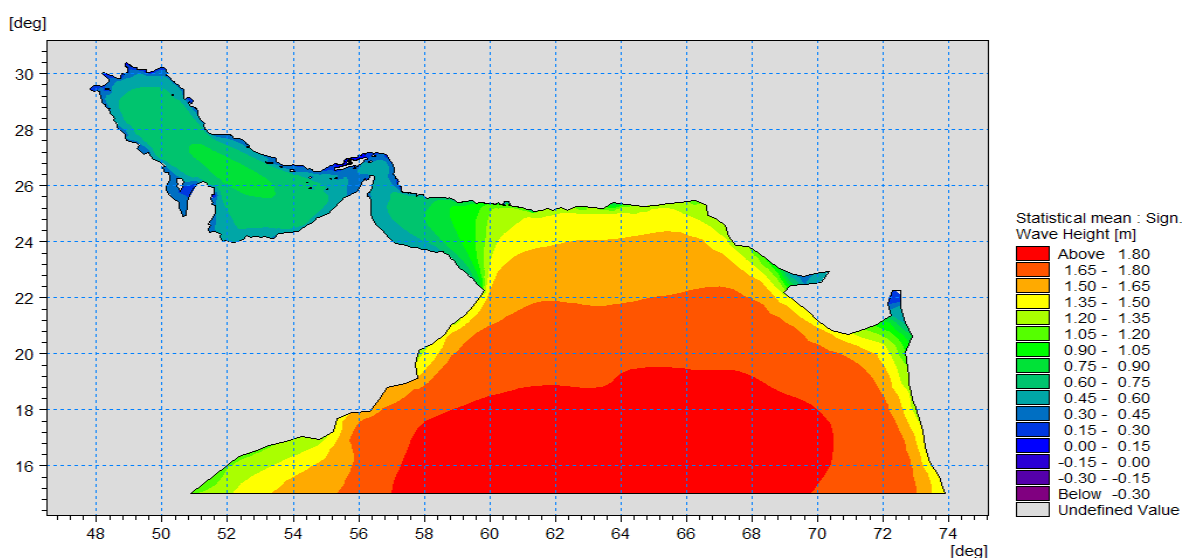
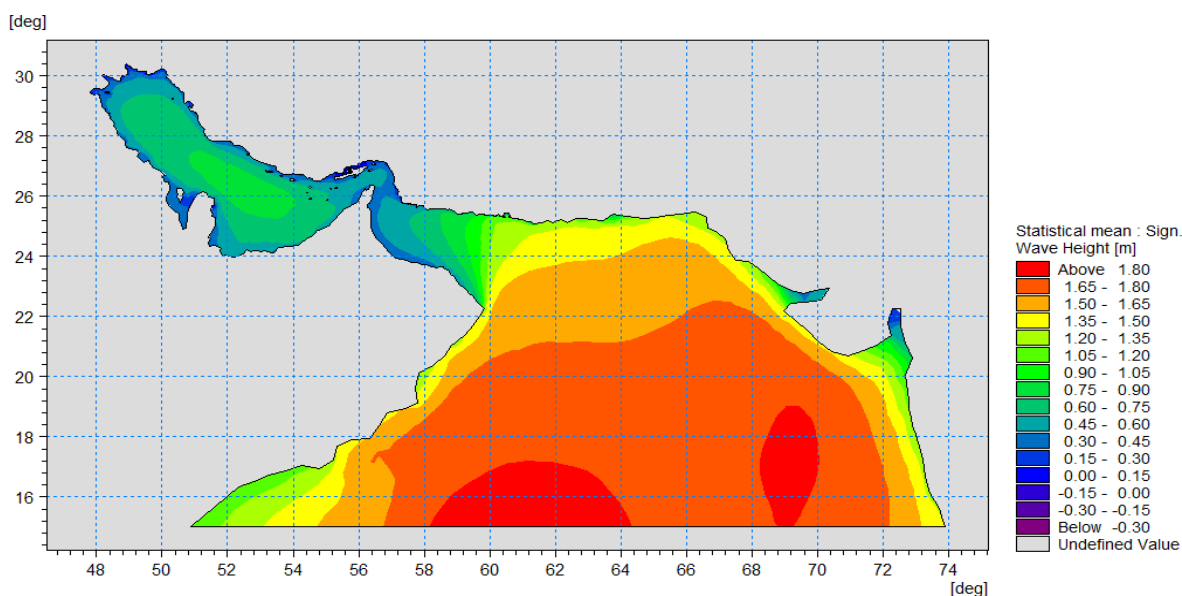
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (X_p - X_m)^2} \quad (9)$$

در روابط فوق، منظور از SI ، CC ، $BIAS$ و $RMSE$ به ترتیب، ضریب پراکندگی داده‌ها، ضریب توفیق داده‌ها (رگرسیون)، انحراف و مجذور میانگین خطاها است. همچنین منظور از X_p ، X_m و n به ترتیب، مقدار پیش‌بینی (در مبحث باد؛ مقدار ریزمقیاس‌سازی شده، در مبحث موج؛ مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل موج)، مقدار اندازه‌گیری مرجع (در مبحث باد؛ داده باد ERA5، در مبحث موج؛ اندازه‌گیری بویه)، و تعداد داده رکورد است.

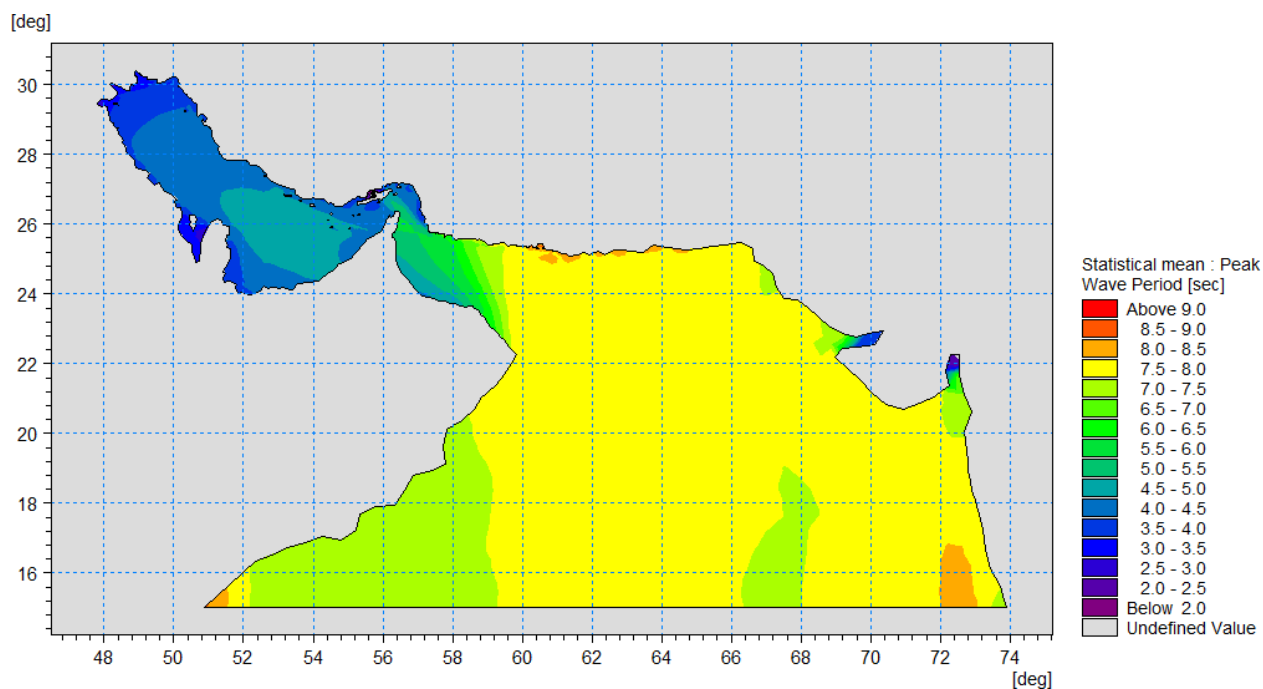
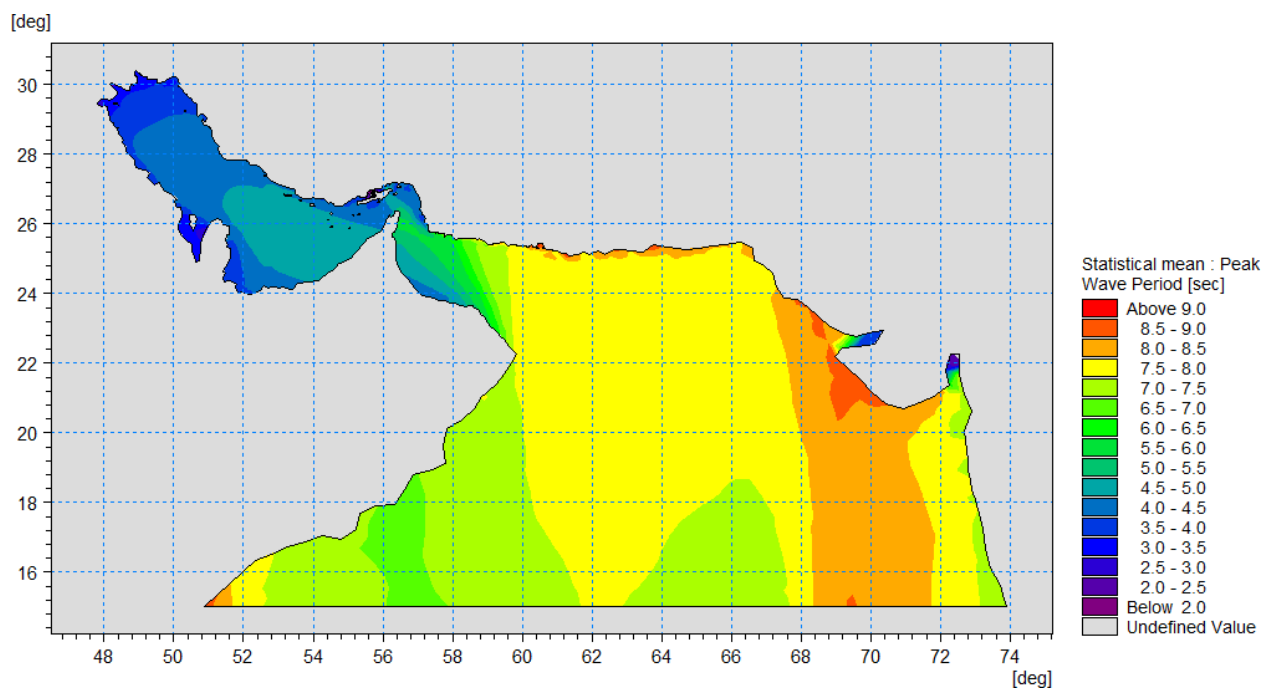
شکل ۴ و شکل ۵ به ترتیب متوسط ارتفاع موج مشخصه و پریود موج را در دوره‌های زمانی گذشته و آینده نشان می‌دهند. راهنمای رنگی دوره‌های گذشته و آینده یکسان‌سازی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مقدار ارتفاع مشخصه و پریود پیک موج، تغییرات جزئی داشته و عمدتاً افزایش یافته است.

جدول ۲: مقادیر آماری داده‌های موج شبیه‌سازی شده

چابهار		جاسک		بویه
Jan & Feb-2000		Feb & Mar-2011		دوره
H_s	T_p	H_s	T_p	پارامتر
۰/۲۱	۰/۱۰	۰/۳۳	۰/۱۶	SI
۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۸۳	۰/۷۶	CC
-۰/۰۴	۰/۰۲	-۰/۰۸	-۰/۰۳	BIAS
۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۷۴	RMSE



شکل ۴: متوسط آماری ارتفاع موج مشخصه در سالهای ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ (بالا) و ۲۰۹۱ تا ۲۱۰۰ (پائین)



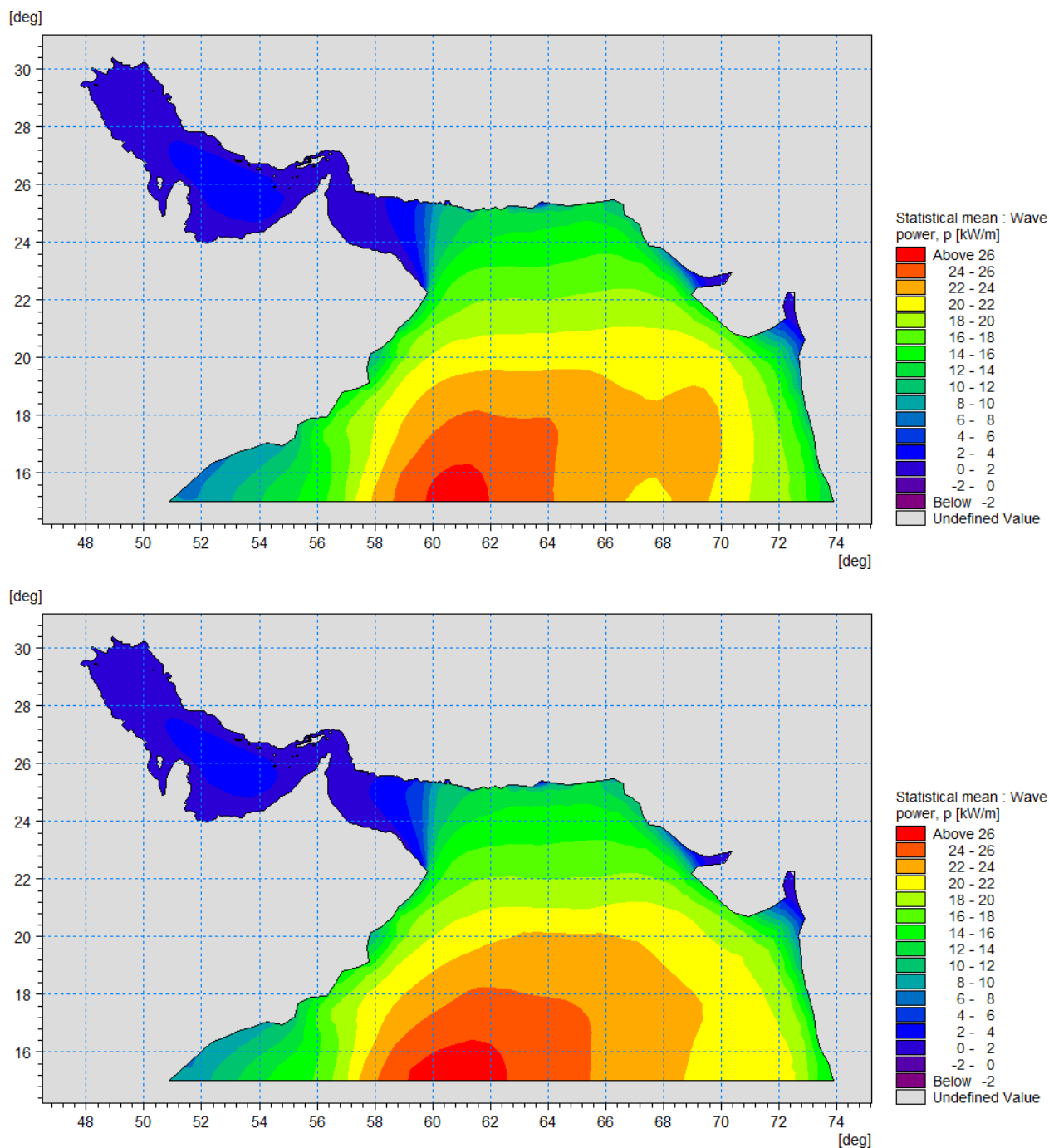
شکل ۵: متوسط آماری پریود موج پیک در سالهای ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ (بالا) و ۲۰۹۱ تا ۲۱۰۰ (پائین)

۳-۲- تغییرات انرژی در اقلیم آینده

انرژی موج بر حسب ارتفاع موج مشخصه و پریود بر حسب kW/m به صورت رابطه ۱۰ است [۱۵ و ۱۶].

$$P \approx 0.49H_s^2T_e \quad (10)$$

پلان دو بعدی انرژی امواج در گذشته و آینده در شکل ۶ نشان داده شده است.



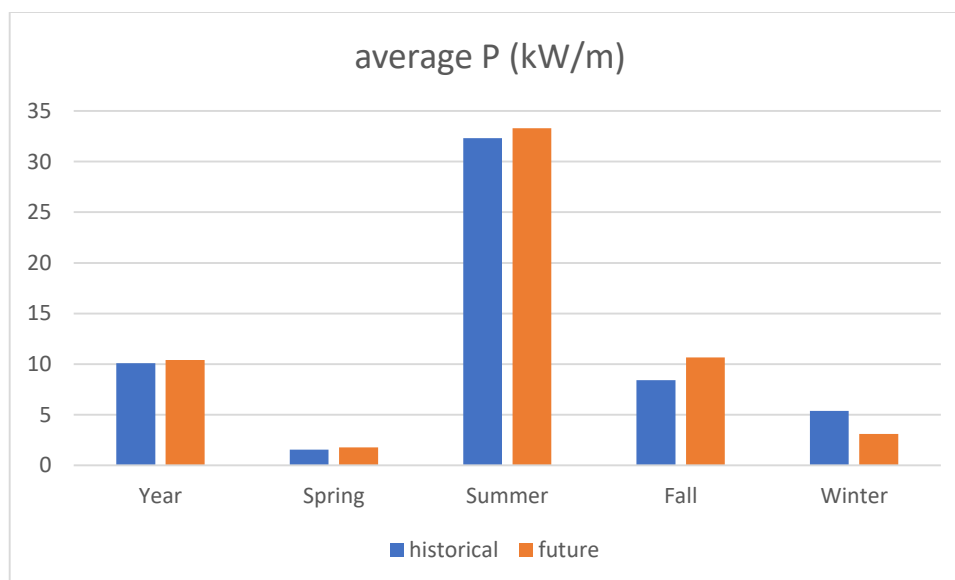
شکل ۶: متوسط آماری مقدار انرژی امواج در سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ (بالا) و ۲۰۹۱ تا ۲۱۰۰ (پائین)

همانند ارتفاع موج مشخصه و پریود پیک موج، تفاوت مقادیر متوسط انرژی در دو دوره ناچیز است. به طور کلی نتیجه گرفته می شود که انرژی امواج بیشتر می شود این افزایش تا ۳ درصد در مقدار میانگین سالانه برآورد می شود. اگرچه مقدار متوسط سالیانه انرژی در آینده تغییرات زیادی نسبت به دوره گذشته ندارد اما بررسی ها نشان می دهد که تغییرات فصلی انرژی به ویژه در دو فصل پائیز و زمستان قابل توجه است. نمونه تغییرات انرژی در محدوده مورد مطالعه در یک نقطه انتخابی در عمق ۲۹ متری در چابهار، انرژی امواج استخراج و مقادیر آن پردازش شد. موقعیت نقطه انتخابی در

جدول ۱ و شکل ۱ ارائه شده است. جدول ۳ و شکل ۷، شکل ۶ مقدار متوسط انرژی موج را در فصول مختلف نشان می دهند.

جدول ۳: مقدار متوسط انرژی امواج در گذشته و آینده

دوره	سال	بهار	تابستان	پائیز	زمستان	واحد
۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰	۱۰/۱۰	۱/۵۶	۳۲/۳۲	۸/۴۱	۵/۳۷	kW/m
۲۰۹۱ تا ۲۱۰۰	۱۰/۴۰	۱/۷۹	۳۳/۲۹	۱۰/۶۵	۳/۰۹	kW/m
تغییرات	+۳	+۱۴	+۳	+۲۷	-۴۲	%



شکل ۷: مقدار متوسط انرژی توان موج در فصول مختلف

همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می شود مقدار توان موج در فصل تابستان به طرز محسوسی بیشتر از سایر فصول است. در این فصل مقدار توان موج ۳۲/۳ کیلووات در هر متر از موج است که در آینده به ۳۳/۳ کیلووات نیز خواهد رسید. علت شدیدتر بودن توان موج در تابستان به خاطر بادهای موسوم به باد مانسون است. ناحیه مورد مطالعه متأثر از اقلیمهای باد متعدد همچون مانسون^{۱۲} از جنوب شرق و اقیانوس هند و باد شمال^{۱۳} از شمال غرب است [۱۷].

¹² Monsoon

¹³ Shamal Wind

به طور کلی متوسط انرژی امواج در طول سال در حدود ۱۰ کیلووات در هر متر است. مقدار انرژی در طول سال متفاوت است به نحوی که در روزهایی از فصل تابستان به حدود ۷۰ کیلووات در متر نیز میرسد. مقدار متوسط فصلی نیز از کمتر از ۲ در بهار تا بیش از ۳۰ کیلووات در هر متر از جبهه موج در تابستان متغیر است. نتایج شبیه‌سازی سناریوی مورد بررسی در آینده نشان می‌دهد که این رویه کلی در آینده نیز حفظ می‌شود.

با توجه به اینکه مقدار متوسط توان موج ۱۰/۱ کیلووات است، این میزان از توان موج برای استخراج انرژی مناسب ارزیابی می‌شود. گفتنی است دستگاه‌های استخراج انرژی بسته به انواع مختلفی کردند، دارای آستانه‌های متفاوتی برای بهره‌برداری هستند. بسیاری از این دستگاه‌ها با آستانه ۲ کیلووات به استخراج انرژی موج می‌پردازند و از این رو توان موج متوسط بیش از ۱۰ کیلوواتی، مناسب ارزیابی می‌شود. این در حالی است که در ۱۰ سال منتهی به سال ۲۱۰۰ میلادی، میزان توان موج به طور میانگین، ۳ درصد نسبت به ۱۰ سال منتهی به سال ۲۰۰۰ افزایش می‌یابد. میزان تغییرات انرژی موج چندان محسوس نیست و این خود نوید قابلیت اتکا و پایداری انرژی موج را دارد و نکته مثبتی ارزیابی می‌شود. این در حالی است که در این محدوده انرژی امواج در تابستان به طرز محسوسی نسبت به انرژی امواج در سایر فصول بیشتر است. در همین فصل انرژی موج در ۱۰ سال منتهی به قرن بعد، ۳ درصد افزایش می‌یابد. فصل پاییز به عنوان دومین فصل پر انرژی از منظر انرژی موج در این ناحیه، در گذشته ۸/۴۱ کیلووات در هر متر از موج انرژی داشته است که در این فصل نیز در دهه منتهی به سال ۲۱۰۰ انرژی موج بیش از ۲ کیلووات معادل ۲۷ درصد افزایش یافته و به ۱۰/۶۵ کیلووات میرسد. در فصول زمستان و بهار، انرژی موج مقادیر بسیار کمتری دارد. در فصل بهار که کمترین مقدار انرژی موج حاصل می‌شود تغییر انرژی از منظر میزان تفاوت ناچیز است و به ۰/۳ کیلووات افزایش محدود می‌شود. این در حالی است که در فصل زمستان به صورت برعکس انرژی موج با بیش از ۲ کیلووات کاهش، کاهشی در حدود ۴۲ درصد را رقم خواهد زد. با توجه به اینکه این فصل از فصول کم انرژی از نظر انرژی موج است و در سایر فصول سال انرژی موج در مجموع به مقدار بیشتری افزایش می‌یابد، تاثیر کاهش انرژی در زمستان قابل اغماض است.

۴- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این تحقیق به صورت زیر خلاصه شده است:

۱. به طور کلی در سناریوی میانی تغییرات اقلیم، انرژی میانگین سالانه امواج در محدوده بندر چابهار تغییرات زیادی ندارد و با افزایش ۳ درصدی به ۱۰/۴ کیلووات در متر میرسد.
۲. انرژی میانگین فصلی امواج تغییرات محسوستری دارد. در دو فصل پرانرژی تابستان و پاییز، انرژی موج افزایش و در فصل زمستان که یکی از دو فصل با انرژی موج کمتر است، انرژی موج کاهش می‌یابد.
۳. فصل تابستان در آینده نیز همانند گذشته پرانرژی‌ترین فصل خواهد بود. این در حالی است که فصل پاییز بیشترین افزایش انرژی موج را خواهد داشت. مقدار افزایش انرژی در این فصل به طور متوسط ۲/۲۴ کیلووات در متر برآورد می‌شود که نشان از افزایش ۲۷ درصدی نسبت به گذشته دارد.
۴. فصل زمستان کم انرژی‌تر از گذشته خواهد بود و با ۴۲ درصد کاهش انرژی، انرژی متوسط امواج آن به ۳/۰۹ کیلووات در متر خواهد رسید.
۵. مقدار انرژی موج در تابستان بسیار مناسب ارزیابی می‌شود و با توجه به مصرف بالاتر انرژی الکتریکی در فصل تابستان در محدوده مطالعاتی (با توجه به مصرف کولرهای گازی در این فصل) میتواند به عنوان منبع کمکی انرژی بسیار مناسب، مدنظر قرار گیرد.

مراجع

- [1] Şan M, Akpınar A, Bingölbali B, Kankal M. Geo-spatial multi-criteria evaluation of wave energy exploitation in a semi-enclosed sea. *Energy* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118997>.
- [2] Portilla J, Sosa J, Cavaleri L. Wave energy resources: Wave climate and exploitation. *Renewable Energy* 2013. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.032>.
- [3] Alizadeh MJ, Alinejad-Tabrizi T, Kavianpour MR, Shamsirband S. Projection of spatiotemporal variability of wave power in the Persian Gulf by the end of 21st century: GCM and CORDEX ensemble. *Journal of Cleaner Production* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120400>.
- [4] Sierra JP, Casas-Prat M, Campins E. Impact of climate change on wave energy resource: The case of Menorca (Spain). *Renewable Energy* 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.060>.
- [5] Rusu L. Evaluation of the near future wave energy resources in the Black Sea under two climate scenarios. *Renewable Energy* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.092>.
- [6] Cuttler MVW, Hansen JE, Lowe RJ. Seasonal and interannual variability of the wave climate at a wave energy hotspot off the southwestern coast of Australia. *Renewable Energy* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.058>.
- [7] Iribarren D, Martín-Gamboa M, Navas-Anguila Z, García-Gusano D, Dufour J. Influence of climate change externalities on the sustainability-oriented prioritisation of prospective energy scenarios. *Energy* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117179>.
- [8] Martinez A, Iglesias G. Wind resource evolution in Europe under different scenarios of climate change characterised by the novel Shared Socioeconomic Pathways. *Energy Conversion and Management* 2021;234:113961. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113961>.
- [9] Martinez A, Iglesias G. Climate change impacts on wind energy resources in North America based on the CMIP6 projections. *Science of The Total Environment* 2022;806:150580. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150580>.
- [10] Pournali M, Kavianpour MR, Kamranzad B, Alizadeh MJ. Future variability of wave energy in the Gulf of Oman using a high resolution CMIP6 climate model. *Energy* 2023;262:125552. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125552>.
- [11] Saket A, Etemad-Shahidi A. Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran. *Renewable Energy* 2012. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.09.024>.
- [12] Kamranzad B, Chegini V, Etemad-Shahidi A. Temporal-spatial variation of wave energy and nearshore hotspots in the Gulf of Oman based on locally generated wind waves. *Renewable Energy* 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.084>.
- [13] Kamranzad B, Hadadpour S. A multi-criteria approach for selection of wave energy converter/location. *Energy* 2020;204:117924. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117924>.
- [14] DHI. MIKE 21 SW - Spectral Wave Model: Scientific Documentation. DHI Water and Environment 2014.
- [15] Tucker MJ, Pitt EG. *Waves in ocean engineering* 2001.
- [16] (U.S.) RE and AUP. *Technology white paper on wave energy potential on the U.S. Outer Continental Shelf*. 2006.
- [17] Sanil Kumar V, Singh J, Pednekar P, Gowthaman R. Waves in the nearshore waters of northern Arabian Sea during the summer monsoon. *Ocean Engineering* 2011. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.11.009>.