

## ارزیابی عملکرد یک مدل نیمه تجربی در شبیه‌سازی انرژی امواج ناشی از حرکت چرخندهای حاره‌ای در اقیانوس هند

حسین فرجامی<sup>۱</sup>

hfarjami@gmail.com

<sup>۱</sup>استادیار، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی

تاریخ پذیرش: ۹۸/۲/۱۴

تاریخ دریافت: ۹۷/۸/۲۵

### چکیده

با توجه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی اقیانوس هند، سالانه چرخندهای حاره‌ای مختلفی در قسمت‌های شمالی و جنوبی این اقیانوس شکل می‌گیرند؛ که خسارت‌های جانی و مالی زیادی در مناطق ساحلی به‌جای می‌گذارند. در این تحقیق انرژی امواج ناشی از چرخندهای حاره‌ای در سطح اقیانوس هند با استفاده از مدل نیمه تجربی کودریاوتسو و اندازه‌گیری ارتفاع سنجی ماهواره‌ای با در نظر گرفتن اثر "امواج به‌دام افتاده" در این چرخندها بررسی شده است. برای به‌دست آوردن سرعت انتقالی چرخندها و مشخصه‌های آن از داده‌های "مرکز مشترک هشدار توفان‌های دریایی" و برای سرعت باد و ارتفاع موج از داده‌های ارتفاع‌سنج ماهواره‌ای جیسون ۱ و جیسون ۲ برای ۱۸ چرخند در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۳ استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داده که مدل نیمه تجربی یادشده توانایی شبیه‌سازی انرژی امواج غیرمعمول حاصل از چرخندهای حاره‌ای با خطای ۳۰ درصد در اقیانوس هند را دارد. با اندازه‌گیری سرعت باد، سرعت انتقالی چرخند و فاصله از مرکز چرخند با اختلاف خطای ارتفاع موج حدود یک متر، انرژی امواج حاصل از حرکت چرخند در اقیانوس هند پیش‌بینی می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** چرخند حاره‌ای، اقیانوس هند، ارتفاع‌سنج ماهواره‌ای، مدل نیمه تجربی

### ۱. مقدمه

چرخند حاره‌ای یک سامانه جوی کاملاً متلاطم با مرکز کم‌فشار است که بر سطح آب‌های گرم اقیانوس‌ها شکل می‌گیرد. این چرخندها را می‌توان سامانه‌ای با ساختار اتلاف انرژی در نظر گرفت که به‌صورت مداوم نیازمند انرژی ورودی به شکل گرمای نهان است. این سامانه‌ها همراه با

بارش و رعدوبرق شدید با باد چرخشی خیلی تندی هستند که اغلب باعث آسیب‌های زیاد اقتصادی، بارش باران‌های سیل‌آسا و توفان‌های شدید در مناطق ساحلی می‌شوند [۱-۲]. یکی از روش‌های شبیه‌سازی میدان امواج ناشی از چرخند حاره‌ای در محیط‌های اقیانوسی استفاده از مدل‌های نیمه تجربی است. در این مدل‌ها به دلیل همگن بودن میدان باد

به عنوان "طول بادگیر امواج به دام افتاده"<sup>۵</sup> یا "طول بادگیر افزایش یافته" شناخته می شود [۷]. بنابراین لازم است اثر افزایش طول بادگیر که اهمیت ویژه‌ای در رشد و توسعه امواج دارد در مدل‌سازی امواج ناشی از چرخندهای حاره‌ای در نظر گرفته شود. در یکی از مدل‌های نیمه تجربی که توسط کودریاوتسو و همکاران برای تخمین انرژی امواج ناشی از چرخندهای حاره‌ای ارائه شده است، طول بادگیر به شکل متغیر در نظر گرفته می شود تا اثر افزایش طول بادگیر در انرژی امواج اعمال شود [۹].

به دلیل بادهای بسیار قوی و امواج سهمگین ناشی از چرخندهای حاره‌ای نمی توان فراسنج‌های ناشی از این پدیده را به شکل مستقیم و مکانی در محیط اقیانوسی اندازه‌گیری کرد؛ بنابراین تا به امروز ارتفاع سنجی ماهواره‌ای تنها ابزاری است که می تواند ارتفاع موج و سرعت باد را در این شرایط خاص اندازه‌گیری نماید، به شرطی که ماهواره در موقع وجود چرخند، نزدیک منطقه موردنظر را پایش نماید. این اندازه‌گیری‌ها می تواند برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی پدیده چرخندهای حاره‌ای و اثرات آن در محیط اقیانوسی مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به موقعیت جغرافیایی، شرایط جوی و اقیانوسی حاکم بر اقیانوس هند، این منطقه یکی از محل‌های وقوع چرخند حاره‌ای است که سالانه خسارت‌های زیادی در کشورهای حاشیه این اقیانوس بر جای می گذارد. به دلیل اهمیت مطالعه و شناخت این پدیده و اثرات ناشی از آن در اقیانوس هند، در این تحقیق به بررسی رشد و انرژی امواج ناشی از چرخندهای حاره‌ای در این اقیانوس بر اساس داده‌های اندازه‌گیری ارتفاع سنجی ماهواره‌ای جیسون ۱ و جیسون ۲ و شبیه‌سازی با استفاده از بهبود یافته مدل نیمه تجربی کودریاوتسو و همکاران در سال ۲۰۱۵ م. با در نظر گرفتن اثر امواج به دام افتاده در میدان باد این چرخندها در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۳ م. پرداخته شده است. دقت مدل یادشده در پیش‌بینی انرژی امواج ناشی از چرخندهای حاره‌ای در اقیانوس هند برای عملیاتی شدن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نسبت به میدان موج در سطح اقیانوس، می توان میدان باد چرخند حاره‌ای را به صورت مدل نسبتاً ساده‌ای از تاوه<sup>۱</sup> توصیف کرد [۳]. با توجه به ماهیت انتقالی تاوه‌ای چرخندهای حاره‌ای، امواج ناشی از میدان باد این چرخندها در سطح اقیانوس در قسمت‌های مختلف چرخندها شدت‌های متفاوتی دارند و این یکی از مشکلات پیچیده در ارزیابی طول بادگیر افزایش یافته<sup>۲</sup> در میدان باد این چرخندهاست. برای تفسیر طول بادگیر افزایش یافته و میدان امواج ناشی از چرخندهای حاره‌ای مطالعات مختلفی با استفاده از مدل‌های نظری و داده‌های مشاهداتی و ماهواره‌ای صورت گرفته است [۴-۷].

بوویر و مکافی در سال ۲۰۰۵ م. به مدل‌سازی امواج به دام افتاده در میدان باد چرخندهای حاره‌ای پرداختند. آن‌ها بعد از ارائه مدل نیمه تجربی امواج به دام افتاده، امواج بلند ناشی از حرکت توفان‌ها را شبیه‌سازی نمودند. بدلیل سادگی این مدل، در سناریوهای مختلفی در مرکز پیش‌بینی توفان کانادا، مدل ارائه شده را عملیاتی کرد [۷]. یانگ و وینوس در سال ۲۰۱۳ م. مدلی نیمه تجربی که بر اساس تئوری جان سوپ و طول بادگیر افزایش یافته بود، برای بررسی انرژی امواج ناشی از حرکت چرخندهای حاره‌ای ارائه کردند. آن‌ها برای بهینه کردن ضرایب مدل خود از داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد، مدل ارائه شده می تواند ارتفاع موج ناشی از حرکت چرخند را پیش‌بینی کند [۶]. کودریاوتسو و همکاران در سال ۲۰۱۵ م. مدل نیمه تجربی ساده‌ای برای برآورد ارتفاع امواج به دام افتاده در میدان باد توفان‌ها ارائه نمودند. آن‌ها با استفاده از این مدل به بررسی برخی توفان‌ها در اقیانوس اطلس و آرام پرداختند. مدل ارائه شده می تواند در بخش راست جلو<sup>۳</sup> و در بخش چپ عقب<sup>۴</sup> میدان باد در راستای حرکت چرخند ارتفاع امواج به دام افتاده را شبیه‌سازی کند [۹].

حرکت انتقالی مستقیم و مداوم چرخندهای حاره‌ای برای یک بازه زمانی طولانی باعث می شود یک سری از امواج بیشتر تحت تأثیر میدان باد چرخندهای حاره‌ای باقی بمانند و به طور مداوم ارتفاع موج آن‌ها افزایش یابد [۸]. این سازوکار

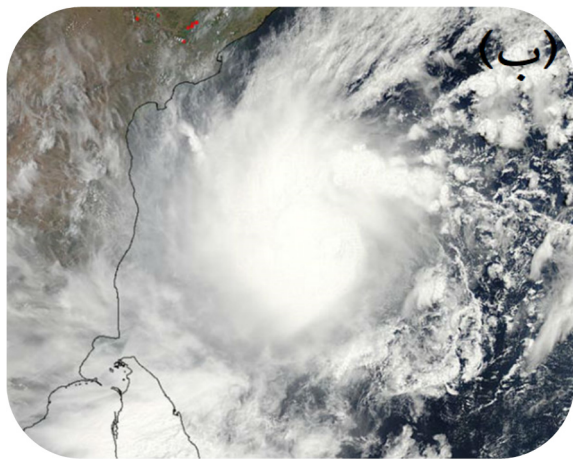
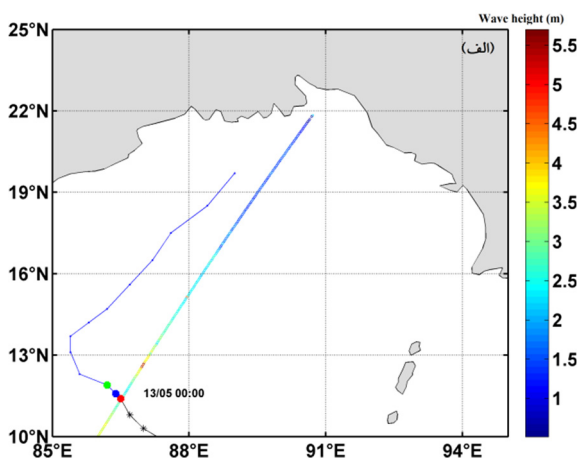
## ۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای به دست آوردن مشخصه‌های چرخندهای حاره‌ای از مجموعه داده‌های مسیر حرکت چرخند حاره‌ای «مرکز مشترک هشدار توفان‌های دریایی»<sup>۷</sup> نیروهای مشترک دریایی آمریکا از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ استفاده شده است. این داده‌ها شامل موقعیت مرکز چرخند، فشار در مرکز و در هم فشار بیرون چرخند، سرعت باد در شعاع ۳۴، ۵۰، ۶۵ گره دریایی و غیره است که چهار بار در روز در ساعات UTC ۰۰:۰۰، ۰۶:۰۰، ۱۲:۰۰ و ۱۸:۰۰ اندازه‌گیری به عمل آمده است. در این تحقیق میانگین سرعت حرکت چرخند حاره‌ای،  $\bar{V}$ ، بر اساس فاصله مکانی انتقال مرکز چرخند در بازه زمانی ۶ ساعت به دست می‌آید. داده‌های باد و ارتفاع موج ناشی از چرخندهای حاره‌ای استفاده شده در این پژوهش از داده‌های سطح<sup>۲</sup> ارتفاع سنجی ماهواره‌ای جیسون ۱ و جیسون ۲ که دارای راداری با باندهای فرکانسی (13.575 GHz) و Ku (GHz) و C (5.3 GHz) هستند، استخراج شده است. این ماهواره‌ها داده‌های ارتفاعی سطح دریا را اندازه‌گیری می‌کند، سپس با استفاده از نوسانات لحظه‌ای سطح دریا ارتفاع موج و باد مورد محاسبه قرار می‌گیرد و بر اساس هر گذر ماهواره دور کره زمین داده‌ها ذخیره می‌شوند. داده‌های این ماهواره‌ها پس از تصحیح‌های لازم به فرمت NetCDF تبدیل شده و در اختیار کاربران قرار می‌گیرد.

برای مطالعه چرخندهای حاره‌ای در اقیانوس هند، ۱۸ چرخند که در آن‌ها ارتفاع سنج ماهواره‌ای سمت راست چرخند حاره‌ای در نیم کره شمالی و سمت چپ چرخند حاره‌ای در نیم کره جنوبی در فاصله کوچک‌تر از ده برابر شعاع حداکثر سرعت باد را پایش نموده است، انتخاب شد.

به‌عنوان نمونه در شکل ۱ (الف) مسیر اندازه‌گیری ارتفاع سنجی ماهواره‌ای و پخش انرژی حاصل از چرخند ماهاسن در خلیج بنگال در امتداد پایش ماهواره آورده شده است. در زمان گذر ارتفاع سنج ماهواره‌ای، در ساعت UTM ۰۲:۰۸:۳۷ در تاریخ ۱۳ می ۲۰۱۳ مرکز چرخند در موقعیت جغرافیایی ۸۶/۵ شرقی و ۱۱/۴ شمالی قرار داشته است. فشار هوا در مرکز این چرخند برابر با ۹۸۹ هکتوپاسکال ثبت شده

است. بر اساس اندازه‌گیری موقعیت مکانی این چرخند سرعت انتقالی ۳ متر بر ثانیه و شعاع بیشینه سرعت باد آن ۸۳۳۴۰ متر است. در این شکل نقطه آبی موقعیت مرکز چرخند حاره‌ای در زمان گذر ماهواره، نقطه سبز موقعیت بعدی و نقطه قرمز موقعیت قبلی مرکز این چرخند حاره‌ای است. در شکل ۱ (ب) تصویر چرخند یادشده که به وسیله سنجنده مودیس<sup>۸</sup> تصویربرداری شده است، نشان داده شده است.



شکل ۱. مسیر حرکت چرخند حاره‌ای ماهاسنبر اساس داده‌های "مرکز مشترک هشدار توفان‌های دریایی" و مسیر اندازه‌گیری ارتفاع موج به وسیله ارتفاع سنج ماهواره‌ای جیسون ۱ (نقطه و خط)، نقطه قرمز موقعیت قبلی، نقطه آبی موقعیت فعلی و نقطه سبز موقعیت مرکز چرخند حاره‌ای در زمان UTC ۰۲:۰۸:۳۷ تاریخ ۱۳ می ۲۰۱۳ است. (ب) تصویر ماهواره‌ای چرخند حاره‌ای در ساعت UTC ۰۷:۵۵:۰۰ تاریخ ۱۳ می ۲۰۱۳ به وسیله سنجنده مودیس.

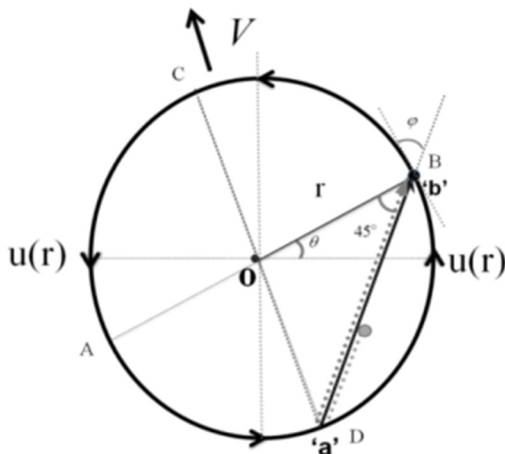
از آنجا که الگوریتم استاندارد مورد استفاده در جیسون ۱ و جیسون ۲ برای محاسبه سرعت باد سطحی در شرایط جوی خاص و مناطق ساحلی با خطا مواجه است [۱۰].

حاضر از مقادیر پیشنهادی بابائین و سالوویو [۱۴] استفاده شده است. این مقادیر عبارت‌اند از:  $q = -0.275$ ،  $c_e = 4.41 \times 10^{-7}$  و  $p = 0.89$ ،  $c_\alpha = 15.14$

بر اساس مطالعه کودریاوتسو و همکارانش در سال ۲۰۱۵ طول بادگیر مؤثر که در آن امواج تحت تأثیر میدان باد چرخند حاره‌ای قرار دارند، با رابطه ۲ تعریف می‌شود.

$$x_{ef} = (u_{obs}^2 / g)(\bar{e}_{obs} / c_e)^{1/p}. \quad (2)$$

در این رابطه  $u_{obs}$  و  $\bar{e}_{obs}$  به ترتیب سرعت باد و انرژی بی‌بعد امواج مشاهداتی،  $c_e$  مقدار ثابت و  $g$  شتاب گرانش هستند. برای حالتی که چرخند حاره‌ای حرکت انتقالی ندارد، طول بادگیر به صورت  $x_{ef} = \sqrt{2}r$  تعریف می‌شود (شکل ۲). در این رابطه  $r$  فاصله از مرکز چرخند تا بیشینه مقدار ارتفاع موج است که با استفاده از اندازه‌گیری ارتفاع سنجی ماهواره‌ای محاسبه می‌شود. با دانستن اختلاف بین انرژی امواج ناشی از چرخند حاره‌ای در حال حرکت و حالت پایه یعنی موقعی که این چرخند حرکت انتقالی ندارد (رابطه ۱) می‌توان اثر امواج به دام افتاده در این چرخندها را محاسبه کرد.



شکل ۲. مدل میدان باد ایده‌آل برای چرخند حاره‌ای،  $r$  شعاع از مرکز چرخند،  $u(r)$  سرعت باد در فاصله  $r$  از مرکز چرخند،  $V$  سرعت انتقالی چرخند؛ نقطه خط‌چین مسیر رشد امواج به دام افتاده در میدان باد چرخند را نشان می‌دهد که از نقطه خاکستری شروع به رشد می‌کنند.

### ۳-۲. مدل انرژی امواج ناشی از چرخندهای حاره‌ای

برای مدل‌سازی انرژی امواج به دام افتاده در میدان باد یک چرخند حاره‌ای، حالت ایده‌آلی در نظر گرفته شده است که

الگوریتم‌های مختلفی برای استخراج پارامتر باد از فرکانس‌های دریافتی به وسیله سنجنده ماهواره‌ها ارائه شده است. هر کدام از این الگوریتم‌ها برای شرایط جوی و بازه سرعتی باد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در زمان وقوع توفان‌های حاره‌ای که شرایط جوی دارای ابرناکی و بارش شدید باران است. گادجین مورفی و همکاران الگوریتمی را ارائه داده‌اند که بتوان با دو باند فرکانسی یعنی باند  $Ku$  و باند  $C$  میدان باد این چرخندها را با دقت مناسبی استخراج نمود [۱۱]. بنابراین در این تحقیق از ارتفاع سنج ماهواره‌ای دو باند فرکانسی، برای تصحیح اثر ابرناکی در فرکانس‌های بازگشتی به ماهواره و به دست آوردن «سرعت واقعی» باد سطحی استفاده شد.

### ۳. تئوری و محاسبات

#### ۳-۱. انرژی امواج ناشی از چرخند حاره‌ای

مطابق نظریه خودتشابهی<sup>۹</sup> رشد موج، انرژی بی‌بعد  $(\bar{e} = eg^2 / u^4)$  و فرکانس بی‌بعد قله طیف موج  $(\tilde{\omega}_p = \omega_p u / g)$  تابع طول بادگیر بی‌بعد  $(\tilde{x} = xg / u^2)$  هستند، به طوری که به شکل قوانین تابع نمایی بیان می‌شوند [۱۲]. در این روابط  $e$  انرژی،  $\omega_p$  بسامد قله موج،  $x$  طول بادگیر،  $u$  سرعت باد سطحی در ارتفاع ۱۰ متری و  $g$  شتاب گرانش زمین هستند. با استفاده از قانون طول بادگیر<sup>۱۰</sup>، انرژی بی‌بعد می‌تواند تابعی از عکس سن موج به شکل معادله (۱) نشان داده شود.

$$\bar{e} = c_e c_\alpha^{-p/q} \alpha^{p/q} \quad (1)$$

در این رابطه  $\alpha = u / C_p$  عکس سن موج<sup>۱۱</sup>،  $C_p$  سرعت فاز قله طیف موج و ضرایب  $C_e$ ،  $C_\alpha$ ،  $p$  و  $q$  مقادیر ثابت این رابطه هستند که محققان مختلف براساس شرایط مختلف مقادیر متفاوتی را پیشنهاد داده‌اند. در رابطه (۱) فراسنج‌ها ثابت نیستند، اما تابعی از درجه رشد امواج هستند. در مطالعه [۱۳] به بررسی مقادیر حدی این ضرایب در شرایط مختلف پرداخته شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مقادیر پیشنهادی بابائین و سالوویو [۱۴] از دقت بالاتری نسبت به دیگر مقادیر پیشنهادی برخوردار است؛ بنابراین در مطالعه

گروه آن‌ها شروع به افزایش یافتن می‌کند. در این مدل پیش‌بنهادی، در امتداد OB عکس سِن موج (  $\alpha_r = \omega_p u(r) / g$  ) و انرژی بی‌بعد موج (  $\tilde{e}_r = e_r g^2 / u(r)^4$  ) با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۹].

$$\left(\frac{\alpha_r}{\alpha_{0r}}\right)^{1/q} \left(1 - \frac{(1-q)^{-1} \alpha_r}{\alpha_T}\right) = 1 - \frac{\tilde{L}_{cr}}{\tilde{l}_r} \quad (۴)$$

$$\frac{\tilde{e}_r}{\tilde{e}_{0r}} = \left(\frac{\alpha_r}{\alpha_{0r}}\right)^{p/q}$$

در این معادله  $\alpha_{0r} = c_\alpha \tilde{l}_r^q$  و  $\tilde{e}_{0r} = c_e \tilde{l}_r^p$  به ترتیب عکس سِن امواج توسعه یافته و انرژی بی‌بعد در حالتی که چرخند حاره‌ای سرعت انتقالی ندارد ( $V = 0$ )، هستند. مقادیر  $c_e$  و  $c_\alpha$  در بالا آمده است. اگر  $\tilde{l}_r < \tilde{L}_{cr}$  باشد، سرعت انتقالی چرخند بیشتر از سرعت انتشار امواج هستند که این حالت به ندرت اتفاق می‌افتد. در این حالت سرعت انتشار امواج ناشی از چرخند حاره‌ای نمی‌تواند به سرعت انتقالی این چرخند برسد.

برای بررسی عملکرد مدل کودریاوتسو [۹] و پیش‌بینی ارتفاع موج و انرژی امواج ناشی از چرخندهای حاره‌ای در اقیانوس هند ۱۸ مورد بررسی و ارزیابی شد. برای این منظور در هر یک از مسیرهای ارتفاع سنجی ماهواره‌ای بیشینه ارتفاع موج (از میانگین ۳-۵ مقدار مشاهده شده حداکثر ارتفاع امواج) و شعاع آن‌ها (فاصله از مرکز چرخند)، سرعت باد ارتفاع سنجی ماهواره‌ای و طول بادگیر بحرانی در بخش OB شکل ۲، محاسبه شدند. این مقادیر با حالت پایه (حالت سکون چرخند  $V = 0$ ) مرجع شده‌اند تا افزایش نسبی انرژی امواج در نتیجه به دام افتادن آن‌ها در میدان باد چرخند حاره‌ای نشان داده شود. نتیجه این افزایش انرژی در شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که از این شکل برمی‌آید؛ همه داده‌های جمع‌آوری شده تأییدی بر افزایش انرژی امواج در سمت راست چرخند حاره‌ای در اقیانوس هند شمالی و در سمت چپ چرخند حاره‌ای در اقیانوس هند جنوبی با استفاده از پیش‌بینی‌های این مدل است.

در آن سرعت باد چرخند حاره‌ای در فاصله  $r$  از مرکز آن چرخند برابر  $u(r)$  بوده و حرکت انتقالی آن  $V$  است (شکل ۲). در این میدان باد حالتی که چرخند حاره‌ای حرکت انتقالی ندارد، در سمت راست آن امواج از امتداد OB شروع به رشد کردن می‌کنند و در امتداد OD که دارای طول بادگیر  $l_r = \sqrt{2} r$  است به حداکثر مقدار می‌رسند. با به دست آوردن بیشینه سرعت باد و فاصله آن از مرکز چرخند حاره‌ای و استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) می‌توان بخش انرژی امواج در امتداد اندازه‌گیری ارتفاع سنج ماهواره‌ای را محاسبه نمود.

به‌عنوان مثال امواجی که در نقطه 'b' مشاهده می‌شوند؛ امواجی هستند که شروع آن‌ها از نقطه 'a' و در راستای  $V_{||} = V \cos(\varphi)$  بوده‌اند. در این رابطه  $V$  سرعت حرکت انتقالی چرخند حاره‌ای و  $\varphi = 45^\circ - \theta$  و  $\theta$  زاویه‌ی سمت<sup>۱۲</sup> در نقطه 'b' است. در این مدل برای حالتی که چرخند حرکت انتقالی دارد، طول بادگیر که به طول بادگیر بحرانی نیز معروف است به شکل رابطه ۳ تعریف می‌شود و نقش کلیدی در توسعه امواج ناشی از حرکت چرخندهای حاره‌ای بازی می‌کند [۹].

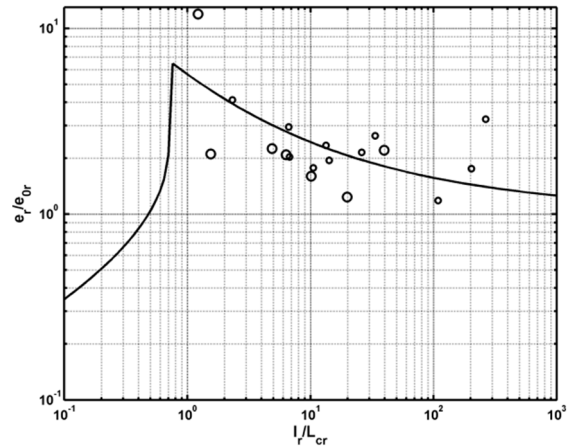
$$\tilde{L}_{cr} = -c_\alpha^{-1/q} \frac{q}{1+q} \alpha_T^{1/q} \quad (۳)$$

در این معادله  $c_\alpha, q$  ضرایب ثابتی هستند که مقادیر آن‌ها در بالا آورده شده است.  $\alpha_T = u(r) / 2V_{||}$  عکس رشد امواج به دام افتاده در میدان باد چرخند حاره‌ای در حال حرکت است. عکس رشد امواج برای حالت ایستا ( $V = 0$ ) به شکل  $\alpha = u(r) / C_p$  تعریف می‌شود. در این رابطه  $C_p$  سرعت فاز قله طیف موج است. در این مدل اگر  $\tilde{l}_r > \tilde{L}_{cr}$  سرعت انتشار امواج بیشتر از سرعت انتقالی چرخند بوده و از امتداد OD امواج شروع به رشد کردن می‌کنند. در دستگاه مختصات در حال حرکت، امواج ابتدا با سرعت کم شروع به رشد می‌کنند ( $\alpha > \alpha_T$ )، سپس این امواج به سمت عقب برمی‌گردند و در امتداد OD سرعت گروه امواج منطبق با سرعت حرکت چرخند حاره‌ای می‌شود ( $\alpha = \alpha_T$ ). در ادامه جهت حرکت امواج عوض شده و شروع به حرکت به سمت جلو ( $\alpha < \alpha_T$ ) می‌کنند و سرعت

## ۴. یافته‌ها

در این پژوهش اثر افزایش طول بادگیر در انرژی امواج ناشی از چرخندهای حاره‌ای در اقیانوس هند با استفاده از مدل نیمه تجربی و اندازه‌گیری ارتفاع سنج ماهواره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور همان‌طور که قبلاً نیز بیان شده است، مواردی انتخاب شده‌اند که ارتفاع سنجی ماهواره‌ای سمت راست چرخند حاره‌ای را در اقیانوس هند شمالی و سمت چپ چرخند حاره‌ای را در اقیانوس هند جنوبی پایش نموده است. به‌عنوان نمونه رشد امواج به دام افتاده در میدان باد چرخندهای حاره‌ای فیت<sup>۱۳</sup> (۳ ژوئن ۲۰۱۰)، آلینا<sup>۱۴</sup> (۹ دسامبر ۲۰۱۱)، بنیلدا<sup>۱۵</sup> (۲۹ دسامبر ۲۰۱۱)، ماهاسن<sup>۱۶</sup> (۱۳ می ۲۰۱۳) و درجه فایو<sup>۱۷</sup> (۹ دسامبر ۲۰۱۱) در اقیانوس هند شمالی و جنوبی را می‌توان نام برد.

در شکل ۴ سرعت باد سطحی، ارتفاع موج و انرژی امواج ناشی از چرخند حاره‌ای فیت در امتداد پایش ارتفاع سنج ماهواره‌ای آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۴ (الف) بر می‌آید، در ساعت UTC ۰۶:۰۰ تاریخ ۳ ژوئن ۲۰۱۰ ارتفاع موج بیشینه در حدود ۹ متر و بیشینه سرعت باد برابر با ۲۷ متر بر ثانیه است. شکل ۴ (ب) پخش انرژی امواج ناشی از این چرخند را در حالت پایه (بدون در نظر گرفتن حرکت انتقالی چرخند حاره‌ای)، با در نظر گرفتن اثر امواج به دام افتاده در میدان باد چرخند (رابطه ۴) و اندازه‌گیری ماهواره‌ای با استفاده از رابطه  $E = H_s^2 / 16$  در امتداد پایش ماهواره همان‌طور که از شکل ۴ (ب) بر می‌آید، مدل مورد استفاده در این تحقیق توانسته به شکل خوبی در نزدیکی بیشینه ارتفاع موج، افزایش انرژی امواج به دام افتاده از حالت پایه ( $V = 0$ ) را محاسبه نماید.



شکل ۳. انرژی امواج مرجع شده با حالت پایه (حالت سکون  $V = 0$ ) در سمت راست چرخند حاره‌ای در اقیانوس هند شمالی (دایره‌های کوچک) و سمت چپ در اقیانوس هند جنوبی (دایره‌های بزرگ).

با استفاده از خطای جذر میانگین مربعات (rms) و بایاس (bias) دقت مدل در برآورد ارتفاع موج ناشی از چرخند حاره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. برای به دست آوردن این مقادیر به ترتیب از رابطه‌های ۵ و ۶ استفاده شد [۱۵].

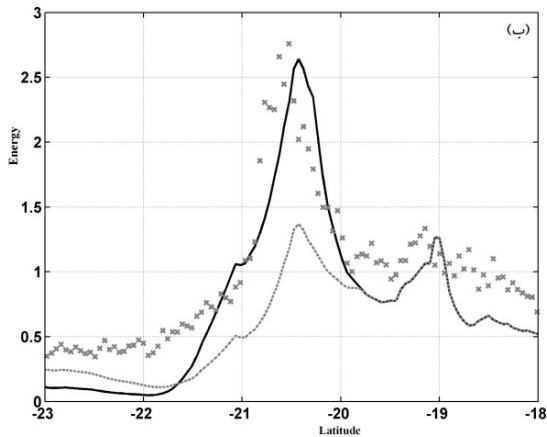
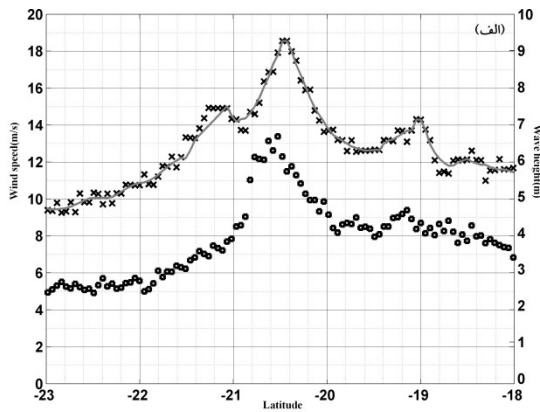
$$rms = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i^2} \quad (5)$$

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i \quad (6)$$

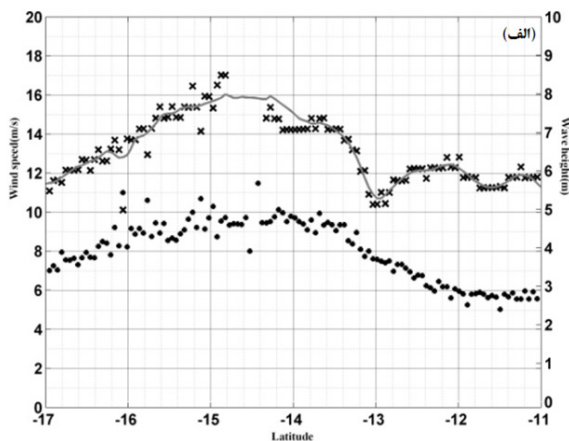
در این رابطه  $\alpha$  مقدار نرمال شده ارتفاع موج غالب (به‌عبارتی  $\alpha = (H_s^{alt} - H_s^{mod}) / H_s^{alt}$ ) و  $N$  تعداد مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای برای چرخندهای حاره‌ای است. در رابطه  $\alpha$ ، فراسنج  $H_s^{alt}$  ارتفاع موج حاصل از اندازه‌گیری ارتفاع سنج ماهواره‌ای و  $H_s^{mod}$  ارتفاع موج حاصل از مدل‌سازی است. در واقع بایاس یک آشکارسازی است که بیان می‌کند در چه مواقعی شبیه‌سازی مدل به اندازه‌گیری ماهواره نزدیک یا دور بوده است. در مواقعی که بایاس صفر است یعنی دقیقاً مقدار شبیه‌سازی ارتفاع موج مدل با مقدار اندازه‌گیری ماهواره‌ای یکسان بوده است، مقدار منفی بایاس بیانگر این است که مقدار پیش‌بینی مدل بیشتر از اندازه‌گیری ماهواره‌ای بوده و برعکس زمانی که مقدار بایاس مثبت است، پیش‌بینی مدل برای ارتفاع موج کمتر از اندازه‌گیری ماهواره‌ای است.



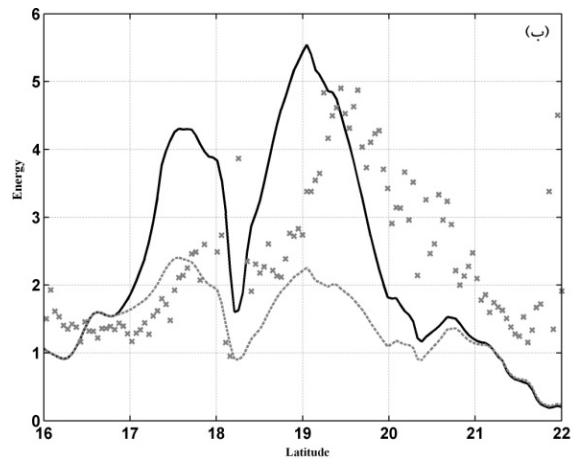
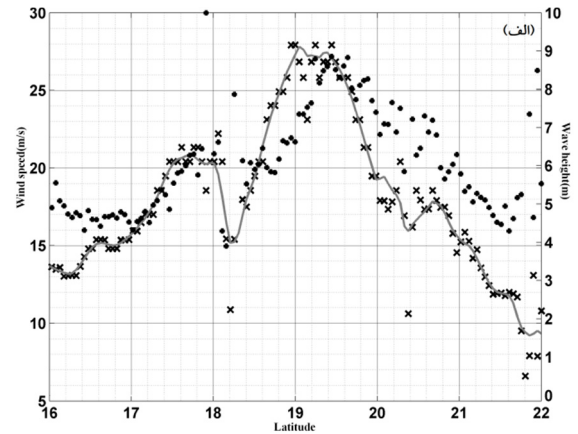
شبیه سازی نماید. در شکل های ۶، ۷ و ۸ به ترتیب برای چرخند حاره ای بنیلد در تاریخ ۲۹ دسامبر ۲۰۱۱، ماهاسن در تاریخ ۱۳ می ۲۰۱۳ و درجه فایو در تاریخ ۹ دسامبر ۲۰۱۱ مقادیر سرعت باد و ارتفاع موج اندازه گیری شده به وسیله ماهواره و انرژی شبیه سازی شده آن ها با مدل نیمه تجربی آورده شده است.



شکل ۵. چرخند حاره ای آلینا (۰۹ دسامبر ۲۰۱۱). توضیحات همانند شکل ۴



شکل ۶. (الف) چرخند حاره ای بنیلد (۲۹ دسامبر ۲۰۱۱). توضیحات همانند شکل ۴



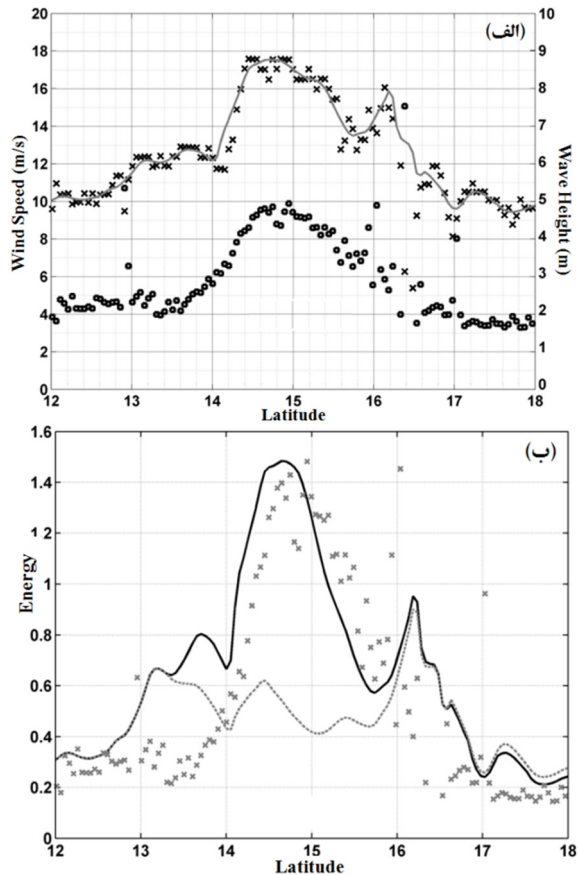
شکل ۴. چرخند حاره ای فت، در ساعت UTC ۰۶:۰۰ تاریخ ۳ ژوئن ۲۰۱۰ در امتداد پایش ارتفاع سنجی ماهواره ای الف) سرعت باد (با علامت ضربدر)، سرعت هموار شده (با علامت خط ممتد) و ارتفاع موج ناشی از چرخند حاره ای (با علامت نقطه) ب) انرژی امواج حاصل از اندازه گیری ارتفاع سنجی ماهواره ای (با علامت ضربدر)، انرژی حالت پایه (با علامت نقطه چین)، انرژی حاصل از امواج به دام افتاده در میدان باد چرخند حاره ای (با علامت خط ممتد).

نمونه دیگر، چرخند حاره ای آلینا است که ماهواره در ساعت UTC ۰۰:۰۵:۲۶ در تاریخ ۰۹ دسامبر ۲۰۱۱ سمت چپ این چرخند را پایش نموده است که نتایج آن در شکل ۵ آورده شده است. همان طور که در شکل ۵ الف) نشان داده شده است بیشینه ارتفاع موج و بیشینه سرعت باد سطحی بر اساس اندازه گیری ارتفاع سنج ماهواره ای به ترتیب در حدود ۶/۵ متر و ۱۹ متر بر ثانیه ثبت شده است.

ارتفاع موج و به تبع آن انرژی ناشی از حرکت چرخندها بر اساس شدت میدان باد سطحی، حرکت انتقالی چرخند و فاصله از چشم چرخند دارای مقادیر متفاوتی است. بهبود یافته مدل نیمه تجربی کودریاوتسو به خوبی توانسته این مقادیر را

برای برآورد انرژی ناشی از چرخندهای حاره‌ای در اقیانوس هند استفاده شده است.

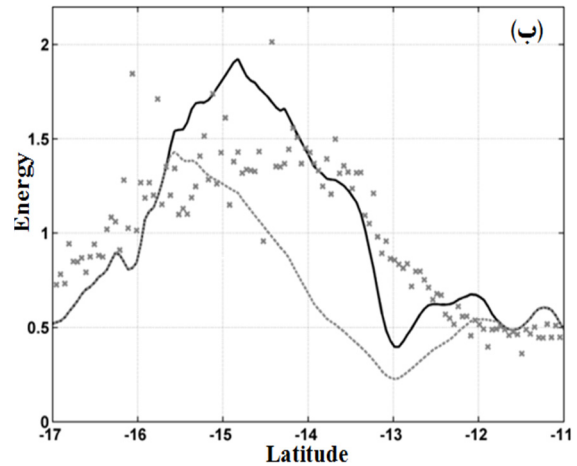
خطای جذر میانگین مربعات و بایاس آماری برای ۱۰ مورد از چرخندهای حاره‌ای در اقیانوس هند در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول  $V$  سرعت حرکت چرخند حاره‌ای و  $V_{max}^{alt}$  بیشینه سرعت باد چرخند است که از اندازه‌گیری ارتفاع سنج ماهواره‌ای به دست آمده است.



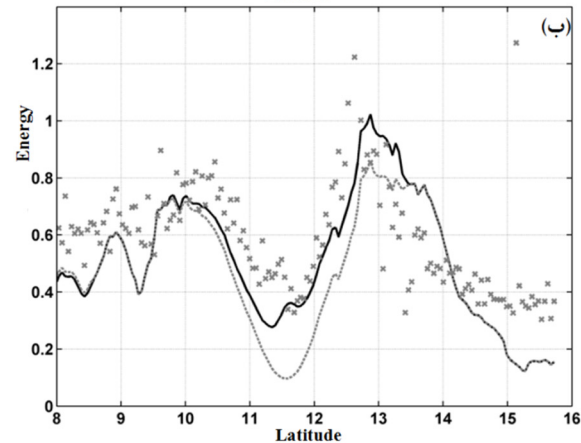
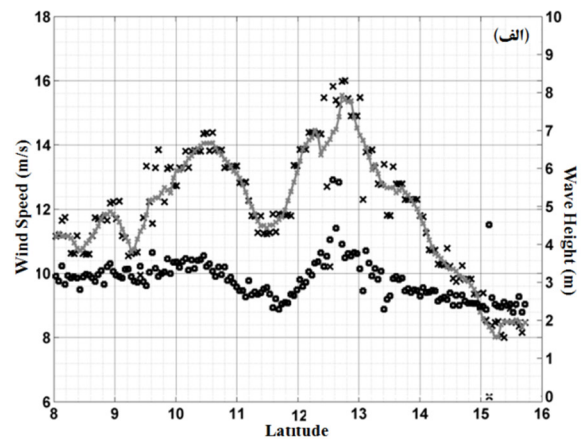
شکل ۸. چرخند حاره‌ای درجه فایو (۹ دسامبر ۲۰۱۱). توضیحات همانند شکل ۴

جدول ۱: جذر میانگین مربعات و بایاس آماری ارتفاع موج ناشی از چرخند حاره‌ای در اقیانوس هند

	Time	RMS	Bias	$V_{max}^{alt}$	$V$
۱	JAMALA (13 May 2013)	۰/۱۹	۰/۰۹	۱۶	۲/۶
۲	EMANG (16 January 2013)	۰/۴۳	۰/۲۶	۱۳/۶	۴
۳	NANAUK (09 Jun 2014)	۰/۵۱	۰/۳۶	۱۵/۹	۴/۵
۴	FELLENG (28 Jun 2013)	۰/۲۶	۰/۰۷۷	۲۵	۵
۵	ANAIS (16 Oct.)	۰/۳۷	۰/۲	۱۷	۵/۴



شکل ۶. (ب) چرخند حاره‌ای بنیلید (۲۹ دسامبر ۲۰۱۱). توضیحات همانند شکل ۴



شکل ۷. چرخند حاره‌ای ماهاسن (۱۳ می ۲۰۱۳). توضیحات مثل شکل ۴

مدل‌های تجربی مختلفی برای برآورد بیشینه ارتفاع موج ناشی از حرکت چرخندها در محیط‌های اقیانوسی ارائه شده‌اند. بیشتر این مدل‌ها به دلیل ساده‌سازی‌های انجام‌شده از دقت پایینی برخوردار هستند. در این تحقیق یک مدل نیمه تجربی که اثرات افزایش طول بادگیر را نیز در نظر می‌گیرد،



## ۵. بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق رشد و توسعه امواج ناشی از چرخندهای حاره‌ای و میدان پخش فضایی انرژی آن‌ها در اقیانوس هند با استفاده از مدل نیمه تجربی کودریاوتسو و همکاران [۹] مورد بررسی قرار گرفت و اثر امواج به دام افتاده در میدان باد چرخندهای حاره‌ای نشان داد که به دلیل طول بادگیر افزایش یافته، در نیم کره شمالی بیشینه ارتفاع موج در سمت راست چرخند و در نیم کره جنوبی بیشینه ارتفاع موج در سمت چپ آن اتفاق می‌افتد.

همچنین دقت مدل استفاده شده برای شبیه سازی بیشینه ارتفاع موج ناشی از حرکت چرخندهای حاره‌ای در اقیانوس هند مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مدل استفاده شده در این تحقیق می‌تواند ارتفاع موج ناشی از میدان باد چرخند حاره‌ای را با خطای حدود ۳۰ درصد در اقیانوس هند شبیه سازی نماید. بنابراین تنها با دانستن سه فراسنج سرعت باد، سرعت انتقالی چرخند و فاصله از مرکز چرخند می‌توان ارتفاع موج بیشینه در نتیجه انرژی آن را به سادگی با دقت قابل قبولی با استفاده از مدل بهبود یافته کودریاوتسو و همکاران در اقیانوس هند پیش بینی نمود [۹].

## ۶. سپاسگزاری

از همکاری آقایان پروفیسور ولادیمیر کودریاوتسو و پاول گلوپکین، آزمایشگاه اقیانوس شناسی ماهواره‌ای دانشگاه دولتی آب و هواشناسی روسیه، در پیشبرد اهداف این پژوهش یاری نموده‌اند، سپاسگزاری می‌گردد.

## منابع

- [1] Cheung KK, Chang LT-C, Li Y. Rainfall prediction for landfalling tropical cyclones: perspectives of mitigation. Typhoon Impact and Crisis Management: Springer; 2014. p. 175-201.
- [2] Doocy S, Daniels A, Packer C, Dick A, Kirsch TD. The human impact of earthquakes: a historical review of events 1980-2009 and systematic literature review. PLoS currents. 2013;5.
- [3] Holland GJ. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. Monthly Weather Review. 1980;108(8):1212-8.

	Time	RMS	Bias	$V_{max}^{alt}$	$V$
	2012)				
۶	BENILDE (29 Dec. 2011)	۰/۱۶	۰/۰۵	۱۴/۷	۷/۱
۷	05 A (28 Nov. 2011)	۰/۳۰	-۰/۱۹	۱۷/۴	۴
۸	GONU (05 Jun. 2007)	۰/۲۵	۰/۰۶	۳۲	۲/۵
۹	PHET (03 Jun 2010)	۰/۴۰	۰/۱۵	۲۵/۸	۴/۶
۱۰	03 B (14 Dec 2003)	۰/۱۹	-۰/۰۲	۱۱	۷/۲
	Sum.	۰/۳۱	۰/۱		

بر اساس جدول ۱ می‌توان گفت برای چرخندهای 05 A و 03 B مقدار شبیه سازی برای ارتفاع موج بیشتر از مقدار اندازه گیری ماهواره‌ای است. در دیگر موارد بررسی شده شبیه سازی ارتفاع موج مدل کمتر از اندازه گیری ماهواره‌ای است. همان طور که در جدول ۱ مشخص است برای چرخند حاره‌ای مختلف با سرعت انتقالی متفاوت مدل نیمه تجربی استفاده شده دقت قابل قبولی دارد. برای موارد بررسی شده میانگین خطای پیش بینی مدل برای ارتفاع موج ناشی از حرکت چرخندهای حاره‌ای برابر با ۳۱٪ است. بنابراین این مدل می‌تواند ارتفاع موج ناشی از به دام افتادن این امواج در میدان باد چرخند حاره‌ای را با دقت تقریباً یک متر برآورد نماید.

اگرچه میدان باد چرخند حاره‌ای می‌تواند با استفاده از مدل ساده توصیف شود، اما شکل گیری حرکت امواج پیچیده تر است. حرکت تاوهای چرخندهای حاره‌ای نشان می‌دهد امواج در بازه زمانی طولانی تحت تأثیر میدان باد چرخند در حال حرکت قرار می‌گیرند. بنابراین میدان باد درست و قابل اطمینان نقش بسیار مهمی در مدل سازی میدان امواج چرخندهای حاره‌ای بازی می‌کند [۶]. در این مدل از میدان باد متقارن و ساده استفاده شده است و مدل با خطایی در حدود یک متر می‌تواند ارتفاع موج ناشی از چرخند حاره‌ای را پیش بینی نماید. برای بهبود نتایج مدل بهتر است میدان باد متغیر و نامتقارن در نظر گرفته شود.

## پی نوشت

1. Vortex
2. Extended fetch
3. Front right sector
4. Rear-left sector
5. Trapped-fetch waves
6. Parameter
7. Joint Typhoon Warning Center (JTWC)
8. MODIS
9. Self-similarity
10. Fetch law
11. Inverse wave age
12. Azimuth
13. PHET
14. ALENGA
15. BENILDE
16. MAHASSEN
17. FIVE

- [4] Young IR. Wind generated ocean waves: Elsevier; 1999.
- [5] Quilfen Y, Vandemark D, Chapron B, Feng H, Sienkiewicz J. Estimating gale to hurricane force winds using the satellite altimeter. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2011;28(4):453-8.
- [6] Young I, Vinoth J. An “extended fetch” model for the spatial distribution of tropical cyclone wind-waves as observed by altimeter. *Ocean Engineering*. 2013;70:14-24.
- [7] Bowyer PJ, MacAfee AW. The theory of trapped-fetch waves with tropical cyclones—An operational perspective. *Weather and forecasting*. 2005;20(3):229-44.
- [8] Young IR. Parametric hurricane wave prediction model. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 1988;114(5):637-52.
- [9] Kudryavtsev V, Golubkin P, Chapron B. A simplified wave enhancement criterion for moving extreme events. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015;120(11):7538-58.
- [10] Farjami H, Golubkin P, Chapron B. Impact of the sea state on altimeter measurements in coastal regions. *Remote Sensing Letters*. 2016;7(10):935-44.
- [11] Goddijn-Murphy L, Woolf DK, Chapron B, Queffelec P. Improvements to estimating the air-sea gas transfer velocity by using dual-frequency, altimeter backscatter. *Remote sensing of environment*. 2013;139:1-5.
- [12] Kitaigorodskii S. Applications of the theory of similarity to the analysis of wind-generated wave motion as a stochastic process. *Izv Geophys Ser Acad Sci, USSR*. 1962;1:105-17.
- [13] Badulin SI, Babanin AV, Zakharov VE, Resio D. Weakly turbulent laws of wind-wave growth. *Journal of Fluid Mechanics*. 2007;591:339-78.
- [14] Babanin AV, Soloviev YP. Variability of directional spectra of wind-generated waves, studied by means of wave staff arrays. *Marine and freshwater research*. 1998;49(2):89-101.
- [15] Cimbala JM. Basic Statistics[Internet]. 2011.available from:[https://www.mne.psu.edu/me345/Lectures/Basic\\_Statistics.pdf](https://www.mne.psu.edu/me345/Lectures/Basic_Statistics.pdf), diakses tanggal 9 September 2014.