



## تخمین توابع انتقال بویه موج نگار با استفاده از داده‌های میدانی

سید مصطفی نوربخش<sup>1</sup>، احمد رضا زمانی<sup>2</sup>، محمد علی بدری<sup>3\*</sup>

1- استادیار مخابرات، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان  
2- استادیار مهندسی مکانیک، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان  
3- استادیار مهندسی مکانیک، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان  
\* اصفهان، صندوق پستی 134، malbdr@cc.iut.ac.ir

### چکیده

اینرسی بویه‌های موج نگار موجب پیدایش تابع انتقال برای کمیت‌های موج‌نگاری در حرکت عمودی و شیب موج نسبت به محورهای مختصات افقی می‌شود که نتیجه آن اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر واقعی امواج دریا است. با محاسبه یا تخمین توابع انتقال بویه و اعمال معکوس آنها برداده‌های موج نگار، امکان دست‌یابی به داده‌های دقیق‌تر موج‌نگاری فراهم می‌شود. در این مقاله، یک روش برای تخمین توابع انتقال بویه موج‌نگار با استفاده از داده‌های میدانی که در حین داده‌برداری بویه در دریا حاصل می‌شود ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی آن ارائه شده است. این روش از خواص ذاتی امواج دریا استفاده می‌کند. همچنین تأثیر توابع انتقال در پارامترهای طیفی موج بررسی شده است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 21 اردیبهشت 1392  
پذیرش: 15 مرداد 1392  
ارائه در سایت: 30 شهریور 1393  
کلید واژگان:  
بویه موج نگار  
تابع انتقال  
طیف جهت‌دار موج

## Estimation of Transfer Functions for Wave Measurement Buoy using Field Data

Seyed Mostafa Noorbakhsh, Ahmad Reza Zamani, Mohammad Ali Badri\*

Research Institute for Subsea Science and Technology, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran  
\*P. O. Box 134, Isfahan, Iran, malbdr@cc.iut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 11 May 2013  
Accepted 6 August 2013  
Available Online 21 September 2014

**Keywords:**  
Wave Measurement Buoy  
Transfer Function  
Wave directional Spectrum

### ABSTRACT

The inertia of wave measurement buoys impresses transfer functions on the wave measurement data (i.e. heave, wave slopes with respect to the horizontal axes). This effect causes difference or error between measured and actual wave data. Calculation or estimation of the buoy transfer functions and affecting the inverse of them makes the possibility to achieve more accurate wave data. In this paper, an algorithm for estimation of the buoy transfer functions using in-situ wave data is introduced and the simulation results are presented. This algorithm uses the intrinsic properties of the sea waves. The effect of the buoy transfer functions on spectral parameters is also investigated.

### 1- مقدمه

مشخص تحت تأثیر امواج منظم و برای دو نوع حرکت عمودی و پیچشی انجام شده است. حرکات مورد مطالعه به صورت مستقل در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در کارهای انجام شده توسط گاریسون [۲،۳] هیدرودینامیک و دینامیک اجسام شناور بزرگ در دریا مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع، حرکات گوناگون شناورهای بزرگ با شکل بدنه کروی و دیسکی و برای حرکات مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است و تابع انتقال آن به روش تحلیلی محاسبه شده است. مبنای کارهای انجام شده در مراجع [۲،۳] به کارگیری تئوری امواج خطی و همچنین فرض کوچک بودن دامنه‌های حرکت جسم بوده است. فرض فوق منجر به خطی شدن معادلات حرکت شده است. همچنین بزرگ بودن ابعاد مشخصه هندسه‌های مورد بررسی در مقایسه با طول موج برخوردکننده به گونه‌ای است که روش موريسون برقرار نبوده و لذا از تئوری جریان پتانسیل و روش پانل در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی استفاده شده است. ضرایب هیدرودینامیکی محاسبه

بویه‌های موج‌نگار نقشی مؤثر در جمع‌آوری اطلاعات پایه‌ای در محیط دریا دارند. این اطلاعات در زمینه‌های گوناگونی نظیر مدل‌سازی امواج، طراحی سازه‌های دریایی، تحلیل‌های آماری و ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای استفاده می‌شوند. کمیت‌های اصلی که توسط بویه‌های موج‌نگاری اندازه‌گیری می‌شود، حرکت عمودی<sup>1</sup> و شیب موج نسبت به محورهای مختصات افقی می‌باشند. اینرسی بویه‌های موج‌نگاری موجب پیدایش تابع انتقال برای کمیت‌های موج‌نگاری یاد شده می‌شود که نتیجه آن اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر واقعی امواج دریا است. بنابراین بررسی و کنترل داده‌های موج‌نگاری و صحت‌سنجی آن‌ها امری گریزناپذیر است.

بررسی تابع انتقال حرکات عمودی یک بویه ساده استوانه‌ای در مرجع [1] انجام شده است. در این مرجع تابع انتقال یک استوانه‌ای باریک با آب‌خور

1- Heave

است. در کار حاضر در واقع با استفاده از فیزیک دریا تابع انتقال بدست آمده است نه از طریق خصوصیات فیزیکی، که در نوع خود بدیع می‌باشد.

## 2- معادلات حاکم در مورد موج‌نگاری و مدل‌سازی آن

کمیت‌های مورد نظر در موج‌نگاری، حرکت عمودی موج،  $Z$  و شیب موج نسبت به محورهای مختصات افقی ( $X$  و  $Y$ )، یعنی  $\partial z / \partial x$  و  $\partial z / \partial y$  می‌باشند. مقادیر طیفی موج براساس طیف حرکت عمودی و طیف‌های متقابل حرکت عمودی با شیب‌های بویه نسبت به محورهای مختصات  $X$  و  $Y$  تعریف می‌شوند [5]. توابع خود همبستگی و همبستگی متقابل بصورت رابطه (1) در نظر گرفته می‌شوند.

$$\begin{aligned} R_{11}(\tau) &= E\{z(t+\tau)z(t)\}, \\ R_{12}(\tau) &= E\{z(t+\tau) \times (\partial z / \partial x)(t)\}, \\ R_{13}(\tau) &= E\{z(t+\tau) \times (\partial z / \partial y)(t)\}, \\ R_{22}(\tau) &= E\{(\partial z / \partial x)(t+\tau) \times (\partial z / \partial x)(t)\}, \\ R_{33}(\tau) &= E\{(\partial z / \partial y)(t+\tau) \times (\partial z / \partial y)(t)\} \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $R_{ij}$  معرف تابع خودهمبستگی یا همبستگی متقابل است. همچنین  $E\{\cdot\}$  امید ریاضی و  $\tau$  شیفت زمانی است. در این رابطه جهت سادگی از زبرنویس 1 تا 3 به ترتیب برای نمایش حرکت عمودی، شیب نسبت به محور  $X$  و شیب نسبت به محور  $Y$  استفاده شده است. مقادیر حرکت عمودی  $Z$  و شیب  $\partial z / \partial x$  و  $\partial z / \partial y$  در محل مختصات بویه  $x_0, y_0$  که ثابت فرض می‌شود، برحسب زمان در نظر گرفته شده است. با داشتن دسته روابط (1)، طیف فرکانسی حرکت عمودی و شیب‌های بویه و طیف‌های متقابل آنها از رابطه (2) بدست می‌آیند.

$$S_{mn}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{mn}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad m, n = 1, 2, 3 \quad (2)$$

در رابطه (2)،  $S_{11}(\omega)$  معرف طیف بدون جهت عمودی،  $S_{12}(\omega)$  و  $S_{13}(\omega)$  طیف‌های متقابل حرکت عمودی با شیب‌های بویه، و  $S_{22}(\omega)$  و  $S_{33}(\omega)$  طیف‌های شیب‌های بویه می‌باشند. همچنین  $\omega$  فرکانس موج بر حسب rad/s است و نیز عدد موهومی را نشان می‌دهد. طیف‌های  $S_{11}(\omega)$  و  $S_{22}(\omega)$  و  $S_{33}(\omega)$  حقیقی، و طیف‌های متقابل  $S_{12}(\omega) = jQ_{12}(\omega)$  و  $S_{13}(\omega) = jQ_{13}(\omega)$  موهومی محض می‌باشند. لذا محاسبه طیف‌های یاد شده طبق روابط (3) و (4) انجام شده است.

$$S_{nn}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{nn}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau \quad n = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$Q_{1n}(\omega) = -\int_{-\infty}^{\infty} R_{1n}(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau \quad n = 2, 3 \quad (4)$$

می‌توان نشان داد که جهت متوسط موج در هر فرکانس  $\omega$  طبق رابطه (5) عبارت است از [5]:

$$\bar{\theta}(\omega) = \tan^{-1} Q_{13}(\omega) / Q_{12}(\omega) \quad (5)$$

در رابطه (5)،  $\bar{\theta}$  جهت متوسط موج و عبارت‌های  $Q_{12}$  و  $Q_{13}$  بخش‌های موهومی طیف‌های متقابل را نشان می‌دهد. همچنین نشان داده می‌شود رابطه (6) بین طیف‌های  $S_{11}(\omega)$ ،  $S_{22}(\omega)$  و  $S_{33}(\omega)$  برقرار است [9].

$$K(\omega) = [(S_{22}(\omega) + S_{33}(\omega)) / S_{11}(\omega)]^{0.5} \quad (6)$$

در رابطه (6)،  $K = K(\omega)$  اندازه عدد موج است که بر اساس رابطه  $\omega^2 = k g \tanh(kh)$  بر حسب فرکانس  $\omega$  (rad/s) و عمق دریا  $h$  (m) قابل محاسبه می‌باشد.

شده بر حسب فرکانس موج در معادلات حرکت خطی شده قرار گرفته واز روی آنها تابع انتقال حرکات شناور به دست آمده است.

کشمیری و همکاران در مرجع [4] و بر اساس روش پیشنهادی مراجع [2,3] تابع انتقال یک بویه دیسکی شکل را تحت تأثیر وزن‌های مختلف جرم پایدارکننده بویه به دست آورده‌اند. اگرچه ممکن است بعد مشخصه بویه به کار رفته در این کار در مقایسه با طول موج شرایط جریان پتانسیل را برقرار ننماید. با این حال در کار انجام شده با پائل‌بندی سطح بویه و توزیع چشمه و چاه‌های سه بعدی، ضرایب هیدرودینامیکی بویه استخراج گردیده و سپس از آنها در معادلات دینامیکی حرکت استفاده شده است.

بارستو و کروگستاد [5] و نیز سارپکایا و پاتل [6-8] به بررسی آنالیز طیفی امواج جهت‌دار دریا به کمک بویه‌های موج‌نگار پرداخته‌اند. آنالیز طیفی امواج دریا در مراجع گوناگونی نظیر مراجع [9,10] مورد بررسی واقع شده است. روش اندازه‌گیری مورد مطالعه بر اساس سنجش زوایای غلطش و پیچش بویه و همچنین ثبت حرکات عمودی بویه بوده است. در کار انجام شده توسط مرجع [5] به نحوه محاسبه تابع انتقال بویه پرداخته شده است. همچنین آزمایش‌های گوناگونی که نشان‌دهنده انحراف پیش‌بینی تئوری خطی با واقعیت است، ارائه شده است. بر اساس آزمایش‌های انجام شده مواردی نظیر وجود جریان‌های زیرآبی، غیرایده‌آل بودن سنسورهای بویه موج‌نگار و همچنین اثرات غیرخطی امواج منطقه و اثرات خط مهار می‌توانند باعث انحراف نتایج تئوری خطی با واقعیت شوند.

از دیگر مطالعات انجام شده در مورد حرکت بویه‌های موج‌نگار با فرض زوایای چرخش نسبتاً کوچک می‌توان به مرجع [11] اشاره کرد. در این مرجع معادلات دینامیکی کوپله شده بویه به همراه کابل بویه مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین حل معادلات و بررسی پایداری بویه تحت تأثیر امواج ثقیلی به روش عددی و تجربی در مرجع [12] به انجام رسیده است. در صورت در دسترس بودن توابع انتقال بویه، امکان اعمال معکوس آن و دست‌یابی به داده‌های موج‌نگاری نزدیک‌تر به واقعیت فراهم می‌شود. محاسبه تحلیلی توابع انتقال بویه براساس شکل هندسی و توزیع جرم آن نسبتاً پیچیده می‌باشد. در مقابل این روش، روش تخمین توابع انتقال با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط خود بویه می‌باشد. براساس خواص ذاتی امواج دریا این امکان وجود دارد که توابع انتقال بویه با کمک داده‌های میدانی که در حین فعالیت بویه در دریا حاصل می‌شود، تخمین زده شود.

در این مقاله روش تخمین توابع انتقال معرفی شده و کارایی آن با ارائه نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است. بدیهی است توابع انتقال به دست آمده کاملاً وابسته به شکل هندسی بویه و توزیع جرم آن می‌باشد. در این جا توابع انتقال برای همان بویه‌ای که داده‌های موج‌نگاری از آن بدست آمده است تخمین زده شده و سپس تصحیح لازم برای سری زمانی "حرکت عمودی و شیب موج" برای داده‌های همان بویه صورت گرفته است. توابع انتقال تخمین زده شده برای بویه‌های دیگری که همان شکل هندسی و توزیع جرم تقریبی را دارند نیز قابل استفاده خواهد بود. در این مقاله، ترتیب بخش‌های مختلف از این قرار است:

در بخش 2، تئوری موج‌نگاری و مدل‌سازی مربوطه ارائه شده است. در بخش 3، توابع انتقال بویه و اثر آنها بر پارامترهای موج‌نگاری معرفی شده‌اند. همچنین در این بخش، الگوریتم تخمین توابع انتقال بر اساس داده‌های میدانی معرفی شده و در بخش 4 نتایج شبیه‌سازی این الگوریتم عرضه شده

## 3- توابع انتقال بویه

## 3-1- تعریف توابع انتقال بویه

$$S_{12}^b(\omega) = F\{R_{12}^b(\tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{12}^b(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau,$$

$$S_{13}^b(\omega) = F\{R_{13}^b(\tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{13}^b(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (10)$$

با  $R_{12}^b(\tau)$  و  $R_{13}^b(\tau)$  به ترتیب توابع همبستگی متقابل حرکت عمودی  $z^b$  با شیب‌های  $(\partial z/\partial x)^b$  و  $(\partial z/\partial y)^b$  می‌باشند (مشابه رابطه (1)) که با استفاده از داده‌های واقعی در حالت وجود توابع انتقال، محاسبه می‌شوند. درضمن با استفاده از روابط گفته شده در مرجع [10] رابطه (11) ارائه می‌شود.

$$\begin{aligned} \angle T(\omega) - \angle T_x(\omega) &= \angle S_{12}^b(\omega) - 0.5\pi - m\pi, \\ \angle T(\omega) - \angle T_x(\omega) &= \angle S_{13}^b(\omega) - 0.5\pi - m'\pi \end{aligned} \quad (11)$$

$\angle$  نماد فاز یک متغیرمختلط می‌باشد.  $m=0.1$  و  $m'=0.1$  بصورتی تعیین شده‌اند که مقدار  $\angle T(\omega) - \angle T_x(\omega)$  بدست آمده، حول صفر (نه حول  $\pi$ ) باشد. در اینجا متوسط دو مقدار  $\angle T(\omega) - \angle T_x(\omega)$  حاصل از  $S_{12}^b(\omega)$  و  $S_{13}^b(\omega)$  در نظر گرفته شده است.

ب) اندازه عدد موج تخمین زده شده با استفاده از داده‌های میدانی طبق رابطه (12) برای همان مجموعه فرکانس‌های  $\omega$  انتخاب شده محاسبه شده است.

$$K^b(\omega) = [S_{22}^b(\omega) + S_{33}^b(\omega) / S_{11}^b(\omega)]^{0.5} \quad (12)$$

$S_{11}^b(\omega)$ ،  $S_{22}^b(\omega)$  و  $S_{33}^b(\omega)$  به ترتیب طیف‌های حرکت عمودی  $z^b$  و شیب‌های  $(\partial z/\partial x)^b$  و  $(\partial z/\partial y)^b$  در حالت داده‌های عملی با وجود توابع انتقال بویه می‌باشند. با توجه به روابط (9) و (12)، رابطه (13) بدست می‌آید.

$$K(\omega) / K^b(\omega) = |T(\omega) / T_x(\omega)| \quad (13)$$

با استفاده از ترکیب تخمین  $\angle T(\omega) - \angle T_x(\omega)$  طبق رابطه (11) و  $|T(\omega) / T_x(\omega)|$  طبق رابطه (13)، مقادیر مختلط  $X(\omega) + jY(\omega)$  به ازای فرکانس‌های مختلف  $\omega$  بر اساس رابطه (14) ارائه می‌شود:

$$X(\omega) + jY(\omega) = K(\omega) / K^b(\omega) \quad (14)$$

توابع انتقال بویه به صورت روابط (15) و (16) تعریف شده است.

$$T(\omega) = 1 / (1 + aj\omega - b\omega^2) \quad (15)$$

$$T_x(\omega) = 1 / (1 + a_x j\omega - b_x \omega^2) \quad (16)$$

که  $\omega_0 = b^{-0.5}$ ،  $\lambda = 0.5a \times b^{-1/2}$  و  $\omega_{0x} = b_x^{-1/2}$ ،  $\lambda_x = 0.5a_x \times b_x^{-0.5}$ .

در این صورت رابطه (17) بدست می‌آید:

$$T(\omega) / T_x(\omega) = X(\omega) + jY(\omega) \quad (17)$$

مقادیر  $X(\omega) + jY(\omega)$  از رابطه (14) محاسبه می‌شوند. بدین صورت معادلات خطی (18) برای چهار پارامتر مجهول  $a$ ،  $b$ ،  $a_x$ ،  $b_x$  حاصل شده است:

$$1 - b_x \omega^2 = X(\omega) - b\omega^2 X(\omega) - a\omega Y(\omega), \quad (18)$$

$$a_x \omega = a\omega X(\omega) + Y(\omega) - b\omega^2 Y(\omega)$$

این معادلات برای فرکانس‌های مختلف  $\omega$  و برای دوره‌های مختلف زمانی که طیف موج دریا تغییر کرده و تخمین‌های مختلفی طبق رابطه (14) نتیجه می‌دهد، در نظر گرفته شده‌اند. در فرم ماتریسی، این معادلات به صورت رابطه (19) خواهد بود. بردار پارامترهای مجهول از حل دستگاه معادلات فوق، یعنی  $\hat{x} = A^+ b$  به دست می‌آیند که در آن  $A^+$  ماتریس شبه معکوس  $A$  است.

با محاسبه پارامترهای مجهول، تخمین توابع انتقال در دسترس قرار گرفته است. در عمل خطای تخمین توابع انتقال هنگام استفاده از داده‌های محدود، نسبتاً زیاد است. لذا برای حصول دقت مورد نیاز، از مجموعه داده‌های اندازه گیری شده در دوره نسبتاً طولانی مانند دوره یک ساله استفاده شده است.

به لحاظ جرم و اینرسی بویه، مقادیر اندازه‌گیری شده موج نگاری (مشخص شده با بالانویس  $b$ )، یعنی  $z^b$ ،  $(\partial z/\partial x)^b$ ،  $(\partial z/\partial y)^b$  با مقادیر واقعی موج دریا یعنی  $z$ ،  $\partial z/\partial x$  و  $\partial z/\partial y$  تفاوت دارند. نشان داده شده است که می‌توان مقادیر اندازه‌گیری شده را با توابع انتقال سیستم‌های خطی تغییر ناپذیر با زمان به مقادیر واقعی موج ارتباط داد [4، 1]. منحنی‌های پاسخ فرکانسی این توابع نشان می‌دهند که با توجه به محدوده فرکانسی امواج دریا که حداکثر تا حدود  $\omega \leq 2$  (rad/s) می‌باشد [5-8]، در نظر گرفتن دو قطب برای تابع انتقال کفایت می‌کند. لذا توابع انتقال یاد شده به صورت روابط (7) و (8) مدل شده‌اند.

$$F\{z^b(t)\} / F\{z(t)\} = T(\omega) = \frac{1}{1 + 2j\lambda\omega / \omega_0 - (\omega / \omega_0)^2} \quad (7)$$

$$T_x(\omega) = \frac{1}{1 + 2j\lambda_x\omega / \omega_{0x} - (\omega / \omega_{0x})^2} \quad (8)$$

$x$ ،  $y$  متغیرهای مکان افقی،  $t$  متغیر زمان،  $F\{\cdot\}$  تبدیل فوریه<sup>1</sup> یک بعدی از حوزه زمان  $t$  به فرکانس زوایای  $\omega$ ،  $T(\omega)$  تابع انتقال حرکت عمودی،  $T_x(\omega)$  تابع انتقال شیب‌ها،  $\omega_0$  و  $\lambda$  پارامترهای تابع انتقال حرکت عمودی و  $\omega_{0x}$  و  $\lambda_x$  پارامترهای تابع انتقال شیب‌های  $\partial z/\partial x$  و  $\partial z/\partial y$  می‌باشند. علت یکسان در نظر گرفتن تابع انتقال برای شیب‌های موج نسبت به محورهای  $x$  و  $y$ ، تقارن دایره‌ای شکل بویه است. وجود توابع انتقال بویه موجب تفاوت در مقادیر اندازه‌گیری با مقادیر واقعی آنها می‌شود که به گونه‌ای باعث خطا در موج نگاری است. به نحو مشخص، مقدار اندازه‌گیری شده حرکت عمودی و به دنبال آن، پارامترهای ارتفاع موج، متأثر از تابع انتقال  $T(\omega)$  خواهند بود. در ادامه، اثر توابع انتقال بویه بر مقادیر طیفی موج بررسی می‌شود. هرگاه نرم‌افزار محاسبه مقادیر طیفی، توابع  $S_{11}^b(\omega)$ ،  $S_{22}^b(\omega)$ ،  $S_{33}^b(\omega)$ ،  $Q_{12}^b(\omega)$  و  $Q_{13}^b(\omega)$  را طبق روابط (3) و (4) محاسبه نماید، مقادیری که عملاً با وجود توابع انتقال بویه بدست خواهد آمد با بالانویس  $b$  مشخص شده و در رابطه (9) آورده شده است [10]:

$$\begin{aligned} S_{11}^b(\omega) &= S_{11}(\omega) |T(\omega)|^2, \\ Q_{12}^b(\omega) &= Q_{12}(\omega) \text{Re}\{T_x^*(\omega)T(\omega)\}, \\ Q_{13}^b(\omega) &= Q_{13}(\omega) \text{Re}\{T_x^*(\omega)T(\omega)\}, \\ S_{22}^b(\omega) &= S_{22}(\omega) |T_x(\omega)|^2, \\ S_{33}^b(\omega) &= S_{33}(\omega) |T_x(\omega)|^2 \end{aligned} \quad (9)$$

در دسته روابط (9)، علامت \* نشان‌دهنده مزدوج مختلط تابع انتقال است. بدین صورت، تخمین جهت متوسط موج، یعنی:

$$\tan^{-1} Q_{13}^b(\omega) / Q_{12}^b(\omega) = \bar{\theta}^b(\omega) \quad \text{با} \quad \bar{\theta}^b(\omega) = \tan^{-1} Q_{13}^b(\omega) / Q_{12}^b(\omega)$$

تفاوتی نخواهد کرد.

## 3-2- تخمین توابع انتقال بویه

در این تحقیق، تخمین توابع انتقال بویه با استفاده از داده‌های میدانی، مطابق با مراحل زیر صورت گرفته است:

الف) طیف‌های متقابل  $S_{12}^b(\omega)$  و  $S_{13}^b(\omega)$  طبق رابطه تبدیل فوریه (10) و بدون فرض موهومی محض بودن در تعدادی فرکانس  $\omega$  محاسبه شده است:

1- Fourier Transform

جدول 1 جدول مشخصات موج شبیه‌سازی شده به منظور تخمین توابع انتقال

شماره هارمونیک‌های موج	دامنه $a_i$ (m)	فرکانس $\omega_i$ (rad/s)	زاویه ورود $\theta_i$ (deg)
1	1	0/2	0
2	5	0/4	10
3	3	0/5	50
4	2	0/6	70
5	1	0/8	120
6	0/1	1/0	200
7	0/2	1/2	210
8	0/1	1/4	300
9	0/1	1/6	330

جدول 2 حداکثر خطای تخمین دامنه توابع انتقال متوسط‌گیری شده در دفعات

مکرر شبیه‌سازی		
تعداد قطعات داده	حداکثر خطای تخمین	حداکثر خطای تخمین
1024 نمونه ای به	پاسخ دامنه تابع انتقال	پاسخ دامنه تابع انتقال
ازاء هر ساعت	حرکت عمودی	شیب
1	28	40
10	2/4	0/54
100	0/17	0/12
1000	0/12	0/077
8760 (یک سال)	0/11	0/063

توابع انتقال، هر نوبت شبیه‌سازی نیز به دفعات تکرار شده و نتیجه (توابع خطا)، متوسط‌گیری شده است. لازم به ذکر است که توابع انتقال، خود نرمالیزه هستند. زیرا مقدار آنها در فرکانس صفر (DC) برابر با 1 می‌باشد. نتایج ارائه شده در جدول 2 نشان می‌دهد استفاده از مجموعه داده‌های بلند مدت در حد 1000 قطعه و بالاتر، دقتی مناسب در تخمین پاسخ دامنه توابع انتقال بویه حاصل می‌کند.

نتیجه یک نوبت اجرای تخمین توابع انتقال، طبق الگوریتم ارائه شده با انتخاب همان مجموعه فرکانس‌های  $\omega_i$  و در شرایط استفاده از مجموعه 8760 تایی قطعه‌ها عبارت از  $T(\omega) = (1 + 0.4475j\omega - 0.2200\omega^2)^{-1}$  و  $T_x(\omega) = (1 + 0.5810j\omega - 0.3815\omega^2)^{-1}$  می‌باشد. مقایسه توابع انتقال حرکت عمودی و شیب‌ها حاکی از برآورد مناسب الگوریتم تخمین توابع انتقال با بهره‌گیری از داده‌های میدانی می‌باشد. این نتایج در شکل‌های 1 تا 4 آورده شده‌اند. منحنی‌های مربوط به شکل‌های 1 تا 4 مقدار واقعی و تخمینی برای پاسخ دامنه و پاسخ فاز<sup>2</sup> توابع انتقال حرکت عمودی و شیب‌ها را نشان می‌دهد. با مقایسه منحنی‌های ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت الگوریتم تخمین توابع انتقال با استفاده از داده‌های میدانی برای توابع انتقال با مشخصات فرکانسی در مقیاس محدود شبیه‌سازی شده، می‌تواند تخمین معتبری ارائه نماید. زیرا از یک طرف، جهت متوسط موج اصولاً مستقل از توابع انتقال است و از طرف دیگر دامنه سری زمانی حرکت عمودی که ارتفاع موج به آن مربوط است، عمدتاً متأثر از پاسخ دامنه تابع انتقال می‌باشد. بنابراین انطباق قابل

خاطر نشان می‌سازد ذخیره و استفاده از داده‌های موج نگاری در چنین مقیاس زمانی مرسوم می‌باشد.

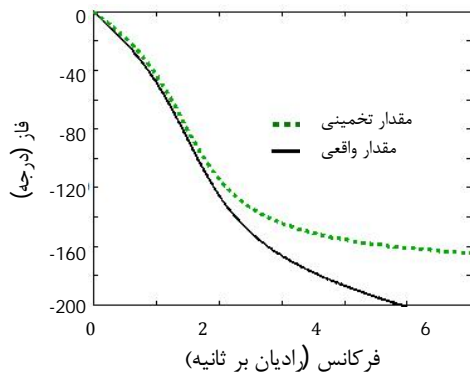
توابع انتقال حاصل، در همین محدوده طولانی که از روی آن تخمین زده شده‌اند، استفاده شده‌اند. نکته دیگر، نحوه تخمین طیف‌های  $S_{12}^b(\omega)$ ،  $S_{13}^b(\omega)$ ،  $S_{22}^b(\omega)$  و  $S_{33}^b(\omega)$  است که در روابط تخمین توابع انتقال استفاده شده‌اند (روابط 11 و 12). بدیهی است که به لحاظ تغییر شرایط آب و هوایی، سری‌های زمانی حرکت عمودی و شیب موج ایستاد آماری<sup>1</sup> نیست. لذا نمی‌توان تخمین طیف‌های یاد شده (رابطه 10) را بر اساس سری زمانی حاصل از دنبال هم قرار دادن کل داده‌ها انجام داد. در این حالت برای هر قطعه داده‌های حرکت عمودی و شیب موج که ایستاد آماری است، (قطعه‌هایی در حدود 20 دقیقه)، طیف‌های یاد شده تخمین زده شده‌اند. سپس توابع  $\angle T(\omega) - \angle T_x(\omega)$  (رابطه 11) و  $K^b(\omega)$  (رابطه 12) برای هر یک از قطعه‌ها محاسبه شده و کل آنها با هم متوسط‌گیری شده تا در روابط (13) تا (19) برای تخمین توابع انتقال بویه استفاده شوند. ضمناً تخمین توابع انتقال به عمق آب در محل استقرار بویه بستگی نداشته و عدد موج  $k = K(\omega)$  مورد استفاده از روی حل معادله  $\omega^2 = k \tan(kh)$  بدست آمده است. بدین ترتیب اثر عمق در روابط، جبران شده و بعد از آن، معادلات دیگر وابسته به عمق نیستند. لذا در اینجا تخمین توابع انتقال بویه مستقل از عمق می‌باشد.

#### 4- نتایج شبیه‌سازی

برای الگوریتم شبیه‌سازی مطرح شده برای تخمین توابع انتقال، موج دریا بصورت ترکیب چند موج، هر یک با فرکانس‌های  $\omega_i$  دامنه‌های  $a_i$  زاویه‌های ورود  $\theta_i$ ، و فازهای تصادفی طبق جدول 1 در نظر گرفته شده‌اند. فرکانس نمونه‌برداری  $1 \text{ Hz} = \pi \text{ rad/s}$  و طول قطعه داده‌ها 1024 نمونه (معادل 1024 ثانیه) می‌باشد. مؤلفه اغتشاش تصادفی با توزیع گوسی با انحراف استاندارد  $10 \pm$  سانتی‌متر به سری زمانی حرکت عمودی و مؤلفه اغتشاش تصادفی با توزیع گوسی با انحراف استاندارد  $0/052 \pm$  سانتی‌متر (معادل  $3^\circ$ ) به سری‌های زمانی شیب‌های موج اضافه شده است تا خطای سنسور موج‌نگاری و تلاطم تصادفی امواج دریا را مدل کند و توابع انتقال حرکت عمودی و شیب‌ها به ترتیب برابر با  $T(\omega) = (1 + 0.4j\omega - 0.2\omega^2)^{-1}$  (دارای قطب در  $1 \pm$  (rad/s) و  $T_x(\omega) = (1 + 0.5536j\omega - 0.346\omega^2)^{-1}$  (دارای قطب در  $-0.8 \pm 1.5j$  (rad/s) در نظر گرفته شده‌اند.

شبیه‌سازی برای مجموعه‌های تکی، 10 تایی، 100 تایی، 1000 تایی و 8760 تایی از قطعه‌های 1024 نمونه‌ای اجرا شده است تا نشان داده شود که خطای تخمین توابع به ازای طول داده‌های کوتاه زیاد بوده و برای حصول کیفیت قابل قبول، نیاز به بکارگیری داده‌ها در یک دوره طولانی مدت است. در یک سیستم مرسوم که به ازای هر ساعت، یک سری قطعه داده حرکت عمودی موج و شیب‌ها ارائه می‌شود، مجموعه 8760 تایی از قطعه‌ها معادل یک سال داده‌برداری می‌باشد.

جدول 2 حداکثر خطای تخمین دامنه توابع انتقال حرکت عمودی و شیب موج را به ازای تعداد قطعات مختلف داده‌ها بیان می‌کند. اگر  $\tilde{T}(\omega)$  و  $\tilde{T}_x(\omega)$  به ترتیب تخمین توابع انتقال دامنه و شیب موج باشند، توابع خطای یاد شده برای حرکت عمودی و شیب موج عبارتند از:  $\max | |T(\omega) - \tilde{T}(\omega)| |$  و



شکل 4 مقدار اصلی و تخمین پاسخ فاز تابع انتقال شیبها

### 5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش تخمین توابع انتقال بویه با استفاده از داده‌های میدانی که در حین فعالیت بویه حاصل می‌شود معرفی شده است که از خواص ذاتی امواج دریا استفاده می‌کند. با استفاده از این روش توابع انتقال بویه بدون نیاز به تست‌های آزمایشگاهی پرهزینه و یا محاسبات تحلیلی که در آنها نیاز به ساده‌سازی‌های مکرر و نادیده گرفتن برخی پدیده‌ها می‌باشد، تخمین زده شده است. با اعمال عکس اثر توابع انتقال برداده‌های موج‌نگاری از قبیل سری زمانی حرکت عمودی موج داده‌های دقیق‌تری فراهم می‌شود.

### 6- فهرست علائم

$E\{0\}$	متوسط گیری آماری
$F\{0\}$	تبدیل فوریه
$g$	شتاب جاذبه زمین ( $m/s^2$ )
$h$	عمق (m)
$m$	عدد ثابت تبدیل
$T(\omega)$	تابع انتقال حرکت عمودی
$T_X(\omega)$	تابع انتقال شیبها
$Q$	بخشهای موهومی طیفهای متقابل
$z$	حرکت عمودی موج (m)
$\partial z / \partial x$	شیب موج نسبت به محور افقی x
$\partial z / \partial y$	شیب موج نسبت به محور افقی y

### علائم یونانی

$\tau$	شیفت زمانی (sec)
$\omega$	فرکانس زاویه ای (rad/s)
$\bar{\theta}$	جهت متوسط موج
$\omega_0$ و $\lambda$	پارامترهای تابع انتقال حرکت عمودی
$\omega_{0X}$ و $\lambda_X$	پارامترهای تابع انتقال شیبها

### بالانویس‌ها

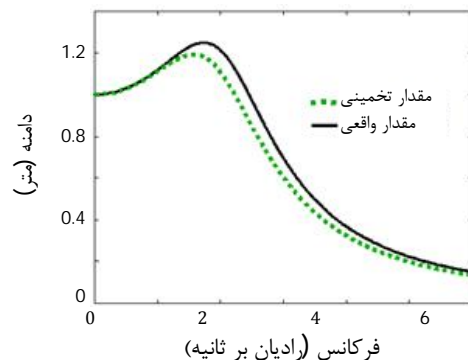
+	شبه معکوس یک ماتریس
^	تخمین

### 7- مراجع

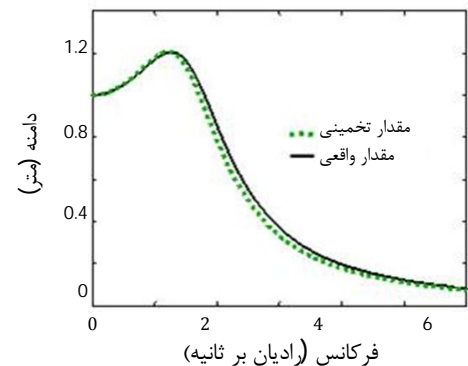
- [1] H.O., Berteaux, E. E., Hays, *Buoy Engineering*, John Wiley & Sons, 1976.
- [2] C.J., Garrison, Hydrodynamic of large objects in the sea, part I, Hydrodynamic analysis, *Journal of Hydraulics*, Vol. 8, No. 1, 1974, pp. 5-63.
- [3] C.J., Garrison, Hydrodynamic of large objects in the sea, part II-motion of free floating bodies, *Journal of Hydraulics*, Vol. 9, No. 2, 1975, pp. 58-83.

قبول پاسخ دامنه (شکل‌های 1 و 2) حاصل شده و تخمین باموقفیت صورت گرفته است.

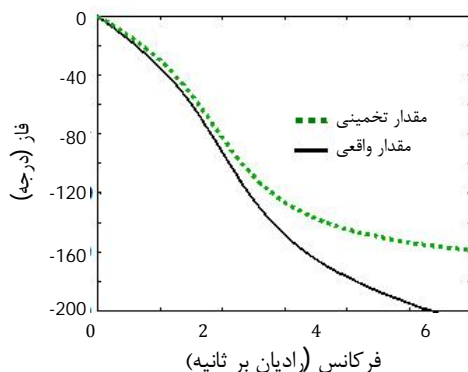
الگوریتم تخمین توابع انتقال اگر چه پاسخ فاز را با مقداری خطا محاسبه می‌کند (شکل‌های 3 و 4)، ولی با توجه به این که در عمل معمولاً بر روی پاسخ فاز حساسیتی وجود ندارد، اختلاف مشاهده شده دارای چندان اهمیتی نیست. در واقع، همان‌طور که اشاره شد پاسخ دامنه مورد کاربرد عملی است تا بتوان بر اساس آن، مقادیر ارتفاع موج تخمین زده شده توسط بویه موج‌نگاری را تصحیح نمود. در اجرای شبیه‌سازی ارائه شده در شکل‌های 1 و 2، حداکثر خطای تخمین پاسخ دامنه به ترتیب عبارت از 0/1256 و 0/0692 می‌باشد. این میزان دقت مناسب بوده و برای تصحیح پارامترهای معتبر موج‌نگاری کفایت می‌کند که در پژوهش حاضر از این اصل استفاده شده است.



شکل 1 مقدار اصلی و تخمین پاسخ دامنه تابع انتقال حرکت عمودی



شکل 2 مقدار اصلی و تخمین پاسخ دامنه تابع انتقال شیبها



شکل 3 مقدار اصلی و تخمین پاسخ فاز تابع انتقال حرکت عمودی

- [9] M. Noorbakhsh, A.R Zamani, *Quality control of Wave Measurement Buoy*, Research Ins. for Subsea Sci. & Tech., (Technical Report), Isfahan Univ. of Tech., 2009. (In Persian)
- [10] S., Barstow, Krogstad, H.E., *General analysis of Directional Ocean wave data, Modeling, Identification and control*, Vol. 5, No. 2, 1984, pp. 47-70.
- [11] K., Idris, Leonard, J.w., YIM, S.C.S., Coupled dynamics of tethered buoy system, *Ocean engineering*, Vol. 24, 1997, pp. 445-464.
- [12] S. Radhakrishnan, R. Delta, I. Hires, Theoretical and experimental analysis of tethered buoy instability in gravity waves, *ocean engineering*, Vol. 34, 2007, pp. 261-274.
- [4] M. Keshmiri, M. Sadigh, M. Goodarzi, Dynamic analysis of Wave Measurement Buoy, *6th conference on mechanical engineering*, Iran, 2008. (In Persian)
- [5] M. K., Ochi, *Ocean Waves: The Stochastic Approach*, Cambridge Ocean Technology Series, 2005.
- [6] T. Sarpkaya, M. Isaacson, *Mechanics of wave forces on offshore structures*, Van NostrandReinhold Company, 1981, Fig. 7.24 .
- [7] J. F. Wilson, *Dynamics of Offshore Structures*, John Wily & Sons. Inc, 2003, Fig. 6.5, Fig. 7.5.
- [8] H.M.Patel, *Dynamics of Offshore Structure*, Butterworth & Co. Ltd., 1989, Fig. 4.14 .