



ORIGINAL RESEARCH PAPER (Engineering)

Numerical Simulation of Kyarr Tropical Cyclone Waves in Makran Coastlines

Seyede Masoome Sadaghi ^{1,*}, Ali Asghar Golshani ², Mohammad Hosein Nemati ³¹ Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran² Assistant Professor, Islamic Azad University, Central Tehran branch, Tehran, Iran³ Head of Coastal Engineering Office, Ports and Maritime Organization, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Code: A-10-1642-1

Article History:

Received: 07/04/2021

Revised: 26/06/2021

Accepted: 02/07/2021

Keywords:

Tropical Cyclone

Kyarr

Numerical Simulation

Makran Coastlines

*Corresponding author:

✉ s.sadaghi@bhrc.ac.ir

10.52547/joc.12.46.39

ABSTRACT

Background and Objectives: Kyarr Tropical Cyclone was formed on October 2019 in the Arabian Sea and affected Makran coastlines in Oman Sea. Some small rock armored breakwaters were damaged consequently though they were designed to withstand similar cyclones. The aim of the present study is to numerically simulate Kyarr cyclone and investigate the characteristics of the induced waves on Makran coastlines. The design assumptions are then compared to the simulation results.

Methods: In this simulation, DHI-MIKE software has been used and the Persian Gulf, Oman Sea and some parts of the Arabian Sea up to the five-degree north line are modeled. The two-dimensional wind and pressure field are reproduced to simulate storm conditions based on parametric models.

Findings: According to the simulation results, waves with characteristic heights of up to 3 meters and peak periods of up to 16 seconds are formed near ports in shallow areas of Makran coastlines, which led to damage to some of small rock armored breakwaters.

Conclusion: Kyarr cyclone simulation results show that the induced waves near ports in shallow areas of Makran coastlines had significant heights consistent with the assumptions used in the design of coastal breakwaters but in terms of wave length, longer periods were observed which led to increased run-up, overtopping and consequent damage to the rock armored structures.

©2021 JOC. All rights reserved



NUMBER OF TABLES

2



NUMBER OF FIGURES

12



NUMBER OF REFERENCES

10

شبیه‌سازی عددی امواج ناشی از طوفان کبار در سواحل مکران

سیده معصومه صدیقی^{۱*}، علی اصغر گلشنی^۲، محمدحسین نعمتی^۳^۱ استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی^۲ استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی تهران مرکز^۳ رئیس اداره مهندسی سواحل، سازمان بنادر و دریانوردی

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸

تاریخ بازبینی: ۱۴۰۰/۰۴/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۱

چکیده

پیشینه و اهداف: طوفان کبار در آبان‌ماه سال ۱۳۹۸ در دریای عرب شکل گرفت و سواحل مکران از دریای عمان را تحت تأثیر قرار داد. برخی از موج‌شکن‌های سنگی کوچک با اینکه برای شرایط طوفان‌های حاره‌ای طراحی شده بودند، در نتیجه وقوع طوفان دچار آسیب شدند. هدف از مطالعه حاضر، شبیه‌سازی عددی طوفان کبار و بررسی مشخصات امواج ناشی از این طوفان در سواحل مکران است. نهایتاً نتایج مدل‌سازی با فرضیات طراحی موج‌شکن‌ها مقایسه شده‌اند.

روش‌ها: در این شبیه‌سازی که با استفاده از نرم‌افزار مایک انجام شده است، محدوده خلیج فارس و دریای عمان و بخشی از دریای عرب تا خط پنج درجه شمالی مدل شده است. میدان باد و فشار دوبعدی برای شبیه‌سازی شرایط طوفان بر اساس یک مدل تحلیلی گردابه‌ای بازتولید شده است.

یافته‌ها: براساس نتایج شبیه‌سازی، امواج با ارتفاع موج مشخصه تا حدود ۳ متر و پریود پیک تا ۱۶ ثانیه در نزدیکی بنادر و در نواحی کم‌عمق سواحل مکران تشکیل شده‌اند که منجر به آسیب به برخی از موج‌شکن‌های کوچک سنگی شده‌اند.

نتیجه‌گیری: نتایج شبیه‌سازی طوفان کبار نشانگر آن است که امواج ایجاد شده در نواحی کم‌عمق سواحل مکران از نظر ارتفاع مشخصه، مقادیری در حدود فرضیات طراحی موج‌شکن‌های ساحلی داشته‌اند اما پریود امواج بیش از مقادیر متناظر در طراحی به دست آمده است که منجر به بالاروی و روگذری بیشتر و در نتیجه آسیب به موج‌شکن‌های سنگی شده است.

واژگان کلیدی:

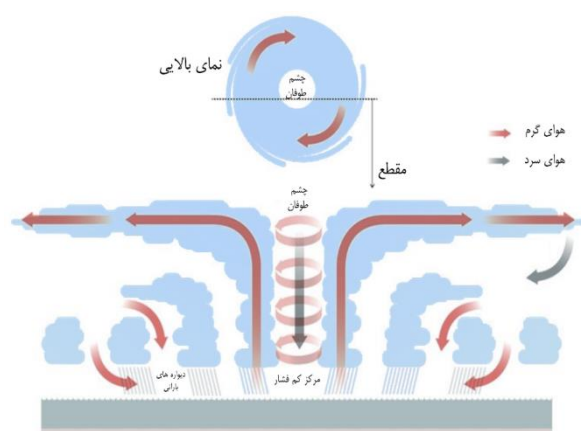
طوفان استوایی
کبارشبیه‌سازی عددی
سواحل مکران.

*نویسنده مسئول

✉ s.sadaghi@bhr.ac.ir

مقدمه

میلی‌بار و مربوط به مرکز تایفون تیپ^۲ (سال ۱۹۷۹ میلادی) است. چشم طوفان که قطر آن معمولاً بین ۳۰ تا ۶۵ کیلومتر است، منطقه آرامی است. در مقابل در دیواره ابری پیرامونی چشم طوفان، سرعت باد به بیشترین مقادیر رسیده و تبخیر و تراکم ابرها حداکثر است. بیشترین تخریب‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که دیواره چشم طوفان به سواحل برخورد می‌کند. میدان باد سطحی ناشی از طوفان‌های استوایی، به صورت چرخشی در اطراف دیواره چشمی ایجاد می‌شود و قطر چرخش آن بین حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلومتر است. با توجه به حرکت کره زمین و اثر کریولیس^۳، جهت چرخش این چرخندها در نیمکره شمالی به صورت پادساعتگرد و در نیمکره جنوبی ساعت‌گرد است. در شکل ۱ نحوه جریان هوای گرم و سرد و شکل‌گیری طوفان‌های استوایی نشان داده شده است.



شکل ۱: نحوه جریان هوای گرم و سرد و شکل‌گیری طوفان‌های حاره‌ای

Fig. 1: Warm and cold air fields in cyclone formation

الگوی کلی خطوط هم‌فشار و جهت حرکت در طوفان‌های استوایی در شکل ۲ نشان داده شده است. نیروی گرادیان فشار به سمت ناحیه کم فشار چشم طوفان و نیروهای گریز از مرکز و کریولیس در جهت مخالف گرادیان فشار ایجاد می‌شوند. تعادل این سه نیرو با عنوان تعادل گرادیان باد شناخته می‌شود. اما در نزدیکی سطح زمین، نیروی اصطکاک در جهت مخالف باد ایجاد می‌شود و باعث کاهش سرعت باد و نیروهای گریز از مرکز و کریولیس می‌گردد اما تاثیری بر گرادیان فشار ندارد. در نتیجه، اصطکاک باعث می‌شود که باد در نزدیکی سطح زمین به سمت داخل و به طرف چشم طوفان متمایل شود و به گردش ثانویه طوفان کمک کند [۳].

زاویه انکسار θ نسبت به مؤلفه چرخشی سرعت، از روابط (۱) محاسبه می‌شود که در آن R_m فاصله مرکز طوفان با نقطه‌ای است که بیشترین سرعت را دارد (تائبی ۱۳۸۷).

$$\begin{aligned} \theta &= 10^\circ & \text{for } 0 < R < R_m & \quad (1) \\ \theta &= 10^\circ + (R - R_m) / (0.2R_m) \times 15^\circ & \text{for } R_m < R \leq 1.2R_m \\ \theta &= 25^\circ & \text{for } 1.2R_m < R \end{aligned}$$

طوفان‌های استوایی یکی از رایج‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی در جهان است که هر ساله منجر به خسارات مالی و جانی بسیاری در مناطق استوایی و نیمه استوایی می‌شود. با توجه به اینکه منبع اصلی انرژی این طوفان‌ها، آب‌های گرم اقیانوسی است، مناطق ساحلی در مقایسه با نواحی خشکی، بیشتر در معرض آسیب هستند. آسیب به نواحی ساحلی می‌تواند ناشی از وزش باد و بارندگی شدید، ایجاد گردبادهای عظیم، امواج بزرگ و افزایش تراز آب بر اثر برکشند طوفان (ناشی از اختلاف فشار و وزش باد) باشد. در سال‌های اخیر، همسو با تغییرات اقلیمی از جمله افزایش دمای سطح اقیانوس‌ها و بالا رفتن تراز سطح آب آن‌ها، مدت زمان و شدت این طوفان‌ها افزایش یافته است [۱]. بنابراین، احداث، بازطراحی و بازسازی سازه‌های حفاظتی در سواحل اهمیت بیشتری پیدا کرده است.

یکی از مناطق مستعد برای شکل‌گیری طوفان‌های استوایی دریای عرب در اقیانوس هند شمالی است. طوفان‌های ایجاد شده در دریای عرب اغلب به سمت غرب (سواحل عمان) حرکت نموده و یا به سمت شمال تغییر جهت داده و سواحل هند و پاکستان را مورد اصابت قرار می‌دهد [۲]. این طوفان‌ها در موارد نادری نیز وارد دریای عمان شده و سواحل مکران از کشورمان را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در مواردی آسیب‌هایی به سازه‌های حفاظتی ساحلی به ویژه موج‌شکن‌های برخی بنادر کشورمان وارد نموده‌اند. برای نمونه در اوایل آبان ماه سال ۱۳۹۸، وقوع طوفان حاره‌ای موسوم به کیار در محدوده شمال اقیانوس هند و دریای عرب، تعدادی از موج‌شکن‌های مردمی احداث شده در سواحل استان سیستان و بلوچستان را دچار آسیب کرده است. با توجه به نقش این طوفان در تخریب سازه‌های ساحلی کشور، در این مقاله به بررسی عددی تولید و انتشار امواج ناشی از طوفان کیار پرداخته می‌شود.

روش پژوهش

۱. معرفی کلی طوفان‌های استوایی

۱-۱ نحوه شکل‌گیری و الگوی حرکت

طوفان‌های استوایی، چرخندهای عظیمی با یک مرکز کم‌فشار هستند که معمولاً در بدنه‌های آبی وسیع با دمای سطحی نسبتاً بالا ایجاد شده و شکل‌گیری آنها عمدتاً با تبخیر سطحی آب آغاز می‌شود. در شکل‌گیری طوفان‌های استوایی، تبخیر سطحی منجر به ایجاد یک سیستم کم‌فشار مرکزی شده و انرژی طوفان از فرآیند تبخیر و تراکم با ابرهای همرفتی در محدوده این منطقه مرکزی کم‌فشار تولید می‌شود. منطقه کم‌فشار مرکز طوفان با نام چشم طوفان^۱ شناخته می‌شود. فشار در این محدوده می‌تواند تا ۱۵ درصد کمتر از نواحی مجاور خارج از محدوده طوفان باشد. این فشار در اغلب موارد کمتر از ۱۰۰۵ میلی‌بار است. کمترین فشار بارومتریک ثبت شده، ۸۷۰

³ Coriolis Effect

¹ Cyclone Eye

² Typhoon Tip

جدول ۱: طبقه‌بندی توفندها بر مبنای مقیاس سفیر-سیمپسون

Table 1: Saffir-Simpson hurricane wind scale

درجه طوفان	سرعت باد	میزان تخریب مورد انتظار
۱	64-82 kn 119-153 km/h	عدم آسیب سازه‌های قابل توجه برای سازه‌های مناسب دائم، احتمال آسیب به سازه‌های متحرک مهار نشده، آسیب به درختان ضعیف با ریشه سطحی
۲	83-95 kn 154-177 km/h	آسیب به اجزای سازه‌های متحرک و ثابت، علائم، پایه‌ها و درختان
۳	96-112 kn 178-208 km/h	آسیب به سازه‌ها، وقوع سیلاب در مناطق شهری و آسیب به درختان
۴	113-136 kn 209-251 km/h	آسیب به سازه‌ها و زیرساخت‌ها، وقوع سیلاب در مناطق شهری، فرسایش ساحلی، آسیب به اغلب درختان
۵	≥ 137 kn ≥ 252 km/h	آسیب‌های سازه‌ای و زیرساختی گسترده، آسیب به اغلب درختان، وقوع سیلاب، فرسایش ساحلی، از بین رفتن و شسته شدن سازه‌های ساحلی ناشی از برکشند طوفان

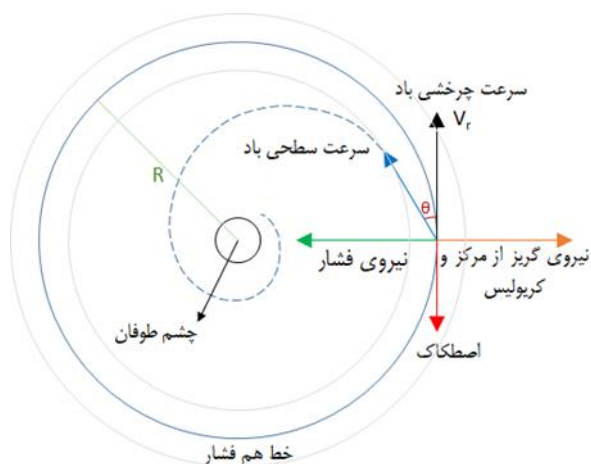
جدول ۲: طبقه‌بندی تغییرات سیکلونی در اقیانوس هند شمالی، سازمان هواشناسی هند (IMD)

Table 2: North Indian Ocean tropical cyclones intensity scale, India Meteorological Department (IMD)

Weather system	Maximum wind speed (3-min average)
1. Low pressure area	less than 17 kt (31 km/h)
2. Depression	D between 17 and 27 kt (31 and 49 km/h)
3. Deep Depression	DD between 28 and 33 kt (50 and 61 km/h)
4. Cyclonic Storm	CS between 34 and 47 kt (62 and 88 km/h)
5. Severe Cyclonic Storm	SCS between 48 and 63 kt (89 and 117 km/h)
6. Very Severe Cyclonic Storm	VSCS between 64 and 89 kt (118 and 166 km/h)
7. Extremely Severe Cyclonic Storm	ESCS between 90 and 119 kt (167 and 221 km/h)
8. Super Cyclonic Storm	SUCS 120 kt (222 km/h) and above

یکی از سیستم‌های متداول طبقه‌بندی طوفان‌های حاره‌ای، مقیاس سفیر-سیمپسون (Saffir-Simpson) است که در دهه هفتاد میلادی در مرکز ملی طوفان آمریکا توسعه یافته است و به طور رسمی برای درجه‌بندی توفندهای اقیانوس اطلس و شمال اقیانوس آرام مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقیاس، طوفان‌های حاره‌ای در صورت تجاوز سرعت باد از حدود ۱۱۹ کیلومتر بر ساعت، براساس سرعت باد به ۵ گروه تقسیم می‌شوند. مبنای سرعت باد در این سیستم طبقه‌بندی، متوسط یک دقیقه است. طبقه‌بندی توفندها بر مبنای مقیاس سفیر-سیمپسون و برآوردی از نوع خسارت وارد به سازه‌ها برای هر درجه از طوفان در جدول ۱ ارائه شده است [۴].

برای طوفان‌های حاره‌ای سایر مناطق بر اساس محل شکل‌گیری طوفان، از مقیاس‌های دیگری استفاده می‌شود که مبنای سرعت باد در آنها متوسط سه دقیقه یا ده دقیقه است و این اختلاف مبنای سرعت،



شکل ۲: الگوی کلی خطوط هم‌فشار و جهت حرکت در طوفان‌های استوایی

Fig. 2: General pattern of pressure isolines and direction of motion in tropical storms

فشار در هر نقطه نیز از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد که در آن P_n فشار خنثی و P_c فشار مرکز طوفان است.

$$P = P_c + (P_n - P_c) \exp\left(-\frac{R_m}{R}\right) \quad (2)$$

میدان باد شامل دو مؤلفه چرخشی و انتقالی است. در فاصله R از مرکز طوفان، سرعت چرخشی V_r بر اساس روابط (۳) محاسبه می‌گردد که در آنها V_{max} بیشینه سرعت طوفان بوده و R و R_m بر حسب کیلومتر هستند.

$$V_r = V_{max} \left(\frac{R}{R_m}\right)^7 \times \exp\left(7\left(1 - \frac{R}{R_m}\right)\right) \quad \text{for } R < R_m \quad (3)$$

$$V_r = V_{max} \times \exp\left((0.0025 R_m + 0.05)\left(1 - \frac{R}{R_m}\right)\right) \quad \text{for } R \geq R_m$$

سرعت انتقالی V_t نیز مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود که در آن V_f سرعت جابجایی طوفان و φ زاویه میان خط واصل نقطه به مرکز طوفان و خط بیشینه سرعت باد است.

$$V_t = -0.5V_f(-\cos\varphi) \quad (4)$$

سرعت کلی باد نیز با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است.

$$V = V_r + V_t \quad (5)$$

۲-۱ طبقه‌بندی طوفان‌های استوایی

طبقه‌بندی طوفان‌های استوایی در دنیا بر اساس معیارهای مختلفی همچون موقعیت شکل‌گیری، ساختار و شدت طوفان انجام می‌گیرد. برای مثال در اقیانوس اطلس شمالی و شرق اقیانوس آرام، طوفان‌های با سرعت باد بیش از ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت با نام توفند (Hurricane) و در غرب اقیانوس آرام شمالی با نام تایفون (Typhoon) شناخته می‌شوند. در اقیانوس آرام جنوبی و اقیانوس هند، طوفان‌های حاره‌ای چرخند (Cyclone) نامیده می‌شوند.

جهت داد و با کاهش تدریجی شدت، در ۳۱ اکتبر به سطح DD و در روز بعد به سطح D رسید. مسیر حرکت طوفان کیار در شکل ۳ نشان داده شده است. اطلاعات تکمیلی مربوط به مسیر طوفان کیار و تغییرات سرعت باد و فشار هوا در زمان وقوع آن، از مراجع مختلفی قابل دسترس است که از آن جمله می‌توان به سایت سازمان اقیانوس‌شناسی و علوم جوی ایالات متحده آمریکا (NOAA)^۳، آزمایشگاه تحقیقات دریایی ارتش آمریکا (NRL)^۴، شاخه هواشناسی متوسط‌مقیاس منطقه‌ای NOAA/NESDIS (RAMMB)^۵ و بانک اطلاعاتی دانشگاه کارولینای شمالی (UNCA)^۶ اشاره کرد [۶-۸].

مقایسه اطلاعات ثبت شده نشان از تطابق نسبی مناسب بین داده‌ها دارد. برای نمونه اطلاعات سرعت باد ثبت شده در زمان طوفان کیار از سه مرجع مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.

در بین مراجع مذکور، بانک اطلاعاتی UNCA که مورد تأیید سازمان جهانی هواشناسی^۷ است اطلاعات سرعت باد و فشار هوا را در بازه‌های زمانی کوچکتر (سه ساعته) ارائه کرده است. لازم به ذکر است که مرجع اصلی این اطلاعات، گروه IBTrACS از زیرمجموعه‌های مراکز ملی اطلاعات محیطی سازمان اقیانوس‌شناسی و علوم جوی ایالات متحده آمریکا^۸ است.

۳. شبیه‌سازی عددی تولید و انتشار امواج ناشی از طوفان کیار

۳-۱ روش و مشخصات کلی شبیه‌سازی در شبیه‌سازی عددی تولید و انتشار امواج ناشی از طوفان کیار از مدل کوپله موج و جریان HD+SW از مجموعه مایک ۲۱ استفاده شده است [۹]. ورودی‌های مدل شامل شبکه‌بندی محیط مدل‌سازی، میدان‌های دوبعدی باد و فشار و شرایط مرزی پارامترهای امواج شامل پارامترهای امواج و مد طوفان در مرز باز مدل می‌باشد.

محدوده مدل‌سازی، خلیج فارس و دریای عمان و بخشی از دریای عرب را شامل می‌شود که تا خط پنج درجه شمالی ادامه دارد و در واقع مرز باز مدل در این خط قرار گرفته است (شکل ۵). شبکه محاسباتی در مسیر عبور سیکلون کیار کمی ریزتر شده تا گرادیان‌های شدید حاصل از عبور سیکلون را با دقت بهتری محاسبه نماید.

مقایسه این سیستم‌های طبقه‌بندی با سیستم سفیر سیمپسون را دشوار می‌کند. طبقه‌بندی سازمان هواشناسی هند (IMD)^۱ که برای تغییرات سیکلونی در اقیانوس هند شمالی به کار می‌رود، در جدول ۲ ارائه شده است [۵].

۲. معرفی طوفان کیار

در ۱۷ اکتبر ۲۰۱۹، یک سیستم کم‌فشار در نزدیک سواحل غربی شبه قاره هند در دریای عرب شکل گرفت و طبق پیش‌بینی سازمان هواشناسی هند، امکان تبدیل این سیستم کم‌فشار به طوفان حاره‌ای اعلام شد. سیستم کم‌فشار تا شکل‌گیری کامل در ۲۲ اکتبر، در همان نواحی باقی ماند. IMD در اوایل ۲۴ اکتبر، این سیستم را به عنوان تغییرات سیکلونی در سطح D (Depression) طبقه‌بندی کرد و تا اواخر روز وضعیت به سطح DD (Deep Depression) ارتقا یافت. در همان روز، مرکز هشدار مشترک طوفان (JTWC)^۲ با طبقه‌بندی آن به نام طوفان حاره‌ای 04A، شروع به صدور هشدار در مورد سیستم نمود. سیستم DD، ابتدا به سمت شمال شرقی و سواحل هند حرکت کرد و در اوایل روز ۲۵ اکتبر، به سطح CS (Cyclonic Storm) رسید و نام کیار توسط IMD برای آن انتخاب شد. در ادامه روز، سیستم به سمت شمال تغییر جهت داد و به سطح SCS (Severe Cyclonic Storm) شدت یافت و سپس به سمت شمال غرب تغییر جهت داد. در روز ۲۶ اکتبر، IMD وضعیت طوفان را در سطح VSCS (Very Severe Cyclonic Storm) و سپس ESCS (Extremely Severe Cyclonic Storm) طبقه‌بندی کرد. در روز ۲۷ اکتبر، طوفان کیار با رسیدن به حداکثر سرعت باد ۱۵۰ مایل بر ساعت و حداقل فشار ۹۲۲ میلی‌بار به اوج خود رسید و طبق طبقه‌بندی IMD به عنوان طوفان فوق‌حاره‌ای SUCS (Super Cyclonic Storm) معادل درجه ۴ مقیاس سفیر سیمپسون ثبت شد. بر این اساس طوفان کیار بعد از طوفان گنو (طوفان درجه ۵ سال ۲۰۰۷)، دومین طوفان بزرگ ثبت شده در دریای عرب از اقیانوس هند شمالی محسوب می‌شود. این طوفان همچنین اولین طوفان در سطح SUCS است که بعد از فصل مونسون در دریای عرب ایجاد شده است.

طوفان کیار برای مدت حدود ۱۲ ساعت، شدت خود را حفظ کرد و برای حدود ۵۱ ساعت در سطح یک طوفان فوق‌حاره‌ای (SUCS) باقی ماند و به سمت شبه‌جزیره عربستان پیش رفت. در ۳۰ اکتبر، با حرکت به سمت غرب از شدت طوفان تا سطح SCS کاسته شد. طوفان کیار سپس به سمت جنوب غرب و به موازات شبه‌جزیره عربستان تغییر

(https://rammb-data.cira.colostate.edu/tc_realtime/storm.asp?storm_identifier=io042019)
^۶ University of North Carolina Asheville
(<http://ibtracs.unca.edu/index.php?name=v04r00-2019298N16071>)

^۷ World Meteorological Organization

^۸ IBTrACS group at the NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI)

^۱ India Meteorological Department

^۲ Joint Typhoon Warning Center (JTWC), joint "United States Navy - United States Air Force command", U.S. Department of Defense

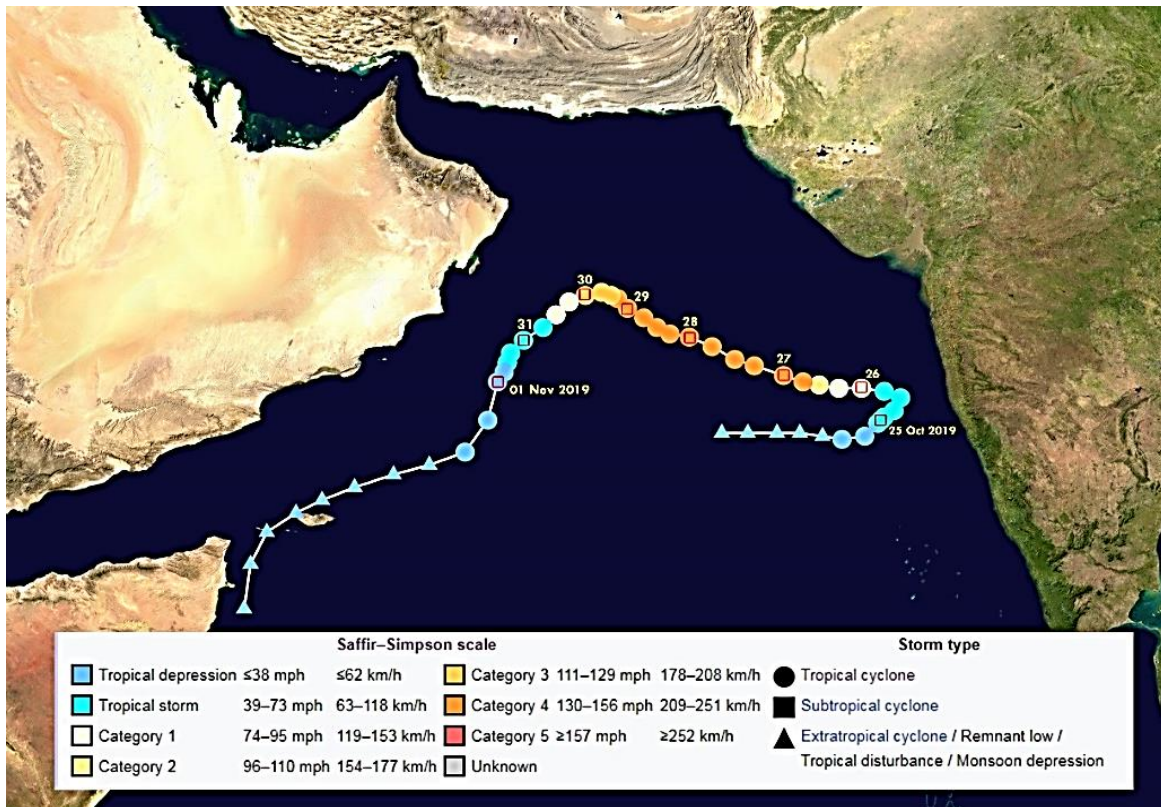
^۳ US National Oceanic and Atmospheric Administration

<https://www.ssd.noaa.gov/PS/TROP/DATA/2019/tdata/arab/04A.html>

^۴ U.S. Naval Research Laboratory

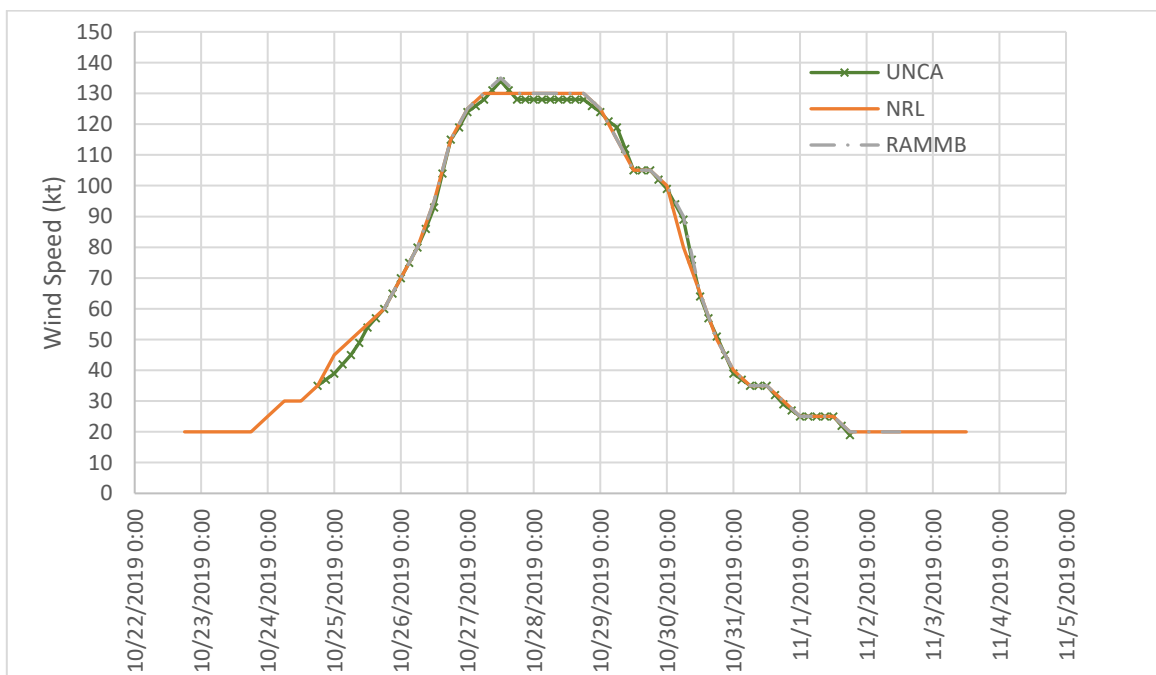
(<https://www.nrlmry.navy.mil/tcdat/tc19/IO/04A.KYARR/trackfile.txt>)

^۵ Regional and Mesoscale Meteorology Branch (RAMMB) of NOAA/NESDIS



شکل ۳: مسیر طوفان کیار [NRL]

Fig. 3: Cyclone Kyarr track [NRL]



شکل ۴: مقایسه سرعت باد در زمان وقوع طوفان کیار از مراجع مختلف

Fig. 4: Comparison of cyclone Kyarr wind speed from different sources

متوسط موج مستخرج از مدل ECMWF-ERA5 با گام مکانی ۰/۵ درجه و گام زمانی ساعتی (با فرض اندیس پراکندگی ۶) استفاده شده است. برای شرایط مرزی تراز سطح آب این مدل نیز از ترکیب جزر و مد مستخرج از مدل جهانی جزر و مد مایک ۲۱ با گام مکانی ۰/۱۲۵ درجه و خیزاب مستخرج از مدل جهانی HYCOM با گام مکانی

شبکه‌بندی در سواحل مکران و در مجاورت برخی موج‌شکن‌های آسیب‌دیده نیز ریزتر شده است به طوری که ابعاد آن در برخی نقاط ساحلی به حدود ۵۰ متر می‌رسد. برای شرایط مرزی امواج مرز باز این مدل از پارامترهای امواج شامل ارتفاع مشخصه، پریود پیک و جهت

تجربیات مدل‌سازی سیکلون‌ها در پروژه پایش و شبیه‌سازی سواحل مکران نشان داد که مدل تحلیلی یانگ و سوبی مناسب‌ترین گزینه برای کاربرد در دریای عمان می‌باشد.

مقادیر بیشینه میدان باد تولید شده توسط نظریه یانگ و سوبی در شکل ۷ نشان داده شده است که از مقادیر باد بیشینه مدل WRF بیشتر می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده، از میدان باد و فشار حاصل از مدل تحلیلی گردابه‌ای یانگ و سوبی به عنوان ورودی باد و فشار مدل کوپله موج و خیزاب استفاده شده است.

۳-۳ مدل کوپله موج و خیزاب

از مدل کوپله مایک ۲۱ با مش بدون ساختار که در آن ماژول امواج طیفی SW فعال شده است به منظور مدل‌سازی تولید و انتشار امواج استفاده شده است. این مدل کوپله از تراز سطح آب محاسبه شده توسط مدل هیدرودینامیک HD به عنوان ورودی مدل SW استفاده کرده و از تنش تشعشی محاسبه شده توسط مدل SW به عنوان ورودی مدل HD استفاده می‌کند تا اندرکنش موج و جریان در مدل دیده شود. بر اساس اطلاعات دریافتی از پایگاه اطلاعاتی سازمان ملی اقیانوسی و جوی آمریکا (NOAA)، که در شکل ۸ نشان داده شده است، در تاریخ ۲۹ اکتبر ساعت ۲ بعدازظهر، ارتفاع موج ۷/۵ متری در آب عمیق در مختصات جغرافیایی حدودی (۲۰ و ۶۲ درجه) در دریای عمان گزارش شده است.

نتایج مدل، در ساعت ۲ بعد از ظهر تاریخ ۲۹ اکتبر، ارتفاع موج ۸/۵ متری را در نقطه‌ای با مختصات (۲۰ و ۶۱/۵) دریای عمان نشان می‌دهد که به مقدار متناظر از داده‌های ماهواره‌ای NOAA نزدیک است. ارتفاع مشخصه موج مطابق شکل ۹ در محدوده سواحل مکران به حدود ۳ متر می‌رسد.

نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که ارتفاع امواج ناشی از طوفان کیار در مجاورت سازه‌های ساحلی که دچار آسیب شده‌اند بین ۲/۳ تا ۳ متر و پریود پیک امواج بین ۱۴ تا ۱۶ ثانیه است. مشخصات امواج به طور خاص در مجاورت چهار بندر کوچک که در این طوفان دچار آسیب شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته است. موقعیت این چهار بندر در سواحل مکران در شکل ۱۰ نشان داده شده است. سری زمانی ارتفاع مشخصه و پریود پیک موج در اثر عبور سیکلون کیار در مجاورت بنادر مذکور در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ ارائه شده است.

۰/۰۸۳۳ درجه و گام زمانی ساعتی استفاده شده است. شرایط مرزی موج و تراز سطح آب در شکل ۶ به عنوان نمونه در یک گام زمانی نشان داده شده است. در شبیه‌سازی عددی، اطلاعات اندازه‌گیری لازم مانند اطلاعات ثبت شده توسط بویه‌ها در هنگام طوفان در دسترس نبوده است. تنها اطلاعات قابل استفاده برای کالیبراسیون مدل، اطلاعات ماهواره‌ای ثبت شده در آب عمیق و اطلاعات مدل‌های جهانی امواج بوده است که در حد امکان برای کالیبراسیون مدل استفاده شده‌اند.

۳-۲ شبیه‌سازی میدان دوبعدی باد و فشار

میدان‌های باد و فشار دوبعدی از مهمترین ورودی‌های مدل محسوب می‌شوند. در مطالعات انجام شده، میدان‌های باد و فشار از مراجع مختلف شامل ECWMF-ERA5 (با گام مکانی ۰/۲۵ درجه و گام زمانی ساعتی) و میدان باد و فشار WRF (با گام مکانی ۰/۱ درجه و گام زمانی ساعتی) و مدل‌های تحلیلی گردابه‌ای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های عددی جوی به دلیل تغییرات شدید (گرادیان) باد و فشار در شبیه‌سازی سیکلون‌ها ضعف دارند. در مدل‌سازی سیکلون‌ها لازم است مدل‌های مربوطه با گام مکانی ریزتر و گام زمانی محاسباتی در حد یک ثانیه به صورت جداگانه شبیه‌سازی شوند که البته این فرایند بسیار زمان‌بر خواهد بود. در این موارد، مدل‌های تحلیلی گردابه‌ای جایگزین مناسبی برای شبیه‌سازی میدان‌های باد و فشار حاصل از سیکلون‌ها هستند.

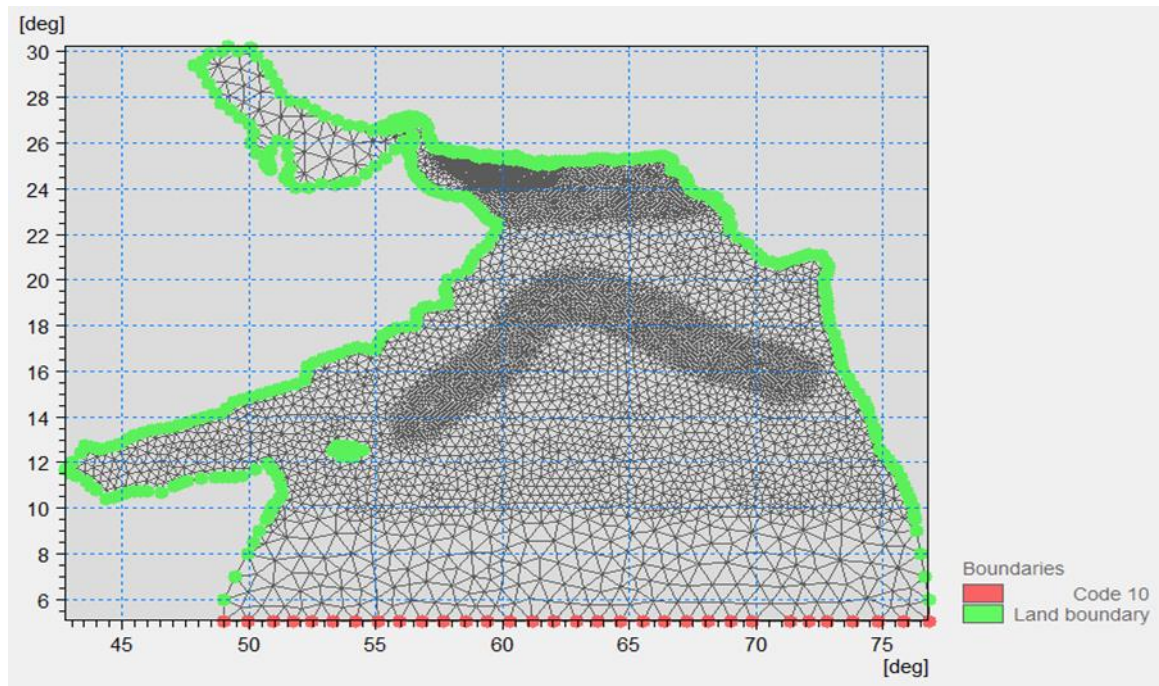
برنامه Cyclone Wind Generation از زیر برنامه‌های Mike21 قادر است میدان باد را با استفاده از نظریه‌های مختلف مدل‌های تحلیلی هلند^۱، یانگ و سوبی^۲ و رانکین^۳ و چندین ورودی شامل موقعیت جغرافیایی مرکز طوفان، فاصله مرکز طوفان تا نقطه وقوع بیشینه سرعت، فشار مرکز، فشار خنثی و بیشینه سرعت به صورت سری زمانی و معرفی یک شبکه مکانی منظم از منطقه، بر روی شبکه با گام زمانی مساوی و دلخواه تولید کند.

در مطالعات حاضر، فایل مربوطه با گام مکانی ۰/۰۵ درجه در برگیرنده کل محدوده مطالعاتی تا مرز ۵ درجه شمالی و گام زمانی یک ساعته تولید شده است. در ضمن حساسیت‌سنجی نسبت به گام مکانی نشان داده که گام مکانی ۰/۱ درجه نیز مناسب است. میدان‌های باد و فشار سیکلون کیار با استفاده از این نظریه‌ها ساخته شده‌اند. مقایسه مولفه‌های سرعت باد و فشار تولید شده با استفاده از این مدل‌ها با مولفه‌های باد و فشار ایستگاه‌های سینوپتیک جاسک و چابهار و

³ Rankine

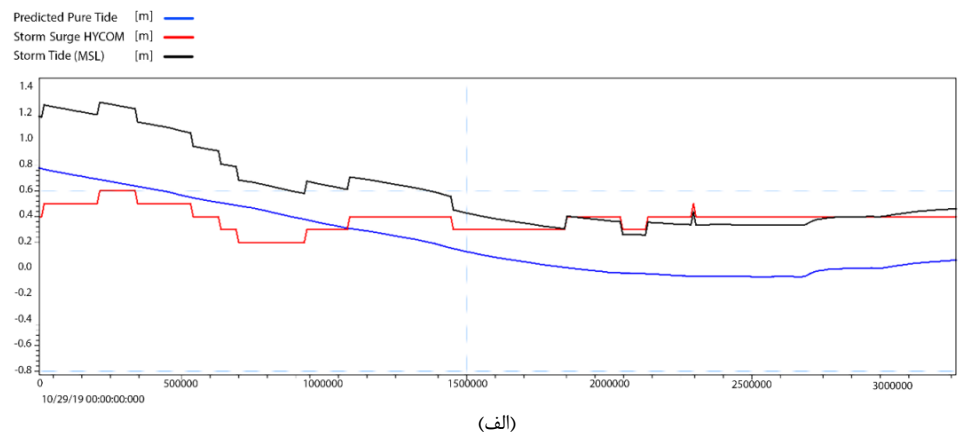
¹ Holland

² Young and Sobey

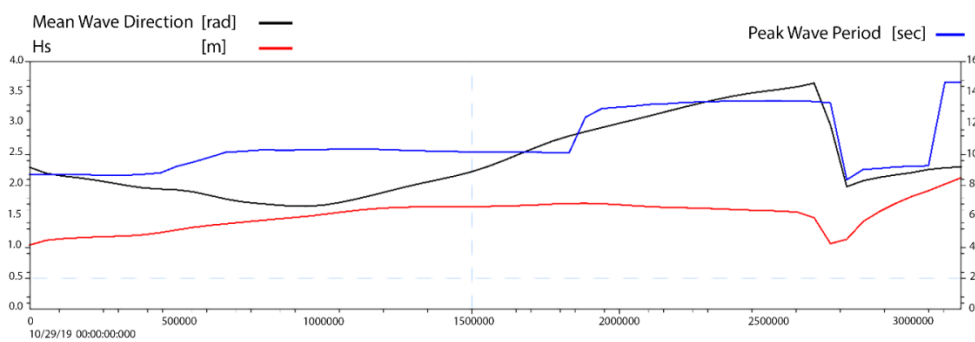


شکل ۵: شبکه‌بندی مورد استفاده در مدل کوپله امواج و خیزاب طوفان کیار

Fig. 5: The mesh file used in the coupled wave-surge model for cyclone Kyarr



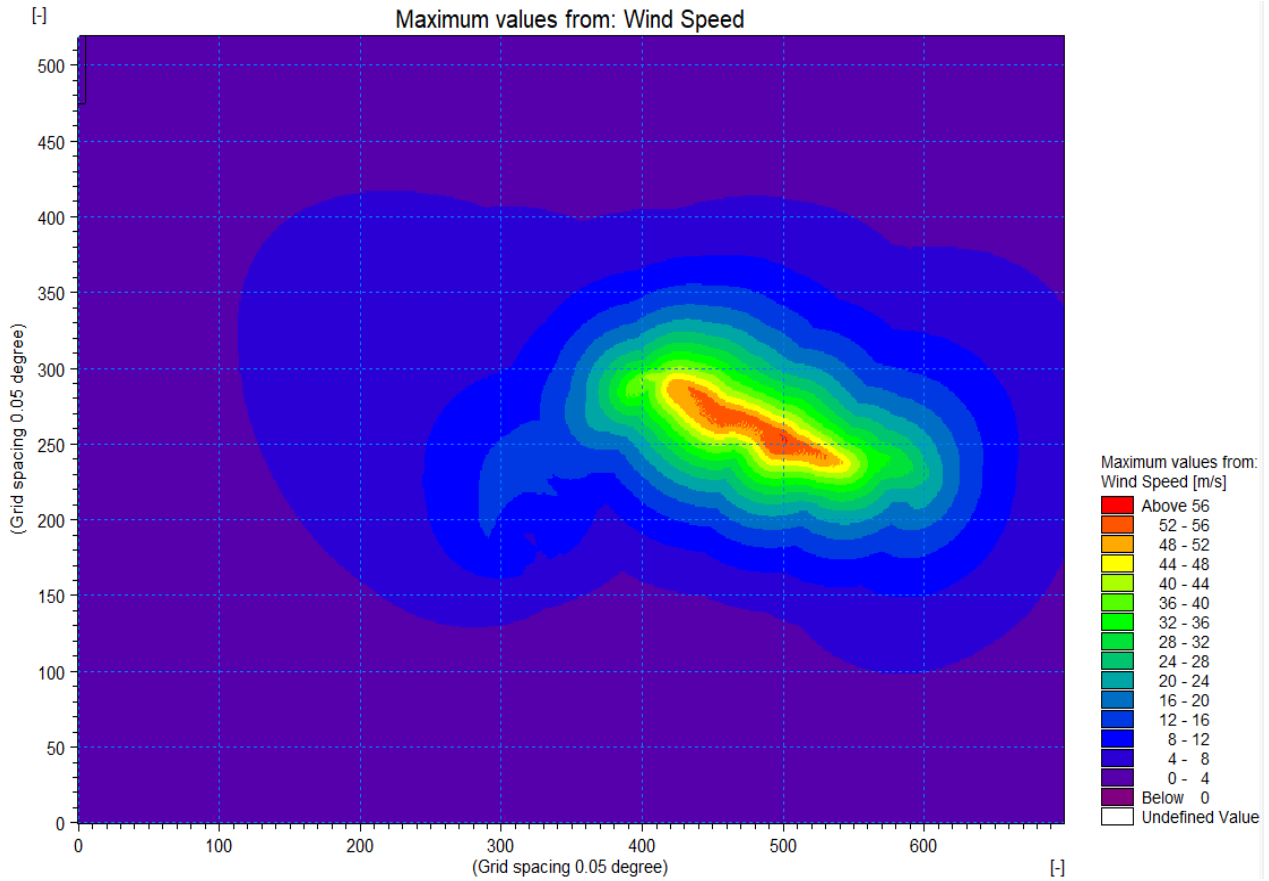
(الف)



(ب)

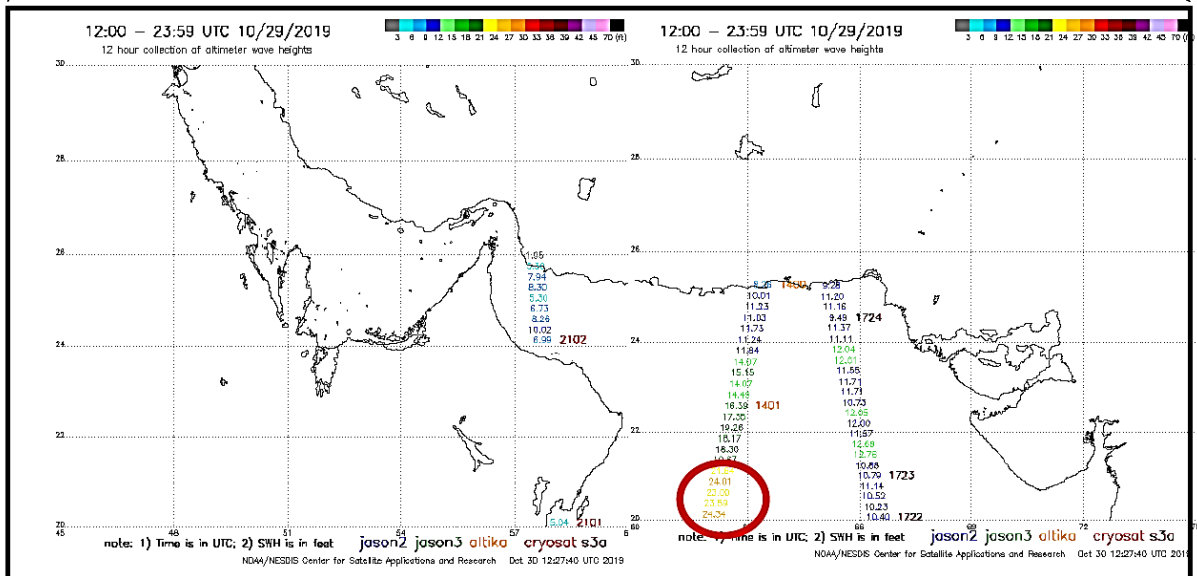
شکل ۶: شرایط مرزی موج (الف) و تراز سطح آب (ب) در یک گام زمانی

Fig. 6: Wave boundary condition (up) and water level (down) in one time step



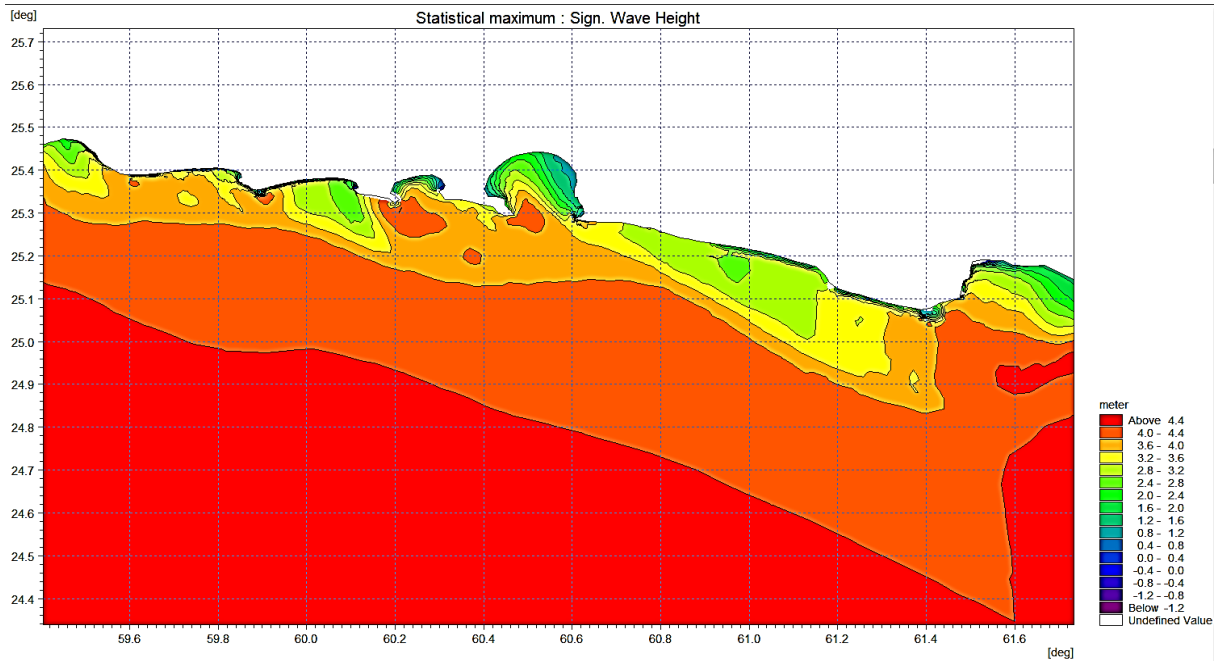
شکل ۷: نقشه ماکزیمم سرعت باد در اثر عبور سیکلون کیار مربوط به مدل تحلیلی یانگ و سوبی

Fig. 7: Map of maximum wind speed due to the passage of Cyclone Kyarr related to Young and Sobey analytical model



شکل ۸: داده‌های ماهواره‌ای امواج اخذ شده از وب سایت NOAA در ۲۹ اکتبر ۲۰۱۹

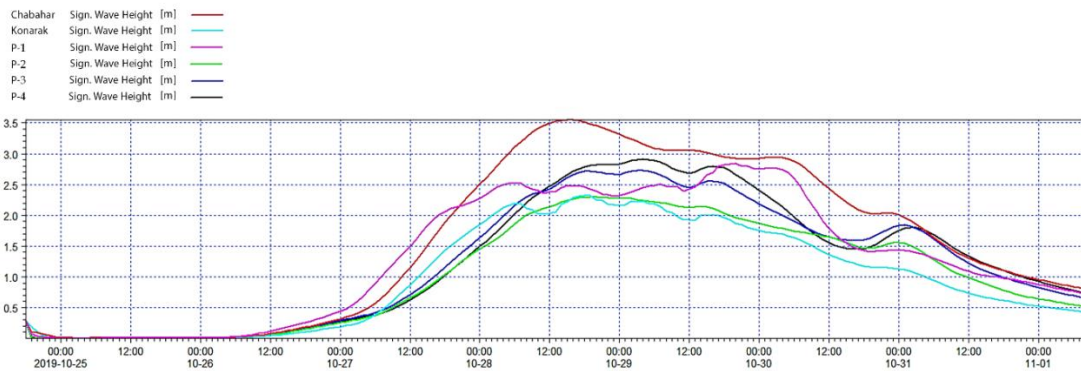
Fig. 8: Satellite wave data from NOAA website on 10/29/2019



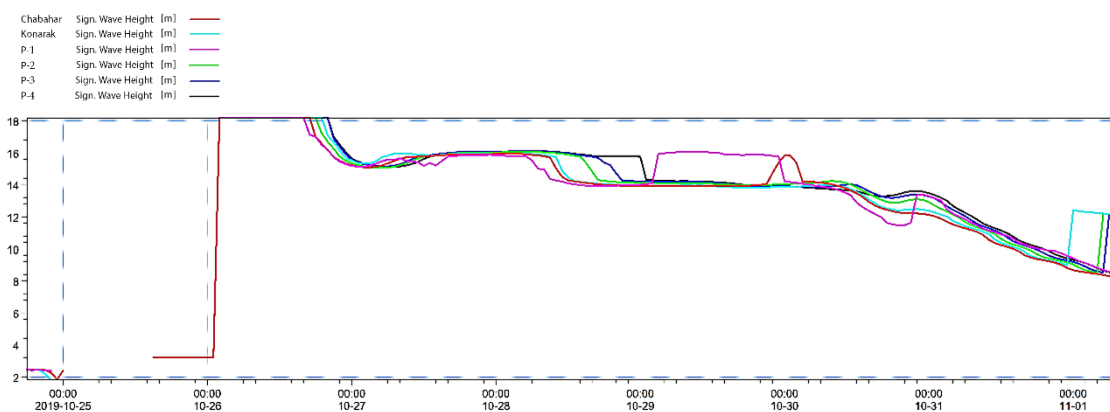
شکل ۹: نقشه ماکزیمم ارتفاع موج مشخصه در اثر عبور سیکلون کیار مربوط به مدل تحلیلی یانگ و سوبی در سواحل ایرانی مکران
Fig. 9: Map of maximum characteristic wave heights due to the passage of Cyclone Kyarr related to Young and Sobey analytical model in Iranian Makran coastlines



شکل ۱۰: موقعیت چهار بندر کوچک در سواحل مکران برای مقایسه نتایج مدلسازی با فرضیات طراحی
Fig. 10: Location of four small ports on Makran coastlines for comparison of simulation results with design assumptions



شکل ۱۱: سری زمانی ارتفاع مشخصه موج در اثر عبور سیکلون کیار در مجاورت نقاط مورد بررسی
Fig. 11: Time series of the characteristic wave heights due to the passage of Cyclone Kyarr in the vicinity of the selected points



شکل ۱۲: سری زمانی پریود پیک موج در اثر عبور سیکلون کیار در مجاورت نقاط مورد بررسی

Fig. 12: Time series of the peak wave periods due to the passage of Cyclone Kyarr in the vicinity of the selected points

اقیانوس‌شناسی در محدوده آب‌های دور از ساحل چابهار همخوانی داشته است. بر اساس نتایج مدل، امواج با ارتفاع موج مشخصه ۲/۳ تا ۳ متر و پریود پیک ۱۴ تا ۱۶ ثانیه در نزدیکی بنادر و در نواحی کم عمق سواحل مکران تشکیل شده‌اند. بنابراین در محدوده سازه‌های ساحلی مکران که دچار آسیب شده‌اند، ارتفاع امواج کمتر از مقادیر طراحی بوده ولی پریود امواج بیش از پریود در نظر گرفته شده برای موج طرح به دست آمده است. بیشترین تأثیر پریود موج، در مقادیر بالاروی و روگذری امواج است که مشاهدات میدانی از وضعیت روگذری امواج در زمان طوفان نیز موید این موضوع است. [۱۰]

مشارکت نویسندگان

این مقاله با مشارکت یکسان نویسندگان تهیه شده است.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از پروژه پژوهشی با عنوان "اعلام نظر کارشناسی و قضاوت مهندسی در خصوص آسیب‌دیدگی موج‌شکن‌های گواتر، گوردیم، بیردف و جد در اثر وقوع طوفان کیار" است که توسط سازمان بنادر و دریانوردی کشور تعریف شده و در بخش حمل‌ونقل دریایی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به انجام رسیده است و نویسندگان این مقاله نیز از حمایت سازمان‌های مذکور کمال سپاس و تشکر را دارند.

تعارض منافع

«اصالت محتوا و عدم تعارض منافع مورد تأیید نویسندگان قرار گرفته است.»

References

1. Wang H, Min X, Anselem O, Yanjun W, Shanshan W, Andrew EG, et al. "Tropical cyclone damages in Mainland China over 2005-2016: losses analysis and implications.". *Environ Develop Sustainabil.* 2019;21(6):3077-3092. doi: 10.1007/s10668-019-00481-7
2. Bakhtiari A, Allahyar MR, Jedari Attari M, Haghshenas SA. "Modeling of Last Recent Tropical Storms in the Arabian Sea.". *J Coastal Marine Engineer.* 2018;1(1):58-66.
3. Smith R, K. Lectures on Tropical Cyclones. Faculty of Physics, The Meteorological Institute, Ludwig-

- Maximilians-University Munich, Munich: The Meteorological Institute.2006.
4. Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center. Accessed 2020 2020. Available from: <https://www.nhc.noaa.gov/>.
 5. Cyclones. WMO/ESCAP Panel on Tropical. Tropical Cyclone Operational Plan for the Bay of Bengal and the Arabian Sea . World Meteorological Organization. DHI. 2014. MIKE 21 Manuals. DHI.2015.
 6. Regional and Mesoscale Meteorology Branch (RAMMB) of NOAA/NESDIS. 2019. Available from: https://rammb-data.cira.colostate.edu/tc_realtime/storm.asp?storm_identifier=io042019.
 7. He B, Goonetilleke A, Ayoko GA, Rintoul L. Abundance, distribution patterns, and identification of microplastics in Brisbane River sediments, Australia. *Sci Total Environ.* 2020;**700**:134467. doi: [10.1016/j.scitotenv.2019.134467](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134467) pmid: 31629260
 8. Dodson GZ, Shotorban AK, Hatcher PG, Waggoner DC, Ghosal S, Noffke N. Microplastic fragment and fiber contamination of beach sediments from selected sites in Virginia and North Carolina, USA. *Mar Pollut Bull.* 2020;**151**:110869. doi: [10.1016/j.marpolbul.2019.110869](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110869) pmid: 32056649
 9. N.D US. Naval Research Laboratory. Accessed 2020. Available from: <https://www.nrlmry.navy.mil/tcdat/tc19/IO/04A.KY ARR/trackfile.txt>.
 10. Golshani A, Taebi S. "Numerical Modeling of Gonu Cyclone and Its Resulting Waves in the Gulf of Oman". *Marine Engineer.* 2009;**4**(8):25-34.

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

Sadaghi, S.M., Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center

✉ s.sadaghi@bhrc.ac.ir



Golshani, A.A., Lecturer, Islamic Azad Universtiy, Central Tehran branch, Tehran, Iran

✉ ali.golshani@iauctb.ac.ir



Nemati, M.H., Head of Coastal Engineering Office, Ports and Maritime Organization

✉ mhn1982@gmail.com





HOW TO CITE THIS ARTICLE

Citation (Vancouver) Sadaghi S M, Golshani A A, Nemati M H. Numerical Simulation of Kyarr Tropical Cyclone Waves in Makran Coastlines. *J Oceanography.* 2021; 12 (46):39-50.

 <http://doi.org/10.52547/joc.12.46.39>

 <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1647-fa.html>

 <https://orcid.org/0000-0002-8311-5238>



COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.