

مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مختلف پیش‌بینی امواج ناشی از باد در خلیج فارس (منطقه بوشهر)

کامران لاری^{*}، عباسعلی علی‌اکبری‌بیدختی^{**} و مهدی شفیع‌فر^{***}

^{*} دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، صندوق پستی ۱۴۵۱۵-۷۵

^{**} مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۱۴۱۵۵-۶۴۶۶

^{***} دانشگاه تربیت مدرس، تهران، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۱۱

(دریافت مقاله: ۸۳/۳/۳، پذیرش مقاله: ۸۴/۳/۱۰)

چکیده

مطالعه پارامترهای میدانی همراه با دید و درک فیزیکی مسائل، در مسیر روشن کردن برخی از پدیده‌های فیزیک دریا بسیار مفید است. در این تحقیق پارامترهای مختلف میدانی ثبت شده توسط بویه موج‌نگار سازمان هواشناسی کشور در خلیج فارس، سواحل بوشهر (۲۸°، ۵۷' شمالی و ۵۰°، ۵۰' شرقی) از جمله مشخصه‌های امواج، باد، دمای هوا و سطح آب در طی سال‌های ۱۹۹۵، ۱۹۹۶ و ۱۹۹۹ که در حدود ۳۹۰۰ رویداد است مورد مطالعه قرار گرفته است. فراوانی وقوع سه حالت کلی محدود شدن طول موجگاه، محدود شدن مدت زمان وزش باد و موج کاملاً رشد یافته و همچنین فراوانی وقوع شرایط پایدار، ناپایدار و خنثی لایه سطحی جو در طی سال ۱۹۹۵ محاسبه شد که نشان داد بیشتر شرایط محدود شدن مدت زمان وزش باد و همچنین ناپایداری لایه سطحی جو بر این منطقه حاکم است. روابط به‌دست آمده بین انرژی ϵ و بسامد ν بدون بعد برحسب طول موجگاه بدون بعد X در منطقه بوشهر همخوانی خوبی با نتیجه سایر محققان دارد. همین‌طور با در نظر گرفتن پایداری لایه سطحی جو (عدد ریچاردسون توده‌ای R_b) نشان داده شد که برای $0.005 < R_b < 1$ ، $\epsilon = 0.091 R_b^{0.88}$ و $\nu = 0.056 R_b^{-0.3}$ است. این‌گونه روابط را می‌توان در مدل‌های پیش‌بینی موج اعمال کرد و دقت مدل‌ها را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: امواج ناشی از باد، خلیج فارس، پایداری جو، طول موجگاه

۱ مقدمه

روش را ساده‌سازی و خلاصه کرد. در یک طول موجگاه (fetch) بزرگ، منحنی‌های پیش‌بینی SMB به حدی معین می‌رسند. این حد معرف آن است که موج کاملاً رشد یافته است و دیگر رشدی نخواهد داشت. پیرسون و موسکوویچ (۱۹۶۴) با بررسی اطلاعات ثبت شده از اقیانوس اطلس شمالی این حدود را به‌دست آوردند.

هاسلمن و همکاران (۱۹۷۳) نیز با استفاده از داده‌های پروژه مشترک دریای اروپا (Joint North Sea Wave-Project) که تلاشی بین‌المللی برای تحقیق در زمینه موج بود، و با استفاده از سایر داده‌های میدانی و آزمایشگاهی، روابطی را برای مشخصات امواج پیشنهاد کردند.

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه امواج ناشی از باد صورت گرفته است. اولین کوشش قابل ملاحظه برای پیش‌بینی امواج در طی جنگ دوم جهانی از سوی سوردراپ و مانک صورت گرفت که در ۱۹۴۷ منتشر شد. لذا می‌توان آنها را از پیشگامان اولیه مسئله پیش‌بینی امواج دانست. روش پیش‌بینی امواج سوردراپ و مانک عصر جدیدی را در علم اقیانوس‌شناسی گشود. در طی سال‌های ۱۹۵۲ و ۱۹۵۸ بریتش‌نایدر روش آنها را تصحیح و نتایج به دست آمده از این روش را بهبود داد. لذا روش پیش‌بینی حاصل از روش SMB می‌نامند. چندی بعد در ۱۹۷۷ مرکز تحقیقات مهندسی سواحل ارتش امریکا (U.S. Army Coastal Engineering Research Center) این

$$X = \frac{gx}{U_a^2} \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{gt}{U_a} \quad (4)$$

با توجه به پارامترهای بدون بعد معرفی شده می‌توان X, v, ε را در شرایط محدود شدن طول موجگاه به صورت:

$$\varepsilon = F_1(X) \quad , \quad v = F_2(X) \quad (5)$$

و در شرایط محدود شدن مدت زمان وزش باد به صورت:

$$\varepsilon = F_3(\zeta) \quad , \quad v = F_4(\zeta) \quad (6)$$

نوشت. F_1 تا F_4 توابعی هستند که با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده تعیین می‌شوند. برای تعیین این توابع در شرایط محدود شدن طول موجگاه و شرایط دریای کاملاً رشد یافته تحقیقات گوناگونی از جمله سرک (۱۹۷۷)، پیرسون و موسکوویچ (۱۹۶۴)، هاسلمن و همکاران (۱۹۷۳)، کاما (۱۹۸۱)، دابسون (۱۹۸۹)، دونلن و همکاران (۱۹۸۵) و دونلن (۱۹۹۲) صورت گرفته است (جدول ۱). با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی و آزمایشگاهی و در نظر گرفتن حالت دریای کاملاً توسعه یافته (fully developed sea)، رابطه انرژی بدون بعد ε و بسامد بدون بعد v برحسب طول موجگاه بدون بعد X به صورت روابط v و ε یا متوسط‌گیری از فرمول‌های مختلف رشد (جدول ۱) ارائه شده است.

$$\varepsilon = (7.5 \pm 2) \times 10^{-7} X^{0.8} \quad (7)$$

$$v = (2 \pm 0.3) X^{-0.25} \quad (8)$$

برای مقادیر بزرگ طول موجگاه بدون بعد، انرژی و بسامد بدون بعد به سمت مقادیر ثابتی نظیر مقادیر پیرسون و موسکوویچ (۱۹۶۴) میل می‌کنند (جدول ۱). در شکل ۱ این معادلات به صورت گرافیکی نشان داده شده است. ناحیه سایه‌دار در شکل معرف دقت روابط پیش‌بینی است. با افزایش طول موجگاه بدون بعد، انرژی افزایش و بسامد کاهش می‌یابد.

تحقیقات دیگری از جمله کاما (۱۹۸۱) در خلیج بوتنیا (Gulf of Bothnia) بین فنلاند و سوئد، دونلن و همکاران (۱۹۸۵) و دونلن (۱۹۹۲) در دو حوضه بسته دریاچه اونتاریو (Lake Ontario)، سنت‌کلیر (Lake Saint Clair) کانادا و دابسون (۱۹۸۹) در اقیانوس اطلس شمالی صورت گرفته است. همچنین پایداری لایه سطحی جو پارامتری است که می‌تواند روی رشد امواج تأثیر بگذارد. کاما و کالکون (۱۹۹۲) و یانگ (۱۹۹۸) در دریاچه جورج استرالیا مطالعاتی در این زمینه انجام داده‌اند.

در این مقاله ضمن بررسی پارامترهای مربوط به داده‌های هواشناسی و موج خلیج فارس در منطقه بوشهر روابطی برای مشخصه‌های امواج محاسبه و با کار دیگر محققان مقایسه می‌شود. همچنین اثرات پایداری لایه سطحی جو بر مشخصه‌های امواج مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲ معرفی برخی از پارامترهای فیزیکی

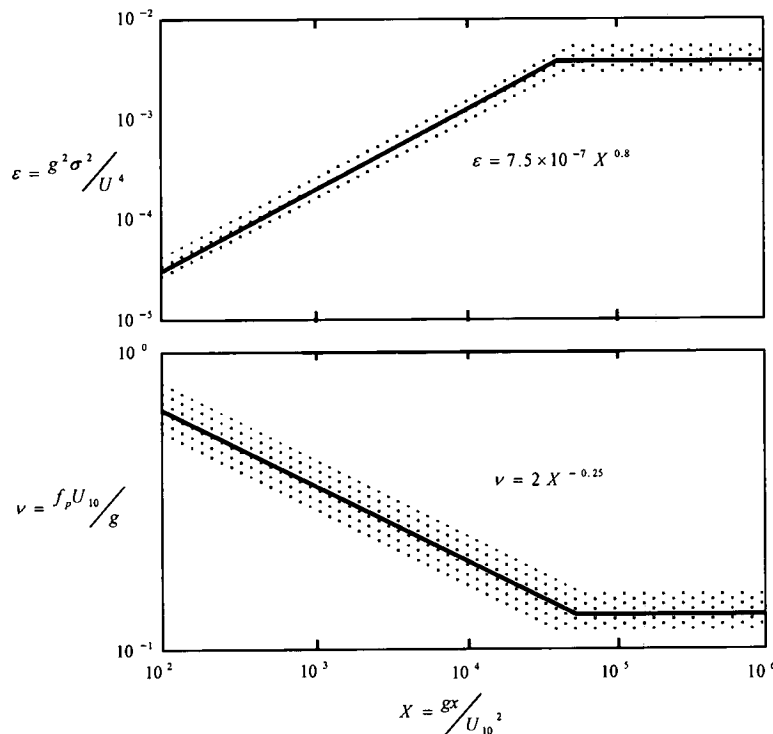
سوردراپ و مانک (۱۹۴۷) و کیتایگورودسکی (۱۹۶۲ و ۱۹۷۰) برای پدیده‌های محدود شدن طول موجگاه (limited fetch) و مدت زمان وزش باد (duration limited) متغیرهایی را که می‌توانند مؤثر باشند، پیشنهاد کردند. این متغیرها عبارت‌اند از: σ^2 واریانس نوسانات سطح آب، U_a سرعت باد در ارتفاع مرجع a ، X طول موجگاه، g شتاب گرانش زمین، t مدت زمانی که باد می‌وزد و f_p بسامد قله طیف موج. پارامترهای بدون بعد حاصل از این متغیرها عبارت‌اند از: انرژی بدون بعد ε ، بسامد بدون بعد v ، طول موجگاه بدون بعد X ، مدت زمان وزش باد بدون بعد ζ :

$$\varepsilon = \frac{\sigma^2 g^2}{U_a^4} \quad (1)$$

$$v = \frac{f_p U_a}{g} \quad (2)$$

جدول ۱. خلاصه نتایج محققین برای مشخصه‌های امواج در دو حالت طول موجگاه بدون بعد (X) کوچک و بزرگ (بانگ، ۱۹۹۹).

مطالعات	کوچک X	بزرگ X
SMB CERC (1977)	$\varepsilon = 7.82 \times 10^{-7} X^{0.84}$ $\nu = 1.722 X^{-0.25}$	$\varepsilon = 5 \times 10^{-3}$ $\nu = 0.133$
North Atlantic Pierson & Moskowitz (1964)	—	$\varepsilon = 3.64 \times 10^{-3}$ $\nu = 0.13$
North Sea-JONSWAP Hasselmann et al (1973)	$\varepsilon = 1.6 \times 10^{-7} X$ $\nu = 3.5 X^{-0.33}$	—
Bothnian Sea Kahma (1981)	$\varepsilon = 3.6 \times 10^{-7} X$ $\nu = 3.18 X^{-0.33}$	—
Lake Ontario Donelan et al (1985)	$\varepsilon = 8.415 \times 10^{-7} X^{0.76}$ $\nu = 1.85 X^{-0.23}$	—
North Atlantic Dobson et al (1989)	$\varepsilon = 12.7 \times 10^{-7} X^{0.75}$ $\nu = 1.7 X^{-0.24}$	—
Lake St. Clair Donelan et al (1992)	$\varepsilon \approx 1.7 \times 10^{-7} X$ $\nu \approx 3.6 X^{-0.33}$	$\varepsilon = 4.07 \times 10^{-3}$ $\nu = 0.132$



شکل ۱. نمایش رابطه بین انرژی و بسامد بدون بعد برحسب طول موجگاه بدون بعد با استفاده از میانگین کلیه نتایج محققین (بانگ، ۱۹۹۹).

۱۹۹۵ مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ نمودار فراوانی ارتفاع موج مشخصه در منطقه بوشهر را در فصول مختلف سال ۱۹۹۵ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود بیشترین میانگین ارتفاع موج مشخصه مربوط به فصول زمستان و پاییز است. میانگین ارتفاع امواج در طول سال در حدود نیم متر است.

نمودار فراوانی تناوب موج مشخصه در منطقه بوشهر در فصول مختلف سال نشان می‌دهد که میانگین تناوب امواج در حدود سه ثانیه است و در اکثر اوقات امواج دارای تناوب کوتاه کم‌تر از شش ثانیه بوده‌اند (شکل ۳).

همچنین گلبادهای فصلی منطقه بوشهر نشان می‌دهد که به‌طور کلی در طول سال یک باد شمال غربی روی منطقه حاکم است و حدود ۲۰ درصد از سال شرایط آرام است (شکل ۴). بیشترین میانگین اختلاف دمای هوا و سطح آب در منطقه بوشهر مربوط به فصل پاییز منهای ۳/۶ و کم‌ترین مربوط به فصل تابستان مثبت ۰/۴ است. این اختلاف دما در فصل بهار و تابستان مثبت و در فصل پاییز و زمستان منفی است. اختلاف دما حتی می‌تواند به حدود ۱۳ درجه سلسیوس برسد (شکل ۵).

با اطلاعات به‌دست آمده از داده‌های ثبت شده منطقه و محاسبه عدد بدون بعد ریچاردسون توده‌ای مشخص شد که در اکثر موارد شرایط ناپایدار بر لایه سطحی جو در خلیج فارس (منطقه بوشهر) حاکم است (جدول ۲).

۴ تحلیل داده‌ها و نتایج

موجگاه را می‌توان منطقه‌ای دانست که سمت و سرعت باد در آن به شکل قابل قبولی ثابت است. در مورد آب‌های داخل خشکی (خلیج‌ها و دریاچه‌ها) موجگاه‌ها با خشکی‌های اطراف آب‌ها محدود

تحقیقات کاما و کالکون (۱۹۹۲) و یانگ (۱۹۹۸) نشان داد که امواج در شرایط ناپایدار (هنگامی که آب گرم‌تر از هوا است) سریع‌تر رشد می‌کنند. یانگ به کمک عدد ریچاردسون توده‌ای در حالت $R_b < 0$ شرایط ناپایدار را تشریح کرد.

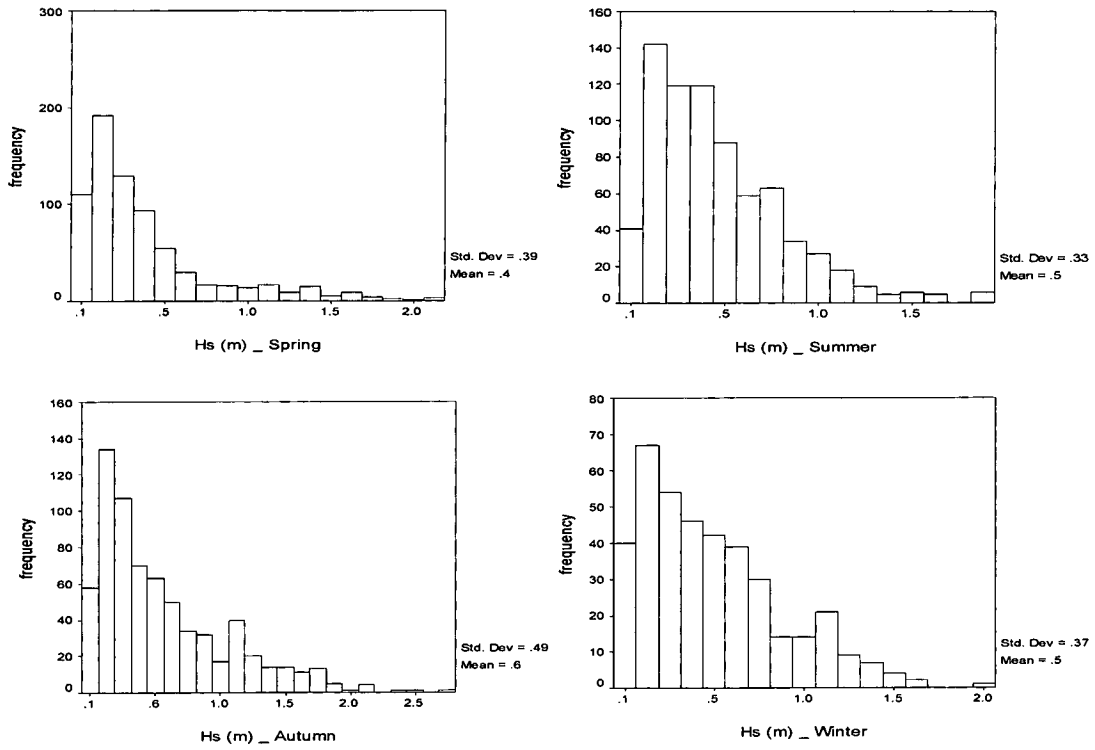
$$R_b = \frac{g(T_a - T_w)}{Z_t T_a \left(\frac{u}{Z}\right)^2} \quad (9)$$

T_w و T_a دمای سطح هوا و آب برحسب درجه کلونین u : سرعت باد، Z_t : ارتفاعی که دما هوا اندازه‌گیری می‌شود و Z : ارتفاعی که سرعت باد اندازه‌گیری می‌شود. وقتی که آب گرم‌تر از هوا باشد شار گرمایی به سمت بالا است و گرادیان چگالی جو به این صورت است که هوای با چگالی بیشتر روی هوا با چگالی کم‌تر قرار می‌گیرد و شرایط ناپایدار است.

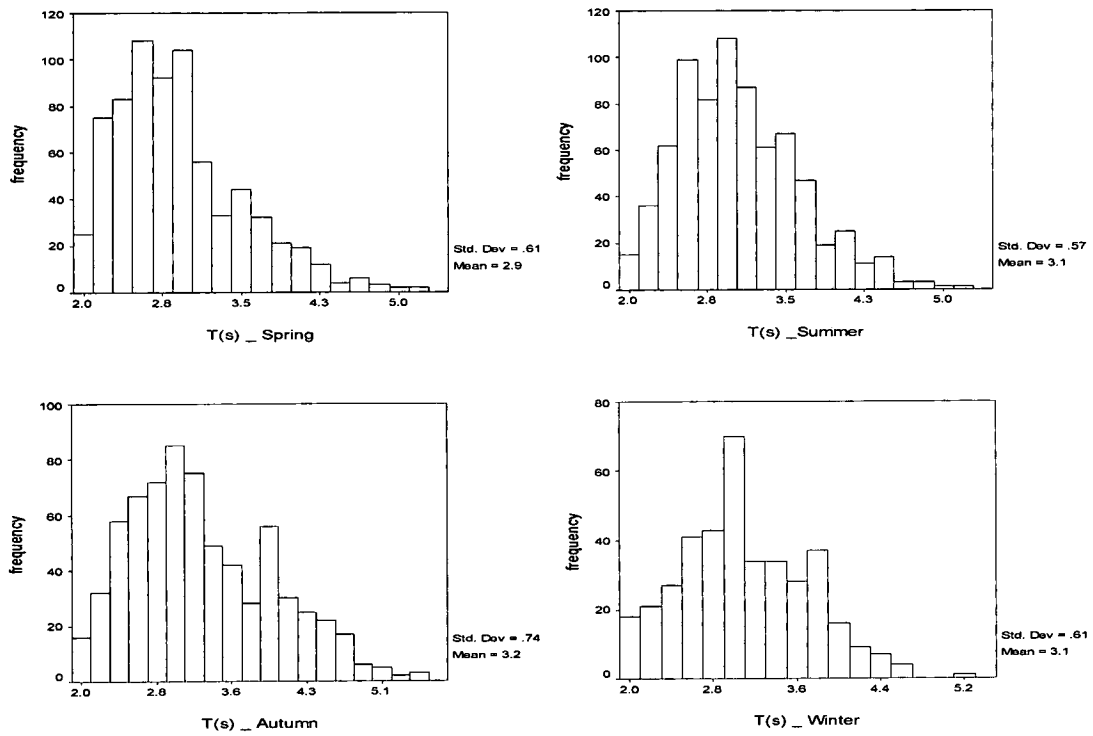
برای مقادیر $0 < R_b < 1$ شرایط هنوز می‌تواند از نظر دینامیکی ناپایدار باشد ولی شدت تلاطم ایجاد شده با ناپایداری، شدیداً وابسته به مقدار R_b است، به‌طوری‌که با افزایش R_b مقدار آن کاهش می‌یابد. بنابراین در حالت کلی R_b مثبت، معرف شرایطی است که در آن، بیشتر اثر پایداری حاکم است.

۳ بررسی داده‌های هواشناسی و موج منطقه بوشهر

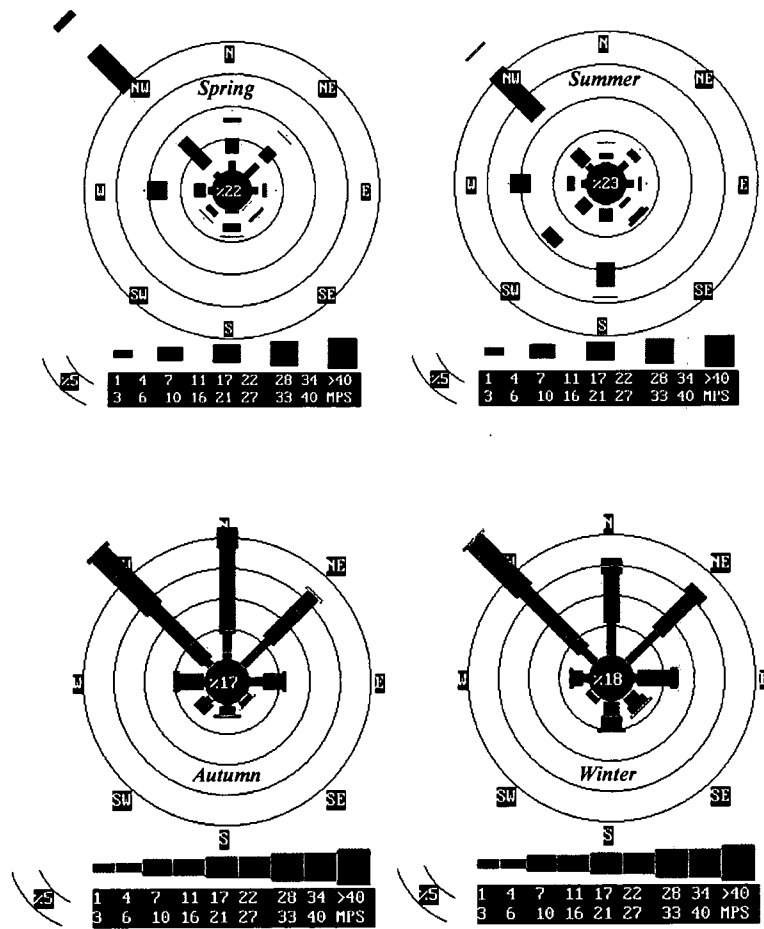
پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط بویه موج‌نگار و ایستگاه ساحلی سازمان هواشناسی، شامل ارتفاع و تناوب موج مشخصه، سرعت و جهت باد، دمای هوا و دمای سطح آب هستند که به کمک این پارامترها می‌توان مشخصات امواج را به‌دست آورد. اطلاعات ثبت شده در سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۹ محدود به چند ماه و در ۱۹۹۵ تقریباً کامل است. برای بررسی آماری بهتر پارامترهای اندازه‌گیری شده طی یک سال، نمودارهای فراوانی هر یک از این پارامترها در فصول مختلف سال



شکل ۲. نمودار فراوانی فصلی ارتفاع موج مشخصه برحسب متر در خلیج فارس (بوشهر ۱۹۹۵).



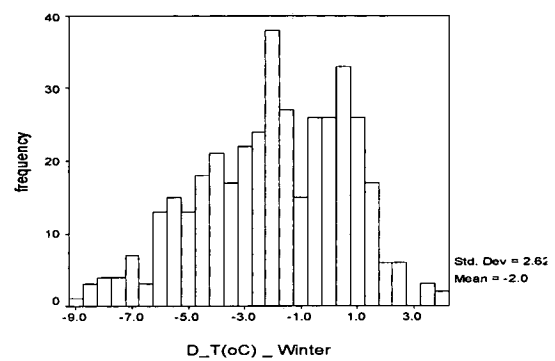
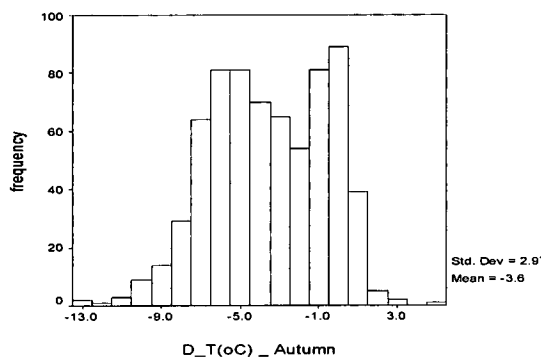
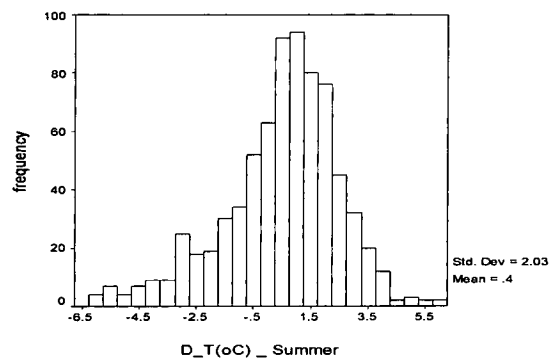
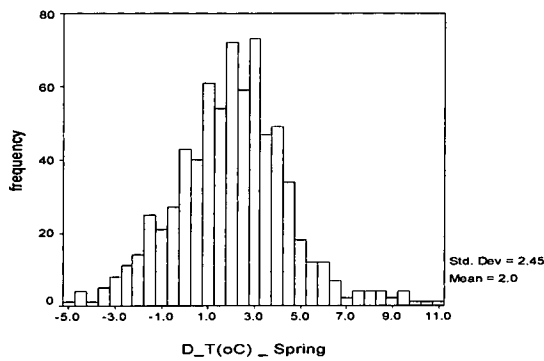
شکل ۳. نمودار فراوانی فصلی تناوب موج مشخصه برحسب ثانیه در خلیج فارس (بوشهر ۱۹۹۵).



شکل ۴. گلباد فصلی خلیج فارس (بوشهر ۱۹۹۵).

جدول ۲. درصد احتمال وقوع شرایط ناپایدار، شرایط خنثی و شرایط $R_b > 0$ بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در خلیج فارس (بوشهر ۱۹۹۵).

$R_b < 0$	شرایط خنثی $R_b = 0$	شرایط ناپایدار $R_b > 0$
45.2%	0.4%	54.4%



شکل ۵. نمودار فصلی فراوانی اختلاف دمای هوا و سطح آب در خلیج فارس (بوشهر ۱۹۹۵).

جدول ۳. طول موجگاه در ۱۲ جهت اصلی در ساحل بوشهر با مختصات (50°, 50' E & 28°, 57' N).

جهت (deg)	طول موجگاه (km)	جهت (deg)	طول موجگاه (km)
0	35.9	180	342.1
30	18.9	210	259
60	10.1	240	242.9
90	4.5	270	238.6
120	12	300	219.4
150	205.9	330	123.7

جدول ۴. درصد احتمال وقوع شرایط حاکم بر خلیج فارس (بوشهر ۱۹۹۵).

شرایط حاکم	محدود شدن طول موجگاه Fetch- limited	محدود شدن مدت زمان وزش باد Duration- limited	موج کاملاً رشد یافته Fully develop sea
درصد وقوع	3%	75%	22%

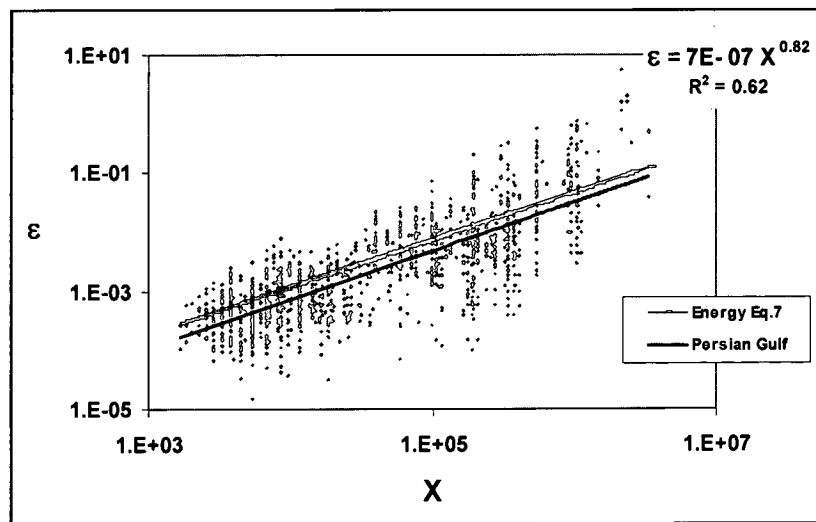
سرعت باد (U_a) در معادله (۱۰)، طول موجگاه معادل به دست می‌آید. اگر طول موجگاه منطقه در جهتی که باد وزیده است کم‌تر از طول موجگاه معادل باشد، شرایط محدود شدن طول موجگاه و اگر بیشتر از آن باشد شرایط محدود شدن مدت زمان وزش باد است. شرایط موج کاملاً رشد یافته شرایطی است که سرعت فاز امواج می‌تواند از سرعت باد بیشتر باشد به عبارت دیگر:

می‌شوند. طول موجگاه در منطقه بوشهر در دوازده جهت اصلی محاسبه و در جدول ۳ نشان داده شده است.

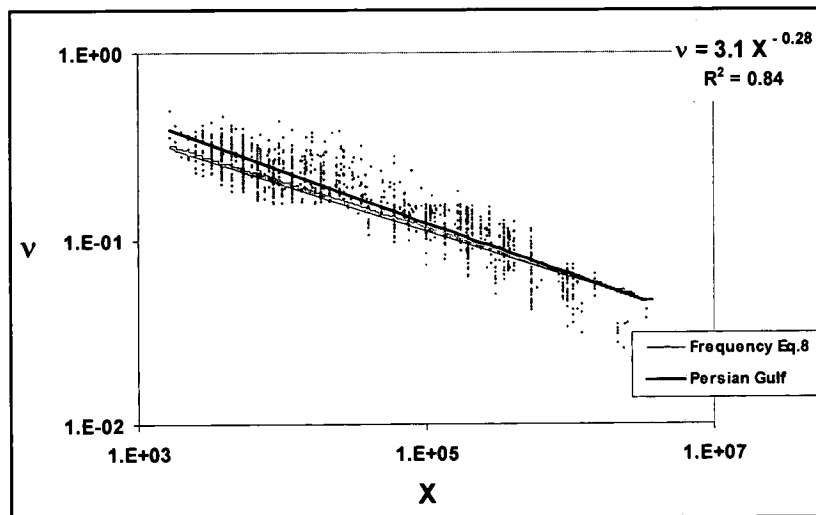
شرایط محدود شدن طول موجگاه و مدت زمان وزش باد با توجه به رابطه زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$\frac{gt}{U_a} = 68.8 \left(\frac{gX}{U_a^2} \right)^{0.67} \quad (10)$$

در یک رویداد با قرار دادن مدت زمان وزش باد (t) و



شکل ۶. نمودار انرژی بدون بعد (ϵ) برحسب طول موجگاه بدون بعد (X) در خلیج فارس (منطقه بوشهر).



شکل ۷. نمودار بسامد بدون بعد (ν) برحسب طول موجگاه بدون بعد (X) در خلیج فارس (منطقه بوشهر).

توده‌ای مثبت و لایه سطحی جو از نظر استاتیکی پایدار است، انرژی و بسامد بدون بعد همبستگی معنی‌داری با عدد ریچاردسون دارند. روابط (۱۴) و (۱۵) رابطه بین انرژی (ε) و بسامد (ν) بدون بعد را برحسب عدد ریچاردسون توده‌ای (R_b) در خلیج فارس (منطقه بوشهر) نشان می‌دهند.

$$\varepsilon = 0.091 R_b^{0.88} \quad (14)$$

$$\nu = 0.056 R_b^{-0.3} \quad (15)$$

روند تغییرات ε و ν برحسب R_b در حالتی که شرایط حاکم دارای اثر پایدار ($R_b < 0$) است در منطقه بوشهر در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. این روند مشابه تغییرات ε و ν بر حسب X است (شکل‌های ۶ و ۷).

افزایش ε و کاهش ν بر حسب R_b برای مقادیر $R_b > 0.005$ قابل ملاحظه است. در حالی که برای مقادیر $R_b < 0.005$ ، ε و ν با تغییرات R_b تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارند، این موضوع می‌تواند به این علت باشد که شرایط مشابه حالت خنثی است. تخمین مستقیم ε و ν با پارامتر R_b بدون استفاده از طول موجگاه بدون بعد برای اولین بار در مطالعاتی از این دست صورت گرفت. با این حال داده‌های بیشتری برای تبیین دقیق این ارتباط لازم است.

$$\frac{U_{10}}{C_p} < 1 \quad (11)$$

U_{10} : سرعت باد در ارتفاع مرجع ده متری
 C_p : سرعت فاز موج است.

با دسته‌بندی شرایط حاکم بر خلیج فارس (منطقه بوشهر) درصد احتمال وقوع شرایط مختلف، مطابق جدول ۴ در طی سال ۱۹۹۵ به دست آمد که نشان داد بیشترین حالتی که در خلیج فارس (منطقه بوشهر) حاکم است، شرایط محدود شدن مدت زمین وزش باد است.

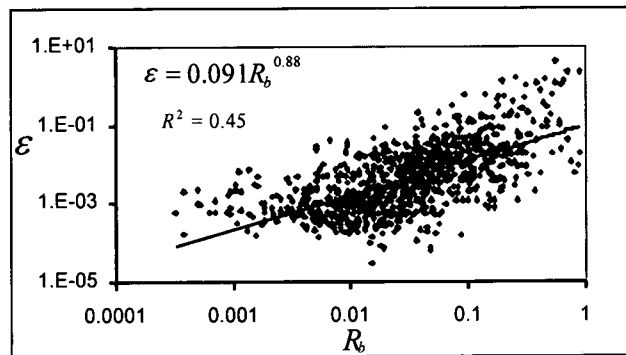
بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در خلیج فارس (منطقه بوشهر) در طی سال‌های ۱۹۹۵، ۱۹۹۶ و ۱۹۹۹ پارامترهای بدون بعد انرژی (ε)، بسامد (ν) و طول موجگاه (X) محاسبه شد. با برازش بهترین خط بر داده‌ها روابط انرژی و بسامد بدون بعد بر حسب پارامتر بدون بعد طول موجگاه محاسبه شد.

$$\varepsilon = 7 \times 10^{-7} X^{0.82} \quad (12)$$

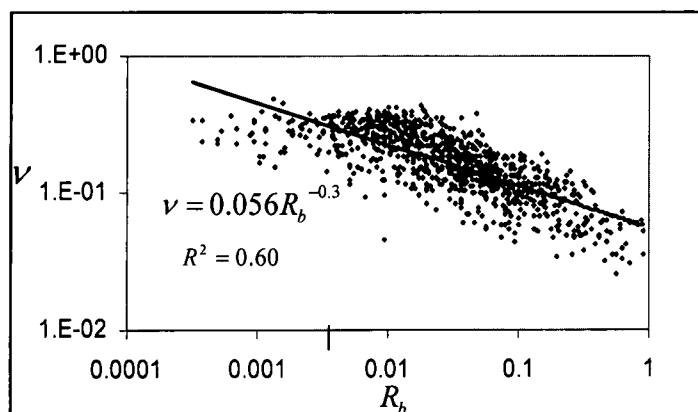
$$\nu = 3.1 X^{-0.28} \quad (13)$$

روابط (۱۲) و (۱۳) تطبیق بسیار خوبی با معادلات (۷) و (۸) که میانگین نتایج مطالعه سایر محققان (جدول ۱) است دارد. شکل‌های ۶ و ۷ این مطابقت را به خوبی نشان می‌دهد.

تحلیل اطلاعات پارامترهای اندازه‌گیری شده در منطقه بوشهر نشان می‌دهد، در حالتی که عدد ریچاردسون



شکل ۸ نمودار انرژی بدون بعد (ε) برحسب عدد ریچاردسون توده‌ای (R_b) در خلیج فارس (منطقه بوشهر).



شکل ۹. نمودار بسامد بدون بعد (v) برحسب عدد رینولدسون توده‌ای (R_b) در خلیج فارس (منطقه بوشهر).

۵ نتیجه‌گیری

۷۵ درصد و محدود شدن طول موجگاه ۳ درصد است. بالا بودن درصد محدود شدن مدت زمان وزش باد معرف آن است که تغییرات سمت و سرعت باد زیاد است و باد در بیشتر مواقع نمی‌تواند طول موجگاه منطقه را به‌طور کامل طی کند.

گلباد منطقه در طول سال یک باد غالب شمال غربی را روی خلیج فارس (منطقه بوشهر) نشان می‌دهد (شکل ۴) و با توجه به طول موجگاه منطقه بوشهر (جدول ۳) احتمال حضور امواج در سمت غربی منطقه بوشهر بیشتر از سمت شرقی آن است. با بررسی داده‌های اندازه‌گیری شده در حوزه خلیج فارس (منطقه بوشهر) روابط بین انرژی و بسامد بدون بعد و طول موجگاه بدون بعد محاسبه شد.

$$\varepsilon = 7 \times 10^{-7} X^{0.82}$$

$$v = 3.1 X^{-0.28}$$

این روابط تطبیق خوبی با نتیجه تحقیقات سایر پژوهشگران دارد و پایه‌های سنجش خوبی برای پیش‌بینی مشخصه‌های امواج در منطقه هستند. براساس این روابط هر چه طول موجگاه بیشتر باشد انرژی امواج بیشتر و تناوب امواج بلندتر است (شکل‌های ۶ و ۷).

پارامترهای اندازه‌گیری شده در خلیج فارس (منطقه بوشهر) در ۱۹۹۵ نشان می‌دهد که میانگین ارتفاع امواج حدود نیم متر است و در نیمه دوم سال که میزان ناپایداری لایه سطحی جو بیشتر است، میانگین ارتفاع امواج نیز نسبت به نیمه اول سال بالاتر است. در فصل پاییز که میانگین اختلاف دمای هوا و سطح آب به بیشترین مقدار خود در طول سال می‌رسد (منهای ۳/۶ درجه سلسیوس)، که این شرایط ناپایدار می‌تواند روی توزیع سرعت باد نزدیک سطح اثر بگذارد و بر شدت بادهای سطحی بیافزاید. میانگین ارتفاع امواج نیز در این فصل بیشترین مقدار را (۰/۶) دارد. این موضوع اهمیت بحث اثر ناپایداری را نشان می‌دهد (شکل‌های ۲ و ۵). ثبت اختلاف دمای تا حدود ۱۳ درجه سلسیوس در منطقه می‌تواند ضریب کشال (drag coefficient) و به تبع آن تنش باد روی دریا را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد. میانگین تناوب امواج ناشی از باد در خلیج فارس کوتاه و در حدود سه ثانیه است و در اکثر اوقات امواج دارای تناوب کوتاه کم‌تر از شش ثانیه بوده‌اند.

درصد وقوع شرایط حاکم بر منطقه برای موج کاملاً رشد یافته ۲۲ درصد، محدود شدن مدت زمان وزش باد

- Donelan, M. A., 1992, On the growth rate of wind-generated waves: *Atmos-Ocean*, **30**, 457-474.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell W., and Walden, H., 1973 Measurements of wind-wane growth and swell decay during the Joint North Sea Wave project (JONSAP): *Dtsch. Hydrog. Z. Suppl. A*, **8**, 12, 95.
- Kahma, K. K., 1981, A study of the growth of the wave spectrum with fetch: *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 1503-1515.
- Kahma, K. K., and Calkone, C. J., 1992, Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves: *J. Phys. Oceanogr.*, **22**, 1389-1405.
- Kantha, L. H., and Clayson. C. A., 2002, *Small Scale Processes in Geophysical Fluid Flows Academic Press, ISBN 0-12-4340-9*.
- Kitaigorodskii, S. A., 1962, Applications of the theory of similarity to the analysis of wind-generated wave motion as a stochastic process: *Bull. Acad. Sci. USSR, Geophys. Ser.*, 105-117.
- Kitaigorodskii, S. A., 1970, *The physics of air-sea interaction English edition, 1973, A. Baruch, translator, P. Greenberg, Ed., Israel program for Scientific Translations, 273*.
- Pierson, W. J., and Moskowitz, L., 1964, A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii: *J. Geophys. Res.*, **69**, 5181-5190.
- Sverdrup, H. V., and Munk, W. H., 1944, *Wind waves and swell: Principles in forecasting, Hydrographic Office, U. S. Navy, Misc. 11, 275*.
- Sverdrup, H. V., and Munk, W. H., 1947, *Wind, sea, and swell: Theory of relation for forecasting, Hydrographic Office, U. S. Navy, Publ. No. 601*.
- Young, I. R., 1998, Experimental investigation of role of atmospheric stability in wind wave growth *Costal Engineering*, **34**, 23-33.
- Young, I. R., 1999, *Wind generated ocean waves Elsevier, ISBN 0-08-043317-0*.

بحث ناپایداری را می‌توان با عدد بدون بعد ریچاردسون توده‌ای (R_b) مطرح کرد و به کمک آن تأثیر پایداری لایه سطحی جو روی مشخصه‌های امواج را بررسی کرد. با توجه به پارامترهای اندازه‌گیری شده در منطقه، روابط بین انرژی و بسامد بدون بعد برحسب عدد ریچاردسون توده‌ای (R_b) به دست آمد.

$$\varepsilon = 0.091 R_b^{0.88}$$

$$\nu = 0.056 R_b^{-0.3}$$

نکته دارای اهمیت آن است که روند تغییرات انرژی و بسامد بدون بعد برحسب طول موجگاه بدون بعد مشابه روند تغییرات آنها برحسب عدد ریچاردسون توده‌ای است (شکل‌های ۸ و ۹). افزایش ε با R_b مثبت احتمالاً مربوط به کاهش سرعت باد در لایه سطحی است. با توجه به این که ε با توان چهارم سرعت باد نسبت عکس دارد (معادله ۱)، این حالت برای ν که با سرعت باد نسبت مستقیم دارد، معکوس است (معادله ۲).

بنابراین نقش وضعیت پایداری در لایه سطحی جو، مشابه نقش طول موجگاه بدون بعد است و به کمک آن می‌توان مشخصه‌های امواج را برآورد کرد.

منابع

- Bretschneider, C. L., 1952, Revised wave forecasting relationships, *Proc. 2nd Conf. on Coastal Eng., ASCE, Council on Wave Research*.
- Bretschneider, C. L., 1958, Revisions in wave forecasting: deep and shallow water, *Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., ASCE, Council on Wave Research*.
- CERC, 1977, *Shore protection manual, U. S. Army Coastal Engineering Research center. 3 volumes*.
- Dobson, F., 1989, On the deep-water fetch laws for wind-generated surface gravity waves *Atmos-Ocean*, **27**, 210-236.
- Donelan, M. A., Hamilton, J., and Hui, W. H., 1985, Directional spectra of wind-generated waves *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, **A315**, 509-562.