ارائه یک تابع توزیع جهتی مناسب برای امواج محدوده منطقه تنگه هرمز

رضا قارنگیان[۱]، مهدی شفیعی‌فر[۲*]، روزبه پناهی[۳]

[۱] کارشناس ارشد مهندسی عمران سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس؛ r.ghazangian@modares.ac.ir
[۲] استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ shafiee@modares.ac.ir
[۳] استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس؛ rpanahi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۲۵
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۳۱

کلمات کلیدی:
تنگه هرمز
تابع توزیع جهتی
مدل کسینوسی
مدل پوآسون
مدل هایپربولیک

چکیده

در این مقاله، با ارزیابی عملکرد توابع توزیع جهتی استاندارد در مقایسه با توزیع جهتی میدانی موج در محدوده منطقه تنگه هرمز، نسبت به کالیبراسیون توابع استاندارد منتخب و معرفی تابع توزیع جهتی مناسب این منطقه پرداخته شده است. تابع توزیع میدانی از روی داده‌های میدانی ثبت شده در بازه‌های زمانی ۱۰ الی ۲۰ ماه و در عمق ۲۵ متری در چهار ایستگاه متفاوت منطقه و پس از استخراج رخدادهای حدی (منتخب) استخراج گردیده است. ارزیابی آماری عملکرد توزیع‌های جهتی استاندارد بیانگر ضعف آن‌ها در ارائه شرایط جهتی این منطقه می‌باشد. بر این اساس، با متغیر در نظر گرفتن ضرایب معرفی شده در این توزیع‌ها و با استفاده از روش گرادیان کاهش یافته عمومی، سعی گردیده است تا خطای این مدل‌ها کاهش یابد. این کالیبراسیون در دو حالت وابسته به رخداد طوفان و مستقل از آن، برای سه مدل کسینوسی، پوآسون و هایپربولیک انجام شده و بهبود بدست آمده برای هر سه مدل مذکور، بیش از ۶۰٪ بوده است. بدین ترتیب، می‌توان از هر یک از مدل‌های کالیبره شده مذکور، با توجه به وسعت اندازه‌گیری‌های موجود، به عنوان تقریب بهتری از تابع توزیع جهتی موج منطقه بهره برد.

A Proper Directional Spreading Function (DSF) For Waves Climate of Hormuz Strait Zone

Reza Gharangian[1], Mehdi Shafieefar[2*], Roozbeh Panahi[3]

[1] M.Sc. Graduate, Tarbiat Modares University, r.ghazangian@modares.ac.ir
[2] Professor of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, shafiee@modares.ac.ir
[3]Assistant Professor of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, rpanahi@modares.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 12 Jan. 2015
Accepted: 14 Apr. 2015
Available online: 22 Sep. 2015

Keywords:
Strait of Hurmoz
Directonal Spreading Function
Cosine Model
Poisson Model
Hyperbolic Model

ABSTRACT

In this article by evaluating the performance of standard Directional Spreading Functions (DSFs) with those of field DSs at the Strait of Hormuz, such standard DSFs have been calibrated. Here, field DSs have been extracted considering the region extreme events based on up to 20 months field measurements at four different 25m stations. Statistical assessment of standard DSFs clearly showed their lack of accuracy. So, a calibration procedure considering their introduced coefficients as variables using generalized reduced gradient method was used. Such procedure has been implemented with and without considering the event's direction for Cosine-power, Poisson and hyperbolic DSFs. Results show a great improvement up to 60% in terms of their conformity. So, such calibrated DSFs could be used as a better approximation of wave directional distribution based on available measurements at the region.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]

۱ - مقدمه

توزیع در جهت، از خصوصیات پایه امواج بوده و در درک مکانیک امواج اقیانوس شامل ایجاد، پخش و شکست آن‌ها نقش مهمی دارد. امواج دریا معمولاً از نظر ارتفاع، پریود و جهت انتشار نامنظم هستند. نامنظمی امواج از نظر ارتفاع و پریود بیشتر مورد توجه کارشناسان بوده اما به پراکندگی جهتی آن‌ها که در محاسبات مهندسی کاملا موثر است کمتر پرداخته شده است.

از مهمترین پدیده هایی که تحت تأثیر پراکندگی جهتی موج قرار دارند میتوان به تأثیر در نحوه انکسار، تفرق، تغییر ارتفاع و میزان نفوذ امواج به بنادر اشاره کرد. همچنین میزان تاثیر امواج بر ایجاد جریان ساحلی و جابجایی رسوب در منطقه شکست[1] موج به طور قابل ملاحظه‌ای وابسته به مقدار بی نظمی جهتی آن‌ها است. با این فرض که شرایط امواج بر اثر برهم‌نهی تعداد زیادی از امواج سینوسی با فرکانس و جهت متفاوت به وجود می‌آید، بیان ریاضی شرایط دریایی به صورت جهت‌دار قابل طرح است[۱]. با توجه به محدودیت اطلاعات، دانش توزیع جهتی امواج در مقایسه با طیف‌های فرکانسی بسیار محدودتر است. اما در سال‌های اخیر، دستگاه‌های موج نگاری که بتوانند در همه جهات اطراف میدان موج در محلی معلوم مشخصات موج را ثبت کنند بصورت وسیعی استفاده می‌شوند. در این دستگاه‌ها با اندازه‌گیری یکی از دو پارامتر هیدرودینامیکی مشابه (تراز و یا فشار) در یک سری نقاط نزدیک به هم (در فاصله یک تا ده متر) و یا اندازه گیری پارامترهای متفاوت (فشار و دو مولفه سرعت افقی) در یک نقطه و با استفاده از تحلیل همبستگی متقابل این داده‌ها با تحلیل طیفی، طیف جهت‌دار موج حاصل می شود.

از طرفی انتشار جهت‌دار انرژی موج در میدان موج ناشی از باد، وابسته به فرکانس است. معمولا مولفه‌های امواج با فرکانس‌های بالاتر طیف موج (پریودهای کوتاه‌تر) محدوده وسیعی از جهات را دارند، در حالیکه برای فرکانس‌های نزدیک فرکانس حداکثر (پریودهای بلندتر)، انرژی موج روی جهت غالب موج متمرکز می‌شود[۲].

مدل‌های جهت‌دار موج معمولاً از ضرب مدل‌های تک جهته در ضریبی که تابع فرکانس و جهت موج است، حاصل می‌شوند:

$$S(f,\theta)=S(f)\ D(f,\theta) \qquad (1)$$

که در آن $S(f)$ همان رابطه مدل طیفی تک جهته یا طیف بدست آمده از تحلیل فوریه بر داده‌های موج می‌باشد. $D(f,\theta)$ ضریب اصلاح جهتی یا تابع توزیع جهتی است که کمیتی بی بعد بوده و به عنوان تابع انتشار جهت‌دار شناخته می‌شود. زاویه θ معمولا در جهت عقربه‌های ساعت با مبدا صفر در راستای جهت غالب موج اندازه گیری می‌شود و محدوده عملی از $-\frac{\pi}{2}$ تا $\frac{\pi}{2}$ را داراست[۳]. فرم تابع $D(f,\theta)$ شکل عمومی ندارد و برای آن روابط مختلفی توسط محققین پیشنهاد شده است.

روابط پیشنهاد شده تابع‌های توزیع جهتی را می توان در سه دسته کسینوسی، پواسون و هایپربولیک دسته بندی نمود. هریک از این روابط دارای ضریب ثابت و متغیری هستند که توسط محققان مختلف و برای شرایط و داده‌های دریاهای گوناگون توصیه شده اند. در این مقاله ضمن معرفی پیشینه مدل‌سازی جهتی امواج، نسبت به مدل‌سازی توزیع جهتی امواج با سه تابع کسینوسی، پواسون و هایپربولیک با ضرایب پیشنهاد شده توسط سایر محققان اقدام و سپس با استفاده از داده‌های میدانی ثبت شده، توزیع جهتی میدانی استخراج و برای افزایش دقت مدل‌سازی نسبت به کالیبراسیون و پیشنهاد ضرایبی متناسب با شرایط منطقه تنگه هرمز اقدام شده است.

۲- معرفی داده ها

سازمان بنادر و دریانوردی در بخشی از پروژه پایش و مدل‌سازی عددی دریاهای کشور اقدام به اندازه‌گیری داده های میدانی منطقه تنگه هرمز با استفاده از دستگاه ای‌وک[2] شرکت نورتک نروژ نموده است. این داده‌ها در چهار ایستگاه مجزا اندازه‌گیری شده‌اند، به طوریکه ۱۵۰۰ کیلومتر از مناطق ساحلی جنوب (با در نظر گرفتن سواحل جزیره قشم) را تحت پوشش قرار می‌دهد. شکل ۱ نقشه و جدول ۱ جزئیات ایستگاه‌های مذکور را نشان می‌دهد.

جدول ۱- جزئیات اندازه‌گیری ایستگاه‌های داده‌های موج تنگه هرمز

شماره ایستگاه	عمق (متر)	بازه زمانی اندازه‌گیری		مختصات نقطه اندازه‌گیری (UTM)		فاصله تا نزدیک‌ترین ساحل (Km)
		شروع	پایان	X	Y	
۱	۲۵	۲۰۰۹/۰۹/۱۲	۲۰۱۰/۰۷/۰۸	۷۰۸۰۹۸	۲۹۷۲۵۲۸	۷
۲	۲۵	۲۰۰۹/۰۹/۱۰	۲۰۱۰/۱۰/۱۲	۲۵۰۹۰۱	۲۹۰۵۶۴۲	۰/۵۰
۳	۲۵	۲۰۰۹/۱۰/۰۶	۲۰۱۱/۰۶/۲۷	۴۳۰۴۸۶	۲۹۶۶۵۸۶	۲/۳۰
۴	۲۵	۲۰۱۰/۰۹/۰۴	۲۰۱۱/۰۵/۱۷	۵۷۵۶۵۳	۲۸۳۲۴۹۷	۳/۳۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]



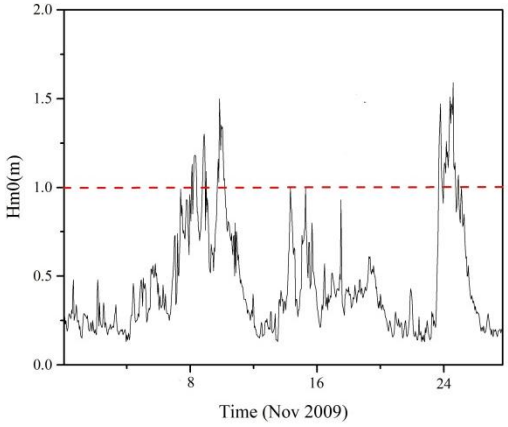
شکل ۱- نقشه قرارگیری ایستگاه‌های تنگه هرمز

داده‌های فوق‌الذکر توسط دستگاه ای وک و به دو روش ای اس تی[۳] و پی یو وی[۴] اندازه‌گیری شده‌اند. روش پی یو وی که قدمت آن به دهه ۱۹۷۰ برمی‌گردد بر پایه اندازه‌گیری سه کمیت فشار (P) و دو مولفه افقی و قائم سرعت چرخشی موج یعنی U و V اجازه تخمین پارامترهای جهت‌دار موج را می‌دهد اما این روش برای اندازه‌گیری کل محدوده امواج ناشی از باد (امواج با پریود بین ۰/۵۰ تا ۳۰ ثانیه) مناسب نمی‌باشد.

اما در روش ای اس تی که در سال ۲۰۰۲ برای اولین بار مورد استفاده قرار گرفت، یک دستگاه مبدل[۵] با جهت قائم با استفاده از یک سنسور اکو[۶] ساده فاصله دقیق دستگاه تا تراز سطح آب را به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌کند. این نوع اندازه‌گیری مستقیم مزیت‌های بسیاری دارد. اولین و مهمترین آن این است که هیچ محدودیت عمقی برای آب‌های ساحلی ندارد و دیگر اینکه بیشترین سهم ممکن از نوار امواج ناشی از باد را پوشش می‌دهد. لذا با توجه به اندازه‌گیری داده‌های منطقه تنگه هرمز با استفاده از هر دو روش فوق‌الذکر و برتری روش ای اس تی به سایر روش‌ها، در این تحقیق از داده‌های اندازه‌گیری شده به روش ای اس تی برای مطالعه استفاده شده است.

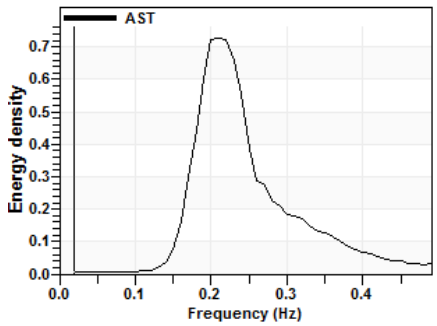
منطقه تنگه هرمز با توجه به دسترسی که به دریای عمان از سمت جنوب شرقی دارد، در مواقعی از سال تحت تأثیر امواج مونسون دریای عمان قرار می‌گیرد لذا بررسی جهات رخداد طوفان (θ_0) در این ناحیه از الزامات این مطالعه می‌باشد.

در ادامه به تعریف آستانه طوفان و بررسی جهت و تعداد طوفان‌های رخ داده در این منطقه پرداخته می‌شود. آستانه طوفان[۷] شامل تعریف یک آستانه برای شناسایی امواج بیش از این مقدار به عنوان طوفان است که در این مقاله $H_{m0}=1^m$ را به عنوان آستانه طوفان و امواج بزرگتر از این مقدار به عنوان طوفان رخ داده در این منطقه در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است در صورت انتخاب آستانه‌ای بالاتر از این مقدار تعداد رخ دادهای غالب کاهش یافته و بر این اساس ممکن است نتایج حاصل از بررسی توزیع‌های جهتی و کالیبراسیون با ضعف‌هایی به واسطه کمبود اطلاعات روبرو شود و لذا نتایج قابلیت تعمیم مناسبی نداشته باشد. همچنین می‌توان گفت در صورت انتخاب آستانه‌ای بالاتر، امواج مرتفع‌تر پراکندگی جهتی کمتری دارند و لذا میزان خطای ناشی از مدل سازی جهتی برای امواج مرتفع‌تر کمتر می‌شود. شکل ۲ نمونه‌ای از تغییرات تراز سطح آب در ایستگاه شماره ۳ را نشان می‌دهد. که طوفان‌های با ارتفاع موج فراتر از ۱ متر مشخص شده‌اند.



شکل ۲- تغییرات ارتفاع مشخصه موج (خط چین: آستانه تعریف شده)

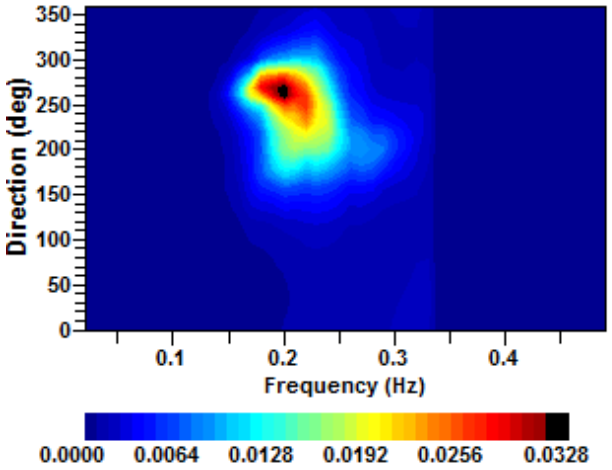
پس از شناسایی طوفان های با ارتفاع بیش از ۱ متر نسبت به شناسایی جهت رخداد این طوفان پرداخته میشود. شکل ۳ و ۴ نمونه ای از خروجی های نرم افزار استورم (نرم افزار ساخته شده توسط شرکت نورتک نروژ که برای تحلیل و پردازش داده‌های خام پروژه مانیتورینگ سواحل جنوب ارائه کرده‌اند) از طیف تک جهته و توزیع جهتی برای طوفان رخداده است. همانطور که از شکل ۳ مشخص است فرکانس پیک برابر ۰/۲۰ هرتز و از شکل ۴ جهت متناظر با فرکانس پیک برابر ۲۸۵ درجه (با در نظر گرفتن صفر مثلثاتی در این نرم افزار) یا جنوب شرقی می باشد.



شکل ۳- طیف تک جهته طوفان منتخب ایستگاه شماره ۳ (ارتفاع موج مشخصه ۱/۱۵ متر، پریود پیک ۴/۷۷ و تاریخ رخداد ۲۰۰۹/۱۱/۲۲)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]



شکل ۴- توزیع جهتی درطوفان رخ داده ایستگاه ۳ (تاریخ رخداد ۲۰۰۹/۱۱/۲۲)

با توجه به موارد بیان شده در بالا و شناسایی تمامی طوفان‌های منطقه، در جدول ۲ تعداد جهات و دامنه تغییرات پریود و موج مشخصه نشان داده شده است. قابل ذکر است تعداد طوفان های بیان شده در این جدول از یکدیگر مستقل نیستند به عبارت دیگر پس از شناسایی طوفان رخداده تمامی امواج بالای ۱ متر و توزیع جهتی مربوط به آن ها استخراج گردیده است.

جدول ۲- مشخصات طوفان‌های شناسایی شده در هر ایستگاه

جهت رخداد طوفان	دامنه تغییرات ارتفاع موج مشخصه در طوفان (متر)	دامنه تغییرات پریود پیک در طوفان (ثانیه)	تعداد طوفان شناسایی شده $(H_{m0}\geq 1^m)$
شمال غربی	۱-۲/۹۱	۲-۹/۳۹	۱۹۰
غرب	۱-۲/۶۳	۱-۹/۸۸	۱۱۵
جنوب غربی	۱-۲/۲۴	۰/۸-۱۰	۳۴۰
جنوب شرقی	۱-۱/۹۵	۲-۸	۵۶

۳-توابع توزیع جهتی استاندارد

اولین تابع توزیع جهتی توسط پیرسون و همکاران در سال ۱۹۵۵ و بر اساس یک مدل کسینوسی[۸] مطابق فرمول (۲) پیشنهاد گردید[۴].

$$D(\theta)=\begin{cases}\frac{2}{\pi}\cos^2\theta & -\frac{\pi}{2}+\theta_0<\theta<\frac{\pi}{2}+\theta_0\\ 0 & otherwise\end{cases} \qquad (۲)$$

که در آن θ جهت رخداد امواج و θ_0 جهت پریود پیک می باشد. از آن جا که مدل فوق هیچگونه ارتباطی با فرکانس امواج ندارد بنابراین لانگوت هیگینز و همکاران در سال ۱۹۶۳، کریلوف در سال ۱۹۶۶، میتسویاسو در سال ۱۹۷۵ و گودا و سوزوکی در سال ۱۹۷۶ [۵] رابطه (۲) را اصلاح و توابعی مرتبط با فرکانس و بر پایه توابع کسینوسی پیشنهاد کردند. در میان روابط مذکور تابع کسینوسی با ضرایب پیشنهاد شده توسط میتسویاسو و همکاران به عنوان یکی از شناخته شده‌ترین توابع توزیع جهتی در مهندسی دریا شناخته می‌شود. رابطه (۳) مدل کسینوسی توزیع جهتی امواج را نشان می‌دهد[۶].

$$D(f,\theta)=\begin{cases}G(s)\cos^{2s}\left(\frac{\theta-\theta_0}{2}\right) & -\frac{\pi}{2}+\theta_0<\theta<\frac{\pi}{2}+\theta_0\\ 0 & otherwise\end{cases}$$

$$G(s)=\frac{d^{2s-1}}{e}\frac{\Gamma^g(s+1)}{\Gamma(2s+1)}$$

$$s=\begin{cases}s_{\max}\left(f/f_p\right)^b & f<f_p\\ s_{\max}\left(f/f_p\right)^c & f>f_p\end{cases} \qquad (۳)$$

$$s_{\max}=\begin{cases}a & \text{for Wind Waves}\\ a' & \text{for Swell Waves with large steepnes}\\ a'' & \text{for Swell Waves with small steepnes}\end{cases}$$

میتسویاسو و همکاران ضرایب رابطه فوق را به صورت جدول ۳ پیشنهاد کردند.

جدول ۳- ضرایب پیشنهادی میتسویاسو و همکاران برای مدل کسینوسی [۶]

g	e	d	c	b	a''	a'	a
۲	۳/۱۴	۲	-۲/۵	۵	۷۵	۲۵	۱۰

در مدل میتسویاسو و همکاران f و f_p به ترتیب فرکانس و فرکانس پیک بر حسب Hz می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود برای امواج محلی ناشی از باد، پارامتر کنترل کننده فرکانس $(s_{\max})$ برابر ۱۰ و برای امواج دورآ با مسافت زوال کم و زیاد به ترتیب برابر ۲۵ و ۷۵ توصیه شده است[۶].

هاسلمن و همکاران با استفاده از داده‌های پروژه جانسوآپ[۹] در سال ۱۹۷۶، وانگ در سال ۱۹۹۲، کروستاد و همکاران در سال ۱۹۹۷، کومار و همکاران در سال ۱۹۹۴ [۷]، کومار در سال ۲۰۰۸ [۸] و سریسوآن و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۹]هریک رابطه فوق را با داده‌های میدانی مناطق مختلف کالیبراسیون و مقادیر $s_{\max}$ متفاوتی را در هر منطقه پیشنهاد کردند. در ادامه در سال ۱۹۸۶ تابع توزیع جهتی مطابق یک مدل پواسونی[۱۰] و طبق رابطه (۴) معرفی شد[۱۰].

$$D(f,\theta)=a.\frac{1-x^2}{1-2x\cos(\theta)+x^2}$$

$$x=\begin{cases}x(f)=b\left(f/f_p\right)^c & for \quad f\leq f_p\\ x(f)=d\left(f/f_p\right)^e & for \quad f>f_p\end{cases} \qquad (۴)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]

لیره و کروستاد نیز ضرایب رابطه فوق را صورت جدول ۴ پیشنهاد کردند.

جدول ۴- ضرایب پیشنهادی لیره و کروستاد برای مدل پوآسونی [۹]

e	d	c	b	a
-۰/۳۵	۰/۹	۲/۲۱	۰/۹	۰/۵

دونلن و همکاران نیز در سال ۱۹۸۵ تابع توزیع جهتی را به عنوانی مدلی هایپربولیکی[11] طبق رابطه (۵) معرفی نمودند[۹].

$$D(f,\theta)=a\beta\cosh^{-2}\left[\beta(\theta-\theta_0)\right]$$

$$\beta=\begin{cases} b\left(\dfrac{f}{f_p}\right)^{c} & for \quad 0.56<\dfrac{\omega}{\omega_p}<0.95 \\ d\left(\dfrac{f}{f_p}\right)^{e} & for \quad 0.95<\dfrac{\omega}{\omega_p}<1.60 \\ h\left(\dfrac{f}{f_p}\right)^{g} & otherwise \end{cases} \qquad (۵)$$

دونلن و همکاران ضرایب رابطه فوق را به صورت جدول ۵ پیشنهاد کردند.

جدول ۵- ضرایب پیشنهادی دونلن و همکاران برای مدل هایپربولیک[۹]

g	h	e	d	c	b	a
۰	۱/۲۴	-۱/۳	۲/۲۸	۱/۳	۲/۶۱	۰/۵

که در آن f و f_p به ترتیب فرکانس و فرکانس پیک بر حسب Hz، θ و θ_0 به ترتیب جهت موج و جهت پریود پیک بر حسب درجه می‌باشد.

۴-عملکرد تابع های توزیع جهتی استاندارد

برای مقایسه مدل‌های طیفی بیان شده با طیف‌های استخراج شده در هر ایستگاه دو معیار مختلف تعریف می‌شود. این معیارها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که حداکثر اطلاعات آماری از نحوه همخوانی داده‌های میدانی با مدل‌های جهتی را ارائه دهد. خطای جذر میانگین مربعات $(RMSE)$ و همچنین اختلاف حجم بین داده‌های میدانی و داده‌های ناشی از مدل‌سازی $(Error\ (V))$ که بیانگر میزان اختلاف انرژی ناشی از مدل سازی با داده‌های میدانی می‌باشد، از معیارهای انتخاب شده برای مطالعه آماری این تحقیق می‌باشد. روابط (۶) و (۷) این دو معیار را نشان می‌دهد.

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(D(f,\theta)_{filed}-D(f,\theta)_{\mathrm{mod}}\right)^2}{n}} \qquad (۶)$$

$$Error(V)=\frac{\left|V_{\mathrm{mod}}-V_{field}\right|}{V_{\mathrm{mod}}} \qquad (۷)$$

در ادامه با توجه به روابط بیان شده تابع‌های توزیع جهتی، پارامترهای آماری حاصل از مقایسه مدل‌های توزیع جهتی با توزیع های جهتی مستخرج ایستگاه‌های ۱ الی ۴ تنگه هرمز در جدول ۶ نشان داده شده است. همانطور که از جدول ۶ و شکل ۵ مشخص است هر سه مدل عملکرد ضعیفی داشته و نیاز است نسبت به اصلاح هر سه مدل اقدام شود.

جدول ۶- عملکرد آماری توزیع‌های جهتی استاندارد در مقایسه با توزیع‌های جهتی میدانی با توجه به جهت رخداد طوفان

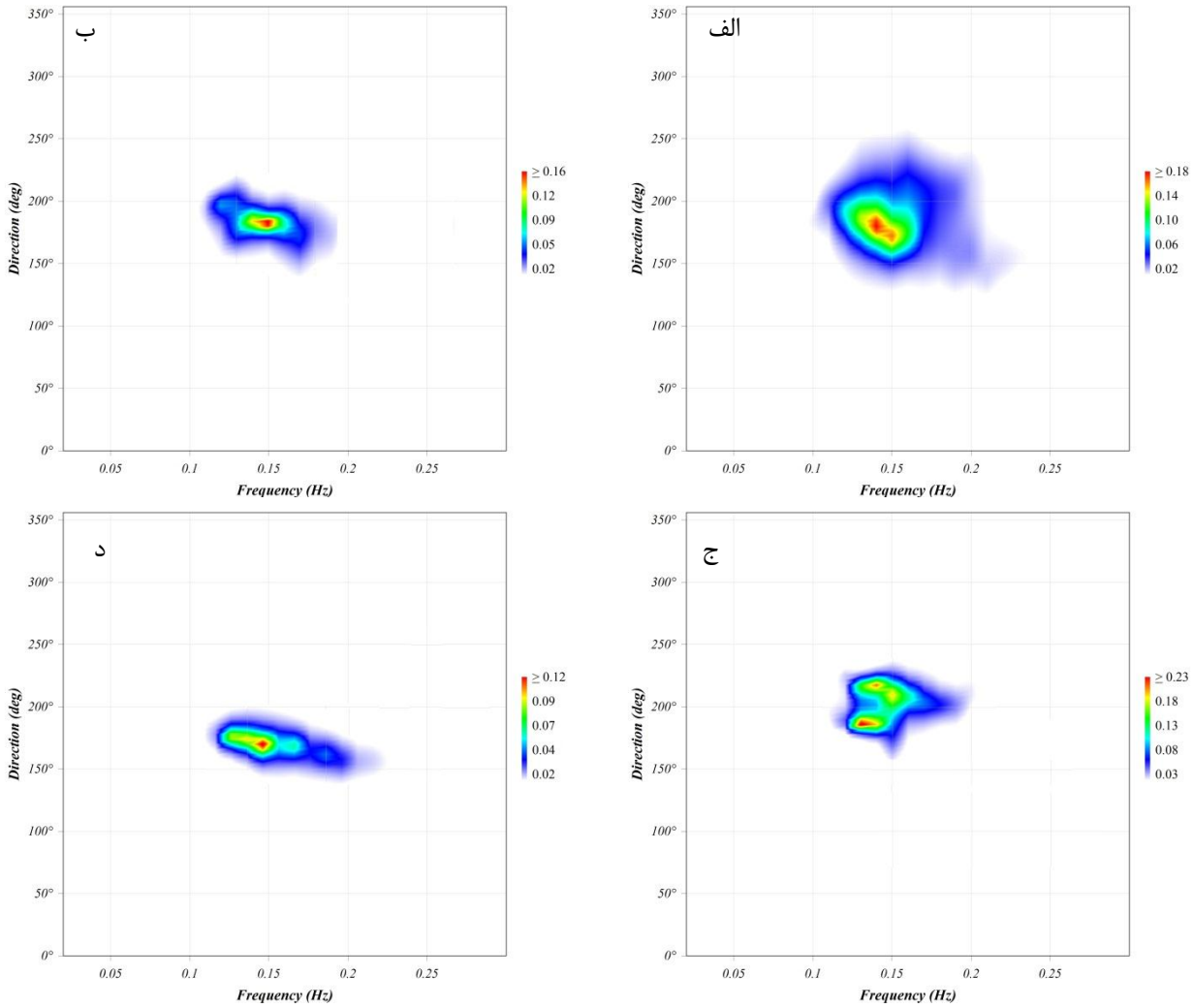
جهت رخداد طوفان	توزیع جهتی	$RMSE$	$Error\ (V)$
شمال غربی	میتسویاسو و همکاران	۰/۴۰	٪۲۰
	لیره و کروستاد	۰/۵۱	٪۲۷
	دونلن و همکاران	۰/۶۳	٪۳۵
غرب	میتسویاسو و همکاران	۰/۳۷	٪۲۲
	لیره و کروستاد	۰/۴۹	٪۲۹
	دونلن و همکاران	۰/۵۶	٪۳۹
جنوب غربی	میتسویاسو و همکاران	۰/۴۶	٪۲۶
	لیره و کروستاد	۰/۵۹	٪۳۱
	دونلن و همکاران	۰/۶۱	٪۳۴
جنوب شرقی	میتسویاسو و همکاران	۰/۴۱	٪۲۴
	لیره و کروستاد	۰/۵۰	٪۲۶
	دونلن و همکاران	۰/۵۷	٪۲۹

شکل ۵ توزیع جهتی را در میدان و در مقایسه با سه مدل استاندارد مذکور نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است هر سه تابع استاندارد همانند توزیع جهتی میدانی در فرکانس پیک $\left(f_p=0.14\right)$ و در زاویه پریود پیک $\left(\theta_0=180^{\circ}\right)$ حداکثر می‌باشند.

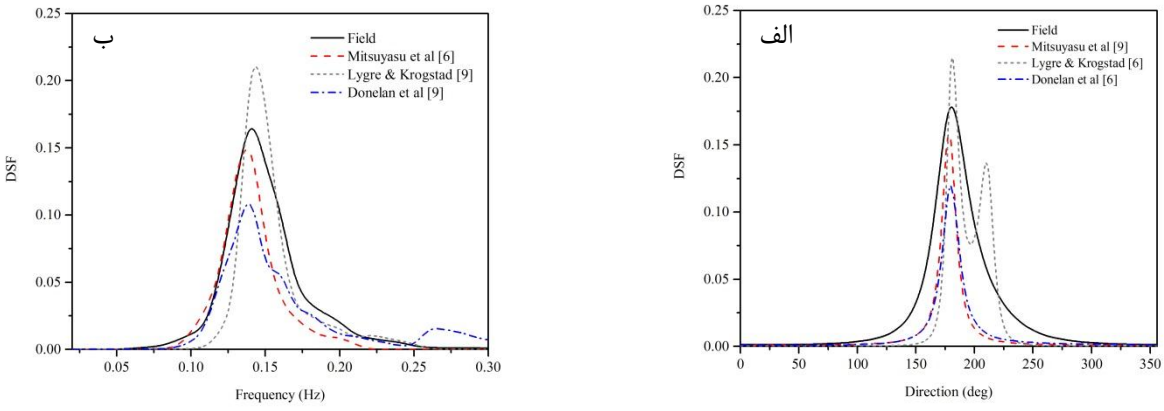
همچنین برای بررسی بیشتر نمایی دو بعدی از عملکرد این توابع استاندارد مطابق شکل ۶ رسم شده است. همانطور که از بررسی شکل ۵ و ۶ مشخص می‌گردد توزیع جهتی استاندارد میتسویاسو و دونلن یک توزیع با پهنای باند کمتر نسبت به مقدار میدانی ارائه می‌دهند و توزیع جهتی استاندارد لیره نیز عملکردی دو قله دارد لذا برای افزایش دقت مدل‌سازی جهتی امواج لازم است هر سه مدل اصلاح می‌شوند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]



شکل ۵- عملکرد توزیع‌های جهتی استاندارد در مقایسه با توزیع جهتی میدانی "رخداد از سمت غرب $\left(\theta_0 = 180^\circ\right)$ مورخه ۲۰۱۰/۱۲/۱۳" الف: توزیع جهتی میدانی، ب: توزیع جهتی میتسویاسو و همکاران [۶] ج: لیره و کروستاد [۹] د: دونلن و همکاران [۹]



شکل ۶- نمای دو بعدی عملکرد توزیع‌های جهتی استاندارد در مقایسه با توزیع جهتی میدانی " رخداد از سمت غرب $\left(\theta_0 = 180^\circ\right)$ مورخه ۲۰۱۰/۱۲/۱۳"، الف:توزیع جهتی در فرکانس پیک، ب: توزیع جهتی در جهت غالب رخداد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]

۵-کالیبراسیون تابع های توزیع جهتی استاندارد

با در نظر گرفتن نتایج جدول ۶ در این بخش به بهینه‌سازی ضرایب توزیع جهتی هر سه مدل فوق پرداخته می‌شود. هدف از انجام این بهینه‌سازی افزایش توانایی توابع توزیع جهتی و یافتن ضرایب مناسب این توابع برای مدل سازی در این منطقه می‌باشد. روش مورد استفاده برای این منظور روش گرادیان کاهش یافته عمومی می‌باشد که با توجه به این روش نسبت به کمینه کردن مقدار $RMSE$ و $Error(V)$ اقدام می‌شود.

۵-۱- کالیبراسیون تابع توزیع جهتی کسینوسی

برای این تابع توزیع جهتی نسبت به کالیبراسیون این مدل با ۶ ضریب a,b,c,d,e,g اقدام می‌شود. مقادیر استاندارد پیشنهاد شده برای این ضرایب توسط میتسویاسو و همکاران در بخش ۳ تعریف شد. قابل ذکر است با توجه به بررسی عملکرد توزیع جهتی استاندارد مشخص گردید که ضریب کنترل کننده فرکانس (s_{max}) در این منطقه حدود ۱۰ است که مناسب برای امواج ناشی از باد است لذا به جای تعریف سه ضریب کنترل فرکانس (a,a',a'') فقط یک ضریب a تعریف می‌شود.

جدول ۷ نتایج حاصل از بهینه‌سازی مدل کسینوسی را با توجه به جهت رخداد طوفان نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود این بهینه‌سازی منجر به افزایش حداقل ۷۸٪ (رخداد غرب) دقت مدل‌سازی توزیع جهتی در این منطقه گردیده است.

جدول ۷- نتایج حاصل از کالیبراسیون تابع توزیع جهتی کسینوسی با توجه به جهت رخداد

رخداد طوفان	نتایج با ضرایب پیشنهادی میتسویاسو و همکاران								نتایج با ضرایب کالیبره شده							
	a	b	c	d	e	g	$RMSE$	$Error(V)$	a	b	c	d	e	g	$RMSE$	$Error(V)$
شمال غربی	۱۰	۵	-۲/۵	۲	۳/۱۴	۲	۰/۴	۰/۲	۱۴	۵	-۳	۳/۳۰	۳/۲۷	۲	۰/۰۸	۰/۰۵
غرب	۱۰	۵	-۲/۵	۲	۳/۱۴	۲	۰/۳۷	۰/۲۲	۱۲	۵/۵	-۳	۳/۱۱	۳/۲۵	۲	۰/۰۶	۰/۰۸
جنوب غربی	۱۰	۵	-۲/۵	۲	۳/۱۴	۲	۰/۴۶	۰/۲۶	۱۲	۵	-۳	۳/۷۲	۲/۷۷	۲	۰/۱۰	۰/۱۰
جنوب شرقی	۱۰	۵	-۲/۵	۲	۳/۱۴	۲	۰/۴۱	۰/۲۴	۱۰	۴/۳	-۳	۳/۵۴	۲/۹۵	۲	۰/۰۸	۰/۰۷

در ادامه و برای دستیابی به مدلی کاربردی‌تر تابع فوق بدون توجه به جهت رخداد موج و با روی هم قرار دادن تمامی داده‌های میدانی مورد کالیبراسیون قرار می‌گیرد. نتایج حاصل مطابق جدول ۸ دارای دقت پایین‌تر نسبت به تابع وابسته به توزیع جهتی، و دارای دقت بیشتر نسبت به مدل میتسویاسو و همکاران هستند. همانطور که مشاهده می‌شود این بهینه‌سازی بیش از ۷۰٪ خطای مدل‌سازی توزیع جهتی برای منطقه تنگه هرمز را کاهش می‌دهد.

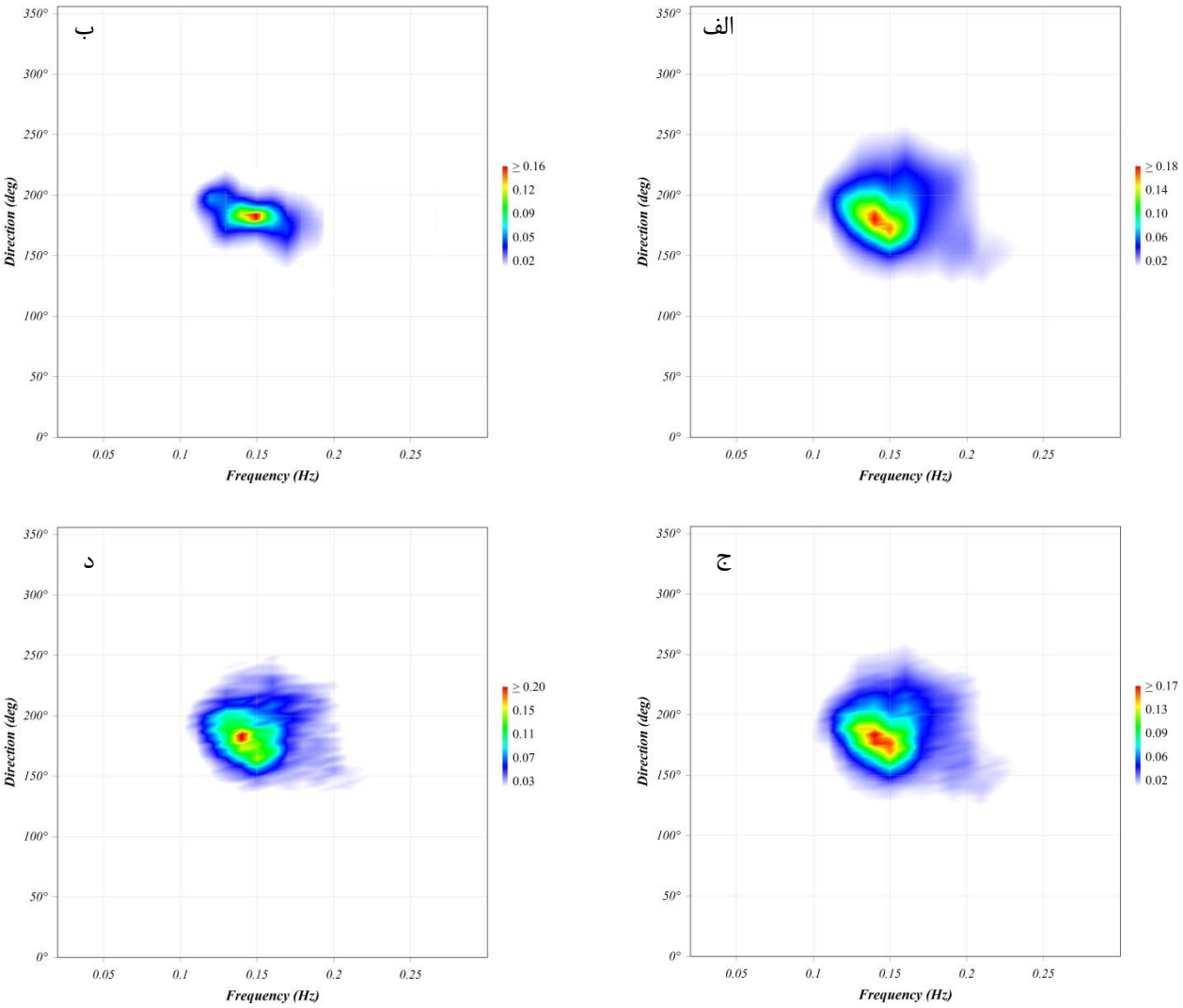
جدول ۸- نتایج حاصل از کالیبراسیون تابع توزیع جهتی کسینوسی بدون توجه به جهت رخداد (کاملا کالیبره شده)

نتایج با ضرایب پیشنهادی میتسویاسو و همکاران								نتایج با ضرایب کاملاً کالیبره شده							
a	b	c	d	e	g	$RMSE$	$Error(V)$	a	b	c	d	e	g	$RMSE$	$Error(V)$
۱۰	۵	-۲/۵	۲	۳/۱۴	۲	۰/۴۲	۰/۲۴	۱۲	۵	-۳	۳/۵	۳	۲	۰/۱۲	۰/۱۵

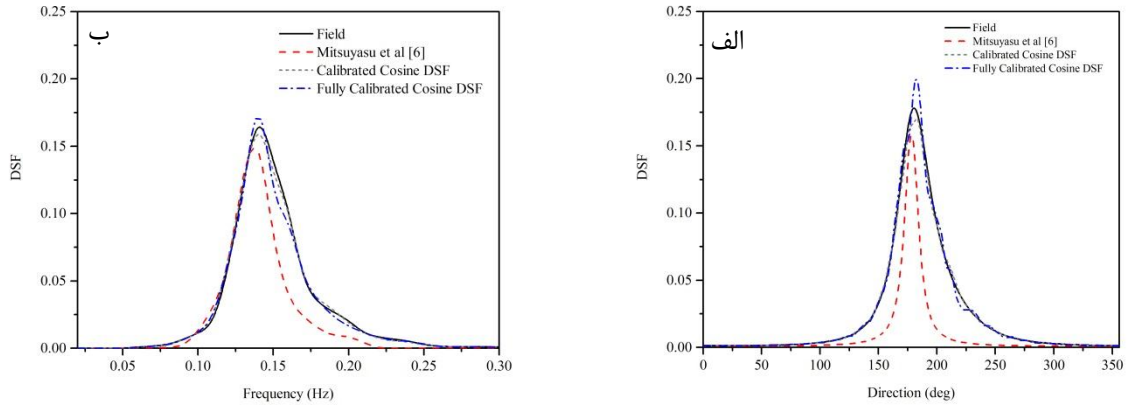
شکل ۷ نیز نشان دهنده نحوه عملکرد تابع کسینوسی قبل و بعد از انجام کالیبراسیون و شکل ۸ نمای دو بعدی از عملکرد این تابع توزیع جهتی را نشان می دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]



شکل ۷- عملکرد توزیع های جهتی استاندارد میتسویاسو و همکاران،کالیبره شده و کاملا کالیبره شده کسینوسی در مقایسه با میدانی (رخداد از سمت غرب $\left(\theta_0 = 180^\circ\right)$ مورخه ۲۰۱۰/۱۲/۱۳) الف: توزیع جهتی میدانی، ب: توزیع جهتی میتسویاسو و همکاران [۶] ج: توزیع جهتی کسینوسی کالیبره شده د: توزیع جهتی کسینوسی کاملاً کالیبره شده



شکل ۸- نمای دو بعدی عملکرد توزیع های جهتی استاندارد میتسویاسو و همکاران،کالیبره شده و کاملا کالیبره شده کسینوسی در مقایسه با میدانی (رخداد از سمت غرب $\left(\theta_0 = 180^\circ\right)$ مورخه ۲۰۱۰/۱۲/۱۳) الف: در فرکانس غالب ب: در جهت رخداد موج پریود پیک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]

۵-۲- کالیبراسیون تابع توزیع جهتی پوآسونی

برای این تابع توزیع جهتی نسبت به کالیبراسیون این مدل با ۵ ضریب a تا e اقدام می‌شود. مقادیر استاندارد پیشنهاد شده برای این ضرایب توسط لیره و کروستاد در بخش ۳ تعریف شد. جدول۹ نتایج حاصل از بهینه سازی این توزیع جهتی در مقایسه با ضرایب پیشنهادی لیره و کروستاد را با توجه به جهت رخداد طوفان نشان می دهد. این بهینه‌سازی منجر به کاهش ۷۰٪ خطای مدل سازی با تابع توزیع جهتی مذکور گردیده است.

جدول ۹- نتایج حاصل از کالیبراسیون تابع توزیع جهتی پوآسونی با توجه به جهت رخداد

رخداد طوفان	نتایج با ضرایب پیشنهادی لیره و کروستاد							نتایج با ضرایب کالیبره شده						
	a	b	c	d	e	$RMSE$	$Error(V)$	a	b	c	d	e	$RMSE$	$Error(V)$
شمال غربی	۰/۵	۰/۹	۲/۲۱	۰/۹	-۰/۳۵	۰/۵۱	۰/۲۷	۰/۵	۰/۹	۳/۱۲	۰/۹	-۰/۴۲	۰/۱۵	۰/۰۹
غرب	۰/۵	۰/۹	۲/۲۱	۰/۹	-۰/۳۵	۰/۴۹	۰/۲۹	۰/۵	۰/۹	۳/۰۵	۰/۹	-۰/۴۶	۰/۱۲	۰/۱۳
جنوب غربی	۰/۵	۰/۹	۲/۲۱	۰/۹	-۰/۳۵	۰/۵۹	۰/۳۱	۰/۵	۰/۹	۳/۰۵	۰/۹	-۰/۴۶	۰/۱۷	۰/۱۵
جنوب شرقی	۰/۵	۰/۹	۲/۲۱	۰/۹	-۰/۳۵	۰/۵۰	۰/۲۶	۰/۵	۰/۹	۳/۰۵	۰/۹	-۰/۴۶	۰/۱۴	۰/۱۱

در ادامه و برای دستیابی به مدلی کاربردی تر همانند مدل قبلی تابع فوق بدون توجه به جهت رخداد موج و با روی هم قرار دادن تمامی داده های میدانی مورد کالیبراسیون قرار میگیرد. نتایج حاصل دارای دقت پایین تر نسبت به تابع وابسته به توزیع جهتی و دارای دقت بیشتر نسبت به مدل استاندارد دارند. نتایج جدول ۱۰ بیان کننده کاهش بیش از ۶۰٪ خطای مدل‌سازی این تابع توزیع جهتی با ضرایب جدید می‌باشد.

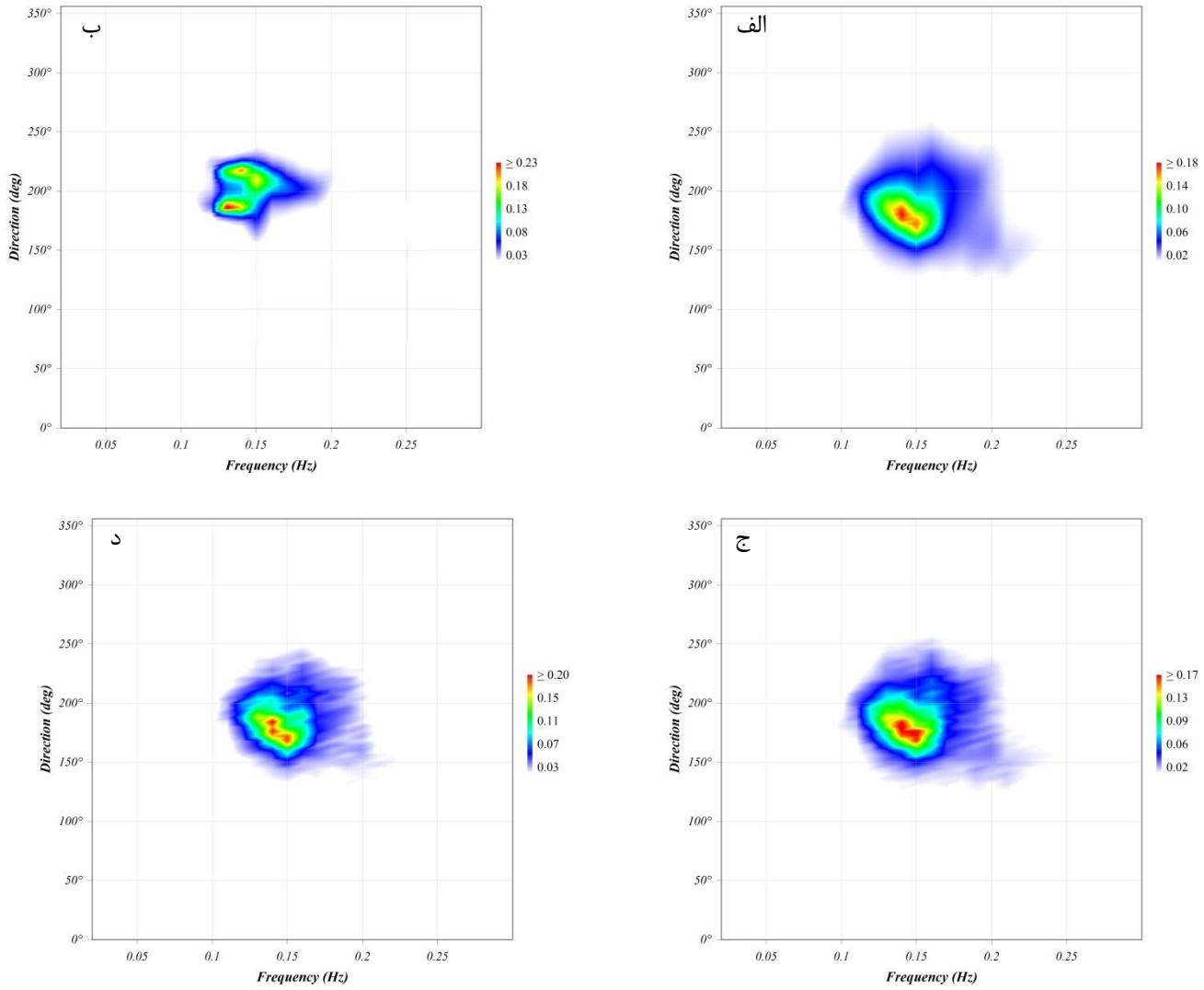
جدول ۱۰- نتایج حاصل از کالیبراسیون تابع توزیع جهتی پوآسونی بدون توجه به جهت رخداد (کاملا کالیبره شده)

نتایج با ضرایب پیشنهادی لیره و کروستاد							نتایج با ضرایب کاملاً کالیبره شده						
a	b	c	d	e	$RMSE$	$Error(V)$	a	b	c	d	e	$RMSE$	$Error(V)$
۰/۵	۰/۹	۲/۲۱	۰/۹	-۰/۳۵	۰/۵۴	۰/۲۹	۰/۵	۰/۹	۳/۰۰	۰/۹	-۰/۳۸	۰/۲۱	۰/۱۹

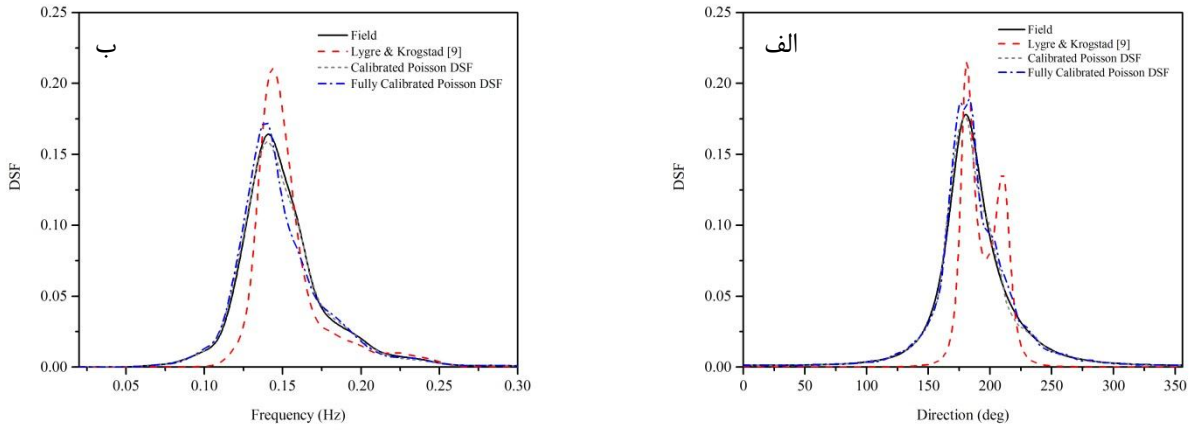
شکل ۹ نبز نشان دهنده نحوه عملکرد توزیع استاندارد پوآسونی قبل و بعد از انجام کالیبراسیون و شکل ۱۰ نمای دو بعدی از عملکرد این تابع توزیع جهتی را نشان می دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]



شکل ۹- عملکرد توزیع های جهتی استاندارد لیره و کروستاد، کالیبره شده و کاملا کالیبره شده پوآسونی در مقایسه با میدانی (رخداد از سمت غرب $\left(\theta_0 = 180^\circ\right)$ مورخه ۲۰۱۰/۱۲/۱۳) الف: توزیع جهتی میدانی، ب: توزیع جهتی لیره و کروستاد [۶] ج: توزیع جهتی پوآسونی کالیبره شده د: توزیع جهتی پوآسونی کاملاً کالیبره شده



شکل ۱۰. نمای دو بعدی عملکرد توزیع های جهتی استاندارد و کالیبره شده و کاملا کالیبره شده لیره و کروستاد در مقایسه با میدانی (رخداد از سمت غرب $\left(\theta_0 = 180^\circ\right)$ مورخه ۲۰۱۰/۱۲/۱۳) الف: در فرکانس غالب ب: در جهت رخداد موج پریود پیک ، از سمت عرب مورخه ۲۰۱۰/۱۲/۱۲) a: در فرکانس غالب D: در جهت رخداد موج پریود پیک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]

۵-۳- کالیبراسیون تابع توزیع جهتی هایپربولیکی

برای این تابع توزیع جهتی نسبت به کالیبراسیون این مدل با ۷ ضریب a,b,c,d,e,g,h اقدام می‌شود. مقادیر استاندارد پیشنهاد شده برای این ضرایب توسط دونلن و همکاران در بخش ۳ تعریف شد. جدول ۱۱ نتایج حاصل از بهینه‌سازی این مدل در مقایسه با مدل استاندارد را با توجه به جهت رخداد طوفان نشان می‌دهد. روش بهینه سازی گرادیان کاهش یافته عمومی با کاهش بیش از ۶۵٪ خطای مدل سازی ضرایبی جدید پیشنهاد نموده است. از آن جا که در منطقه مذکور حداکثر فرکانس امواج رخ داده و ثبت شده حدود ۰/۵ هرتز می‌باشد و امواج با فرکانس بیشتر از این نیز در مطالعات مهندسی دریا فاقد ارزش می‌باشند لذا ضرایب b، c، d ، e عملاً در مدل سازی نقشی نداشته و برابر صفر توصیه شده‌اند.

جدول ۱۱- نتایج حاصل از کالیبراسیون تابع توزیع جهتی هایپربولیکی با توجه به جهت رخداد

رخداد طوفان	نتایج با ضرایب پیشنهادی دونلن و همکاران									نتایج با ضرایب کالیبره شده									
	a	b	c	d	e	h	g	$RMSE$	$Error(V)$	a	b	c	d	e	h	g	$RMSE$	$Error(V)$
شمال غربی	۰/۵	۲/۶۱	۱/۳	۲/۲۸	-۱/۳	۱/۲۴	۰	۰/۶۳	۰/۳۵	۰/۵	۰	۰	۰	۰	۱/۳۷	۰/۱۰	۰/۱۹	۰/۱۲
غرب	۰/۵	۲/۶۱	۱/۳	۲/۲۸	-۱/۳	۱/۲۴	۰	۰/۵۶	۰/۳۹	۰/۵	۰	۰	۰	۰	۱/۳۷	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۱۵
جنوب غربی	۰/۵	۲/۶۱	۱/۳	۲/۲۸	-۱/۳	۱/۲۴	۰	۰/۶۱	۰/۳۴	۰/۵	۰	۰	۰	۰	۱/۳۷	۰/۱۰	۰/۲۰	۰/۱۳
جنوب شرقی	۰/۵	۲/۶۱	۱/۳	۲/۲۸	-۱/۳	۱/۲۴	۰	۰/۵۷	۰/۲۹	۰/۵	۰	۰	۰	۰	۱/۳۷	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۱۰

در ادامه و برای دستیابی به مدلی کاربردی تر همانند مدل قبلی تابع فوق بدون توجه به جهت رخداد موج و با روی هم قرار دادن تمامی داده های میدانی مورد کالیبراسیون قرار میگیرد. نتایج حاصل دارای دقت پایین تر نسبت به تابع وابسته به توزیع جهتی و دارای دقت بیشتر نسبت به مدل استاندارد هستند. کاهش بیش از ۶۰٪ خطا در مدل سازی توزیع جهتی و توصیه مقدار صفر برای ضرایب b، c، d، e از نکات قابل توجه جدول ۱۲ می‌باشد.

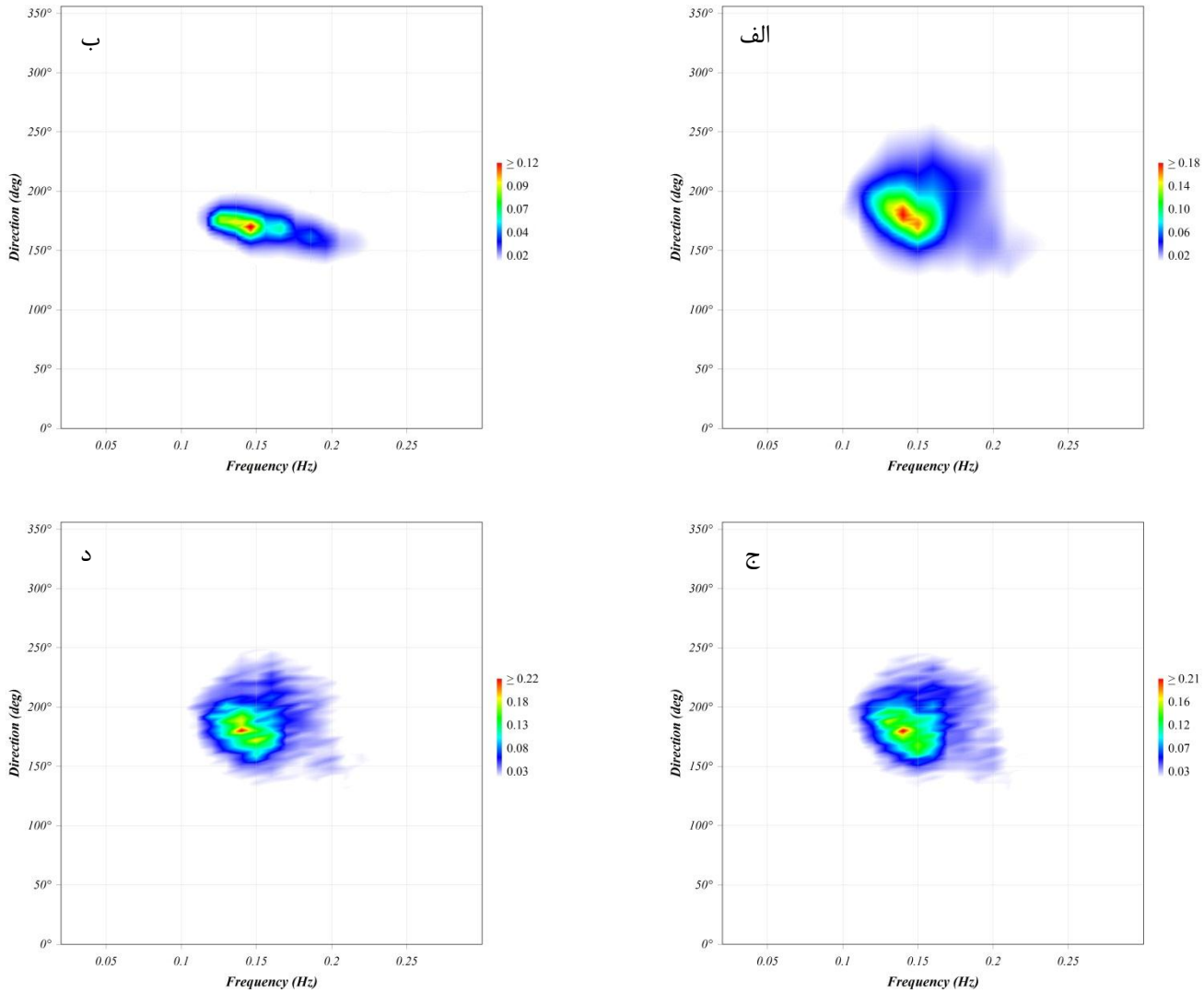
جدول ۱۲- نتایج حاصل از کالیبراسیون تابع توزیع جهتی هایپربولیکی بدون توجه به جهت رخداد (کاملا کالیبره شده)

نتایج با ضرایب پیشنهادی دونلن و همکاران										نتایج با ضرایب کاملاً کالیبره شده									
a	b	c	d	e	h	g	$RMSE$	$Error(V)$		a	b	c	d	e	h	g	$RMSE$	$Error(V)$	
۰/۵	۲/۶۱	۱/۳	۲/۲۸	-۱/۳	۱/۲۴	۰	۰/۶۰	۰/۳۵		۰/۵	۰	۰	۰	۰	۱/۳۰	۰/۱۲	۰/۲۳	۰/۱۸	

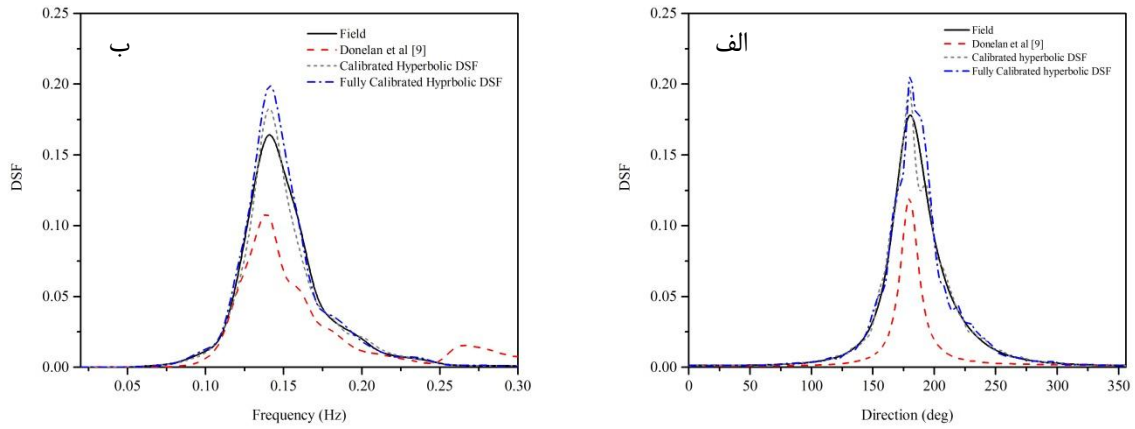
شکل ۱۱ نیز نشان دهنده نحوه عملکرد توزیع استاندارد هایپربولیکی قبل و بعد از انجام کالیبراسیون و شکل ۱۲ نمای دو بعدی از عملکرد این تابع توزیع جهتی را نشان می دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]



شکل ۱۱- عملکرد توزیع های جهتی استاندارد دونلن و همکاران، کالیبره شده و کاملا کالیبره شده هایپربولیکی در مقایسه با میدانی (رخداد از سمت غرب $\left(\theta_0 = 180^\circ\right)$ مورخه ۲۰۱۰/۱۲/۱۳) الف: توزیع جهتی میدانی، ب: توزیع جهتی دونلن و همکاران [۶] ج: توزیع جهتی هایپربولیکی کالیبره شده د: توزیع جهتی هایپربولیکی کاملاً کالیبره شده



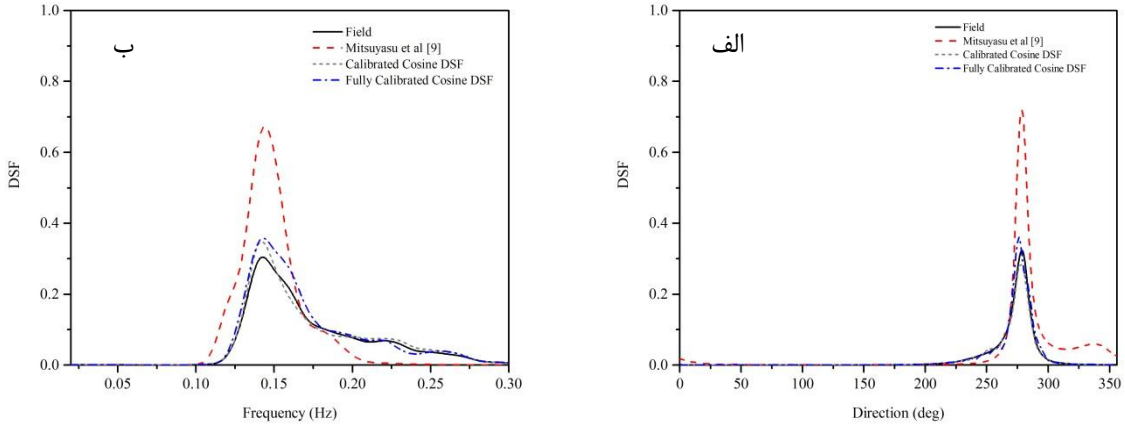
شکل ۱۲- نمای دو بعدی عملکرد توزیع های جهتی استاندارد و کالیبره شده و کاملا کالیبره شده دونلن در مقایسه با میدانی (رخداد از سمت غرب $\left(\theta_0 = 180^\circ\right)$ مورخه ۲۰۱۰/۱۲/۱۳) الف: در فرکانس غالب ب: در جهت رخداد موج پریود پیک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

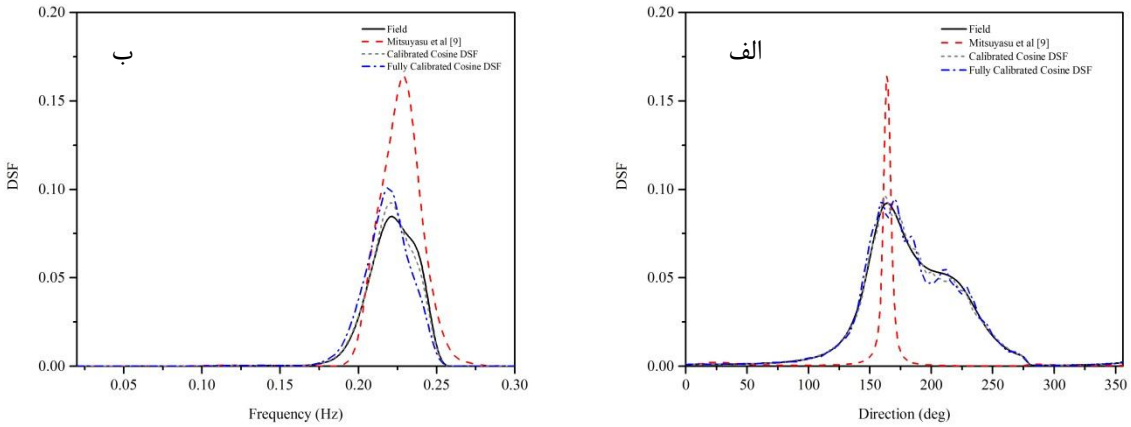
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]

۶- بررسی نتایج در چند طوفان نمونه

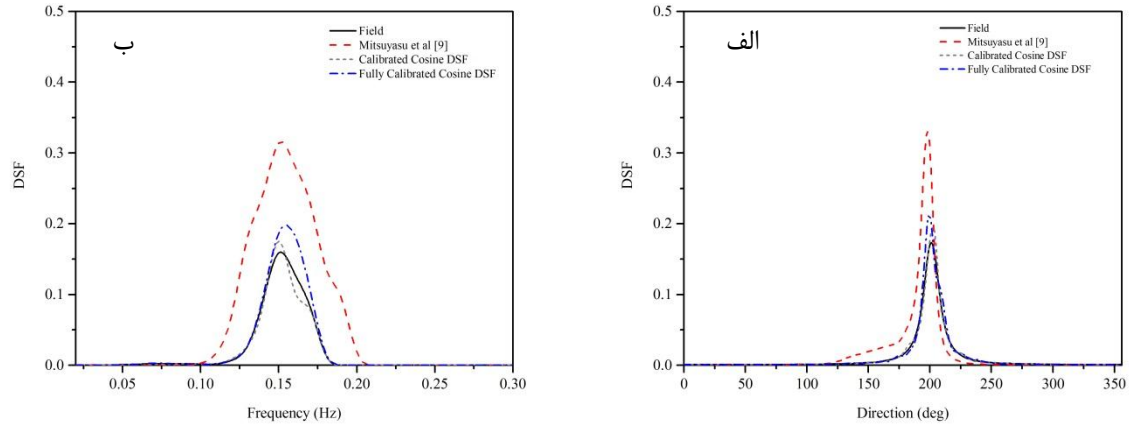
آنچه که از نتایج بخش های ۴ و ۵ نتیجه شد حکایت از برتری مدل کسینوسی (در هر سه حالت استاندارد با ضرایب میتسویاسو و همکاران، کالیبره شده و کاملا کالیبره شده) نسبت به دو مدل دیگر دارد. در این بخش نتایج در سه طوفان از سه جهت رخداد متفاوت (جنوب شرق، شمال غرب و جنوب غرب) و سه پریود پیک متفاوت بررسی می‌شود. همانطور که از شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ مشخص است هر دو مدل کالیبره شده و کاملا کالیبره شده کسینوسی تطابق بسیار خوبی با توزیع جهتی میدانی دارد.



شکل ۱۳- نمای دو بعدی عملکرد توزیع های جهتی کسینوسی با ضرایب میتسویاسو و همکاران،کالیبره شده و کاملا کالیبره شده کسینوسی در مقایسه با میدانی (رخداد از سمت جنوب شرق $\left(\theta_0 = 285^\circ\right)$ مورخه ۲۰۱۰/۰۷/۱۶) الف: در فرکانس غالب ب: در جهت رخداد موج پریود پیک



شکل ۱۴- نمای دو بعدی عملکرد توزیع های جهتی کسینوسی با ضرایب میتسویاسو و همکاران،کالیبره شده و کاملا کالیبره شده کسینوسی در مقایسه با میدانی (رخداد از سمت شمال غرب $\left(\theta_0 = 170^\circ\right)$ مورخه ۲۰۱۰/۰۱/۰۶) الف: در فرکانس غالب ب: در جهت رخداد موج پریود پیک



شکل ۱۵- نمای دو بعدی عملکرد توزیع های جهتی کسینوسی با ضرایب میتسویاسو و همکاران،کالیبره شده و کاملا کالیبره شده کسینوسی در مقایسه با میدانی (رخداد از سمت جنوب غرب $\left(\theta_0 = 200^\circ\right)$ مورخه ۲۰۱۱/۰۳/۰۴) الف: در فرکانس غالب ب: در جهت رخداد موج پریود پیک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج حاصل شده در این تحقیق نشانگر عدم توانایی سه مدل توزیع جهتی کسینوسی، پوآسون و هایپربولیک با ضرایب پیشنهادی توسط میتسویاسو همکاران، لیره و کروستاد، و دونلن همکاران برای مدل‌سازی توزیع جهتی امواج در منطقه تنگه هرمز می‌باشد. لذا برای افزایش دقت مدلسازی توزیع جهتی امواج در این منطقه توابع مذکور اصلاح شدند. با متغیر در نظر گرفتن ضرایب معرفی شده در این توزیع‌ها و با استفاده از روش گرادیان کاهش یافته عمومی، حداقل مقدار افزایش دقت مدلسازی برای هر سه مدل کسینوسی، پوآسون و هایپربولیک با در نظر گرفتن جهت رخداد موج به ترتیب برابر ۷۸٪، ۷۰٪ و ۶۵٪ و بدون در نظر گرفتن جهت رخداد موج به ترتیب برابر ۷۰٪، ۶۰٪ و ۶۰٪ بوده است.

ضرایب معرفی شده در این تحقیق با ضرایب معرفی شده توسط سایر محققان (که برای سایر دریاها محاسبه و توصیه شده‌اند) در برخی موارد اختلاف زیاد و در برخی دیگر اختلاف ناچیزی دارد. این اختلاف‌ها لزوم استفاده از یک مدل مناسب با توجه به شرایط امواج منطقه تنگه هرمز را بیان می‌دارد.

در نهایت برای مدلسازی جهتی امواج در منطقه تنگه هرمز می‌توان از هر سه مدل فوق‌الذکر استفاده کرد اما بایستی توجه کرد که مدل کسینوسی دارای خطای کمتر و مدل پوآسون دارای رابطه‌ای ساده‌تر است.

شایان ذکر است در آینده در صورت ثبت داده‌هایی جدید در منطقه، نتایج می‌تواند دارای دقت بیشتری گردد.

۸- تشکر و قدردانی

نتایج ارایه شده در مقاله حاضر، بخشی از پروژه تعیین مدل مناسب طیف امواج دریای عمان و تنگه هرمز می‌باشد که با حمایت سازمان بنادر و دریانوردی انجام شده است. مولفین مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مساعدت‌ها و همکاری‌های مدیریت محترم کل سواحل و بنادر سازمان بنادر و دریانوردی و همکاران ایشان اعلام می‌نمایند.

کلید واژگان

1- Surf Zone
2- AWAC
3- AST (Acoustic with Surface Tracking)
4- PUV (Pressure with Velocity Vector (U & V))
5- Transducer
6- Echo Sounder
7- Threshold
8- Cosine Model
9- JONSWAP
10- Poisson Model
11- Hyperbolic Model

۹- مراجع

1-Benoit, M., Frigaard, P., & Sch, H. A. (1997). *Analyzing multidirectional wave spectra: a tentative classification of available methods.*. Proc Seminar on Multidirectional Waves and their Interaction with Structures, San Francisco, CA, International Assembly of Hydraulic Research, 131–158.

2-Michel, W. H. (1999). *Sea spectra revisited*. Marine Technol, 36(4), 211-227.

3- Det Norske Veritas (2011). *Modelling and analysis of marine operations*. Technical Report: DNV-RP-H103

4-Casas Prat, M. (2009). *Overview of ocean wave statistics* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

۵- Goda, Y., & Suzuki, T. (1976). *Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments*. Coastal engineering proceedings, 1(15).

۶- Mitsuyasu, H., Tasai, F., Suhara, T., Mizuno, S., Ohkusu, M., Honda, T., & Rikiishi, K. (1975). *Observations of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy*. Journal of Physical Oceanography, 5(4), 750-760.

۷- Elfouhaily, T., Chapron, B., Katsaros, K., & Vandemark, D. (1997). *A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves*. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 102(C7), 15781-15796.

۸ - Onorato, M., Cavaleri, L., Fouques, S., Gramstad, O., Janssen, P. A. E. M., Monbaliu, J., ... & Trulsen, K (2009). *Statistical properties of mechanically generated surface gravity waves: a laboratory experiment in a three-dimensional wave basin*. Journal of Fluid Mechanics, 627, 235-257.

۹- Srisuwan, C., & Work, P. A. (2013). *Directional surface wave spectra from acoustic Doppler current profiler data*. Ocean Engineering, 72, 149-159.

۱۰- Massel, S. R. (1996). *Ocean surface waves: their physics and prediction* (Vol. 11). World Scientific.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.8.2]