

امکان‌سنجی پیش‌بینی کوتاه‌مدت موج در دریای خزر با مدل عددی

WAM

فاطمه جعفریان ابیانه* و علیرضا محب‌الحججه**

* واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی و سازمان هواشناسی کشور، تهران، صندوق پستی ۱۱۴-۱۴۹۶۵

** مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

(دریافت مقاله: ۱۷/۶/۸۲، پذیرش مقاله: ۲۴/۸/۸۴)

چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی امکان‌سنجی پیش‌بینی کوتاه‌مدت موج در دریای خزر جنوبی با مدل موج WAM (wave modelling) است. به‌منظور بررسی توانایی مدل در پیش‌بینی موج، دو وضعیت جوی متفاوت آرام و توفانی در نظر گرفته شد. مدل روی عرض جغرافیایی ۳۶/۵ تا ۴۷/۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۶/۵ تا ۵۵ درجه شرقی با یک شبکه مستطیلی با فاصله شبکه‌های ۱۵ دقیقه قوسی اجرا شد. داده‌های ورودی مورد نیاز در اجرای مدل موج WAM، داده‌های باد و عمق‌اند. داده‌های ورودی باد برای شرایط نسبتاً آرام جوی از داده‌های هم‌دید (synoptic) ارسالی از مراکز منطقه‌ای GTS (Global Telecommunication System) به مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی، برای شرایط توفانی از برون‌داد مدل میان‌مقیاس جوی MM5 واداشته با داده‌های AVN از مرکز NOAA و داده‌های عمق از نقشه آب‌نگاری دریای خزر سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح استخراج شدند. داده‌های ورودی قبل از تبدیل به فرمت مدل WAM روی شبکه دریای خزر درون‌یابی شدند. با تهیه برنامه‌های به زبان‌های فرترن، MATLAB و GrADS برای تبدیل برون‌داد رقمی مدل به برون‌داد نموداری، نقشه‌های میدان برداری موج (نمودار کاستر)، برداری باد، پربندی موج، نمودارهای طیف بسامدی و طیف زاویه‌ای رسم شدند. نتایج حاصل از این تحقیق بر اساس برون‌داد مدل موج دریای خزر به شرح زیر است:

مدل موج WAM به‌علت وجود تغییرات آشکار روی مقدار و گرادیان ارتفاع موج در شرایط متفاوت جوی که بیانگر حساسیت مدل به داده‌های ورودی باد است و به‌دلیل توافق بسیار بالا بین میدان موج و باد که از ویژگی پیش‌بینی موج در حوزه‌های بسته است توانایی پیش‌بینی کوتاه مدت مشخصه‌های امواج در دریای خزر را دارد.

مدل موج WAM به علت تطابق شکل طیف بسامدی دوقله‌ای دریای خزر با تحقیقات استریکالوف و ماسل (۱۹۷۱) در این مورد، قادر به پیش‌بینی کوتاه‌مدت و نمایش الگوی صحیحی از طیف بسامدی موج دریای خزر است.

به‌علت وجود چولگی به سمت راست در شکل طیف بسامدی موج دریای خزر، تعداد امواج شرکت‌کننده در انتشار انرژی طیفی موج، بیشتر به حوزه بسامدی بالاتر از بسامد اوج اختصاص دارد اما حداکثر میزان انتشار انرژی طیفی موج به‌صورت انتگرالی با امواج دارای بسامد کمتر از بسامد اوج صورت می‌گیرد.

به دلیل توافق نسبتاً خوب بین داده‌های برون‌داد مدل و داده‌های موج بویه انزلی حاصل از مقایسه آن‌ها به‌منظور بررسی درستی‌سنجی نتایج مدل، مشخص شد که مدل WAM با دقت نسبتاً خوبی قادر به پیش‌بینی کوتاه مدت مشخصه‌های موج در دریای خزر جنوبی است.

واژه‌های کلیدی: مدل نسل سوم موج، مدل جوی MM5، مدل موج WAM، نمودار کاستر، خوردان داده‌ها، پیش‌بینی کوتاه‌مدت

۱ مقدمه

شد. آگاهی از دانش حرکت و انرژی امواج در موارد وسیعی از قبیل کشتیرانی، صیادی، صنعت نفت، گردشگری به‌منظور کاهش دادن صدمات جانی و مالی، نظارت بر آلودگی‌های دریایی و انتخاب و طراحی سازه‌های دریایی مناسب و مقاوم برای و ایمن‌سازی سرمایه‌گذاری‌ها در صنعت نفت، شیلات و مانند آن به‌کار

پیدایش امواج در اقیانوس‌ها متأثر از نیروهایی است که به طور مداوم بر آن‌ها وارد می‌شوند. آشکارترین علت پیدایش امواج سطحی، فرایند برهم‌کنشی جو و دریا تحت عمل باد روی سطح دریا است. نیاز عملی به آگاهی از حالت موج دریا به هنگام نشستن هواپیما در طی جنگ جهانی دوم، موجب معطوف شدن نگاه‌ها به پیش‌بینی موج

می‌رود.

در آغاز مسیر تکاملی فرایند پیش‌بینی موج، پیش‌بینی‌های اولیه عملی براساس کار سوردراپ و مانک (۱۹۴۷) و در ادامه آن مدل‌های نسل اول، دوم و سوم موج صورت گرفتند که اساس آن‌ها، روش‌های مختلف پارامترسازی (parameterization) عبارت‌های چشمه معادله انتقال انرژی بود. در مدل‌های عددی نسل اول موج به علت نبود وجود عبارت انتقال غیرخطی، رشد موج با دیدگاه فیزیکی تطابق ندارد. با وجود عبارت انتقال غیرخطی در مدل‌های نسل دوم موج، شبیه‌سازی صحیح امواج ناشی از بادهای متغیر سریع مانند توفندها و یا جبهه‌ها امکان‌پذیر نبود. هسلمن و همکاران (۱۹۸۵) و اسنایدر و همکاران (۱۹۸۱) ضمن رفع اشکالات عددی موجود در محاسبه انتگرال نوع بولتزمن، تابع چشمه انتقال غیرخطی، امکان ظهور مدل‌های نسل سوم موج و ایجاد چارچوبی برای برنامه مدل‌سازی موج معروف به WAM را فراهم کردند. مدل WAM تاکنون در بسیاری از برنامه‌های عملیاتی و مطالعاتی در سطح جهانی و منطقه‌ای به کار گرفته شده است که در این خصوص می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) برای اجرای عملیاتی روزانه از مدل موج WAM که به مدل عملیاتی پیش‌بینی جوی متصل شده روی شبکه جهانی با فاصله شبکه‌ای ۳ درجه \times ۳ درجه و مؤسسه هواشناسی کونیکلیجک هلند (KNMI) برای پیش‌بینی زمان واقعی استفاده می‌کند. به‌علاوه از ۱۹۹۰ نسخه‌ای از مدل WAM روی دریای مدیترانه به‌صورت عملیاتی (کومن و همکاران، ۱۹۹۴) و مدل روی بخشی از مناطق اطلس شمالی و خلیج مکزیک با فاصله شبکه‌ای $1/2$ درجه \times $1/4$ درجه اجرا شده است. از نخستین مطالعات منطقه‌ای با مدل WAM می‌توان

به پیش‌بینی امواج در دریای شمال و شمال غربی اقیانوس اطلس شمالی، سه پیش‌بینی توفند در خلیج مکزیک، پیش‌بینی امواج در دریای مدیترانه و آدریاتیک و تایفون در دریای چین جنوبی و پیش‌بینی‌هایی اخیر در دریای آدریاتیک و کانال بریستول اشاره کرد. همچنین از بین نخستین مطالعات منطقه‌ای در ایران می‌توان به اسماعیلی (۱۳۷۲) و نیک‌پسند (۱۳۷۲) اشاره کرد که با میدان باد ثابت اجرا شده است.

این مقاله برای بررسی امکان‌سنجی پیش‌بینی کوتاه مدت موج در دریای خزر جنوبی، داده‌های ورودی باد مربوط به دو وضعیت جوی آرام و توفانی واقعی را روی شبکه‌ای مستطیلی با فاصله شبکه ۱۵ دقیقه قوسی، با مدل موج WAM اجرا می‌کند. در اجرای مدل موج WAM، داده‌های ورودی باد مورد نیاز برای شرایط آرام جوی از داده‌های هم‌دیدگی ارسالی از مراکز منطقه‌ای GTS به مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی، برای شرایط توفانی از برون‌داد مدل میان‌مقیاس جوی MM5 واداشته با داده‌های AVN از مرکز NOAA و داده‌های ورودی عمق مورد نیاز از نقشه عمق‌سنجی دریای خزر سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح استخراج شدند. داده‌های ورودی قبل از تبدیل به فرمت مدل WAM و اجرا با مدل موج روی شبکه دریای خزر درون‌یابی و سپس برای تبدیل برون‌داد رقمی مدل به نموداری، برنامه‌هایی به زبان‌های فرترن، MATLAB و GrADS تهیه شدند تا نقشه‌های میدان برداری موج (نمودار کاستر)، برداری باد، پربندی موج، نمودارهای طیف بسامدی و طیف زاویه‌ای رسم شود.

عملی شدن این تحقیق با توجه به اهمیت پیش‌بینی امواج از نظر اقتصادی، ایمنی جان انسان‌ها و همچنین به دلیل نبود پیش‌بینی موج روی دریای خزر بسیار ضروری است. با وجود اجرای روزانه مدل موج WAM به‌صورت جهانی با ECMWF، به‌علت عرض کم دریای خزر و

انتخابی، برون‌داد را در چهار فایل مجزا شامل میدان‌های منظم مشخصه‌های موج دریا و دورآ، طیف موج دریا و دورآ در نقاط انتخابی شبکه ذخیره می‌کند.

۳. برنامه‌های پس‌پردازش (post-processing programs): این قسمت با چهار برنامه که هر یک مرتبط با یکی از چهار فایل برون‌داد برنامه مرحله پردازش‌اند به چاپ آن‌ها می‌پردازد.

الف- مدل‌سازی

مدل WAM با انتگرال‌گیری از معادله انتقال انرژی و بدون فرض در مورد شکل طیف موج، قادر به محاسبه چگالی انرژی طیفی موج (طیف دوبعدی موج) از راه گسسته‌سازی در ۲۵ نوار بسامدی با فاصله لگاریتمی و ۱۲ نوار جهتی ۳۰ درجه است: گروه WAMDI (wave-model development and implementation group) (۱۹۸۸) و کومن و همکاران (۱۹۹۴). معادله انتقال انرژی به صورت زیر است:

$$\frac{d\bar{F}}{dt} = \frac{\partial \bar{F}}{\partial t} + (\cos \phi)^{-1} \frac{\partial}{\partial \phi} (\dot{\phi} \cos \phi \bar{F}) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} \bar{F}) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta} \bar{F}) + \frac{\partial}{\partial \omega} (\dot{\omega} \bar{F}) = \bar{S} \quad (1)$$

که در آن F چگالی انرژی طیفی، t زمان، ϕ عرض جغرافیایی، λ طول جغرافیایی، θ جهت حرکت موج، ω بسامد موج، $\dot{\phi}$ و $\dot{\lambda}$ میزان تغییر مکان و $\dot{\theta}$ میزان تغییر جهت انتشار یک بسته موج متحرک در امتداد مسیر دایره عظیمه و $\dot{\omega}$ میزان تغییر زمانی بسامد موج و S تابع منبع‌اند. تابع منبع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{S} = \bar{S}_{in} + \bar{S}_{dis} + \bar{S}_{nl} \quad (2)$$

که در آن S_{in} عبارت منبع ورودی باد، S_{dis} عبارت منبع نابودی موج و S_{nl} عبارت منبع انتقال غیرخطی موج‌اند. عبارت منبع ورودی باد و نابودی انرژی موج براساس

فاصله شبکه‌ای بزرگ اجرای مدل به میزان 3×3 درجه درجه هیچ‌گونه پیش‌بینی روی دریای خزر نمی‌شود. در این مقاله ابتدا مدل موج WAM از نظر ساختاری، نحوه مدل‌سازی و حل عددی و سپس داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل، نحوه اجرای مدل و برون‌داد مدل معرفی می‌شوند. در خاتمه ضمن مقایسه داده‌ها با داده‌های موج بوی انزلی، میزان دقت مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲ توصیف مدل موج WAM

مدل WAM به مثابه یکی از مدل‌های نسل سوم موج، در ۱۹۹۲ برای پیش‌بینی شرایط موج در دریا، به صورت عملیاتی اجرا شد. این مدل به علت انعطاف‌پذیری بسیار زیاد نسبت به فاصله شبکه و انتشار روی شبکه طول و عرض جغرافیایی یا دکارتی، به صورت جهانی یا منطقه‌ای، با مرز باز یا بسته در آب کم‌عمق یا عمیق و یا بدون شکست ناشی از جریان و یا کف، قابل اجرا است. خروجی مدل WAM شامل ارتفاع موج عمده، بسامد و جهت متوسط موج، ارتفاع و جهت متوسط موج دورآ، میدان تنش باد تصحیحی با تنش ناشی از موج، ضریب کشال در زمان‌های انتخابی برای هر نقطه از شبکه و طیف دوبعدی موج در نقاط انتخابی شبکه است. سامانه مدل WAM شامل سه قسمت به شرح ذیل است:

۱. برنامه‌های پیش‌پردازش (pre-processing programs): این قسمت با دو برنامه، ضمن فعال شدن با داده‌های عمق جهانی یا منطقه‌ای، کلیه اطلاعات مورد نیاز مستقل از زمان و شبکه را برای مدل و میدان موج اولیه‌ای را برای شروع مدل تولید می‌کند.
۲. برنامه‌های پردازش (processing programs): این قسمت نیز با دو برنامه به مثابه بدنه اصلی مدل موج، ضمن استفاده از برون‌داد برنامه‌های پیش‌پردازش و انتگرال‌گیری از معادله انتقال انرژی در یک دوره

به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega_m = \frac{\kappa^2 g Z_0}{u_*^2} \quad (۸)$$

که در آن g شتاب جاذبه، Z_0 طول ناهمواری و κ ثابت ون کارمن است. پارامتر نیم‌رخ باد، بیانگر وضع جریان متوسط هوا است که از راه بستگی به طول ناهمواری جریان هوا به وضع دریا وابسته است. میزان رشد امواج گرانی ناشی از باد به‌طور مستقیم به سرعت قائم بدون بعد ناشی از موج و به‌طور غیر مستقیم به پارامتر نیم‌رخ باد بستگی دارد.

عبارت ورودی باد براساس پیشنهاد اسنایدر به صورت

زیر است:

$$S_{in} = \gamma \cdot F \quad (۹)$$

که در آن γ از رابطه (۳) تبعیت می‌کند.

تنش جریان هوای روی امواج دریا به دلیل وابستگی به حالت دریا و شکل توازن اندازه حرکت هوا، به صورت زیر تعریف می‌شود، (جانسن، ۱۹۹۱):

$$\tau = \left(\frac{\kappa U(Z_{obs})}{\ln(Z_{obs}/Z_0)} \right)^2 \quad (۱۰)$$

که در آن Z_{obs} ارتفاع متوسط بالای امواج و Z_0 به شکل زیر است:

$$Z_0 = \alpha \tau / g \quad (۱۱)$$

که در آن α پارامتر بدون بعد چارنوک (Charnock-parameter) است و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{\hat{\alpha}}{\sqrt{1 - \frac{\tau_w}{\tau}}} \quad (۱۲)$$

که در آن τ_w تنش ناشی از امواج گرانی (تنش موج) و به صورت زیر است:

$$\tau_w = \rho_w \int \omega \gamma (F \cdot \cos(\theta - \phi)) d\omega d\theta \quad (۱۳)$$

نظریه شبه‌خطی تولید موج ناشی از باد جانسن (Janssen) هستند. میزان رشد امواج گرانی ناشی از باد با نرمال شدن نسبت به بسامد به‌صورت زیر فراسنجی می‌شود:

$$\frac{\gamma}{\omega} = \varepsilon \beta X^2 \quad (۳)$$

که در آن γ میزان رشد امواج گرانی ناشی از باد، ε نسبت چگالی هوا به آب، ω بسامد زاویه‌ای موج، X سرعت قائم بدون بعد ناشی از موج و β پارامتر مایلز (Miles' parameter) هستند. سرعت قائم بدون بعد ناشی از موج به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$X = u_* \cos(\theta - \phi) / c \quad (۴)$$

که در آن u_* سرعت اصطکاکی، θ جهت انتشار موج، ϕ جهت باد و c سرعت فاز موج‌اند و پارامتر مایلز نیز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{\beta_m}{\kappa^2} \mu \ln^4(\mu), \quad \mu < 1 \quad (۵)$$

که در آن β_m یک عدد ثابت برابر $1/2$ ، μ ارتفاع بحرانی بدون بعد و κ ثابت ون کارمن (Von Karman) است. ارتفاع بحرانی بدون بعد در پارامتر مایلز به شکل زیر است:

$$\mu = k Z_c \quad (۶)$$

که در آن k عدد موج و Z_c ارتفاع بحرانی است. ارتفاع بحرانی با رابطه $U_0(Z = Z_0) = c$ تعریف می‌شود که U_0 سرعت جریان برشی و c سرعت فار امواج است. ارتفاع بحرانی بدون بعد برحسب کمیت‌های باد و موج به صورت زیر نیز تعریف می‌شود:

$$\mu = \left(\frac{u_*}{kc} \right)^2 \Omega_m \exp(k/c) \quad (۷)$$

که در آن Ω_m پارامتر نیم‌رخ باد و c سرعت فاز است و

تیلور استفاده می‌شود:

$$S_{n+1} = S_n + \frac{\partial S_n}{\partial F} \Delta F + \dots \quad (18)$$

مشتق تابع در معادله (۱۸) به ماتریس قطری، A_n و ماتریس غیرقطری باقی‌مانده، N_n به شکل زیر تجزیه می‌شود:

$$\frac{\partial S_n}{\partial F} = M_n = A_n + N_n \quad (19)$$

ΔF با جای‌گذاری (۱۸) و (۱۹) در (۱۷) و با در نظر قرار دادن وابستگی تابع چشمه به سرعت اصطکاکی در تراز زمانی $n+1$ به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\left[1 - \frac{1}{2} \Delta t \{A_n(u_*^{n+1}) + N_n(u_*^{n+1})\} \right] \Delta F = \frac{1}{2} \Delta t (S_n(u_*^n) + S_n(u_*^{n+1})) \quad (20)$$

در صورت کوچک بودن گام زمانی، برخی از محاسبات، بیانگر کوچک بودن درایه‌های قطری‌اند. با صرف نظر از ماتریس قطری و معکوس کردن ماتریس سمت چپ، ΔF به صورت زیر در می‌آید:

$$\Delta F = \frac{1}{2} \Delta t (S_n(u_*^n) + S_n(u_*^{n+1})) \left[1 - \frac{1}{2} \Delta t \{A_n(u_*^{n+1}) + N_n(u_*^{n+1})\} \right] \quad (21)$$

عبارت فرارفت و شکست در معادله انتقال انرژی به صورت شار در یک بعد به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} F = - \frac{\partial}{\partial x} \Phi \quad (22)$$

که در آن Φ شار انرژی است و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi = c_g F \quad (23)$$

و توسط طرح‌واره پادسوی مرتبه اول (first order-upwinding scheme) انتگرال‌گیری می‌شود. این طرح‌واره با پخش عددی بزرگ‌تر دارای ضریب پخش مؤثر $D \approx \Delta x^2 / \Delta t$ است که در اینجا Δx و Δt به

عبارت منبع نابودی براساس نظریه کلاهیگ سفید قله موج هسلمن (۱۹۷۴) به شکل زیر است:

$$S_{dis} = -\gamma_d \cdot F \quad (14)$$

که در آن γ_d میزان نابودی امواج گرانی ناشی از باد است که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma_d = \frac{1}{2} c_{dis} \langle \omega \rangle (\langle k \rangle^2 E)^2 \left(\frac{k}{\langle k \rangle} + \left(\frac{k}{\langle k \rangle} \right)^2 \right) \quad (15)$$

و در آن c_{dis} عدد ثابت برابر ۴/۵، E انرژی کل موج، k عدد موج، $\langle \omega \rangle$ بسامد متوسط موج و $\langle k \rangle$ عدد موج متوسط است و E ، k ، $\langle \omega \rangle$ و $\langle k \rangle$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\langle \omega \rangle = \left[E^{-1} \iint F(\omega, \theta) \omega^{-1} d\omega d\theta \right]^{-1} \quad (16-الف)$$

$$\langle k \rangle = \left[E^{-1} \iint (\omega, \theta) k^{-1/2} d\omega d\theta \right]^{-1} \quad (16-ب)$$

$$E = \iint F(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (16-ج)$$

عبارت منبع غیرخطی با برهم‌کنش‌های غیرخطی دقیق پیشنهادی توسط هسلمن و همکاران (۱۹۸۵)، فراسنجی می‌شود.

ب- حل عددی

تابع چشمه در این مدل با یک طرح‌واره ضمنی تفاضلی مرکزی مرتبه دوم به صورت زیر

$$F_{n+1} = F_n + \frac{\Delta t}{2} (S_{n+1} + S_n) \Rightarrow \Delta F = F_{n+1} - F_n = \frac{\Delta t}{2} (S_{n+1} + S_n) \quad (17)$$

انتگرال‌گیری می‌شود که Δt گام زمانی و زیرنویس n به تراز زمانی اشاره می‌کند. اگر S_{n+1} به طور خطی به F_{n+1} بستگی داشته باشد معادله (۱۷) را می‌توان به طور مستقیم برای طیف F_{n+1} در گام زمانی جدید حل کرد. اما چون هیچ کدام از عبارات چشمه خطی نیستند از بسط

داده‌های باد. داده‌های باد از دو منبع متفاوت برای شرایط جوی نسبتاً آرام و توفانی استخراج شدند. منبع اول: برای شرایط جوی نسبتاً آرام از داده‌های باد هم‌دیدگی ارسالی از مراکز منطقه‌ای GTS به مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی از سوم سپتامبر ۲۰۰۲ تا هشتم سپتامبر ۲۰۰۲ استفاده شد. این داده‌ها، داده‌های واقعی دیده‌بانی شده کلیه ایستگاه‌های دیده‌بانی سراسر جهان‌اند که مستقیماً و به‌صورت کد به مراکز منطقه‌ای GTS و از آنجا به مرکز بین‌المللی GTS در آمریکا مخابره شده‌اند. این داده‌ها و پس از پردازش‌های لازم به مراکز منطقه‌ای و از آنجا به مراکز سرویس‌های ملی هواشناسی ارسال می‌شوند. مراکز منطقه‌ای GTS نزدیک به کشور ایران، مراکز منطقه‌ای GTS دهلی و جدانند. این داده‌ها در بانک اطلاعاتی سازمان هواشناسی قابل دستیابی‌اند. منبع دوم: برای شرایط جوی توفانی از داده‌های باد برون‌داد مدل جوی میان‌مقیاس MM5 از بیست و یکم نوامبر ۲۰۰۳ تا بیست و دوم نوامبر ۲۰۰۳ استفاده شد. داده‌های درون‌داد به مدل جوی MM5 داده‌های شبکه منظم AVN از مرکز NOAA هستند که از راه شبکه جهانی اینترنت قابل دستیابی هستند. این داده‌ها به صورت فایل‌های رایانه‌ای داده‌های دیده‌بانی شده و پیش‌بینی شده‌اند و داده‌های دیده‌بانی شده در سازمان هواشناسی ضبط می‌شوند.

ترتیب معرف فاصله شبکه‌ای و گام زمانی‌اند. شرط وجود پایداری عددی، برقراری نامساوی $\Delta t < \Delta x / c_g$ است که منجر به برقراری نامساوی $D > c_g \Delta x$ خواهد شد. معادله (۲۲) از طریق نقاط شبکه به صورت نمودار (۱) گسسته‌سازی می‌شود.

میزان تغییر طیف ΔF_j در نقطه j ام شبکه با رابطه زیر

$$\Delta F_j = -\frac{\Delta t}{\Delta x} (\Phi_{j+1/2} - \Phi_{j-1/2}) \quad (24-f)$$

$$\Phi_{j+1/2} = \frac{1}{2} [v_j + |v_j|] F_j + \frac{1}{2} [v_j - |v_j|] F_{j+1} \quad (24-b)$$

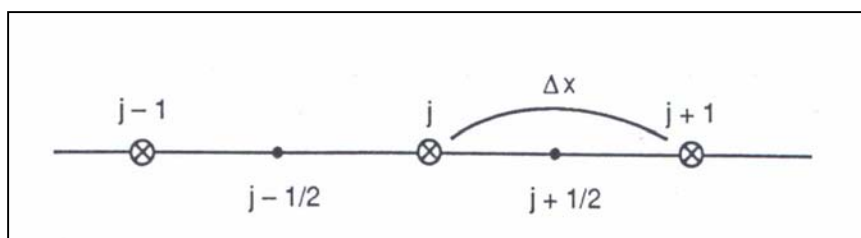
بیان می‌شود که Δx فاصله شبکه‌ای، Δt گام زمانی انتشار و v_j سرعت متوسط گروه است و سرعت متوسط گروه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v_j = 0.5(c_{g,j} + c_{g,j+1}) \quad (25)$$

شار انرژی در نقطه $j-1/2$ با جای‌گذاری $j+1/2$ با $j-1/2$ در معادله (۲۴-ب) به دست می‌آید.

۳ داده‌ها

به منظور اجرای مدل WAM و بررسی دقت پیش‌بینی مدل به داده‌های ورودی و مقایسه‌ای یا شاهد نیاز است. الف- داده‌های ورودی: داده‌های ورودی در اجرای این مدل، داده‌های باد و عمق‌اند.



نمودار ۱. نمایش نقاط شبکه برای طرح‌واره پادسوی مرتبه اول (کومن و همکاران، ۱۹۹۴).

GTS، به مؤلفه‌های X و Y در مختصات دکارتی تجزیه شدند و سپس به شبکه منظمی با فاصله شبکه‌ای ۱ سانتی‌متر نقشه‌های مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی (۱ سانتی‌متر در عرض جغرافیایی ۶۰ درجه معادل ۱۵۰ کیلومتر) به مرکز شبکه واقع در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۷/۵ درجه شرقی و ۳۱×۳۱ نقطه تبدیل شدند. مؤلفه‌های باد برای ۲۴ ساعت آینده از راه درونیابی دوخطی برای شبکه دریای خزر تولید و سرانجام به مختصات مورد نیاز شبکه WAM تبدیل شدند. همچنین با تهیه برنامه‌هایی به زبان فرترن و GrADS، داده‌های باد شبکه منظم برون‌داد از مدل جوی میان مقیاس MM به مؤلفه‌های X و Y تجزیه و سپس به مختصات مورد نیاز شبکه WAM تبدیل شدند.

مدل با در نظر گرفتن مختصات جغرافیایی بویه مستقر در آب‌های انزلی به مثابه مکان طیف خروجی، گام زمانی درون‌داد و برون‌داد باد ۶ ساعت، گام زمانی انتشار ۶۰۰ ثانیه و گام زمانی منبع ۳۰۰ ثانیه (گام زمانی درون‌داد و برون‌داد باد ۳ ساعت برای اجرای مدل با برون‌داد مدل MM5، در سه مرحله پیش پردازش، پردازش و پس پردازش اجرا شد. در خاتمه با تهیه برنامه‌هایی به زبان فرترن، MATLAB و GrADS برای تبدیل برون‌داد رقمی مدل به نموداری، نقشه‌های میدان برداری موج (میدان کاستر)، میدان برداری باد، میدان پرنبدی (کتور) ارتفاع موج، طیف بسامدی و طیف دوبعدی موج در تاریخ سوم تا هشتم سپتامبر ۲۰۰۲ برای شرایط جوی نسبتاً آرام و در تاریخ ۲۱ تا ۲۳ نوامبر ۲۰۰۳ برای شرایط جوی توفانی رسم شد.

۵ برون‌داد مدل موج WAM

برون‌دادهای نموداری مدل شامل نقشه‌های میدان برداری موج (میدان کاستر)، میدان برداری باد، میدان پرنبدی (کتوری) ارتفاع موج و نمودارهای طیف بسامدی موج و

داده‌های عمق. داده‌های عمق دریای خزر از نقشه آب‌نگاری سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح (نقشه‌ای با مقیاس ۱:۱,۵۰۰,۰۰۰ که در آن ژرفا نسبت به حد متوسط سطح آب برای سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۵۵ با استفاده از دستگاه جزرومدسنج با ارسال تپ‌های صوتی اندازه‌گیری و محاسبه شده است) استخراج شدند.

ب- داده‌های مقایسه‌ای یا شاهد: به منظور بررسی میزان دقت و درستی‌سنجی برون‌داد مدل از داده‌های موج اندازه‌گیری شده بویه سازمان بنادر و کشتیرانی مستقر در آب‌های بندر انزلی استفاده شد.

بویه فوق فقط برای ۲ روز از دوره ۵ روزه اجرای مدل مربوط به شرایط آرام جوی، اندازه‌گیری مشخصه‌های موج را ثبت کرده است. در سال‌های اخیر دو بویه هواشناسی و اقیانوس‌شناسی در دریای خزر نصب شده است. بویه اول متعلق به سازمان بنادر و کشتیرانی است که از خرداد ۱۳۷۹ در ۳ کیلومتری ساحل بندر انزلی در عمق ۲۵ متری و در عرض ۳۷' ۱۱" ۳۰° شمالی و طول ۲۹' ۵" ۴۹° شرقی مستقر است، اما به دلیل بروز مشکلاتی در زمینه نرم‌افزاری و سخت‌افزاری قادر به ثبت متوالی اطلاعات نیست. بویه دوم متعلق به سازمان بنادر و کشتیرانی است که از سال ۱۳۸۱ در ۱۰ کیلومتری ساحل بندر امیرآباد در عمق ۱۵ متری و در عرض ۵۲' ۵۵" ۳۶° شمالی و طول ۲۴' ۳۸" ۵۳° شرقی مستقر است. این بویه نیز به دلیل بروز مشکلاتی در زمینه نرم‌افزاری و سخت‌افزاری قادر به ثبت متوالی اطلاعات نشده است.

۴ نحوه اجرای مدل WAM

برای اجرای مدل در عرض جغرافیایی ۳۶/۵ تا ۴۷/۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۶/۵ تا ۵۵ درجه شرقی از یک شبکه مستطیل شکل با فاصله شبکه‌ای ۱۵ دقیقه قوسی و ۱۵۷۵ نقطه استفاده شده است. با تهیه برنامه‌هایی به زبان فرترن، داده‌های باد هم‌دیدگی ارسالی از مراکز منطقه‌ای

شدت گرادیان در خزر شمالی کاسته می‌شود.

- از بررسی نمودارهای طیف بسامدی (یک‌بعدی) موج بندر انزلی شکل ۱۳-ا تا ۱۶-ا استنباط می‌شود که انتشار انرژی امواج در نوار بسامدی ۰/۴۱ تا ۰/۱۳ هرتز با حداکثری در حدود $0.58 \text{ m}^2\text{Hz}^{-1}$ در بسامدی ۰/۱۹ هرتز صورت گرفته است.

- از بررسی نمودارهای طیف زاویه‌ای (دو بعدی) موج بندر انزلی شکل ۱۷ تا ۲۰ استنباط می‌شود که انتشار انرژی موج در محدوده $0.35 - 0.29 \text{ m}^2\text{Hz}^{-1}$ و در نوار بسامدی ۰/۴۱ - ۰/۱۳ هرتز و عمدتاً در جهت شمالی و شمال شرقی صورت گرفته است.

ب- شرایط جوی توفانی

- از بررسی نمودارهای کاستر(نقشه میدان برداری موج) دریای خزر شکل ۱-ا تا ۴-ا استنباط می‌شود که میدان موج تقریباً ثابتی در خزر جنوبی به سمت شمال و شمال شرقی حاکم است اما در قسمت‌های دیگر خزر جهت حرکت امواج در حال تغییر است و در نهایت با قرار گرفتن میدان کلی حرکت موج در خزر به سمت جنوب شرقی، از شدت گرادیان میدان موج در خزر جنوبی کاسته می‌شود.

- از بررسی نقشه‌های میدان برداری باد دریای خزر شکل ۵-ا تا ۸-ا استنباط می‌شود که میدان باد در خزر جنوبی عمدتاً شمال غربی و گاهی نیز دارای حرکت واچرخندی است. اما میدان باد در خزر مرکزی از نظر جهت و گرادیان دچار تغییرات شدیدتری است. در خاتمه با حاکم شدن میدان باد شمال غربی، از شدت میدان باد در خزر جنوبی کاسته می‌شود.

- از بررسی نقشه‌های میدان پربندی ارتفاع موج دریای خزر شکل ۹-ا تا ۱۲-ا استنباط می‌شود که میدان موج در بخش شمالی ضمن تقویت، به سمت عرض‌های پایین‌تر کشیده شده است.

- از بررسی نمودارهای طیف بسامدی (یک‌بعدی) موج

طیف دوبعدی موج‌اند. لازم به توضیح است که اعداد نمایشی در نقشه‌های پربندی (کتوری) میدان موج، نمایانگر ارتفاع موج برحسب ۰/۱ متر، عدد زیر بردار در پایین نمودار کاستر نمایانگر مقیاس طول برداری ارتفاع موج برحسب ۰/۱ متر و عدد زیر بردار در پایین نقشه‌های برداری میدان باد نمایانگر مقیاس طول برداری سرعت باد برحسب متر بر ثانیه‌اند. به‌منظور کاهش حجم مقاله، نقشه‌های شرایط جوی نسبتاً آرام در ساعت ۰۰۰۰ و نقشه‌های شرایط جوی توفانی در ساعت‌های ۰۰۰۰، ۰۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ آورده شده است.

الف- شرایط جوی نسبتاً آرام

- از بررسی نمودارهای کاستر(نقشه میدان برداری موج) دریای خزر شکل ۱-ا تا ۴-ا استنباط می‌شود که میدان موج تقریباً ثابتی در خزر جنوبی به سمت شمال و شمال شرقی حاکم است اما در قسمت‌های دیگر خزر جهت حرکت امواج در حال تغییر است و در نهایت با قرار گرفتن میدان کلی حرکت موج در خزر به سمت جنوب شرقی، از شدت گرادیان میدان موج در خزر جنوبی کاسته می‌شود.

- از بررسی نقشه‌های میدان برداری باد دریای خزر شکل ۵-ا تا ۸-ا استنباط می‌شود که میدان باد در خزر جنوبی عمدتاً شمال غربی و گاهی نیز دارای حرکت واچرخندی است. اما میدان باد در خزر مرکزی از نظر جهت و گرادیان دچار تغییرات شدیدتری است. در خاتمه با حاکم شدن میدان باد شمال غربی، از شدت میدان باد در خزر جنوبی کاسته می‌شود.

- از بررسی نقشه‌های میدان پربندی ارتفاع موج دریای خزر شکل ۹-ا تا ۱۲-ا استنباط می‌شود که میدان موجی با حداکثری در حدود ۰/۶ متر در خزر شمالی ایجاد شده است و با تغییر جهت حرکت موج به سمت شمال در خزر مرکزی، بر شدت میدان در خزر شمالی تا حدود ۰/۹ متر افزوده و مجدداً با تغییر حرکت موج به سمت جنوب از

همچنین توافق بسیار خوبی بین میدان موج و باد برون‌دادی مدل موج در این حوزه بسته مشاهده شد که با نتایج تحقیقات کاوالری و برتوتی (۲۰۰۱) روی حوزه‌های بسته نیز هم‌خوانی دارد. طیف بسامدی موج برون‌دادی مدل در اغلب موارد به صورت دو‌قله‌ای است که با نتایج مطالعات استریکالوف و ماسل (۱۹۷۱) در مورد طیف دریای خزر هم‌خوانی دارد. همگی موارد فوق بیانگر توانایی مدل در پیش‌بینی کوتاه مدت مشخصه‌های موج در دریای خزرند.

طیف بسامدی موج در اغلب موارد دارای چولگی به سمت راست است که بیانگر مشارکت تعداد بیشتر امواج با بسامد بالاتر از بسامد اوج در انتشار انرژی طیفی موج است. اما حداکثر میزان انتشار انرژی طیفی موج به صورت انتگرالی با امواجی با بسامد کمتر از بسامد اوج صورت می‌گیرد.

در نهایت به‌منظور بررسی درستی‌سنجی و میزان دقت نتایج پیش‌بینی با مدل WAM، برون‌داد مدل با داده‌های موج بویه انزلی مقایسه شد و جدول (۱) به‌دست آمد. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد، توافق نسبتاً خوبی بین آنها مشاهده می‌شود که خود بیانگر توانایی مدل WAM در پیش‌بینی کوتاه مدت مشخصه‌های موج دریای خزر جنوبی با دقت نسبتاً خوبی است.

۷ نتیجه‌گیری

نتایج اصلی حاصل از این تحقیق در مورد بررسی امکان‌سنجی پیش‌بینی موج دریای خزر با توجه به محدودیت داده‌های قابل مقایسه به شرح زیر است:

۱. طبق جدول ۱ مربوط به مقایسه موردی نتایج حاصل از اجرای مدل موج WAM (Cycle 4) با اندازه‌گیری‌های بویه موج مستقر در آب‌های انزلی، استنباط می‌شود که مدل با دقت نسبتاً خوبی قادر به پیش‌بینی مشخصه‌های امواج مشاهده شده بوده است.

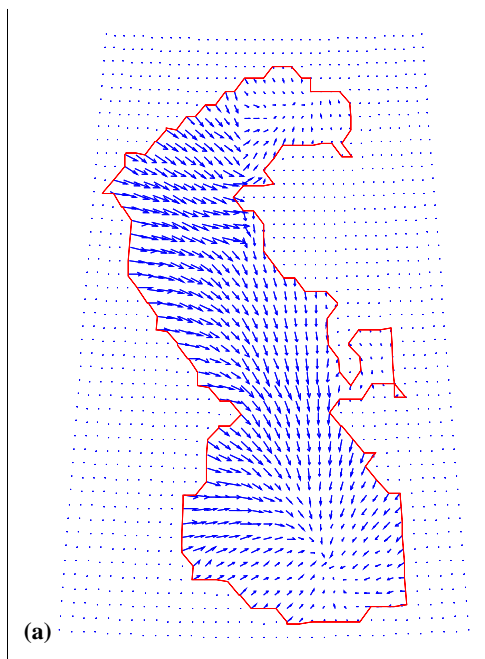
بندر انزلی شکل b-۱۳ و b-۱۴ استنباط می‌شود که انتشار انرژی امواج در نوار بسامدی ۰/۳۷۵ تا ۰/۱۱ هرتز با حداکثری در حدود $2/01 \text{ m}^2\text{Hz}^{-1}$ در بسامد ۰/۱۷۵ هرتز صورت گرفته است.

- از بررسی نمودارهای طیف زاویه‌ای (دوبعدی) موج بندر انزلی شکل b-۱۵ و b-۱۶ استنباط می‌شود که انتشار انرژی موج در نوار بسامدی ۰/۲۲-۰/۱۲ هرتز و در جهت جنوب، جنوب غربی و شرقی صورت گرفته است (جهت انتشار طیفی انرژی موج در نمودارهای شرایط جوی توفانی جهت هواشناسی است که ۱۸۰ درجه با جهت اقیانوس‌شناسی تفاوت دارد).

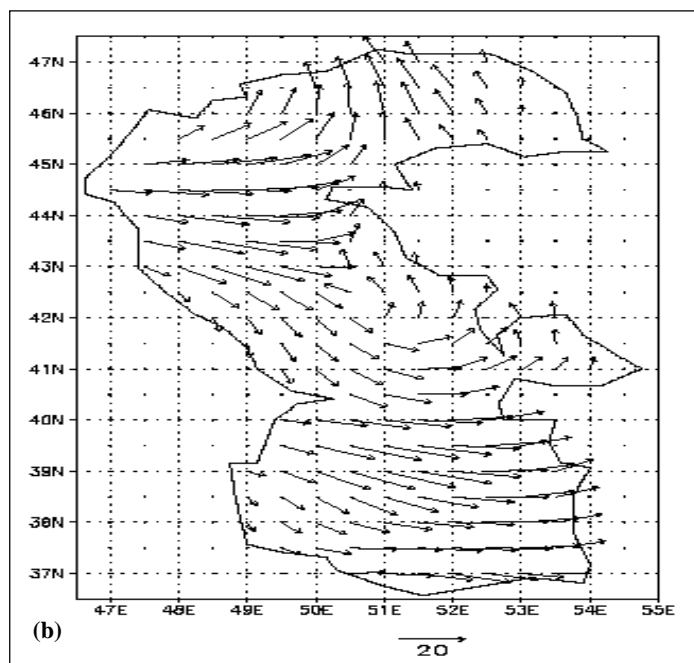
۶ بحث

اجرای مدل بر روی یک شبکه مستطیل شکل با فاصله شبکه‌ای ۱۵ دقیقه قوسی از عرض ۳۶/۵ تا ۴۷/۵ درجه شمالی و طول ۴۶/۵ تا ۵۵ درجه شرقی صورت گرفت. ورودی باد از دو منبع برای شرایط آرام جوی از داده‌های باد همدیدی ارسالی به مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی و برای شرایط آرام توفانی از برون‌داد مدل جوی میان مقیاس MM5 به مختصات مورد نیاز شبکه WAM تبدیل شدند. با قرار دادن مختصات جغرافیایی بویه مستقر در آب‌های انزلی در مدل به‌منابۀ مکان طیف خروجی، مدل در سه مرحله پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش اجرا شد و با تهیه برنامه‌هایی به زبان فرترن، MATLAB و GrADS برای تبدیل برون‌داد رقمی مدل به برون‌داد نموداری، نقشه‌های میدان برداری موج (میدان کاستر)، میدان برداری باد، میدان پربندی (کتور) ارتفاع موج، طیف بسامد و طیف دو بعدی موج رسم شدند.

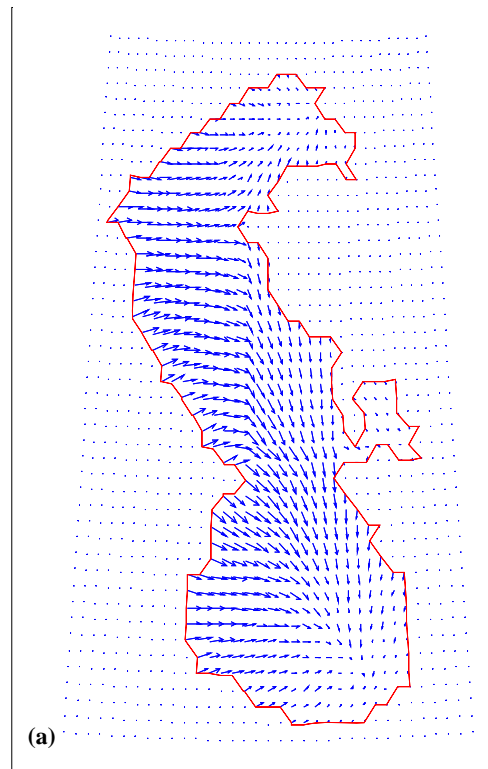
با اجرای مدل در شرایط متفاوت واقعی جوی، تغییر آشکاری در ارتفاع موج و گرادیان میدان موج حاصل شد که بیانگر حساسیت مدل به داده‌های ورودی باد و یکی از ویژگی‌های ضروری مدل‌های پیش‌بینی موج است.



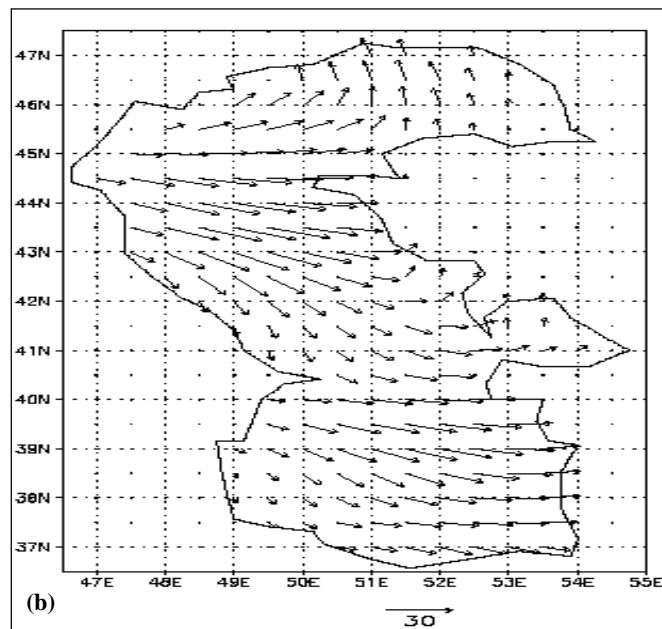
→ 20 (0.1 m)



شکل ۱. (a) نمودار کاستر (میدان موج) (ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز سوم سپتامبر ۲۰۰۲) و (b) نقشه برداری میدان موج (نمودار کاستر) دریای خزر در ساعت ۰۶۰۰ روز بیست و یکم نوامبر ۲۰۰۳ (بر حسب ۰/۱ متر).

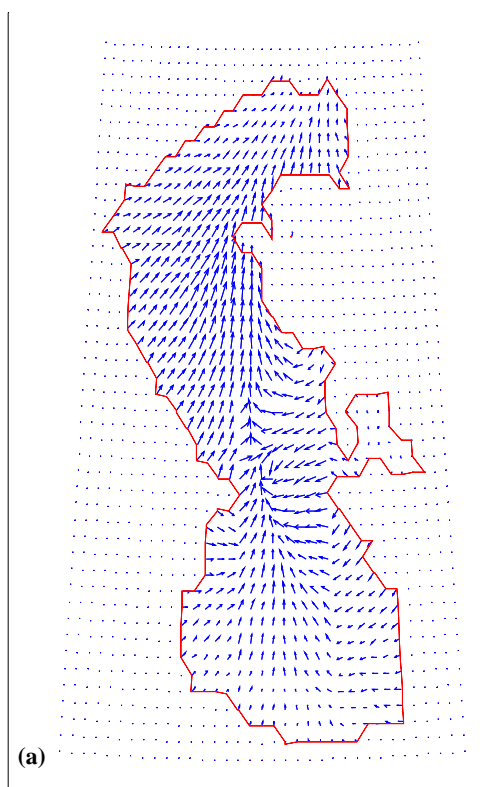


20 (0.1 m)

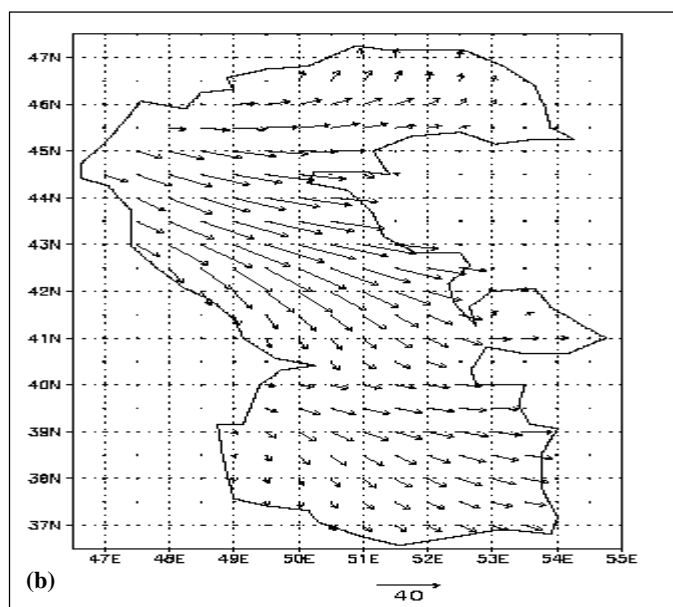


30

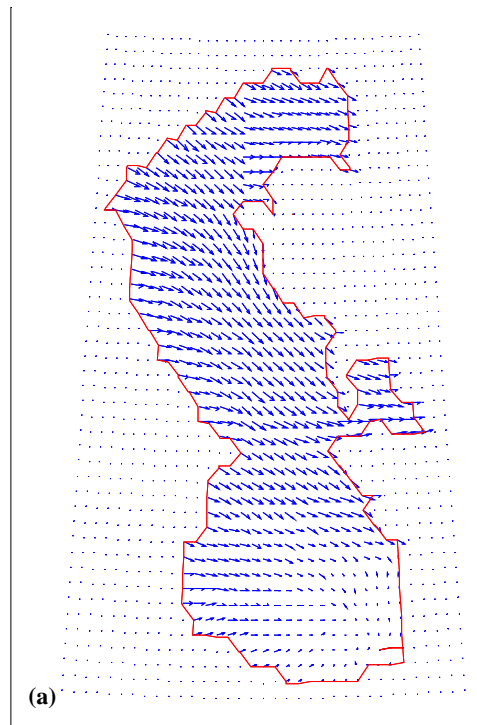
شکل ۲. (a) نمودار کاستر (میدان موج) (ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز چهارم سپتامبر ۲۰۰۲) و (b) نقشه‌برداری میدان موج (نمودار کاستر) دریای خزر در ساعت ۱۲۰۰ روز بیست و یکم نوامبر ۲۰۰۳ (بر حسب ۰/۱ متر).



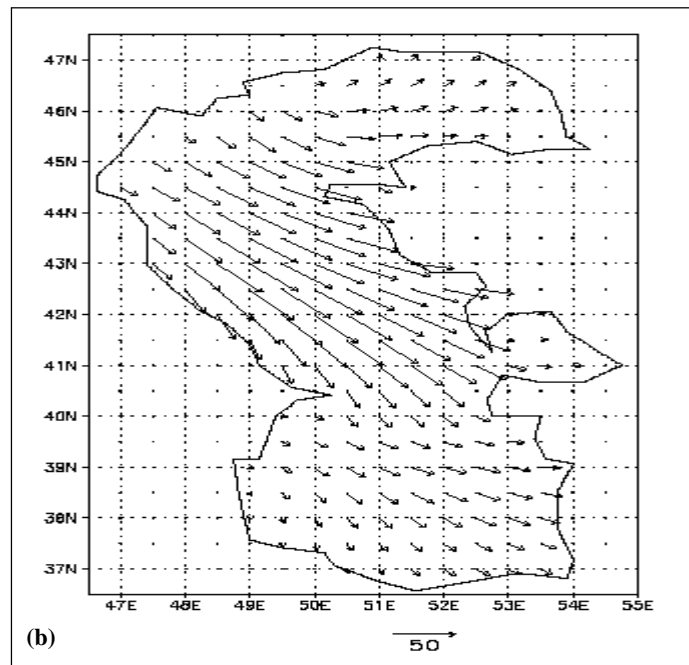
→ 20 (0.1 m)



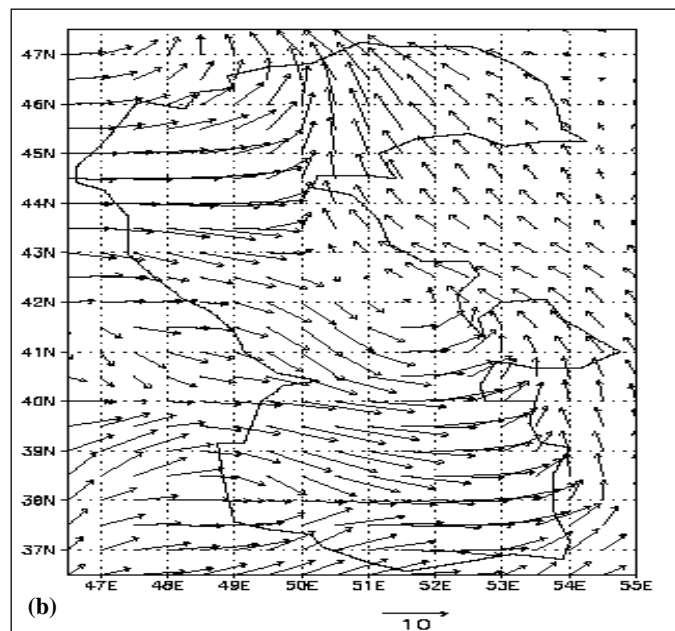
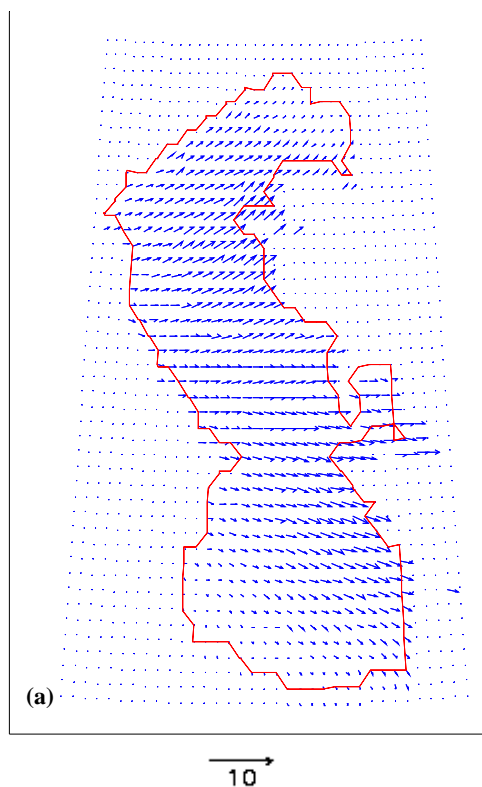
شکل ۳. (a) نمودار کاستر (میدان موج) (ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز پنجم سپتامبر ۲۰۰۲) و (b) نقشه برداری میدان موج (نمودار کاستر) دریای خزر در ساعت ۱۸۰۰ روز بیست و یکم نوامبر ۲۰۰۳ (بر حسب ۰/۱ متر).



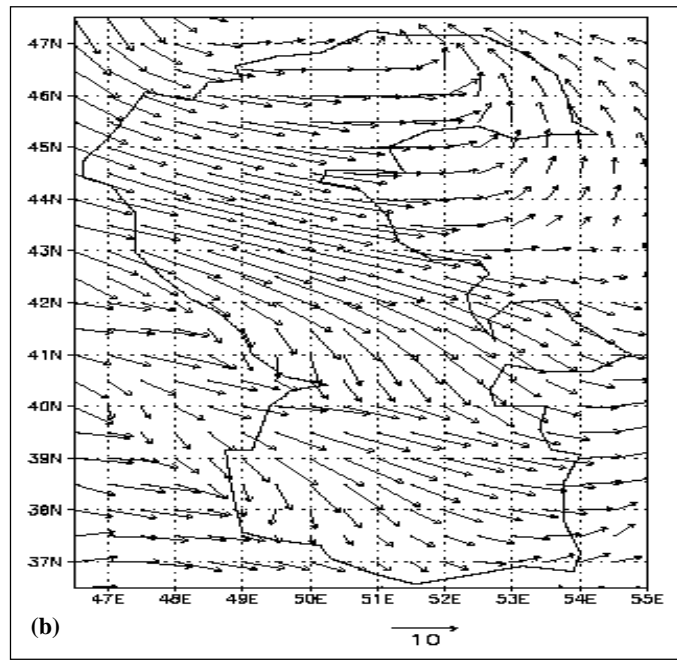
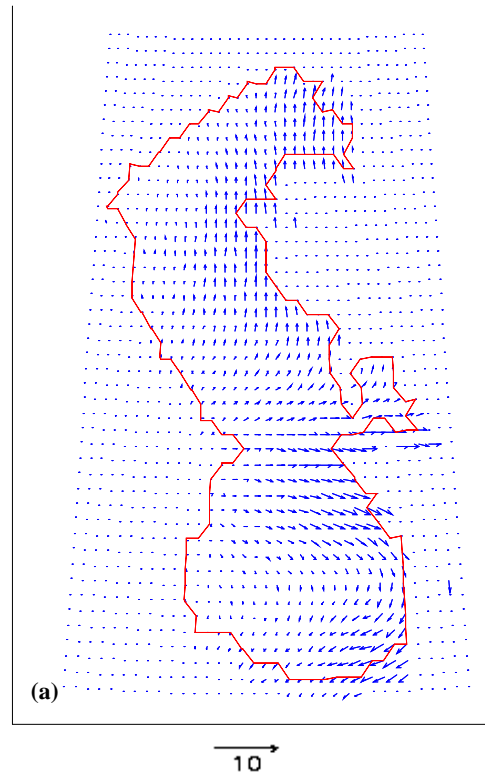
→ 20 (0.1 m)



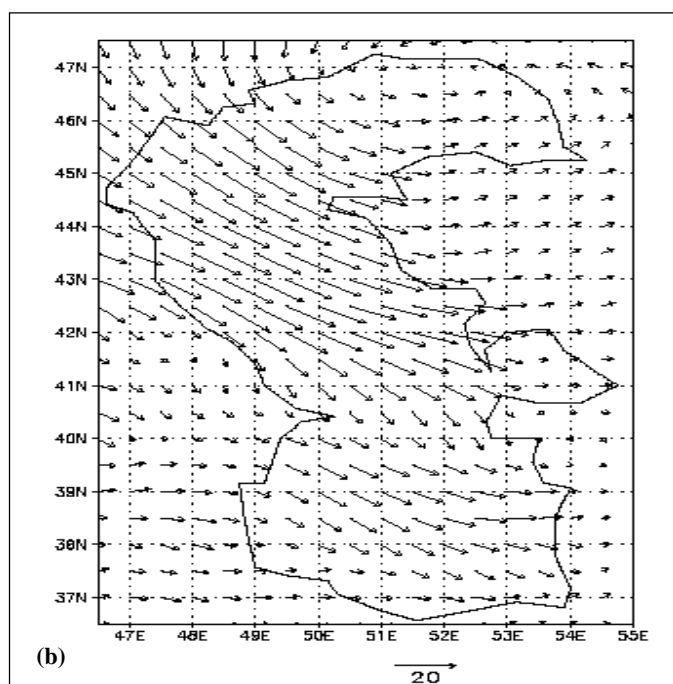
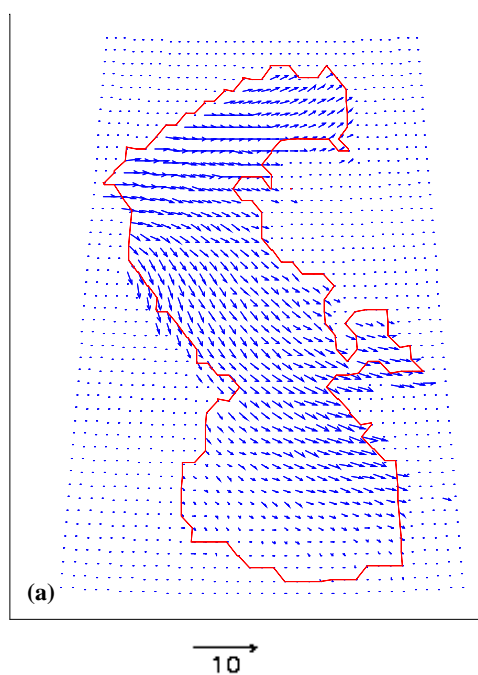
شکل ۴. (a) نمودار کاستر (میدان موج) (ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز ششم سپتامبر ۲۰۰۲) و (b) نقشه‌برداری میدان موج (نمودار کاستر) دریای خزر در ساعت ۰۰۰۰ روز بیست و دوم نوامبر ۲۰۰۳ (بر حسب ۰/۱ متر).



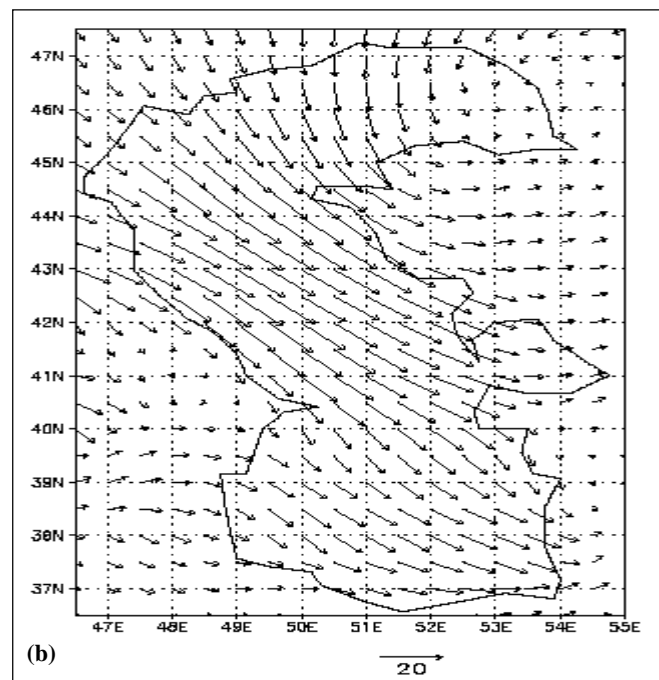
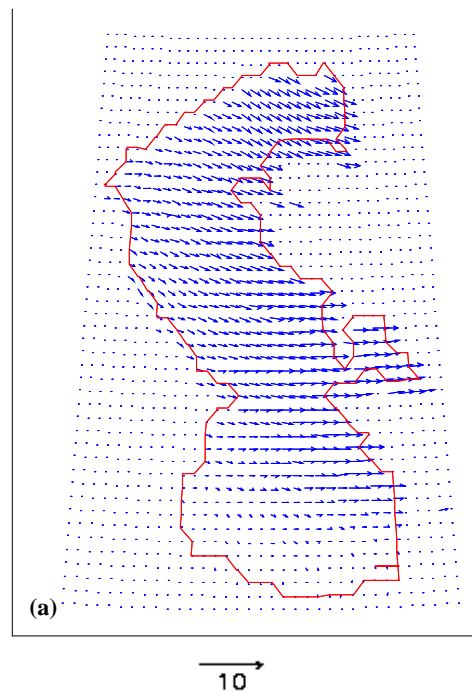
شکل ۵. (a) میدان باد ساعت ۰۰۰۰-UTC روز سوم سپتامبر ۲۰۰۲ (ms^{-1}) و (b) نقشه برداری میدان باد دریای خزر در ساعت ۰۶۰۰ روز بیست و یکم نوامبر ۲۰۰۳.



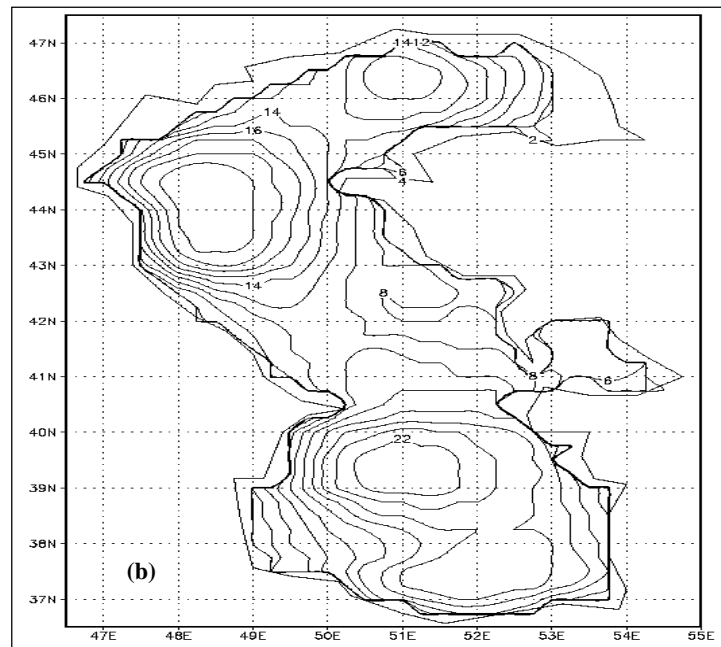
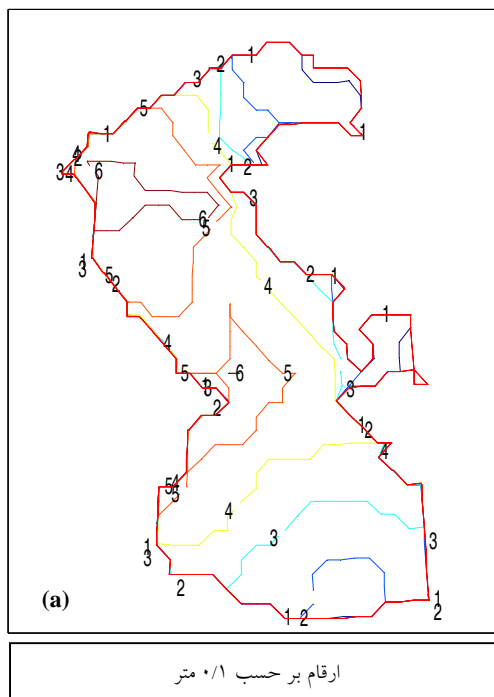
شکل ۶. (a) میدان باد ساعت ۰۰۰۰-UTC روز چهارم سپتامبر ۲۰۰۲ (ms^{-1}) و (b) نقشه‌برداری میدان باد دریای خزر در ساعت ۱۲۰۰ روز بیست و یکم نوامبر ۲۰۰۳.



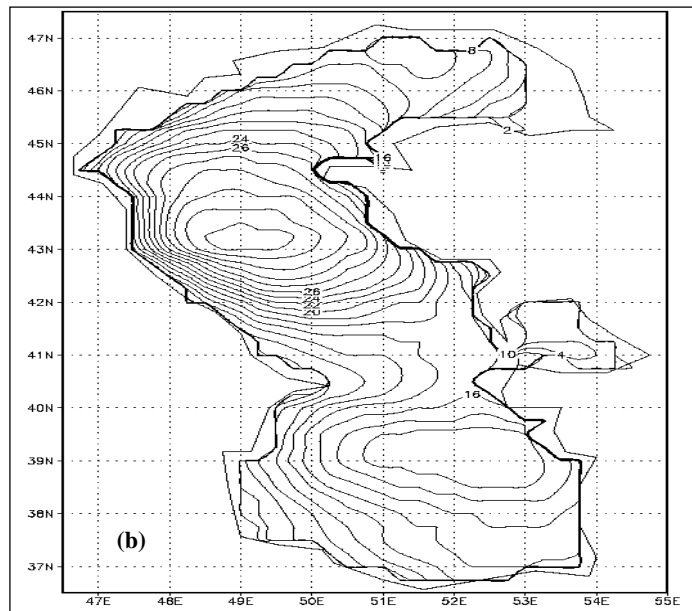
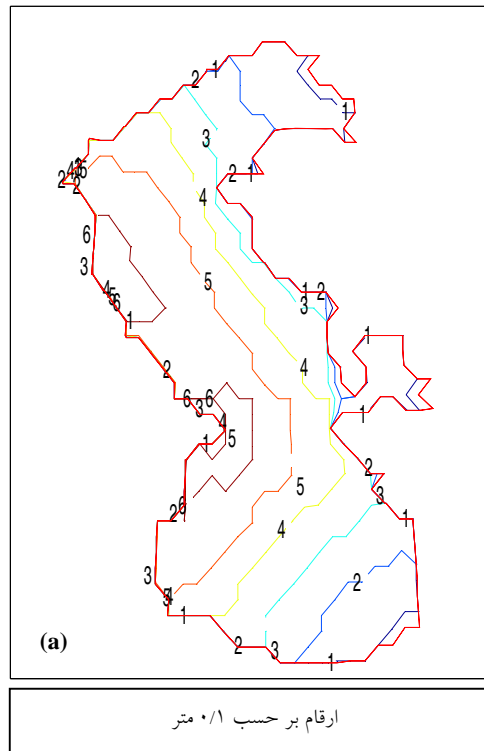
شکل ۷. (a) میدان باد ساعت ۰۰۰۰-UTC روز پنجم سپتامبر ۲۰۰۲ (ms^{-1}) و (b) نقشه برداری میدان باد دریای خزر در ساعت ۱۸۰۰ روز بیست و یکم نوامبر ۲۰۰۳.



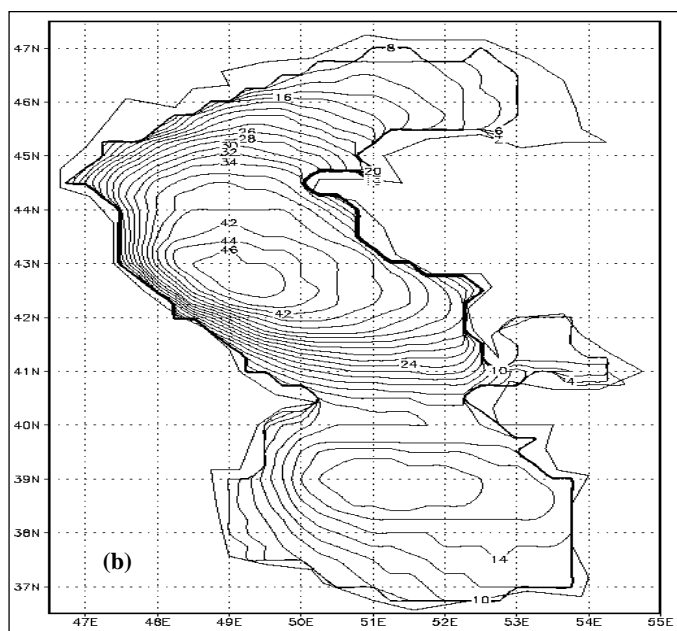
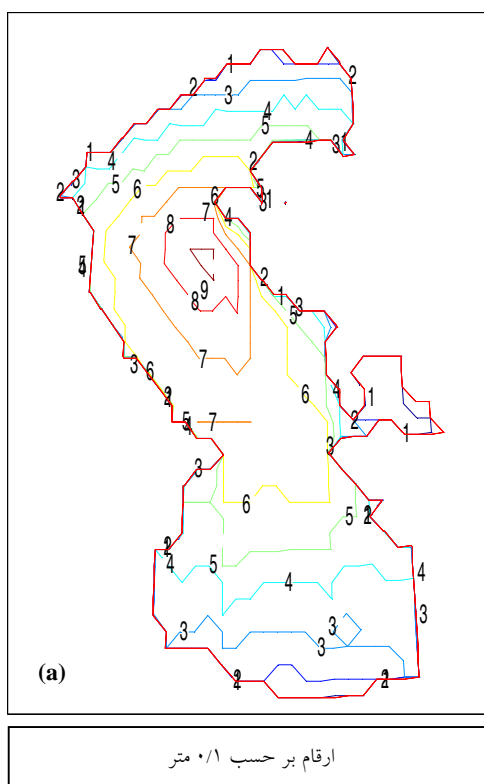
شکل ۸. (a) میدان باد ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز ششم سپتامبر ۲۰۰۲ (ms^{-1}) و (b) نقشه‌برداری میدان باد دریای خزر در ساعت ۰۰۰۰ روز بیست و دوم نوامبر ۲۰۰۳.



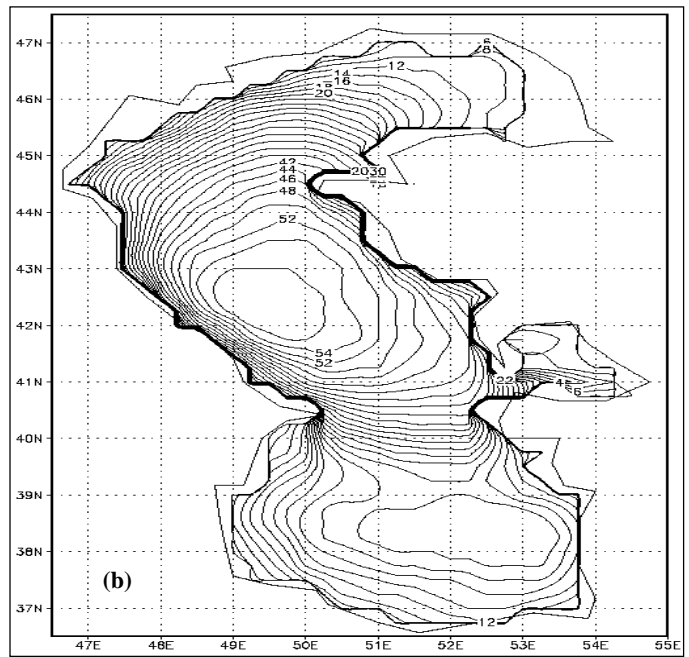
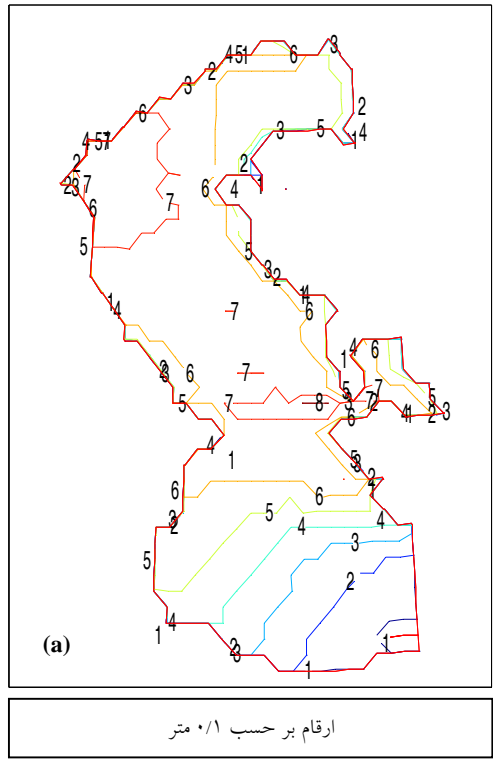
شکل ۹. (a) پربند (کتور) ارتفاع موج (ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز سوم سپتامبر ۲۰۰۲) و (b) نقشه پربندی میدان موج دریای خزر در ساعت ۰۶۰۰ روز بیست و یکم نوامبر ۲۰۰۳ (برحسب ۰/۱ متر).



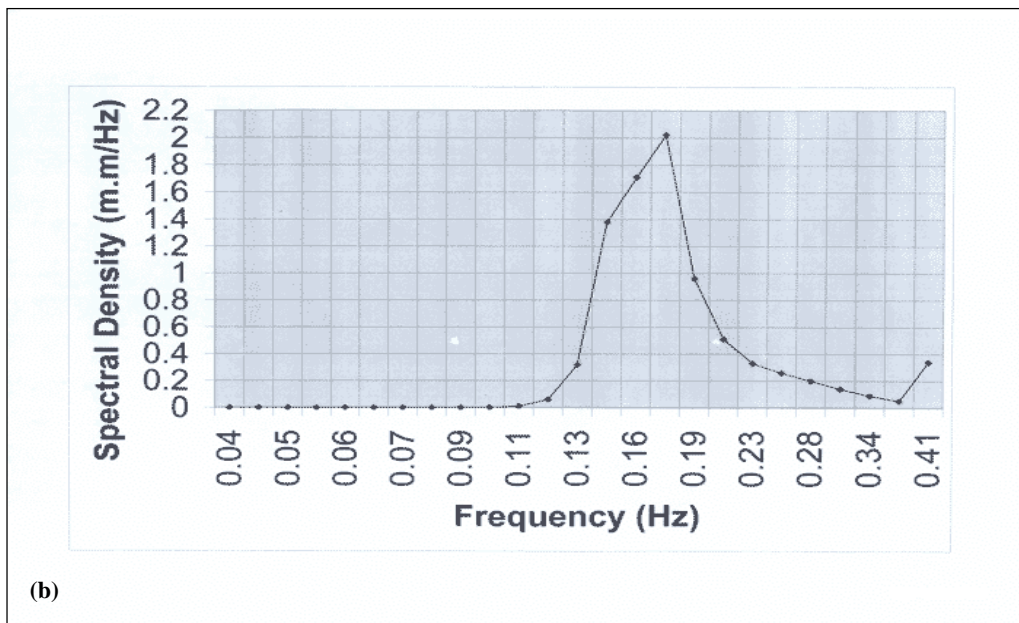
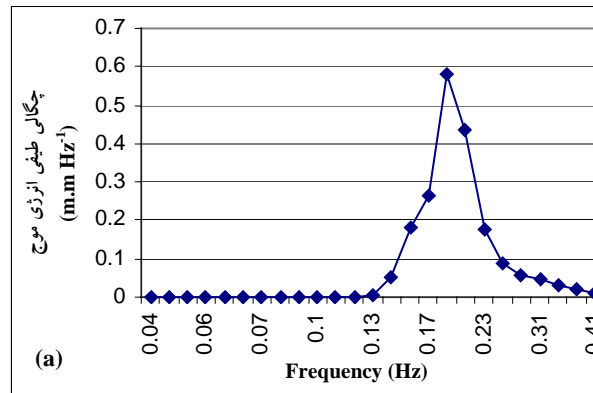
شکل ۱۰. (a) پربند (کتتور) ارتفاع موج (ساعت ۰۰۰۰-UTC روز چهارم سپتامبر ۲۰۰۲) و (b) نقشه پربندی میدان موج دریای خزر در ساعت ۱۲۰۰ روز بیست و یکم نوامبر ۲۰۰۳ (برحسب ۰/۱ متر).



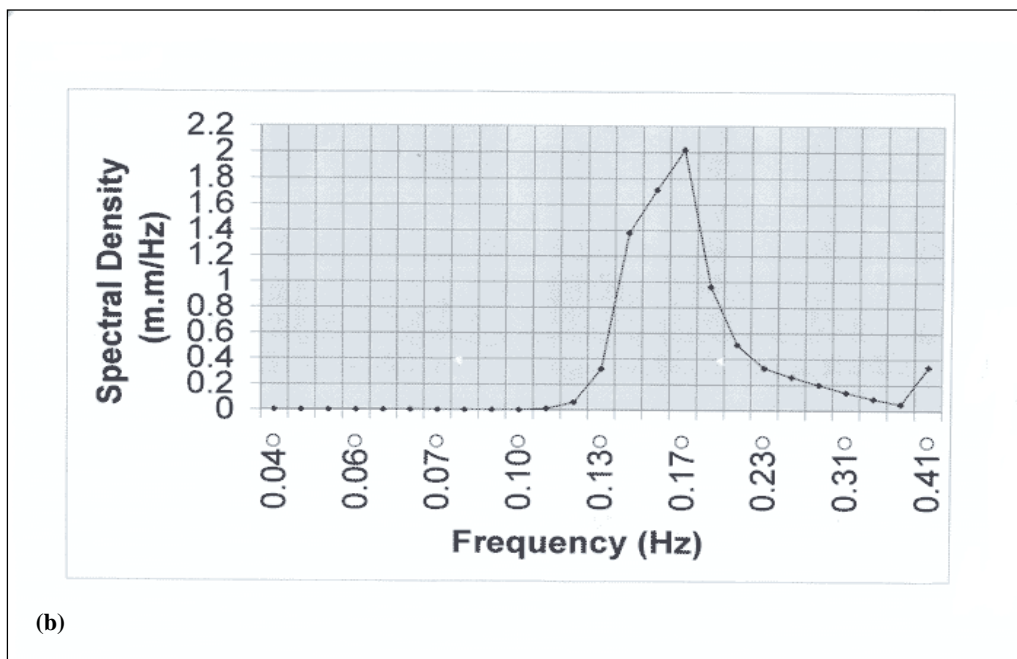
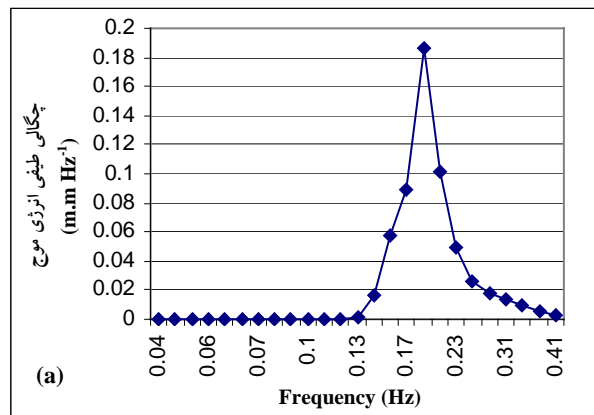
شکل ۱۱. (a) پرنده (کتور) ارتفاع موج (ساعت ۰۰۰۰-UTC روز پنجم سپتامبر ۲۰۰۲) و (b) نقشه پرنده میدان موج دریای خزر در ساعت ۱۸۰۰ روز بیست و یکم نوامبر ۲۰۰۳ (برحسب ۰/۱ متر).



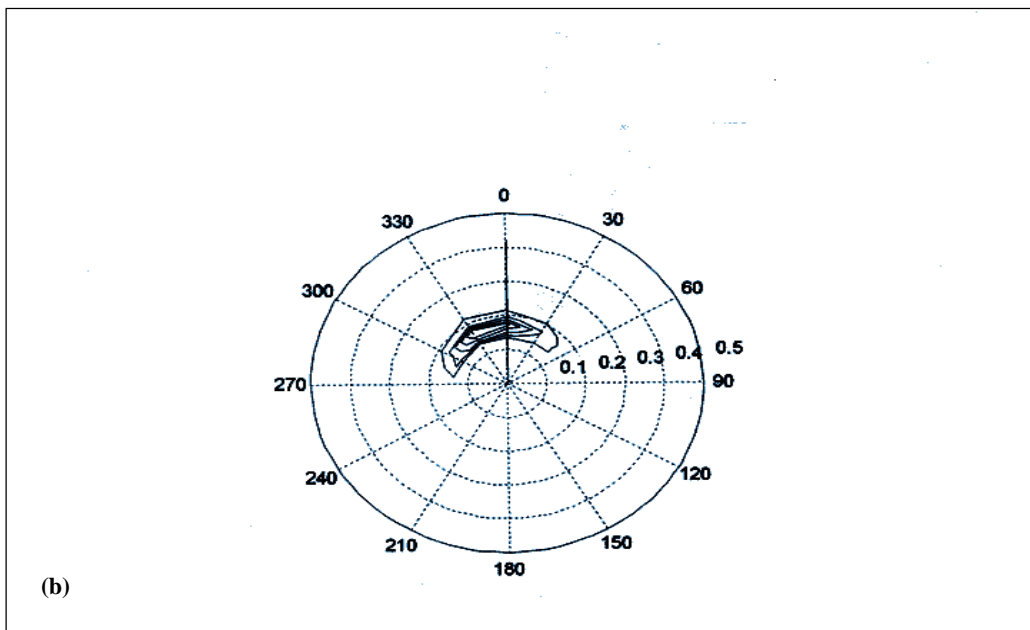
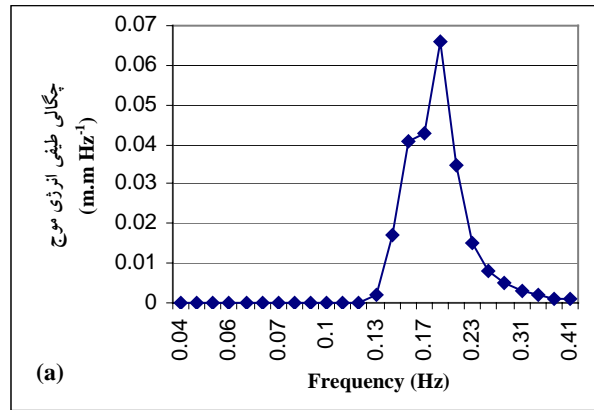
شکل ۱۲. (a) پریند (کتور) ارتفاع موج (ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز ششم سپتامبر ۲۰۰۲) و (b) نقشه پربندی میدان موج دریای خزر در ساعت ۰۰۰۰ روز بیست و دوم نوامبر ۲۰۰۳ (بر حسب ۰/۱ متر).



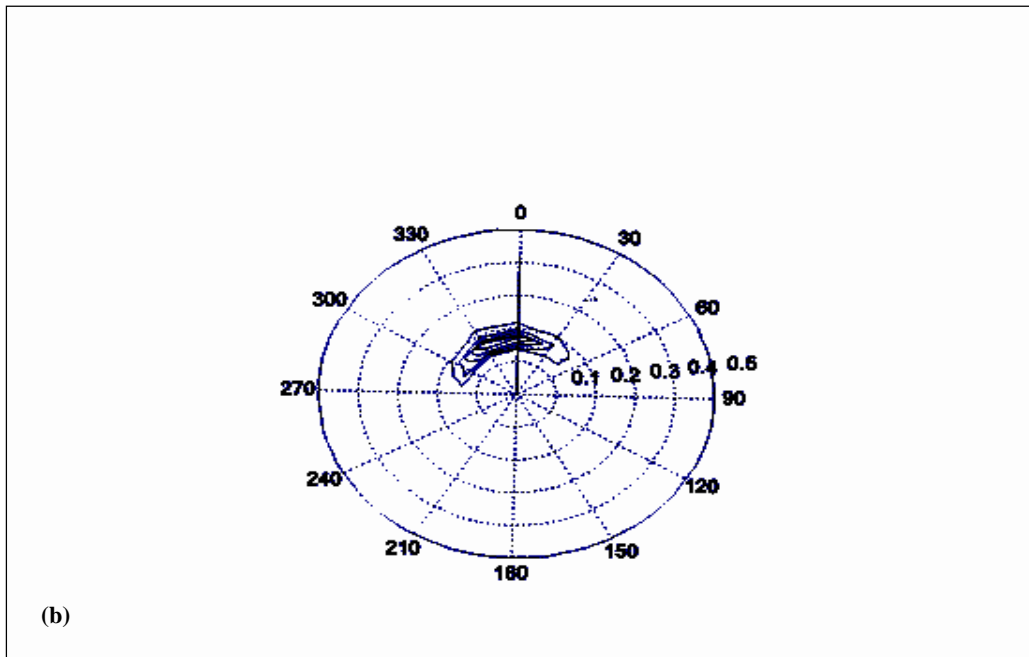
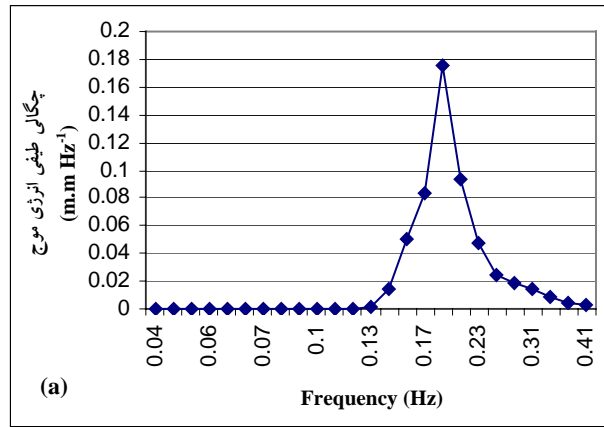
شکل ۱۳. (a) طیف بسامدی موج بندر انزلی ($m.m Hz^{-1}$) ساعت ۰۰۰۰ UTC-روز سوم سپتامبر ۲۰۰۲ و (b) نمودار طیف بسامدی موج (طیف یک‌بعدی) بندر انزلی ساعت ۰۶۰۰ روز بیست و یکم نوامبر ۲۰۰۳.



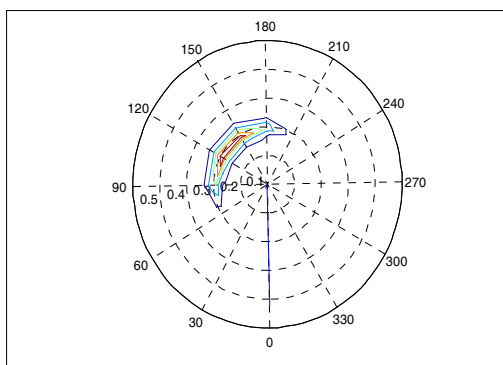
شکل ۱۴. (a) طیف بسامدی موج بندر انزلی ($m.m Hz^{-1}$) ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز چهارم سپتامبر ۲۰۰۲ و (b) نمودار طیف بسامدی موج (طیف یک‌بعدی) بندر انزلی ساعت ۰۰۰۰ روز بیست و دوم نوامبر ۲۰۰۳.



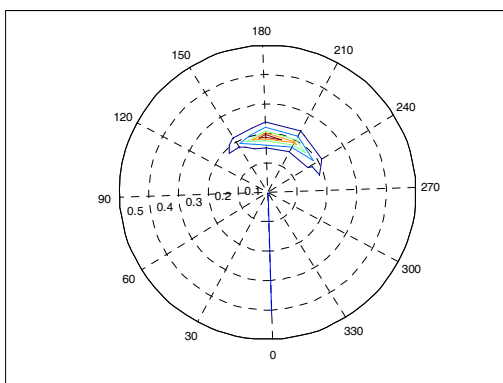
شکل ۱۵. (a) طیف بسامدی موج بندر انزلی ($m.m Hz^{-1}$) ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز پنجم سپتامبر ۲۰۰۲ و (b) نمودار طیف زاویه‌ای موج (طیف دوبعدی) بندر انزلی ساعت ۰۶:۰۰ روز بیست و یکم نوامبر ۲۰۰۳.



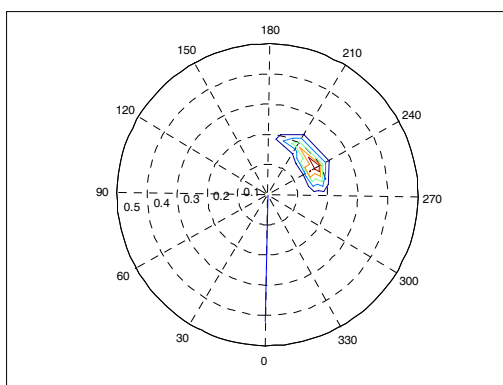
شکل ۱۶. (a) طیف بسامدی موج بندر انزلی ($m.m Hz^{-1}$) ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز ششم سپتامبر ۲۰۰۲ و (b) نمودار طیف زاویه‌ای موج (طیف دوبعدی) بندر انزلی ساعت ۰۰۰۰ روز بیست و دوم نوامبر ۲۰۰۳.



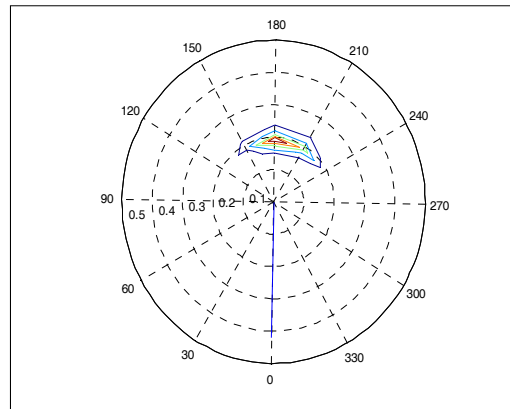
شکل ۱۷. طیف زاویه‌ای موج بندر انزلی (m.m Hz^{-1}) ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز سوم سپتامبر ۲۰۰۲.



شکل ۱۸. طیف زاویه‌ای موج بندر انزلی (m.m Hz^{-1}) ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز چهارم سپتامبر ۲۰۰۲.



شکل ۱۹. طیف زاویه‌ای موج بندر انزلی (m.m Hz^{-1}) ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز پنجم سپتامبر ۲۰۰۲.



شکل ۲۰. طیف زاویه‌ای موج بندر انزلی ($m.mHz^{-1}$) ساعت ۰۰۰۰ UTC- روز ششم سپتامبر ۲۰۰۲.

جدول ۱. مقایسه پیش‌بینی ارتفاع موج برون‌داد مدل WAM با داده‌های بویه بندر انزلی.

ارتفاع موج عمده (ثابت بویه انزلی)	ارتفاع موج عمده (برون‌داد مدل WAM)	ساعت (UTC)	تاریخ
۰/۳۷	۰/۳	۰۰۰۰	۲۰۰۲/۹/۳
۰/۴۰	۰/۳	۰۶۰۰	۲۰۰۲/۹/۳
۰/۳۵	۰/۳	۱۲۰۰	۲۰۰۲/۹/۳
۰/۳۲	۰/۳	۱۸۰۰	۲۰۰۲/۹/۳
۰/۳۲	۰/۵	۰۰۰۰	۲۰۰۲/۹/۴
۰/۴۳	۰/۵	۰۶۰۰	۲۰۰۲/۹/۴

۲. با اجرای مدل در شرایط جوی توفانی، تغییر قابل انتظار در ارتفاع موج و گرادیان میدان موج نسبت به شرایط جوی آرام حاصل شد که بیانگر حساسیت مدل به داده‌های ورودی باد است. این ویژگی اختصاص به مدل‌هایی دارد که با نیروی باد واداشته می‌شوند. این امر بر کارآمدی مدل در پیش‌بینی کوتاه‌مدت موج در دریای خزر دلالت دارد.

۳. توافق بسیار خوبی در مورد میدان امواج (نمودار کاستر)، میدان باد و جهت انتشار موج (طیف دوبعدی موج) وجود دارد که با تحقیق کاوالری و برتوتی (۲۰۰۱) روی حوزه‌های بسته هم‌خوانی دارد و دلیلی است بر توانایی مدل در پیش‌بینی کوتاه‌مدت روی حوزه‌های بسته به خصوص دریای خزر.

۴. در اغلب موارد، طیف بسامدی موج بندر انزلی به صورت دوقله‌ای است و حداکثر انتشار انرژی با امواجی با بسامد ۰/۱۹ هرتز صورت می‌گیرد که با نتایج مطالعات استریکالوف و ماسل (۱۹۷۱) در مورد طیف دریای خزر هم‌خوانی دارد و بیانگر توانایی مدل در پیش‌بینی کوتاه‌مدت انرژی موج و ارائه الگوی نسبتاً درستی از طیف بسامدی موج دریای خزر جنوبی است.

۵. با وجود چولگی به سمت راست اغلب نمودارهای

۴. با اجرای مدل در شرایط جوی توفانی، تغییر قابل انتظار در ارتفاع موج و گرادیان میدان موج نسبت به شرایط جوی آرام حاصل شد که بیانگر حساسیت مدل به داده‌های ورودی باد است. این ویژگی اختصاص به مدل‌هایی دارد که با نیروی باد واداشته می‌شوند. این امر بر کارآمدی مدل در پیش‌بینی کوتاه‌مدت موج در دریای خزر دلالت دارد.

۳. توافق بسیار خوبی در مورد میدان امواج (نمودار کاستر)، میدان باد و جهت انتشار موج (طیف دوبعدی موج) وجود دارد که با تحقیق کاوالری و برتوتی (۲۰۰۱) روی حوزه‌های بسته هم‌خوانی دارد و دلیلی

منابع

اسماعیلی، م.، ۱۳۷۲، پس‌بینی موج در دریای عمان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک دریا، واحد شمال دانشگاه آزاد اسلامی.

نیک‌پسند، د.، ۱۳۷۲، پس‌بینی موج در خلیج فارس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک دریا، واحد شمال دانشگاه آزاد اسلامی.

Cavaleri, L., and Bertotti, L., 2001, The characteristics of wind and wave fields modelled with different resolutions: Q. J. Roy. Meteor. Soc. 129.

Hasselmann, K., 1974, On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping. Bound Lay Meteorol., 6, 107-127.

Hasselmann, S., and Hasselmann, K., 1985, Computation and parametrization of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part I: A new method for efficient computation of the exact nonlinear transfer integral: Phys. Oceanogr., 15, 1369-1377.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J. H. and Barnett, T. P., 1985, Computation and parametrization of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: Parametrization of the nonlinear energy transfer for application in wave models: Phys. Oceanogr., 15, 1378-1391.

Heimbach, E., Bauer, S., Hasselmann, K., and Hasselmann, S., 1998, Global operational remote sensing and modeling of ocean waves., Marine Meteorology and Related Oceanography Activities: Report No. 42.

Janssen, P. A. E. M., 1991, Quasi-linear theory of wind generation applied to wave forecasting: Phys. Oceanogr. 21.

Komen, G., Cavaleri, L., Donelan, L., Hasselmann, K., Hasselmann, S., and Janssen, P., 1994, Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press: 233-238.

Massel, S. R., 1996, Ocean surface waves: Their physics & prediction. World Scientific.

Snyder, R. L., Dobson, F. W., Elliott, J. A., and Long, R. B., 1981. Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves: Fluid Mech. 102, 1-59.

Snyder, R. L., Thacker, W. C., Hasselmann, K., and Barzel, G., 1993, Implementation of an efficient scheme for calculating nonlinear transfer from wave-wave interactions. Geophys. Res., 98, 14507-14525.

طیف بسامدی موج که بیانگر مشارکت تعداد بیشتر امواج با بسامد بالاتر از بسامد اوج در انتشار انرژی طیفی موج است، حداکثر میزان انتشار انرژی طیفی موج به صورت انتگرالی اختصاص به امواجی با بسامد کمتر از بسامد اوج دارد.

۸ پیشنهادها

بررسی دقیق‌تر توانایی این مدل در آب‌های بسته از جمله دریای خزر، نیازمند چگالی زیاد اندازه‌گیری‌های دقیق است. بنابراین نصب چند دستگاه بویه از سازندگان معتبر برای کارهای تحقیقاتی که منجر به استفاده در کارهای عملی از جمله کشتیرانی، صنعت نفت دور از ساحل، گردشگری، و مانند آن می‌شود، بسیار ضروری است.

پیش‌بینی دقیق میدان موج به شدت وابسته به دقت میدان باد ورودی است و این موضوع به‌ویژه برای حوزه‌های بسته دارای اهمیت بیشتری نسبت به حوزه‌های بزرگ اقیانوسی است. بنابراین در گام بعدی لازم است که روی میدان باد با تفکیک زمانی- مکانی هر چه بیشتر تمرکز شود (کاوالری و برتوتی، ۲۰۰۱) و پیش‌بینی موج با مدل WAM در یک چرخه‌ خوراند داده‌ها قرار گیرد (هایم‌باخ و همکاران، ۱۹۹۸). این امر در WAM Cycle 5 و با استفاده از داده‌های مناسب موج اندازه‌گیری شده میسر خواهد بود. به‌علاوه اجرای مدل موج Cycle 5 WAM نیز می‌تواند در جهت دستیابی به مدل موج معتبر، به‌منظور پیش‌بینی مشخصه‌های امواج مؤثر واقع شود.

تشکر و قدردانی

نگارندگان از مسئولین محترم سازمان هواشناسی کشور و سازمان بنادر و کشتیرانی، به‌ویژه آقایان علی عابدینی و دکتر مجید آزادی که در تهیه داده‌های مورد نیاز این تحقیق همکاری کرده‌اند تشکر و قدردانی می‌کنند.

Stekalov, S. S., and Massel, S. R., 1971, On the spectral analysis of wind waves. Arch. Hydrot., **18**, 457-485.

Sverdrup, H. U., and Munk, W. H., 1947, Wind sea and swell; Theory of relations for forecasting. U. S. Navy Hydrographic Office: H. O., Publ. No. 601.

WAMDI Group: Hasselmann, S., Hasselmann, K., Bauer, E., Janssen, P. A. M., Komen, G. J., Bertotti, L., Lionello, P., Guillaume, A., Cardone, V. C., and Ewing, J.A., 1988. The WAM Model-A third generation ocean wave prediction model: J. Phys. Oceanogr. 18.