



ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران  
دانشگاه شهردکرد- ۱۵-۱۳ شهریور ۱۳۸۶



## پیش‌یابی امواج ناشی از باد به روش‌های آماری در مقایسه با

### سیستم استنباط فازی در آب‌های بسته

سید محمود برقی

(استاد دانشگاه صنعتی شریف)

کاوه زمانی

(دانشگاه صنعتی شریف [kzamani@alum.sharif.edu](mailto:kzamani@alum.sharif.edu))

ژوبین شعراف کاشانی

(دانشگاه آزاد اسلامی تهران جنوب)

### چکیده

دسترسی به آمار دراز مدت امواج برای طراحی و نگهداری ساحل، ابنیه ساحلی و فراساحلی ضروری است. معمولاً آمار دراز مدت پدیده موج موجود نیست و از روی داده‌های هواشناسی برای دوره طرح لازم تولید می‌شود. در آیین‌نامه‌های دریایی بر اساس برداشت‌های آماری روش‌های مختلفی برای این پیش‌بینی توصیه شده است که بر مبنای رگرسیون بر اعداد بی‌بعد استوار است. در این پژوهش این روش‌ها با روش‌های محاسبات نرم که در عرصه‌های مختلف و به‌صورت خاص سیستم‌های پیچیده کارکردی مناسب‌تر از آمار کلاسیک از خود نشان داده‌اند برای آب‌های بسته (دریاچه میثیگان) مقایسه شده‌اند این روش‌ها در کلیه حالات وقوع موج اعم از محدودیت طول بادگیر و محدودیت زمان تداوم وزش باد، عملکردی مناسب‌تر از روش‌های SMB، SPM و CEM نشان دادند.

**کلمات کلیدی:** پیش‌بینی (Forecasting)، پیش‌یابی موج (Wave Hindcast)، رگرسیون (Regression)، سیستم استنباط فازی (FIS)، شبکه تلفیقی عصبی- فازی (ANFIS).



## مقدمه

اطلاعات حاصل از پیش‌بینی امواج، که اساس طراحی‌های مهندسی دریا قرار خواهند گرفت نقش مهمی در ساخت، نگهداری و مدیریت پروژه‌های عمرانی ساحلی و فراساحلی بازی می‌کند. متغیرهای موج شامل ارتفاع موج شاخص و پرپود قله طیف موج، در مسأله‌های مختلف از جمله حمل رسوب در سواحل، آبستگي ابنیه و خطوط لوله مستغرق، طراحی بندر و سکوه‌های دریایی استفاده می‌شود. تخمین نادرست متغیرهای امواج، به افزایش قیمت پروژه‌ها و یا در نقطه مقابل خسارات ناشی از طراحی ضعیف پروژه منتهی خواهد شد. از میان امواج مختلفی که در دریاها وجود دارند، امواج ناشی از باد به دلیل دارا بودن بیشترین محتوای انرژی، و بیشترین فراوانی تکرار، مهمترین نوع موج در دیدگاه مهندسی دریا محسوب می‌شوند.

از روش‌های متداول پیش‌بینی موج، حل عددی معادله طیف انرژی موج است. کدهای فراوانی که معمولاً به روش تفاضل محدود و یا حجم محدود عمل می‌کنند، در سه نسل برای این کار بسط داده شده‌اند و در این زمینه کارهای زیادی از دهه ۱۹۶۰ به بعد انجام شده است ولی بعد از بررسی‌های فراوان مشخص گشته که با توجه به اینکه معادله حاکم<sup>۱</sup> بر پدیده موج پارامترهایی را نادیده می‌گیرد دقت این روش‌ها محدود به سقف مشخصی است و از روش حل ناشی نمی‌شود. برای افزایش این دقت باید در معادلات حاکم تغییر ایجاد شود<sup>[۱]</sup>. از معایب دیگر روش‌های عددی پیش‌بینی موج را می‌توان نیاز به اطلاعات وسیع هواشناسی، ژرفیابی<sup>۲</sup> و زبری بستر در کنار تلاش محاسباتی بالا دانست<sup>[۲]</sup>.

در زمینه پیش‌موج با مدل‌های آیین‌نامه‌ای کارهای فراوانی انجام شده که از مهم‌ترین آنها مدل‌سازی است که در سال ۱۹۹۲ با چهار مدل تجربی مطرح آن زمان SMB، Donelan، Jonswap و SPM انجام شده است که با هشت دسته داده معتبر مربوط به نواحی مختلف جهان انجام گرفته. این مدل‌ها با توجه به نقاط کالیبره شدن و سایر فرضیات لحاظ شده، هرکدام نقاط ضعف و قوتی دارند<sup>[۳]</sup>.

<sup>1</sup> Governing Equation

<sup>2</sup> Bathymetry



علی‌رغم اینکه موج ذاتاً پدیده پیچیده‌ای است، روش‌های آماری - مانند کلیه دانش‌های تجربی دیگر - می‌توانند با در دست داشتن داده‌های کافی در مورد امواج، در مقام تعمیم و تصمیم‌گیری قرار گیرند. با همین راه-کار مطالعات زیادی روی امواج انجام شده و نتایج در قالب روش‌های سریع ساخت آمار امواج از روی اطلاعات هندسی و هواشناسی ارائه گردیده. اساس این روش‌ها رگرسیون بر روی برداشت‌های میدانی است [4]. در میان روش‌های آماری کلاسیک، با توجه به مسلسل‌وار بودن پدیده موج و همچنین تاثیر پذیری آن از گام‌های قبلی، الگوی سری زمانی به کامل‌ترین شکل می‌تواند مبین پدیده باشد. الگوهای ARMA در پیش‌بینی موج توانسته‌اند به دقت‌های مناسبی دست پیدا کنند [5].

محاسبات نرم<sup>۳</sup> به‌عنوان روشی سریع و کارا در برخورد با سیستم‌های پیچیده در دهه ۱۹۷۰ پا به عرصه کاربرد گذاشت. در پی آن نظریه امکان<sup>۴</sup> به عنوان مکملی بر نظریه احتمال کلاسیک ارائه شد. از مهمترین عرصه‌های عمل منطق فازی رگرسیون و درون‌یابی است. دیدگاه غیر قطعی، و توانایی یادگیری این روش‌ها محملی شد که در مسایل بسیار پیچیده و یا توأم با عدم قطعیت مهندسی- که هنوز معادلات حاکم و یا شرایط مرزی و اولیه آنها به وضوح معلوم نیست- به‌سرعت تبدیل به ابزاری کارا شوند [6]. با استفاده از روش‌های محاسبات نرم می‌توان بدون وارد شدن به روابط فیزیکی حاکم بر پدیده، به‌کمک تجارب قبلی استنباط‌هایی در مورد پدیده انجام داد و به قواعدی کلی دست یافت. استفاده از روش‌های محاسبات نرم مانند شبکه‌های یادگیرنده، منطق فازی و الگوریتم‌های تکاملی به عنوان جایگزینی قوی‌تر از آمار کلاسیک در پیش‌بینی امواج سابقه‌ای کمتر از یک‌دهه دارد و کارهای محدودی در این زمینه انجام شده. پیش‌بینی پارامترهای موج با شبکه‌های عصبی MLP در آب‌های غربی هند و تعمیم مشخصات موج در ایستگاه‌های مجاور به هم با این روش انجام شده است [7]. منطق فازی در پیش‌بینی امواج اولین بار در دریاچه اونتاریو در مقایسه با روش آیین‌نامه CEM به‌کار رفته است، که این منطق نتایج مناسبی در پیش‌بینی امواج در حالت محدودیت طول

<sup>3</sup> Softcomputing

<sup>4</sup> Possibility



بادگیر داشت [8]. از این روش در مقایسه با سری‌های زمانی ARIMAX نیز استفاده شده است این روش در این تحقیق توانست به نتایج چشمگیری دست پیدا کند [9].

### روش تحقیق:

### الف- داده‌های میدانی

در این پژوهش داده‌های میدانی ایستگاه ۴۵۰۰۷ دریاچه میشیگان در فاصله سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ استفاده شد. علت این انتخاب این بود که ایستگاه فوق‌الذکر اطلاعاتی معتبر و فیلتر شده داشت که مبنای تحقیقات مشابه پیشین بوده [8,10] و می‌تواند مبنای مقایسه مناسبی قرار گیرد. همچنین در دریاچه‌های بسته، مسئله امواج دورا<sup>۵</sup> به اندازه دریاچه‌های بزرگ مطرح نیست و می‌توان کلیه امواج را ناشی از میدان باد موجود در منطقه دانست.

برای کلیه مدل‌های استفاده شده در تحقیق از داده‌های یکسانی برای آموزش و کنترل مدل استفاده شد تا شرایط مقایسه یکسان باشد. داده‌های شاهد و آموزشی به نحوی انتخاب شدند که میانگین و انحراف معیار یکسانی داشته باشند [11]. همچنین معیار اصلی سنجش کارایی مدل‌ها شاخص پخش<sup>۶</sup> قرار گرفت. این شاخص به صورت زیر:

$$SI = \frac{RMSE}{Average(Predict)} \times 100 \quad (1)$$

تعریف می‌شود. با توجه به اینکه پیش‌بینی دست پایین امواج خطر خسارت دیدن سازه‌ها را در پی دارد، برای اینکه مشخص شود که یک مدل نتایجی دست بالا ارائه می‌دهد یا پیش‌بینی آن دست پایین است، از معیار ارببی<sup>۷</sup> استفاده شده است. این معیار به صورت مقابل تعریف می‌شود

<sup>5</sup> Swell

<sup>6</sup> Scatter Index

<sup>7</sup> Bias-Index



$$Bias = Average(Predict - Observe) \quad (2)$$

### ب: مدل‌های آیین‌نامه‌ای

ابتدا با روش‌های آیین‌نامه‌ای SMB، SPM، و CEM پیش‌بینی موج با داده‌های شاهد صورت گرفت (چون خود این مدل‌ها پیشتر از رگرسیون حاصل شده‌اند). در مرحله دوم سعی شد دقت این روش‌ها با تنظیم به‌وسیله رگرسیون افزایش داده شود. چون معادلات حالت محدودیت طول بادگیر موج با استفاده از طول بادگیر مجازی در نهایت اساس بدست آوردن مشخصات امواج در حالت محدودیت ساعات تداوم وزش نیز هستند، برای سنجش و آموزش فقط از داده‌های محدودیت طول بادگیر استفاده شد. روش کار بدین گونه بود که برای بدست آوردن ضرایب مجهول  $a$  و  $b$  در رابطه (۳):

$$y = ax^b \quad (3)$$

از طرفین رابطه لگاریتم گرفته و در نظر گرفته می‌شود که:  $Y = \ln(y)$ ,  $X = \ln(x)$ ,  $A = \ln(a)$  در نتیجه  $Y = A + bX$  خواهد شد و به سادگی می‌توان ضرایب  $a$  و  $b$  را در نرم افزار MINITAB به‌دست آورد. این افزایش دقت، علی‌رغم بهبود نسبی این روش‌ها، چندان کارساز نبود. در همین مرحله بدون استفاده از اعداد بی‌بعد نیز رگرسیون تکرار شد که به علت بیشتر شدن متغیرهای ورودی، به نسبت حالت در نظر گرفتن اعداد بی‌بعد، دقت از مدل‌های قبل کمتر نیز شد. نتایج این مدل‌سازی‌ها در جدول (۱) آورده شده است. شایان ذکر است این نتایج مربوط به مجموع دو حالت محدودیت طول بادگیر موج و محدودیت زمان تداوم وزش باد است. و کلیه مدل‌ها در حالت محدودیت زمان تداوم وزش دقت کمتری داشتند.



جدول-۱: شاخص‌های آماری پیش‌بینی موج در روش‌های مبتنی بر رگرسیون

SPM	CEM	SMB	Regr essi on	ASMB	ASPM	ACEM	روش:	شاخص آماری
							پارامتر	
70.81	53.22	40.3	26.74	13.21	30.08	13.27	$T_p$	SI (%)
45.5	31.54	21.5	39.89	21.48	38.25	27.61	$H_s$	
0.091	-0.085	-0.221	-0.056	-0.331	-0.045	0.170	$T_p$	Bias
0.892	-1.682	-0.516	-0.041	-0.003	-0.033	0.033	$H_s$	

### ج: مدل استنتاج فازی

در گام بعد سعی شد به جای رگرسیون از شبکه‌های عصبی فازی برای نگاشت این داده‌ها استفاده شود. ورودی‌های انتخاب شده برای مدل عصبی-فازی همان ورودی‌های آیین‌نامه‌ها انتخاب شد. پارامترهای "سرعت باد در تراز ۱۰ متری"، "طول بادگیر" و "زمان تداوم وزش باد" انتخاب شدند، هرچند نتایج دقیق‌تر از مدل‌های توصیه شده توسط آیین‌نامه‌ها بود ولی در حالت محدودیت زمان وزش باد بازهم خطای پیش‌بینی بالا بود. سیستم استنتاج فازی به کار رفته از نوع تاکاگی-سوگنو بود. ساختار این مدل برای پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص به صورت زیر است:

$$\text{IF } W \text{ is } A_1 \ \& \ F \text{ is } B_1 \ \& \ T_r \text{ is } C_1 \quad \text{THEN} \quad H_s = a_1 W + b_1 F + c_1 T_r + d_1$$

که  $W$  سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری،  $F$  طول بادگیر موج و  $T_r$  زمان تداوم وزش باد است. پارامترهای  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  نیز از آموزش دیدن شبکه عصبی از روی داده‌های آموزشی حاصل می‌شوند. مانند سایر روش‌های مبتنی بر سرعت تغییرات<sup>۸</sup> برای بدست آوردن نتایج دقیقتر، ورودی‌های شبکه به صورت خطی بین اعداد ۱ تا ۱۰۰ نرمال‌سازی شدند. این نرمال‌سازی نتایج را بهبودی جزئی داد.

### د: تحلیل حساسیت برای منشا خطاها:

برای بهبود نتایج تحلیل حساسیت روی خطاها انجام شد. تحلیل منشا خطاهای پیش‌بینی نشان داد که لحاظ کردن اختلاف حرارت باد و سطح آب به صورت ضریب در داخل سرعت باد تغییر چندانی نسبت به

<sup>۸</sup> Gradient Base



استفاده از آن به صورت یک متغیر جدید ندارد. این مورد در نتایج جدول شماره (۲) که از ساخت سه مدل مختلف و مقایسه آن بدست آمده مشهود است.

جدول ۲- مدل فازی ساده، با لحاظ کردن حرارت به عنوان متغیر جدا و اثر دادن اختلاف حرارت در سرعت باد

Bias	SI(%)	Correl	R <sup>2</sup>	شاخص آماری:	متغیرهای مدل
-0.009(m)	21.7	0.93	0.868		مدل ۱: W (km/hr), F (km)
-0.007(m)	19.9	0.93	0.873		مدل ۲: ΔT, W (km/hr), F (km)
-0.008(m)	21.0	0.93	0.874		مدل ۳: W <sub>modified</sub> (km/hr), F (km)

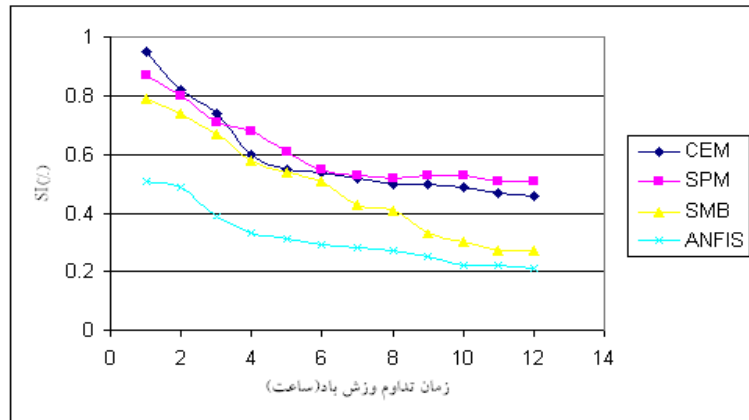
به این مسئله در آیین نامه CEM نیز اشاره شده است [12]. متغیر سرعت باد نیز با توجه به قابلیت اندازه‌گیری دقیق و تعریف تقریباً یکسانی که در روش‌های مختلف دارد نمی‌تواند به عنوان منشا اصلی خطا موثر باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که تعریف طول بادگیر موج حتی به صورت دینامیکی و محاسبه آن از روی وضعیت زمان‌های قبلی نیز فقط چند درصد جزئی به دقت پیش‌بینی امواج کمک می‌کند و حتی در مواردی نیز به کاهش دقت منتهی می‌شود [13]. در ادامه تحلیل حساسیت روی متغیرهای ورودی میزان خطای شاخص پخش بر حسب متغیر ساعات تداوم وزش باد در شکل (۱) رسم گردید. نتایج نشان می‌داد که در ساعات اولیه وزش بادی جدید در کلیه روش‌ها، اعم از آیین‌نامه‌ها و روش‌های نرم دقت پیش‌بینی کم است و با افزایش ساعات تداوم باد این دقت بهبود می‌یابد. علت این خطا امواج باقی مانده از ساعات قبل در زمان توفان بود. زمان تداوم یک باد طبق تعریف تعداد ساعاتی است که در آن شرایط (۴) و (۵) تامین شوند.

$$|D_i - \bar{D}| \leq 15 \text{ deg.} \quad (۴)$$

$$|W_i - \bar{W}| \leq 2.5 \text{ m/Sec.} \quad (۵)$$

که در این رابطه D زاویه وزش باد و W سرعت وزش آن است. در زمان توفان با فروکش کردن نسبی سرعت باد، بادهای جدیدی وجود دارند که به رشد امواج تولید شده در ساعات قبل کمک می‌کنند از این رو این

تعریف نمی‌تواند تعریفی دقیق از ساعات تداوم وزش باد باشد و سر منشا خطای پیش‌بینی در روش‌های مختلف می‌باشد.



شکل-۱: خطای پیش‌بینی ارتفاع موج نسبت به زمان تداوم وزش

### ح: تعریف متغیر جدید

به علت دلیلی که در بالا توضیح داده شد، عده ای از محققین از الگوی سری‌های زمانی برای مدل‌سازی موج بهره برده‌اند [5] این الگو علاوه بر شرایط فعلی مولد هر پدیده، نقش تسلسل را نیز در تولید پدیده مد نظر قرار می‌دهد و آن را به صورت توالی‌گرا<sup>۹</sup> مدل می‌کند. با وارد کردن مقدار پارامتر گام قبلی به عنوان ورودی به مدل برای پیش‌بینی همان پارامتر در گام بعد مشکل لحاظ نشدن افت توفان در ساعات اول تعریف باد جدید مرتفع می‌گردد و مانند الگوهای اتورگرسیو نقش توالی نیز دیده خواهد شد. مقدار بهینه گام قبلی از نظر زمانی ۳ ساعت به دست آمد.

$$H_{t-3}, T_r, W, F \Rightarrow H_t$$

### و: ساخت مدل با متغیر جدید

در مرحله چهارم نوع دید به پدیده موج از واقعه‌گرا به توالی‌گرا تغییر یافت و با کمک متغیرهای گام-های قبل مدل‌سازی تکرار شد. دقت به صورت محسوسی با اضافه کردن این پارامتر جدید تغییر کرد. ابتدا مدل FIS که با کمک متغیرهای گام پیشین ساخته شد. نتایج پیش‌بینی‌های این مدل در جدول (۲) نشان داده

<sup>۹</sup> Sequence-Base



شده است. مدل FIS علی رغم تلاش محاسباتی بالا، به علت غیر بهینه بودن توابع عضویت ورودی و خروجی و حجم بالای پایگاه قواعد<sup>۱۰</sup> حاصل، دچار سر در گمی<sup>۱۱</sup> شد [14] و توانایی پیش‌بینی دقیق خود را در مواردی از دست می‌داد. این مدل با Fortran نوشته شده بود و با توجه به میزان قوت قواعد<sup>۱۲</sup> که از روی داده‌های قبلی موج تخمین زده می‌شد، درایه‌های ماتریسی را که هرکدام از ابعاد آن، تعداد گسسته سازی یکی از متغیرهای ورودی بود، پر می‌کرد. این عمل به این صورت انجام می‌گرفت که ابتدا قانون‌های با قوت کمتر از ۰/۰۱ بدون مقایسه با سایر قانون‌ها مستقیماً حذف می‌شدند [6] و سپس سایر قوت‌ها با هم سنجیده شده و قانون با قوت بیشتر در درایه نظیر خود در پایگاه قواعد قرار می‌گرفت. در انتها درایه‌های خالی با میانگین‌گیری بین درایه‌های همسایه پر می‌شد. تاکاگی و سوگنو برای جلوگیری از سر در گمی این پایگاه داده که حاصل بزرگ شدن بیش از حد آن است پیشنهاد کردند که ابعاد گسسته سازی ورودی‌ها محدود شود و ورودی‌ها در دسته‌هایی که هرکدام فقط یک قانون در پایگاه قواعد دارند ارئه شوند. این روش دسته بندی ورودی‌ها خوشه بندی<sup>۱۳</sup> نام دارد. [15] از شبکه عصبی برای بهینه کردن شعاع این خوشه‌ها استفاده می‌شود. در نرم‌افزار MATLAB بسته خاصی برای خوشه‌بندی دسته داده‌ها پیش‌بینی شده است. عمل مدل‌سازی با متغیر جدید در نرم‌افزار MATLAB تکرار شد این بار تعداد دسته توابع عضویت هر متغیر طبق توصیه‌های انجام شده [15] به عدد ۳ محدود گشت. نتایج این مدل‌سازی‌ها در جدول شماره (۲) قرار داده شده است.

جدول ۲- پیش‌بینی انجام شده با سیستم‌های فازی

مدل		S-ANFIS	S-ANFIS	S-ANFIS	S-FIS
متغیر پیش‌بینی		محدودیت طول بادگیر	محدودیت زمان تداوم	کلی	
شاخص آماری	Bias	0.022	0.275	0.204	0.006
		0.001	0.004	0.004	-0.0127
	SI(%)	2.89	5.09	4.19	9.8
		0.4	3	2.34	8.52

<sup>10</sup> Rule Base

<sup>11</sup> Curse of Dimensions

<sup>12</sup> Rules

<sup>13</sup> Clustering



## نتیجه گیری

۱. انتخاب صحیح متغیرها ورودی نیز علاوه بر تنظیم و آموزش مدل در کیفیت و دقت جوابها موثر است در روند تحقیق مشخص شد که، با استفاده از متغیر ورودی، گام‌های زمانی قبلی موج و باد، با مدل ساده‌تر FIS، می‌توان به نتایج دقیق‌تری از مدل ANFIS که متغیرهای ورودی مناسبی برای آن تعریف نشده، دست پیدا کرد.
۲. با توجه به جدول (۱) و (۳) مشخص گردید که بررسی امواج ناشی از باد هرچند با ابزارهایی پیچیده مانند این تحقیق و یا تحقیقات مشابه با روش‌های محاسبات نرم [10]، در صورت عدم تعریف متغیرهای توالی‌گرا نمی‌تواند از سقف دقت خاصی فراتر رود و این محدودیت ناشی از روش و یا خطای عددی نیست.
۳. در نگرش کلی مدل‌های فازی دقت‌های بالاتری نسبت به مدل‌های رگرسیونی و آیین‌نامه‌ای داشتند مدل‌های رگرسیونی نیز از مدل‌های آیین‌نامه‌ای دقیق‌تر بودند (جدول‌های ۱ و ۳).
۴. استفاده نکردن از متغیر بی بعد "فرود" در رگرسیون موج، به علت اضافه کردن تعداد متغیرها نه تنها از میزان خطا نمی‌کاهد بلکه دقت را تا حدی کاهش نیز می‌دهد.
۵. در میان روش‌های تجربی در دریاچه میشیگان، SMB بهترین عملکرد را دارد. دقت این روش بخصوص در حالت محدودیت طول مبادگیر موج بهتر نیز می‌شود.
۶. شاخص اریبی کلیه روش‌های تجربی در حالت محدودیت زمان تداوم وزش باد منفی است. یعنی این روش‌ها تمایل به پیش‌بینی پایین دست موج در این حالت دارند.
۷. مدل‌های محاسبات نرم پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص را قدری دقیق‌تر از پرئود قله طیف پیش‌بینی می‌کنند.
۸. با توجه به همبستگی بسیار بالای پرئود و ارتفاع موج شاخص (حداقل ۹۴٪) در مجموعه داده‌های دریاچه میشیگان روند تقریباً هماهنگی در دقت پیش‌بینی مدل‌های مختلف از این دو متغیر وجود دارد.

## مراجع:

1. Liu, P.C., Schwab D.J., 2002. "Has wind-wave modeling reached its limit?" J. Ocean Eng. 29, 81-89.
2. Kobayashi, T., Yasuda T., 2004. "Near shore wave prediction by coupling a wave model and statistical methods", J. Ocean Eng. 51, 297-308.



3. Bishop, C.T., Donelan, M.A., Kahma, K.K., 1992. "Shore protection manual's wave prediction reviewed", J. Coastal Eng. 17, 25-48.
4. Goda, Y., 1985. "Random Seas and Design of Maritime Structures", Univ. Tokyo Press, 323.
5. Delbalzo, D.R., Schultz, J.R., Earle, M.D., 2003. "Stochastic time-series simulation of wave parameters using ship observations, Ocean Eng. 30, 1417-1432.
۶. وانگ لی، سیستم‌های فازی و کنترل فازی، ترجمه: تشنه‌لب م. و همکاران. انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۷۸.
7. Agrawal, J.D., Deo M.C., 2002. "On-line wave prediction", J. Marine Structures. 15, 57-74.
8. Kazeminezhad, M.H., Etemad-Shahidi, A., Mousavi, S.J., 2005. "Application of fuzzy inference system in the prediction of wave parameters", J. Ocean Eng. 32, 1709-1725.
9. Ozger m., Sen Z., "Prediction of wave parameters by using fuzzy logic approach" Journal of Ocean Engineering, 2006.
۱۰. زنگنه م.، "پیش‌بینی امواج ناشی از باد با ترکیب روش ژنتیک و فازی در دریاچه میثیگان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۴.
11. Salas, J.D. et al., 1980, "Applied modeling of hydrological time series", Littleton, Co, USA: Water Resources Publication.
12. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Eng. Research Center, 2003. "Coastal Engineering Manual", Washington, DC.
13. Goda, Y., 1974. "Estimation of wave statistics from special information", Ocean Wave Measurement and Analysis. ASCE, 320-337
14. Fuller, R., 1999. "Fuzzy logic and neural nets in intelligent systems" J. Information Systems. 17, 74-97.
15. Takagi, T. and Sugeno, M., 1985. "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", J. IEEE Trans. Systems, Man & Cybernetics. 15, 116-132.
16. Sorensen, R.M., 1993. "Basic Wave Mechanics For Coastal and Ocean Engineers", John Wiley & Sons.
17. Dean, R.,G., Dalrymple, R.,A, 1984 " Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", Prentice-Hall.