

## تخمین حالت دریا با استفاده از رادار با قدرت تفکیک بالا

علی محمد دهقانی<sup>۱</sup>، سید محمد علوی<sup>۲\*</sup>، عباس شیخی<sup>۳</sup>، رضا حق مرام<sup>۴</sup>، مریم سادات خاتمی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکترا، ۲- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>، ۳- استاد، دانشگاه شیراز، ۴- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>،

۵- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت: ۹۵/۰۱/۱۸؛ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۱)

### چکیده

برای رادارهای دریایی، مفهوم حالت یا فورس دریا مهم می‌باشد. در این مقاله در ابتدا معادله موج دریا و شکل حرکتی آن تعیین شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار Feko شکل‌های حاصل از موج دریا بازسازی شده است. در گام بعدی اقدام به محاسبه RCS حاصل از برخورد امواج رادار با قدرت تفکیک بالای معین، به سطح دریا کرده تا زمینه به‌دست آوردن سیگنال برگشتی از امواج دریا در ورودی آنتن مهیا شود. پس از مشخص شدن سیگنال‌های برگشتی در حوزه زمان و دریافت این سیگنال‌ها توسط سیستم گیرنده رادار، ممان‌های اول تا چهارم آنها محاسبه می‌شود. سپس اقدام به تشکیل فضای ویژگی کرده و با استفاده از آن موج دریا در چهار حالت مختلف دسته‌بندی می‌شود. در نهایت نیز با اضافه کردن نویز به سیگنال‌های برگشتی از دریا دقت روش پیشنهادی اندازه‌گیری شده است.

### واژگان کلیدی

تخمین حالت یا وضعیت دریا، شکل موج دریا، رادار HRR، ممان‌های موج دریا، دسته‌بندی امواج دریا.

#### ۱. مقدمه

در طراحی کشتی‌ها و نیروهای وارد بر آنها از سوی آب، شناسایی حالت دریا بسیار مهم می‌باشد. موج دریا دارای یک حرکت بسیار پیچیده است. ارتفاع موج و فرکانس‌های احتمالی موجود در آن، از عوامل مهم، در شبیه‌سازی موج دریا می‌باشند. امروزه مفاهیم مربوط به موج تصادفی نقش زیادی در طراحی‌های دریایی دارد. بدین‌منظور برای شبیه‌سازی موج دریا نیز از مفاهیم موج تصادفی استفاده می‌شود. در گذشته برای تخمین حالت دریا کارهای مختلفی صورت گرفته است. مقاله [۱] از روشی با عنوان Three Frequency Radar Altimeter برای تخمین ارتفاع موج دریا، استفاده می‌کند. در این مقاله از دو ارتفاع سنج که توانایی کارکردن در سه باند فرکانسی را دارند، استفاده شده است. از ارتفاع سنج Poseidon-2 که قابلیت کار در دو باند فرکانسی Ku و C را دارد، در فرکانس‌های ۱۳/۶ GHz و ۵/۳ GHz استفاده شده است. همچنین از ارتفاع سنج AltiKa در باند فرکانسی Ka و فرکانس ۳۵/۷۵ GHz استفاده شده است. در نهایت با بهره‌بردن از روش MLE اقدام به تخمین ارتفاع موج دریا می‌نماید. در مقاله‌های مختلفی همچون [۲-۴] از تصاویر به‌دست‌آمده از سطح دریا و تجزیه و تحلیل سه‌بعدی آن، اقدام به

شناسایی حالت دریا نموده‌اند. روش دیگر برای اندازه‌گیری و تخمین وضعیت دریا، استفاده از ماهواره می‌باشد [۵-۶]. همچنین استفاده از روش‌های مبتنی بر رادارهای دهانه مصنوعی<sup>۲</sup> نیز در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۷].

در این مقاله با توجه به تغییر رفتار امواج دریا در حالت‌های مختلف و بررسی این تغییرات، یک روش جدید برای دسته‌بندی حالت‌های مختلف دریا ارائه شده است. در این روش با تکیه بر تفاوت‌های موجود در مقادیر مربوط به ممان‌های چهارگانه سیگنال‌های برگشتی حاصل از تابش امواج الکترومغناطیسی یک رادار با قدرت تفکیک بالا به پهنه دریا، اقدام به دسته‌بندی حالت‌های دریا شده است. بررسی‌های اولیه انجام‌گرفته در این خصوص این مطلب را نمایان می‌کند که تغییرات به‌وجودآمده در شکل ظاهری امواج دریا، می‌تواند خصوصیات آماری متفاوتی را از خود نشان دهد. مطالعه بر روی خصوصیات آماری سیگنال‌های برگشتی از دریا نشان داد که با افزایش سرعت باد و در نتیجه افزایش ارتفاع موج دریا، به‌طور نسبی تغییرات منظمی در خصوصیات آماری این سیگنال‌ها ایجاد می‌شود، که می‌توان با فهم و استخراج این ارتباط، موفق به دسته‌بندی حالت‌های

<sup>1</sup> Sea State

<sup>2</sup> SAR; synthetic aperture radar

\*رایانامه نویسنده مسئول: malavi@ihu.ac.ir

این دامنه‌ها می‌کنند. به این دامنه یا ارتفاع محاسبه شده  $H_{\frac{1}{3}}$  گفته می‌شود [۵]. بدین ترتیب ارتفاع به دست آمده، به عنوان ارتفاع موج اصلی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، برای توصیف معادله موج دریا می‌توان علاوه بر موج اصلی تعدادی زیر موج‌های<sup>۱</sup> محدود را با دامنه و طول موج و فازهای متفاوت در نظر گرفت و در نهایت با جمع کردن این زیر موج‌ها و موج اصلی با یکدیگر، معادله موج را محاسبه نمود [۱۰]. بدین ترتیب می‌توان معادله موج را به صورت ذیل در نظر گرفت [۱]:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n a_i \cos(k_{1i}x + k_{2i}y + \omega_i t + \varepsilon_i) \quad (1)$$

معادله فوق را می‌توان به صورت دقیق تری نیز بیان کرد

$$s(x, y, t) = \sum_{i=1}^n a_i \cos(k_i x \cos(\chi) + k_i y \sin(\chi) + \omega_i t + \varepsilon_i) \quad (2)$$

که در آن،  $\varepsilon_i$  فاز تصادفی با توزیع یکنواخت بین  $[-\pi, \pi]$ ،  $k_i$  عدد موج،  $\omega_i$  فرکانس زاویه‌ای<sup>۲</sup> مشاهده شده از یک نقطه ثابت و  $a_i$  دامنه ثابت مؤلفه سینوسی نام است. همچنین،  $\chi$  زاویه بین جهت انتشار موج دریا با جهت مرجع است [۱۱]. برای مؤلفه سینوسی نام، سرعت فاز  $c_i$ ، سرعتی است که قله موج را نسبت به یک مرجع ثابت جا به جا می‌کند. با فرض عمق نامتناهی برای دریا، داریم:

$$c_i = \sqrt{\frac{g\lambda_i}{2\pi}} \quad (3)$$

$$k_i = 2\pi/\lambda_i \quad (4)$$

$$\omega_i = \sqrt{gk_i} = \frac{g}{c_i} \quad (5)$$

که  $\lambda_i$  طول موج مؤلفه نام و  $g$  شتاب گرانشی زمین می‌باشد. رفتار یک موج نامنظم کامل را می‌توان به صورت حرکت یک نقطه معین از صفحه، در هنگام عبور موج در نظر گرفت. بنابراین، اگر نقطه  $(0,0)$  در نظر گرفته شود، می‌توان ارتفاع موج در این نقطه در مدت زمان معین را به صورت زیر نوشت:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n a_i \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (6)$$

### ۳. به دست آوردن طیف موج دریا

در یک فرآیند اتفاقی ایستاتیک، مشخصات امواج موجود در آن، بوسیله تحلیل طیف موج، بیان می‌شود. برای نمایش طیف‌های موج، نمونه‌های زیادی تاکنون منتشر شده است. به عنوان مثال

مختلف دریا شد. انتخاب رادار با قدرت تفکیک بالا به این دلیل می‌باشد که تابش امواج الکترومغناطیسی در قالب پالس‌های به اندازه کافی کوتاه، می‌تواند جزئیات بیشتری از رفتار و تغییرات امواج دریا در حالت‌های مختلف را ارائه دهد. به همین دلیل می‌توان با تجزیه و تحلیل مکان‌های کمتری از سطح دریا اقدام به دسته‌بندی حالت‌های دریا نمود. چراکه با استفاده از پالس‌های پهن، برای دریافت اطلاعات کافی از سطح دریا باید مکان بیشتری از دریا را مورد مطالعه قرار داد، که این مسئله نیازمند به حافظه بیشتر برای دریافت اطلاعات و همچنین طولانی‌تر شدن زمان پردازش می‌شود. در نهایت نیز تشکیل فضای ویژگی حاصل از ممان‌های سوم و چهارم مربوط به سیگنال‌های برگشتی از دریا، به عنوان یک روش جدید در دسته‌بندی حالت‌های مختلف دریا ارائه شده است.

### ۲. معادله موج دریا

بهترین روش برای توصیف موج دریا این است که سطح دریا و امواج موجود در آن را یک فرآیند اتفاقی بدانیم. موج‌های سطحی به طور ذاتی غیر خطی هستند. اما برای به دست آوردن معادلات ریاضی حاکم بر آنها، می‌توان تحت شرایطی، امواج را به صورت یک موج سطحی دو بعدی خطی در نظر گرفت. همچنین با توجه به اینکه در بررسی امواج دریا، عامل مهم، ارتفاع یا دامنه موج می‌باشد، می‌توان معادله موج دریا را در راستای محور  $x$  و با دامنه  $y$  در نظر گرفت [۸]. حال می‌توان محور  $x$  را محور زمان و محور  $y$  را دامنه موج در نظر گرفت و بدین ترتیب اقدام به ترسیم و محاسبه معادلات موج نمود.

بر اساس تئوری موج خطی، می‌توان بیان کرد که یک موج بی‌قاعده تصادفی، از مجموع بی‌نهایت موج قاعده‌مند معین با دامنه‌ها و فازها و طول موج‌های متفاوت و تصادفی تشکیل شده‌اند و بدین ترتیب می‌توان گفت که موج به صورت یک فرآیند تصادفی ایستاتیک در نظر گرفته شده است [۹]. البته منظور از ایستاتیک بودن موج دریا، ثابت ماندن ممان‌های اول و دوم در امواج دریا می‌باشد که این امر در ادامه، در قسمت ۵-۲ و در شکل ۱۱ به اثبات رسیده است. اگر برای مدت زمان معینی به سطح دریا نگاه شود، بسته به میزان سرعت باد، ارتفاع‌های مختلفی در آب دریا مشاهده می‌شود. برخی از این ارتفاع‌ها، خیلی بزرگتر از ارتفاع‌های دیگر هستند. یک تعریف متداول از ارتفاع موج دریا بدین صورت می‌باشد که در ابتدا برای یک مدت زمان معین و محدود، ارتفاع‌های مختلف آب را محاسبه می‌کنند. به عنوان مثال اگر برای یک مدت زمان محدود، (در حد چند ده ثانیه) ۱۲۰ قله یا ارتفاع موج مشاهده شود،  $\frac{1}{3}$  از بلندترین ارتفاع‌های موجود، یعنی ۴۰ مورد بزرگتر را در نظر گرفته و اقدام به میانگین‌گیری از

<sup>1</sup> Sub-Wave

<sup>2</sup> Circular Frequency

برای ترسیم شکل ۱، در ابتدا مقدار  $H_{1/3}$  را معین کرده و سپس به تعداد یکصد مقدار  $\omega$  را در محدوده  $[0, \pi]$ ، انتخاب نموده و در نهایت با استفاده از رابطه (۱۰) شکل فوق ترسیم می‌شود. انتخاب فرکانس زاویه‌ای در این محدوده به دلیل کم‌اثر بودن مقادیر فرکانس بالا در رابطه (۱۰) می‌باشد که قبلاً نیز اشاره شد.

با توجه به شکل ۱ می‌توان به یک نتیجه مهم دست یافت، که اساس این تحقیق را شکل می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، طیف حاصل از امواج دریا، با افزایش ارتفاع موج، به سمت چپ هدایت شده است و این مساله بدین معنا می‌باشد که هر چه ارتفاع موج افزایش یافته است، میزان چولگی<sup>۱</sup> طیف نیز افزایش یافته است. چولگی همان ممان سوم می‌باشد، که میزان کج‌شدگی نسبت به طیف نرمال را بیان می‌کند.

#### ۴. شبیه‌سازی و تولید سیگنال‌های برگشتی از دریا در حوزه زمان

هدف نهایی این مقاله، دسته‌بندی امواج دریا و در نتیجه، تخمین وضعیت یا حالت دریا می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، در ابتدا می‌بایست بتوان سیگنال برگشتی از دریا در حالت‌های مختلف را محاسبه کرده و یک بانک اطلاعاتی تشکیل شود. برای این منظور با توجه به رابطه (۲) می‌توان نحوه تغییرات یک نقطه از دریا را به صورت زیر مدل کرد [۱۰]:

$$a_i = \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega} \quad (11)$$

$$\omega_i = \omega_L + (i-1)\Delta\omega \quad (12)$$

$$\Delta\omega = \frac{\omega_H - \omega_L}{M} \quad , \quad M = 50 \sim 100 \quad (13)$$

$$\omega_L = \left(-\frac{3.11}{H_{1/3}^2 \ln(\mu)}\right)^{1/4} \quad (14)$$

$$\omega_H = \left(-\frac{3.11}{H_{1/3}^2 \ln(1-\mu)}\right)^{1/4} \quad (15)$$

M، تعداد نمونه‌های لازم و  $\mu$ ، عددی بین ۰ و ۰/۵ می‌باشد، که محدوده فرکانسی برای شبیه‌سازی طیف موج دریا در یک ارتفاع معین را مشخص می‌نماید. این محدوده طوری معین می‌شود که تنها فرکانس‌هایی که موج دریا در آنها دارای انرژی بیشتری هستند را انتخاب نماید. در این تحقیق، جهت شبیه‌سازی موج دریا، مقادیر  $\mu$  و M به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۷۵ در نظر

می‌توان به طیف P-M، طیف JONSWAP، طیف ITTC و... اشاره کرد [۶]. در این مقاله از طیف P-M برای امواج بی‌قاعده استفاده شده که به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود [۱۲]. البته ذکر این نکته مهم می‌باشد که در [۱۲] نیز همان مدل رابطه زمانی امواج بی‌قاعده که در رابطه (۱) نحوه تشکیل آن بیان شده، بکار رفته است.

$$S(\omega) = A\omega^{-p} \exp(B\omega^{-q}) \quad ; \quad \omega > 0 \quad (7)$$

پارامتر p، بیانگر توان دنباله فرکانس بالای موج می‌باشد و پارامتر q، مربوط به شیب قسمت فرکانس پایین می‌باشد. A و B پارامترهای وابسته به ارتفاع موج و پرپودهای موجود در آن می‌باشند. روابط مربوط به محاسبه A و B به صورت ذیل می‌باشند [۱ و ۵]:

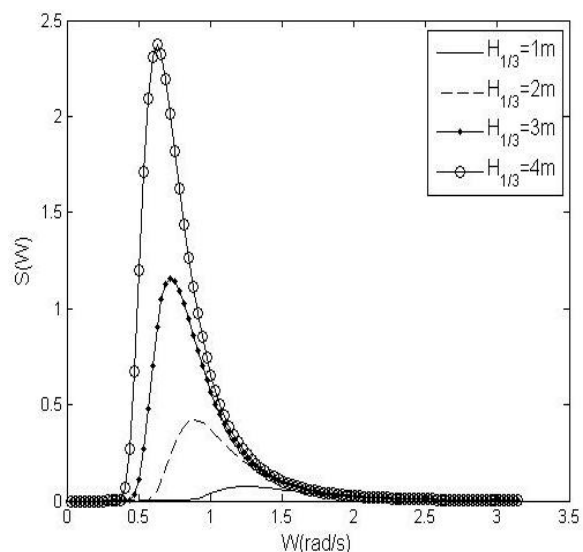
$$A = 8.1 \times 10^{-3} g^2 \quad (8)$$

$$B = -\frac{3.11}{H_{1/3}^2} \quad (9)$$

بر اساس تحقیقات انجام‌شده در [۸]، بهترین حالت برای در نظر گرفتن توان‌های فرکانس بالا و فرکانس پایین موجود در موج، قراردادن مقادیر  $P=5$  و  $q=4$  در رابطه طیف می‌باشد. بنابراین، طبق طیف P-M خواهیم داشت:

$$S(\omega) = \frac{8.1 \times 10^{-3} g^2}{\omega^5} \exp\left(-\frac{3.11}{H_{1/3}^2} \omega^4\right) \quad (10)$$

با توجه به رابطه به دست آمده برای طیف موج، مشاهده می‌شود که بیشتر انرژی موج در فرکانس‌های پایین‌تر قرار دارد و همچنین طیف حاصل به صورت باند باریک بوده و انرژی آن در یک محدوده معین قرار گرفته است. طیف موج حاصل، بر اساس چهار ارتفاع مختلف موج دریا، در شکل ۱ به تصویر درآمده است.



شکل ۱. طیف موج دریا در ارتفاع‌های (۱-۴) متر

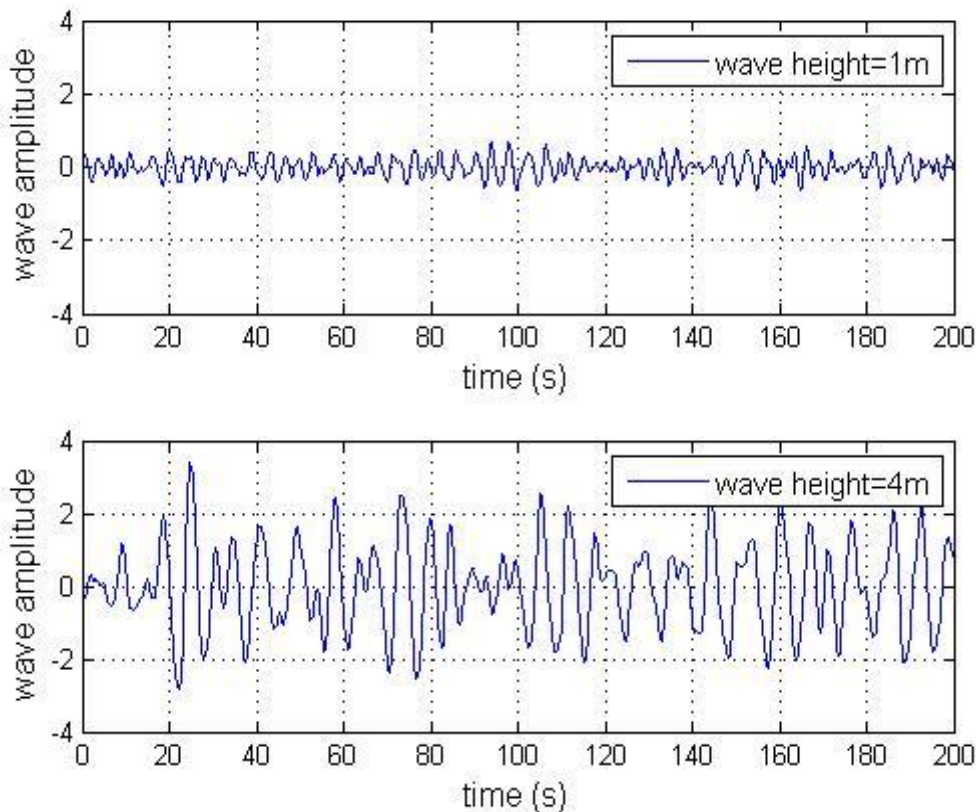
<sup>۱</sup> Skewness

معین را به تصویر کشیده است. برای ساخت نمونه دو بعدی آن در نرم افزار Feko، باید رابطه مکانی شکل را به دست آورده و در نرم افزار ترسیم کرد. با توجه به این که آنتن رادار از نوع بادبزی فرض شده، در هر تابش موج توسط رادار، سطح باریک و طولانی از دریا روشن خواهد شد. از انحنای عرض این مستطیل باریک و بلند صرف نظر کرده و فقط خمیدگی های طولی آن مدل می شود. به همین منظور از رسم منحنی در بخش Analytic Curve نرم افزار Feko استفاده شده و سپس، خم به وجود آمده، به یک سطح انحنادار دوبعدی تبدیل می شود. برای این که امواج دریا در یک لحظه و در مکان های مختلف مدل شود، ابتدا فاز، سرعت فاز و دامنه تصادفی، معین شده و سپس تنها متغیر مکان در معادله موج (۲) تغییر می کند. به این ترتیب، در هر مرحله برای یک ارتفاع مشخص، نتیجه شبیه سازی را به ازای یک بازه ۲۰۰ متری به دست آورده و در نرم افزار Feko وارد می شود. پس از تحلیل، خروجی های نرم افزار Feko، که شامل فاز و دامنه میدان پراکندگی است را به کد MATLAB وارد کرده و در نهایت نمایه برد حاصل می شود.

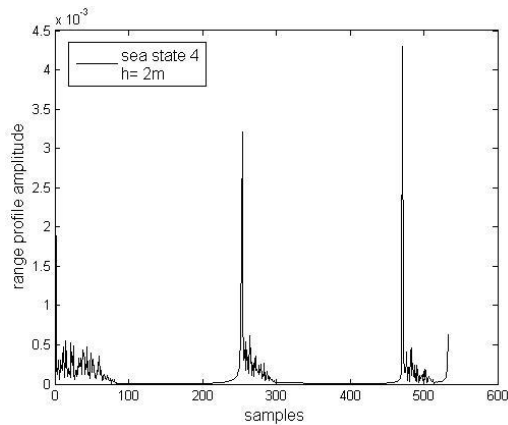
گرفته شده اند. به عنوان نمونه در شکل ۲، تغییرات یک نقطه از دریا، هنگامی که ارتفاع موج ۱ و ۴ متر می باشد، به نمایش در آمده است. البته باید توجه داشت که در روابط (۱۴)-(۱۵) علامت منفی موجود در پرانتز با علامت منفی مربوط به مقادیر  $\ln(\mu)$  و  $\ln(1-\mu)$  (به دلیل آن که مقدار  $\mu$  کوچکتر از یک می باشد) حذف شده و از موهومی شدن مقادیر  $\omega_L$  و  $\omega_H$  جلوگیری می شود.

پس از تابش سیگنال رادار به دریا و دریافت نمونه های کافی از آن، باید اقدام به تولید سیگنال برگشتی از دریا نمود. برای این منظور، با استفاده از شکل موج فیزیکی به دست آمده از دریا (همچون شکل ۲) و ساخت نمونه دو بعدی آن در نرم افزار Feko و ایجاد یک برش متناسب با طول موج آرسالی از رادار، میزان RCS برگشتی را محاسبه نموده و اقدام به تولید نمایه برد ایجاد شده در ورودی گیرنده می شود. در ارتباط با محاسبه RCS روش های مختلفی وجود دارد که از جمله روش های جدید می توان به مرجع [۱۳] اشاره کرد.

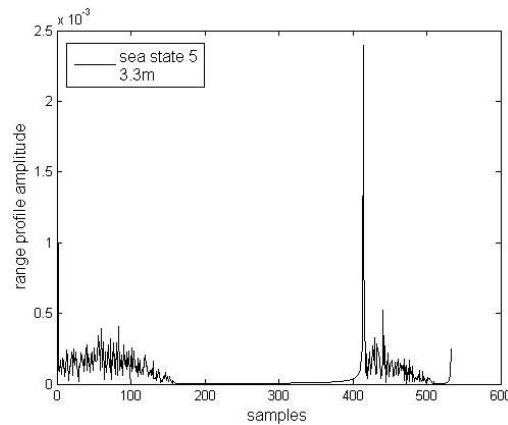
شکل ۲، تغییرات فیزیکی یک نقطه از دریا در یک بازه زمانی



شکل ۲. تغییرات یک نقطه از دریا در یک بازه زمانی ۲۰۰ ثانیه ای برای ارتفاع های ۱m و ۴m



شکل ۶. نمایه برد به دست آمده از امواج دریا با ارتفاع ۲ m

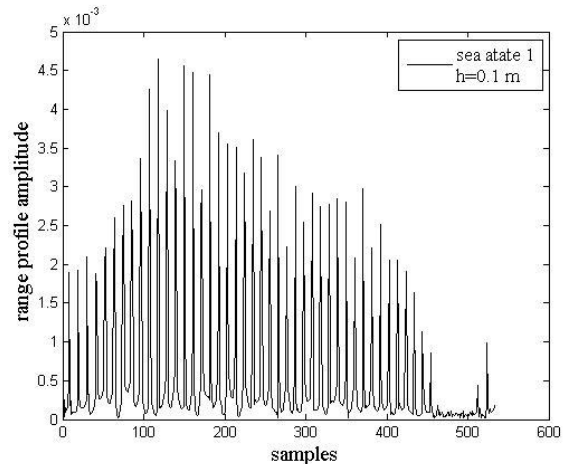


شکل ۷. نمایه برد به دست آمده از امواج دریا با ارتفاع ۳/۳ m

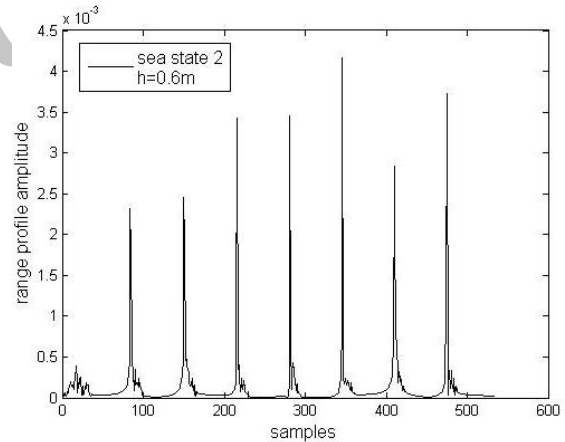
در شکل‌های فوق محور افقی، شماره نمونه‌های دریافتی از نمایه برد دریافت‌شده و محور عمودی دامنه مربوط به هر نمونه می‌باشد. با توجه به شکل‌های فوق این قضیه مشهود است که در وضعیت یک دریا، به دلیل آنکه تغییرات قله‌های موج دریا نسبت به یکدیگر کم می‌باشد، (بدین معنا که ارتفاع بلندترین قله‌های موج تا ریزموج‌های موجود تفاوت زیادی ندارند) نمایه برد ایجادشده در حوزه زمان، دارای قله‌های نسبتاً نزدیک به هم می‌باشند. اما در وضعیت‌های بالاتر نظیر وضعیت چهار یا پنج دریا، به دلیل آن که ارتفاع و پهنای بلندترین قله‌های ایجادشده در این وضعیت، نسبت به ریز موج‌های موجود در اطراف آن خیلی بیشتر است، لذا نمایه برد حاصل، دارای تک‌قله‌های بلند و قله‌های خیلی کوچک می‌باشد. با مطالعه حالات فوق می‌توان به طور کلی به این نتیجه رسید که، هرچه میزان حالت دریا در مرتبه بالاتری قرار بگیرد، تعداد قله‌های بزرگ آشکارشده در نمایه برد، نسبت به کل قله‌های موجود در این نمایه، کمتر خواهد شد.

در این تحقیق مطابق با استاندارد بیان‌شده در جدول ۱، حالت‌های مختلف دریا، تعریف شده است.

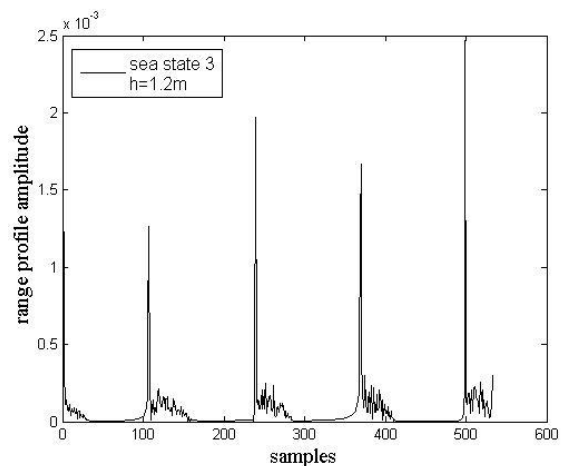
شکل‌های (۷-۳)، پنج نمونه از ۱۸۰ نمونه به دست آمده توسط نرم‌افزار Feko، در وضعیت‌های مختلف دریا را به نمایش گذاشته‌اند. در این شکل‌ها، پالس تابشی از رادار، مسافتی ۲۰۰ متری بر روی سطح دریا را پیموده و ۵۳۳ نمونه از موج دریا را ایجاد کرده است. بنابراین فاصله بین هر نمونه در این شکل‌ها،  $37/5$  cm می‌باشد.



شکل ۳. نمایه برد به دست آمده از امواج دریا با ارتفاع ۰/۱ m



شکل ۴. نمایه برد به دست آمده از امواج دریا با ارتفاع ۰/۶ m



شکل ۵. نمایه برد به دست آمده از امواج دریا با ارتفاع ۱/۲ m

استفاده می‌شود. برای محاسبه هر کدام از ممان‌های چهارگانه از روابط زیر استفاده شده است [۱۴].

$$\text{mean} = m = E[x] \quad (16)$$

$$\text{variance} = E[(x - m)^2] \quad (17)$$

$$\text{skewness} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^3}{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \right]^{3/2}} \quad (18)$$

$$\text{kurtosis} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^4}{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \right]^2} \quad (19)$$

در روابط فوق،  $x$  بردار مربوط به نمونه‌های نمایه برد حاصل از تابش رادار به دریا،  $n$ ، تعداد نمونه‌های موجود در نمایه برد آشکار شده و  $m$ ، میانگین نمونه‌های نمایه برد، می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، برای هر کدام از ارتفاع‌های امواج، یک بردار با ۵۳۳ نمونه در نرم‌افزار Feko ایجاد شده است. در این تحقیق، ارتفاع‌های در نظر گرفته شده برای آموزش این دسته‌بندی‌کننده<sup>۴</sup> پیشنهادی، تا ارتفاع  $2/5m$  معادل با وضعیت ۴ دریا و مطابق با جدول ۲ می‌باشند. ارتفاع‌های در نظر گرفته شده، همان  $H_{1/3}$  در معادلات مربوطه می‌باشند.

جدول ۲. ارتفاع‌های در نظر گرفته شده مربوط به حالت‌های مختلف دریا، جهت شبیه‌سازی

وضعیت دریا	تعداد ارتفاع‌های در نظر گرفته شده	ارتفاع‌های در نظر گرفته شده (m)
۱	۴	$0/1 - 0/1 - 0/2 - 0/3$
۲	۸	$0/32 - 0/4 - 0/5 - 0/6 - 0/7 - 0/8 - 0/9 - 1/0$
۳	۶	$1/01 - 1/1 - 1/2 - 1/3 - 1/4 - 1/5$
۴	۱۱	$1/51 - 1/6 - 1/7 - 1/8 - 1/9 - 2/0 - 2/1 - 2/2 - 2/3 - 2/4 - 2/5$

با توجه به جدول ۲ و بردارهای مربوط به نمایه‌های برد ایجاد شده و اعمال روابط (۱۵-۱۲) بر آنها، یک فضای ویژگی چهاربعدی ایجاد می‌گردد. برای به تصویر کشیدن این فضا، از سه بعد آن استفاده نموده و شکل ۸ به عنوان فضای ویژگی معرفی می‌شود. ابعاد این فضا همان ممان‌های دوم، سوم و چهارم نمایه‌های برد ایجاد شده می‌باشند.

جدول ۱. مشخصات حالت‌های مختلف دریا

ارتفاع متوسط موج (m)	سرعت باد (گره دریایی)	حالت دریا
$0 - 0/3$	$< 7$	۱
$0/3 - 1$	$7 - 12$	۲
$1 - 1/5$	$12 - 16$	۳
$1/5 - 2/5$	$16 - 19$	۴
$2/5 - 4$	$19 - 23$	۵

## ۵. روش پیشنهادی در دسته‌بندی موج دریا و به‌دست آوردن حالت دریا

برای رسیدن به یک روش دسته‌بندی امواج دریا و در نتیجه تخمین حالت دریا به وسیله یک رادار با قدرت تفکیک بالا، مراحل زیر پیشنهاد می‌شود.

### ۵-۱. تشکیل نمایه برد در ورودی گیرنده رادار

در مرحله اول، نمایه‌های حاصل از تابش رادار HRR به سطح دریا، با توجه به بخش ۴ مقاله شبیه‌سازی شده و توسط گیرنده رادار جمع‌آوری می‌شوند. در این تحقیق، با داده‌های شبیه‌سازی و استفاده از نرم‌افزارهای Feko و matlab، کار انجام گرفته‌است. پهنای پالس رادار HRR، به میزان  $\tau = 2.5\text{ns}$  (معادل با پهنای باند  $400\text{MHz}$ )، فرکانس رادار برابر با  $10\text{GHz}$  و قطبش امواج رادار به صورت افقی در نظر گرفته شده است. همچنین زاویه تابش رادار با امواج دریا  $\theta = 89^\circ$  می‌باشد. باید توجه داشت که هرچه از پالس‌های پهن‌تر استفاده شود، به دلیل آن که تعداد قله‌های بیشتری از موج دریا در یک پالس رادار قرار می‌گیرند، به جاروب منطقه وسیع‌تری، برای پردازش رفتار امواج دریا نیاز است. همین امر باعث افزایش زمان و حجم حافظه مورد نیاز برای پردازش، در مقایسه با پالس‌های کوتاه‌تر می‌شود.

### ۵-۲. محاسبه ممان‌های چهارگانه امواج و تشکیل فضای ویژگی چهاربعدی

در روش پیشنهادی، پس از تولید نمایه برد مربوط به سیگنال‌های بازگشتی از دریا، برای دسته‌بندی امواج دریا، از محاسبه مقادیر میانگین<sup>۱</sup>، واریانس<sup>۲</sup>، چولگی و کورتوسیس<sup>۳</sup>

<sup>۴</sup> Classifier

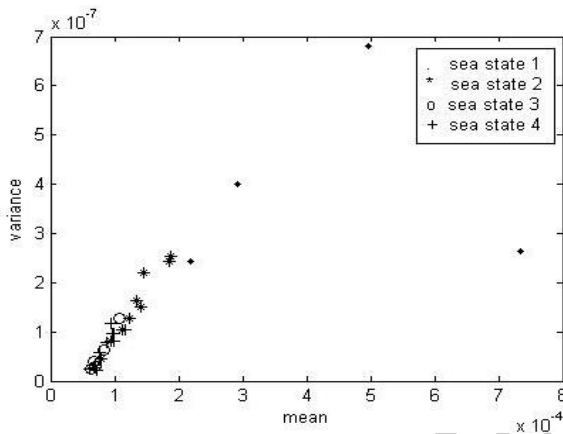
<sup>۱</sup> Mean

<sup>۲</sup> Variance

<sup>۳</sup> Kurtosis

همانگونه که در شکل ۱۰ مشهود می‌باشد، میزان واریانس مربوط به نمایه‌های برد امواج دریا، تقریباً حالت نزولی دارد، اما نمی‌توان از این مورد به عنوان یک ویژگی برای دسته‌بندی اهداف دریا استفاده کرد. با توجه به شکل ۱۰، معلوم می‌شود که واریانس برخی از ارتفاع‌های موج دریا در حالت‌های ۱ و ۲ و همچنین برخی از ارتفاع‌های مربوط به حالت‌های ۲، ۳ و ۴ دارای محدوده واریانسی مشابه می‌باشند. بنابراین از ویژگی ایجادشده توسط واریانس نمایه‌ها، نمی‌توان به عنوان یک ویژگی برای دسته‌بندی امواج دریا استفاده کرد.

اگر فضای ویژگی بر اساس ممان‌های اول و دوم مربوط به نمایه‌های برد امواج دریا در نظر گرفته شود، شکل ۱۱ حاصل خواهد شد.

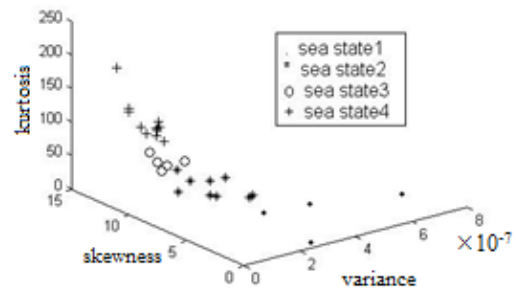


شکل ۱۱. فضای ویژگی حاصل از ممان‌های اول و دوم از نمایه‌های برد ایجادشده

با دقت در شکل ۱۱ معلوم می‌شود که، استفاده همزمان از ممان‌های اول و دوم نمی‌تواند به عنوان یک فضای ویژگی برای دسته‌بندی امواج دریا، به کار رود. هم میانگین حالت‌های مختلف دریا و هم واریانس آنها، قابل تفکیک نبوده و به هیچ نحو نمی‌توان از این ممان‌ها به عنوان معیاری برای سنجش وضعیت دریا استفاده کرد. بنابراین، از مقایسه شکل‌های ۹-۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که بهترین حالت برای تشکیل فضای ویژگی و تفکیک حالت‌های مختلف دریا، استفاده همزمان از ممان‌های سوم و چهارم است.

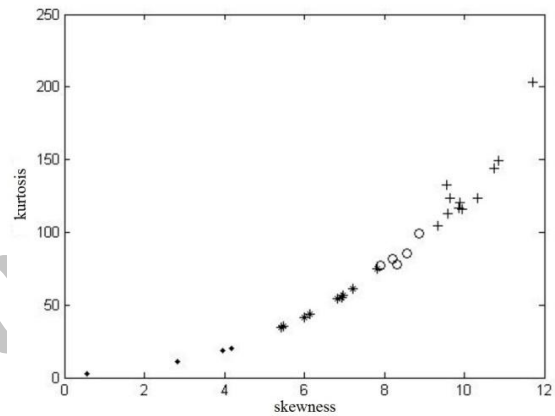
### ۳-۵. افزایش فضای ویژگی بر اساس وضعیت‌های مختلف دریا

با توجه به موارد بیان‌شده در بخش ۵-۲، فضای دو بعدی حاصل از ممان‌های سوم و چهارم نمایه‌های برد، به عنوان فضای ویژگی اصلی در این تحقیق در نظر گرفته شده است. از آنجایی که ارتفاع‌های موج دریا به ترتیب افزایش داده شده‌اند و به همین ترتیب ممان‌های سوم و چهارم حاصل از نمایه‌های برد آنها نیز



شکل ۸. فضای ویژگی حاصل از ممان‌های دوم، سوم و چهارم از نمایه‌های برد ایجادشده

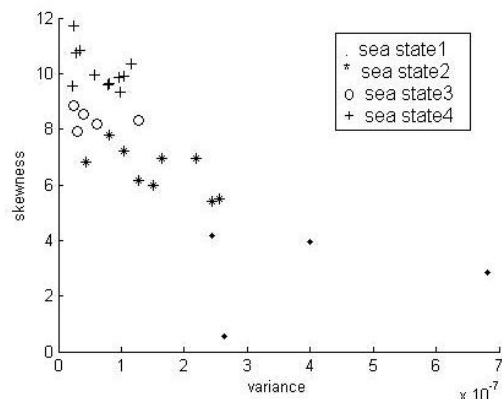
اگر فضای ویژگی حاصل به صورت دوبعدی و با در نظر گرفتن ممان‌های سوم و چهارم در نظر گرفته‌شود، شکل ۹ به دست خواهد آمد.



شکل ۹. فضای ویژگی حاصل از ممان‌های سوم و چهارم از نمایه برد ایجاد شده

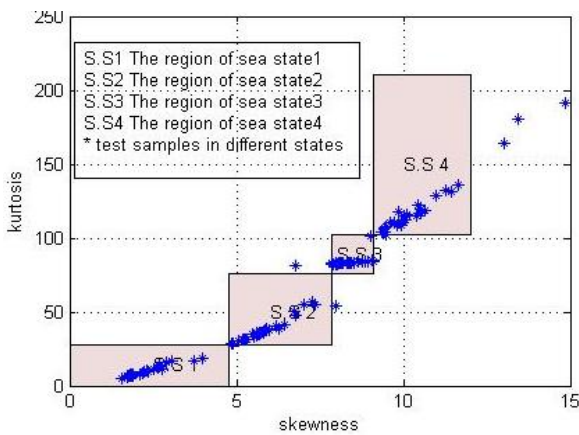
با توجه به شکل ۹، مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع موج دریا، ممان‌های سوم و چهارم نمایه‌های برد نیز افزایش می‌یابند. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که بین ارتفاع موج دریا و ممان‌های سوم و چهارم مربوط به نمایه‌های ایجادشده توسط آنها، یک رابطه مستقیم وجود دارد.

اگر یک فضای ویژگی دو بعدی دیگر، با در نظر گرفتن ممان‌های دوم و سوم نمایه‌های برد ایجاد شود، شکل ۱۰ حاصل می‌شود.



شکل ۱۰. فضای ویژگی حاصل از ممان‌های دوم و سوم از نمایه برد ایجادشده

سیگنال‌های برگشتی از دریا را به عنوان کلاتر می‌شناسند، لذا می‌توان به جای عنوان SNR، از CNR<sup>۳</sup> نیز استفاده نمود. بدین منظور بر طبق روش بیان‌شده در قسمت ۵-۱، ۳۰ نمونه، نمایه برد جدید ایجاد می‌شود. سپس هر ۳۰ نمونه نمایه را با نویزهای مختلف که دارای توان‌های متفاوت می‌باشند، آغشته کرده و از دسته‌بندی‌کننده عبور داده می‌شوند. در انتها چگونگی کارکرد دسته‌بندی‌کننده را مورد ارزیابی قرار داده و دقت روش پیشنهادی اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۱۳، نمونه‌ای از اعمال ۳۰ نمونه نمایه نویزی به دسته‌بندی‌کننده، تحت نویزهای متفاوت را به تصویر کشیده است.

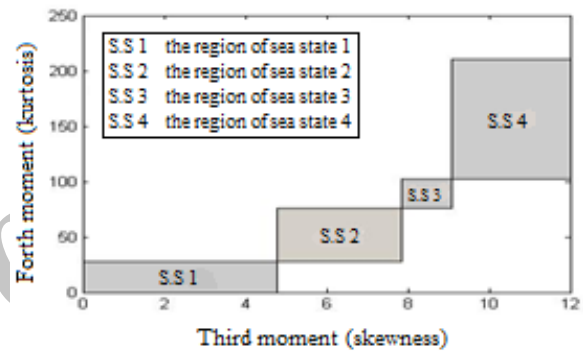


شکل ۱۳. سی نمایه برد ایجادشده در هر وضعیت دریا

هر ۳۰ نمونه نمایه مربوط به وضعیت ۱، در محدوده مشخص‌شده، قرار گرفته‌اند. از ۳۰ نمونه نمایه ایجادشده در وضعیت‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب، یک، دو و چهار، نمایه، خارج از محدوده قرار گرفته‌اند. حال نویز گوسی سفید جمع‌شونده<sup>۴</sup> با توان‌های متفاوت را به نمایه‌های ایجادشده، اضافه کرده و رابطه بین افزایش توان نویز با میزان دقت کارکرد دسته‌بندی‌کننده پیشنهادی، در قالب جدول ۳ به‌دست می‌آید. در جدول ۳، رابطه SNR، از تقسیم توان متوسط سیگنال برگشتی از دریا به توان متوسط نویز ایجادشده، به‌دست آمده است. منظور از دقت اندازه‌گیری این است که با افزایش تدریجی نویز، چند نمونه از ۳۰ نمونه ایجادشده در شکل ۱۳، خارج از محدوده معین‌شده برای هر وضعیت دریا قرار می‌گیرند. بدین ترتیب می‌توان درصد قرارگرفتن ممان‌های محاسبه‌شده برای هر وضعیت دریا، در محدوده‌های معین‌شده برای هر وضعیت، تحت نویزهای مشخص را، در قالب جدول ۳، محاسبه نمود.

افزایش یافته، می‌توان فضای ویژگی به‌دست‌آمده را به نواحی مختلفی افراز نمود، به‌طوری‌که هر ناحیه را، متعلق به یک وضعیت دریا در نظر گرفت. نکته مهم این است که در انتخاب ارتفاع‌های دریا، کمترین و بالاترین ارتفاع‌های مربوط به هر وضعیت دریا در نظر گرفته شده و بقیه ارتفاع‌ها نیز با اختلاف ۰/۱m در بین ارتفاع‌های پیشینه و کمینه هر حالت، انتخاب گردیده‌اند. این امر باعث می‌شود تا به طور یقین بیان نمود که استدلال افزایشی بودن ممان‌های سوم و چهارم نمایه‌های برد، صحیح است.

با توجه به مطالب فوق می‌توان شکل ۱۲ را به عنوان نتیجه نهایی مربوط به دسته‌بندی امواج دریا و معیاری جهت سنجش و تخمین حالت دریا در نظر گرفت.



شکل ۱۲. افراز فضای ویژگی حاصل از ممان‌های سوم و چهارم از نمایه‌های برد ایجادشده و دسته‌بندی حالات دریا

#### ۴-۵. تست دقت روش پیشنهادی

قسمت ۵-۳ نحوه کارکرد و تشکیل فضای ویژگی یا همان مرحله آموزش را بیان می‌کند. برای سنجش دقت روش پیشنهادی، نمایه‌های برد جدید که آغشته به نویز نیز می‌باشند، را در ارتفاع‌های متفاوت ایجاد کرده و از دسته‌بندی‌کننده طراحی‌شده، عبور داده و بدین ترتیب می‌توان سیگنال به نویز مورد نیاز برای انجام یک دسته‌بندی مناسب از امواج دریا را ارائه داد. لازم به ذکر است که منظور از سیگنال به نویز مورد نظر در این تحقیق، سیگنال به نویز در ورودی دسته‌بندی‌کننده می‌باشد، بدین معنا که پس از آشکارسازی نمایه برد<sup>۱</sup> توسط بلوک آشکارکننده، برای انجام یک دسته‌بندی و تخمین مناسب از وضعیت دریا، چه میزان SNR<sup>۲</sup> در خروجی آشکارکننده یا ورودی دسته‌بندی‌کننده، نیاز می‌باشد. نکته دیگر در این مقاله این است که، به دلیل پرداختن به موج دریا، منظور از سیگنال برگشتی، همان سیگنال‌های برگشتی از دریا بوده و چون معمولاً در فعالیت‌های دریایی،

<sup>۳</sup> Clutter to Noise Ratio

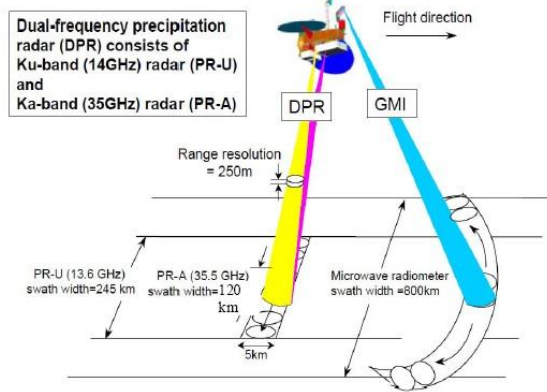
<sup>۴</sup> AWGN; Additive White Gaussian Noise

<sup>۱</sup> Range Profile

<sup>۲</sup> Signal to Noise Ratio



در باند  $ka$  و  $۲۴۵\text{km}$  در باند  $ku$  اقدام به اندازه‌گیری‌های مورد نظر کرده‌اند. شکل ۱۵، نشان‌دهنده موارد یادشده می‌باشد.



شکل ۱۵. تخمین سرعت باد با استفاده از دو رادار هواشناسی [۱۵]

در روش استفاده از ممان‌های چهارگانه برای تخمین حالت دریا، تنها موردی که باعث ایجاد اشکال در تخمین می‌شود این است که باید حداقل یک پیروید از ارتفاع مؤثر موج دریا، در بازه مورد نظر برای شبیه‌سازی قرار گرفته باشد. چرا که در غیر این صورت، اگر ارتفاع مؤثر امواج دریا به حدی زیاد شود که  $۲۰۰\text{m}$  (محدوده شبیه‌سازی‌شده از دریا) یک تناوب از موج دریا را پوشش ندهد، نتایج وضعیت تصادفی خواهند داشت. یعنی ممکن است بازه  $۲۰۰$  متری، شامل قله‌های امواج دریا بشود یا نشود. هر چه ارتفاع مؤثر موج دریا بیشتر می‌شود، طول  $۲۰۰\text{m}$  برای تعداد قله‌های کمتری را شامل می‌شود. طول  $۲۰۰\text{m}$  برای شبیه‌سازی دریا تا حالت ۴ مناسب می‌باشد. اما در روش استفاده از رادارهای هواشناسی محدوده‌های بسیار بزرگتر، در حدود  $۲۰۰\text{km}$  لازم است تا بتوان با تحلیل این مناطق به حالت دریا پی‌برد. که این امر به‌طور قطع نیازمند حافظه زیاد و پردازش‌های سنگین می‌باشد.

همچنین استفاده از رادارهای دهانه مصنوعی برای سنجش حالت دریا که با استفاده از دو تفکیک در برد<sup>۱</sup> و عمود بر برد<sup>۲</sup> اقدام به آشکارسازی و ایجاد تصویر دوبعدی از سطح دریا می‌نمایند نیز، احتیاج به پردازش‌های سنگین‌تر و صرف مدت زمان بیشتری نسبت به الگوریتم پیشنهادی در این مقاله می‌باشند.

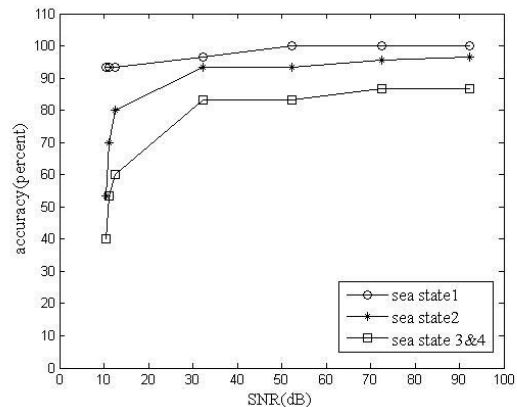
## ۶. نتیجه‌گیری

دسته‌بندی‌کننده پیشنهادی، با بهره‌گیری از اختلاف میزان چولگی و دور یا نزدیک بودن PDF نمایه‌ها به تابع چگالی احتمال

جدول ۳. رابطه میزان SNR، با دقت اندازه‌گیری وضعیت دریا

دقت در اندازه‌گیری وضعیت دریا	دقت در اندازه‌گیری وضعیت دریا	دقت در اندازه‌گیری وضعیت دریا	SNR(dB) در ورودی دسته‌بندی‌کننده
وضعیت ۳ و ۴ دریا	وضعیت ۲ دریا	وضعیت ۱ دریا	۹۲/۳۴
۸۶،۶۶٪	۹۶،۶۶٪	۱۰۰٪	۷۲/۴۲
۸۶،۶۶٪	۹۵،۷٪	۱۰۰٪	۵۲/۳۷
۸۳،۳۳٪	۹۳،۲۴٪	۱۰۰٪	۳۲/۳۸
۸۳،۳۳٪	۹۳،۲۴٪	۹۶،۵۷٪	۱۲/۶۴
۶۰٪	۷۹،۹۲٪	۹۳،۲۴٪	۱۱/۱۵
۵۳،۳۳٪	۶۹،۹۳٪	۹۳،۲۴٪	۱۰/۵۵
۴۰٪	۵۳،۲۸٪	۹۳،۲۴٪	

شکل ۱۴، نمودار دقت عملکرد دسته‌بندی‌کننده پیشنهادی را نسبت به سیگنال به نویز در خروجی آشکارساز نمایه برد یا ورودی دسته‌بندی‌کننده، به تصویر کشیده است.



شکل ۱۴. نمودار درصد دقت عملکرد دسته‌بندی‌کننده پیشنهادی، بر حسب میزان سیگنال به نویز در خروجی آشکارساز، در وضعیت‌های مختلف دریا

همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، از مقادیر SNR بالای  $۲۵\text{dB}$  در خروجی آشکارساز، دقت اندازه‌گیری و تخمین وضعیت دریا، بالای  $۸۰\%$  می‌باشد. در وضعیت ۱ دریا، حتی با مقادیر SNR حدود  $۱۰\text{dB}$  نیز همچنان دقت اندازه‌گیری بالای  $۹۰\%$  می‌باشد.

در مقام مقایسه با روش‌های دیگری که با انواع مختلف رادارها برای سنجش و تخمین وضعیت دریا به‌کار رفته است، می‌توان به استفاده از چند رادار با فرکانس‌های مختلف اشاره کرد [۱۵]. در این روش با استفاده از دو رادار هواشناسی که هر کدام در باندهای فرکانسی  $ku$  و  $ka$  کار می‌کنند، توانسته است تخمینی از سرعت باد و درنهایت حالت دریا به‌دست آورد. این رادارها در ارتفاع  $۴۰۷\text{km}$  از سطح دریا قرار گرفته‌اند و با قدرت تفکیک در برد  $۲۵۰\text{m}$  و با جاروب مکانی  $۱۲۰\text{km}$  از سطح دریا

<sup>۱</sup> Range Resolution

<sup>۲</sup> Cross Range Resolution

- [13] R. Sofiani, H. Hamid and M. Kazerooni, "A smart meshing technique to speed up radar cross-section calculation of very large random rough surfaces," J. Electromagnet Wave, vol. 29, pp. 941-952, 2015.
- [14] A. Hyvärinen, K. Juha, and O. Erkki, "Independent component analysis," vol. 46, John Wiley & Sons, 2004.
- [15] V. Y. Karaev, M. A. Panfilova, Y. A. Titchenko, E. M. Meshkov, and G. N. Balandina, "Remote sensing of the sea waves by the dual-frequency precipitation radar: First results," Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO), pp. 1-2, 2015.

نرمال (میزان ممان چهارم نمایه‌ها)، می‌تواند اقدام به اندازه‌گیری و اعلام وضعیت دریا نماید. در وضعیت‌های پایین‌تر، حساسیت نسبت به افزایش نویز کمتر و بالعکس در وضعیت‌های بالاتر این حساسیت افزایش می‌یابد. بنابراین، نتیجه‌گیری مهم حاصل از این تحقیق بدین‌صورت می‌باشد، که می‌توان با استفاده از ممان‌های چهارگانه و با تاکید بر ممان سوم و چهارم نمایه‌های حاصل از تابش یک رادار HRR به پهنه دریا، اقدام به تعیین وضعیت دریا در منطقه مورد نظر نمود. این امر بسیار مهم بوده و در کاربردهای مختلفی اعم از آگاهی یافتن نسبت به شرایط جوی جهت استفاده از شناورهای بدون سرنشین در عمق دریا، پیش‌بینی سرعت باد از مسافت‌های بسیار دور، تعیین مسیرهای کم‌خطرتر در ناوبری دریایی و همچنین شلیک موشک‌های ساحل به دریا، به‌شدت مفید می‌باشد. در مورد اخیر، آگاهی از میزان وضعیت دریا در مسیر حرکت موشک و تاثیرات این تغییر وضعیت‌ها بر موشک، کمک به‌سزایی به فرمانده موشکی جهت اخذ تصمیم مناسب، می‌نماید.

## ۷. مراجع

- [1] L. Amarouche et al, "A new estimator of the sea state bias using a three frequency radar altimeter," IGARSS'01, vol. 6, pp. 2510-2512, 2001.
- [2] R. Ian, W. Rosenthal, and F. Ziemer, "A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents," J. Geophys. Res-Oceans, pp. 1049-1059, 1985.
- [3] T. Pedersen, C. Malzone, and E. Siegel, "Analysis of band-passed directional wave data," OCEANS, proc. of MTS/IEEE, pp. 293-300, 2005.
- [4] F. Zeimer and R. Wolfgang, "On the transfer function of a shipborne radar for imaging ocean waves," GKSS-Forschungszentrum, 1987.
- [5] A. Pleskachevsky, L. Susanne, and R. Wolfgang, "Meteo-Marine Parameters from High-Resolution Satellite-Based Radar Measurements and Impact of Wind Gusts on local Sea State Variability," EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 18, 2016.
- [6] K. Yu, R. Chris, and A. G. Dempster, "GNSS-based model-free sea surface height estimation in unknown sea state scenarios," IEEE J-STARS 7, no. 5, pp. 1424-1435, 2014.
- [7] M. Bruck and L. Susanne, "Sea state measurements using Terra SAR-X data," IGARSS, pp. 7609-7612, 2012.
- [8] R. Stewart, "Introduction to physical oceanography," Texas A & M University, 2004.
- [9] Z. Xiufeng et al, "Ship motion modeling and simulation in Ship Handling Simulator," ICALIP, international conf. on, pp. 1051-1056, 2012.
- [10] L. Yong, w. li, y. Chen, and c. Yu, "Wave disturbance model based on the simulation of autopilot's navigation environment," Journal of Naval University of Engineering, vol. 14, no. 5, pp. 60-62, 2002.
- [11] E. H. Cramer and F. H. Hansen, "Stochastic modeling of long term wave induced responses of ship structures," MAR STRUCT, pp. 537-566, 1994.
- [12] T. P'erez and M. Blanke, "Simulation of Ship Motion in Seaway," Technical Report EE02037, Australia, 2000.

---

## Estimation of the Sea State Using High Range Resolution Radars

A. M. Dehghani, S. M. Alavi\*, A. Sheikhi, R. Haghmaram, M. Khatami

Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 06/04/2016, Accepted: 20/01/2017)

### Abstract

For naval radars, the concept of "the sea state" is very important. In this article, the sea wave equation and its shape of movement have been determined. Then, the waveforms of the sea waves have been reconstructed using the Feko software. After that, the RCS resulting from the impact of radar waves (with high range resolution radar) to sea level has been calculated in order to acquire returned signals from sea waves in antenna input. Subsequent to determining returned signals in the time domain and receiving these signals by the radar receiver, its first to fourth moments are calculated. On the following, the feature space is formed and by using it sea waves are classified in four different modes. And finally, the precision of this suggested method has been measured by adding noise to returned signals from the sea level.

**Keywords:** Estimation of Sea State, Shape of Sea Save, HRR Radars, Moments of Sea Wave, Sea Waves Classification.

---

\* Corresponding author E-mail: malavi@ihu.ac.ir