



## استخراج معادله بالاروی امواج دریا با استفاده از مدل GEP

فرزاد زند<sup>۱\*</sup>، محمد ذونعمت کرمانی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان، سیرجان، ایران  
farzad.zand.1991@gmail.com  
۲- دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران zounemat@uk.ac.ir

### چکیده

در روابط تجربی بالاروی امواج، پارامتری به نام شاخص نوع شکست وجود دارد که معمولاً با تعریف محدوده‌های خاص برای این شاخص، میزان بالاروی موج تخمین زده می‌شود. بنابراین هدف از این مطالعه، ارائه‌ی یک رابطه جامع برای بالاروی امواج دریا توسط روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) می‌باشد. در این راستا، داده‌های پژوهش "وان‌درمیر و استم (Van der Meer and Stam)" به کار گرفته شده‌اند. سه معیار خطای "ضریب راندمان"، "ریشه میانگین مربعات خطا" و "ضریب همبستگی" میزان دقت مدل‌سازی را مشخص ساخته‌اند. نتایج، کارایی مطلوب معادله بالاروی استخراج شده از مدل GEP را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: مدل GEP، مهندسی ساحل، فرمول بالاروی موج، روش فراکاوشی

### ۱- مقدمه

بالاروی امواج در اثر حرکت امواج ناشی از باد به سمت ساحل و شکست این امواج در منطقه ساحلی واقع می‌گردد. شکست امواج باعث آزاد شدن انرژی آن‌ها و بالاروی موج بر ساحل می‌گردد. در عین حال خوردگی ساحل، تغییر شیب آن و فرسایش پشته‌ها در پشت خط ساحل، از خطرات بالاروی امواج محسوب می‌شود. به همین دلیل طراحی ایمن سازه‌های ساحلی همچون دیواره‌های ساحلی و آب‌شکن‌ها وابسته به تغییرات تراز آب با در نظر گرفتن نوسانات جزر و مدی می‌باشد. در روابط پیش‌بینی بالاروی امواج پارامتری به نام شاخص نوع شکست وجود دارد که مقدار آن برای بسترهای مختلف متفاوت است. این عدم قطعیت در داده‌های آزمایشگاهی منجر به کاهش میزان اعتمادپذیری نسبت به نتایج به دست آمده می‌شود. از طرف دیگر روش‌های تجربی قادر به پیش‌بینی بالاروی امواج به طور کامل نمی‌باشند و انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه اجتناب‌ناپذیر است [۱]. در مقطعی نیز جایگزینی روش‌های عددی با روش‌های تجربی مورد توجه قرار گرفت. مشکلات زیادی در تحلیل پدیده موج با روش‌های تحلیلی و عددی وجود دارد. کاستی‌هایی نظیر عدم دید کلی در برخورد با موضوع بالاروی موج و نیازمندی به ایجاد المان‌های توصیفی در کنار المان‌های ریاضی، بررسی بالاروی امواج در شرایط مختلف را به صورت مدل عددی یا تحلیلی با چالش روبرو می‌کند. همچنین نباید از نیاز به فرضیات محاسبات عددی غافل شد که منشأ کاهش دقت در مدل‌سازی هستند. اما روش برنامه‌ریزی بیان ژن (که مبنای تحقیق حاضر قرار گرفته است) به علت درک پدیده موج با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده و وارد نشدن به فرضیات مسأله در مبحث سیالات، فضای جامع‌تر و منعطف‌تری را در



مدل سازی بازتاب می دهد به طوری که این روش به دسته بندی های خاص در یک موضوع واحد نمی پردازد و لذا از کلیه داده های موجود، استفاده لازم برده می شود.

## ۲- سابقه تحقیق

رسولی مقدم و همکاران (۱۳۹۱) به کمک ماشین های بردار پشتیبان به پیش بینی ارتفاع بالاروی موج پرداخته اند. ۱۹۰ داده آزمایشگاهی برای آموزش مدل و ۸۱ داده برای ارزیابی ماشین بردار پشتیبان آموزش دیده به کار گرفته شده است. نتایج نشان از کارایی این مدل در پیش بینی بالاروی امواج دارد در حالی که روابط تجربی مورد بررسی، خطای قابل توجهی داشته اند [۱]. یگانه بختیاری و حمزه ضیابری (۱۳۹۳) از الگوریتم درختی M5 جهت پیش بینی بالاروی موج در منطقه سواش استفاده کردند و میزان تأثیرگذاری پارامترهای هیدرودینامیکی نظیر پارامترهای تشابه شکست، شیب و ارتفاع نسبی موج بر بالاروی موج را نیز مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از برخی شاخص های آماری (بایاس، ریشه میانگین مربعات خطا، شاخص پراکندگی و ضریب همبستگی) نشان داده شده است که تکنیک درخت تصمیم در مقایسه با فرمول های تجربی رایج از دقت بیشتری در پیش بینی بالاروی نسبی موج در منطقه سواش برخوردار بوده است [۲]. Najafi-Jilani and Monshizadeh (۲۰۱۰) به مدل سازی بالاروی امواج در فلومی به طول ۲۵ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۲/۵ متر پرداختند. شبیه سازی با ایجاد موج منظم توسط دستگاه موج ساز بر روی موج شکن انجام شده است. با تغییر پارامترهای مختلف نظیر چینش آنتیفرها، شیب موج شکن، ارتفاع موج نزدیک شونده، پرپود موج و عمق آب در محدوده های خاص به نتایج مناسبی از بالاروی امواج رسیدند و در انتها با استفاده از روش بهترین برازش توانی، روابطی به منظور پیش بینی بالاروی امواج منظم ارائه نمودند [۳]. Hsu et al. (۲۰۱۲) یک مدل مرتبه بالای عددی را برای امواج منظم بر روی سازه های شیب دار توسعه دادند. به این منظور پارامترهای مورد نظر را در فلومی آزمایشگاهی با طول ۲۵ متر، عرض ۰/۵ متر و عمق ۰/۶ متر و در سه شیب مختلف ثبت کردند تا داده های ۱۶۰ مورد شبیه سازی در دسترس قرار گیرد. علاوه بر این، رابطه ای تجربی برای بالاروی نسبی با دو پارامتر عدد ایرببارن و شیب سازه پیشنهاد دادند که نتایج قابل قبولی داشته است. رویکرد مطرح شده به عنوان نقطه آغازی برای تحقیق در مورد بالاروی امواج نامنظم و سازه های ساحلی با هندسه پیچیده بوده است [۴]. Abolfathi et al. (۲۰۱۶). درخت تصمیم M5 را برای بالاروی موج با داده هایی آزمایشگاهی آماده اند. روابط موجود در پیش بینی بالاروی موج منحصراً بر اساس رگرسیون آماری در داده های آزمایشگاهی بنیان نهاده شده اند و رویکردهای تجربی با محوریت مدل های رگرسیونی به دلایل خطی بودن، نرمال بودن و ثابت بودن واریانس اشکال عمده ای دارند. مدل درختی M5 با پارامترهای هیدرودینامیکی و ژئومورفولوژی بالاروی موج را با ترکیب های متفاوت ورودی به مدل، پیش بینی کرده است و فرمول هایی برای پیش بینی بالاروی نسبی ( $R_{u2\%/h}$ ) ارائه کرده است. نتایج حاصل شده توانایی مورد انتظار الگوریتم M5 را در یافتن ارتباط پیچیده میان پارامترهای ورودی و خروجی اثبات کرده است. همچنین مدل درختی با داشتن قدرت زیاد در آموزش و پیش بینی بالاروی، دقت بیشتری از مدل های رگرسیونی موجود داشته است. روابط ساده و معنی دار استخراجی توسط روش M5، لحاظ کردن اهمیت هر یک از پارامترها در پیش بینی بالاروی موج را نیز نشان داده است [۵].

تحقیقات انجام شده در مبحث بالاروی موج این نتیجه را در پی دارد که زمانی که روابط تجربی و روش های تحلیلی و عددی از حل مسأله با دقت مطلوب ناتوان باشند و یا روش های محاسباتی بسیار پیچیده طلب گردد، روش های هوشمند همچون برنامه ریزی بیان ژن (به عنوان یک راه حل) قادر به شبیه سازی مسائل پیچیده غیرخطی نظیر بالاروی امواج هستند.



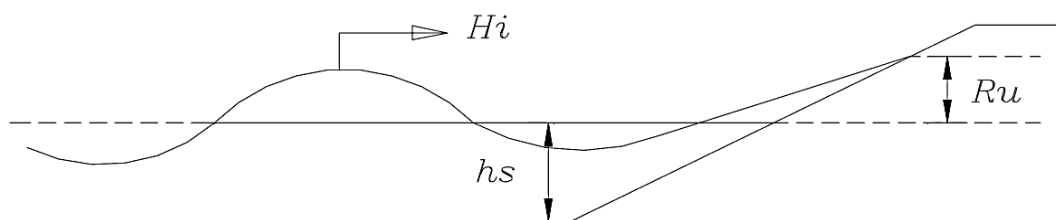
### ۳- تشریح مدل سازی

متغیرهای تحقیق از پارامتر تشابه موج یا شاخص نوع شکست موج ( $\xi$ ) و بالاروی نسبی موج ( $R_{u2\%} / H_s$ ) تشکیل شده‌اند. این دو متغیر از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به تحقیق "وان درمیر و استم" (Van der Meer and Stam, 1992) جمع‌آوری گردیده‌اند [۶]. روابط تجربی ارائه شده توسط "وان درمیر و استم" و روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر را شامل شده‌اند. روابط تجربی مذکور به تفکیک جنس بستر در معادله‌های ۱ (پوشش سنگی نفوذناپذیر) و ۲ (پوشش سنگی نفوذپذیر و همگن) ارائه گردیده‌اند.

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = \begin{cases} 0.96 \xi_m & \text{for } 1.0 < \xi_m \leq 1.5 \\ 1.17 (\xi_m)^{0.46} & \text{for } \xi_m > 1.5 \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = \begin{cases} 0.96 \xi_m & \text{for } 1.0 < \xi_m \leq 1.5 \\ 1.17 (\xi_m)^{0.46} & \text{for } 1.5 < \xi_m \leq 3.10 \\ 1.97 & \text{for } 3.10 < \xi_m < 7.5 \end{cases} \quad (2)$$

برنامه‌ریزی بیان ژن یک روش داده‌محور فراکوشی می‌باشد که دارای مزیت تبیین معادله برازش پس از شبیه‌سازی می‌باشد. این در حالی است که سایر روش‌های داده‌محور توانایی انجام این کار را ندارند. با توجه به پارامترهای ورودی و ساختار روابط تجربی،  $\xi_m$  به عنوان پارامتر ورودی به مدل GEP تعریف شده است تا خروجی مدل ( $R_{u2\%} / H_s$ ) به دست آید. بالاروی موج در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱: طرح شماتیک از بالاروی موج [۷]

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، ۲۵۶ ردیف بوده‌اند. جهت از بین بردن اثر توالی یکسان بودن برخی از مشخصات داده‌ها، در ابتدا مقادیر تصادفی (بین صفر و یک) به هر ردیف اختصاص داده شده است و بعد از آن، ردیف‌ها بر اساس مقادیر تصادفی از کوچک به بزرگ مرتب شده‌اند. در ادامه پس از به هم زدن  $k$  تایی ( $k=4$ )، ۳ دسته برای آموزش و دسته باقیمانده برای آزمون به کار رفته است و با ۴ بار تکرار هر ۴ دسته (کل داده‌ها) مورد آزمون قرار گرفته‌اند. با توجه به تعداد داده‌ها (۲۵۶ ردیف)، هر یک از ۴ دسته دارای ۶۴ ردیف بوده‌اند که هر ردیف، از پارامترهای ورودی به مدل و خروجی از آن تشکیل شده است. بنابراین در هر تکرار، ۷۵ درصد داده‌ها (۳ دسته) برای آموزش و ۲۵ درصد باقیمانده (۱ دسته) جهت آزمون مدل به کار رفته است.

جهت ارزیابی روش‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر از ضریب راندمان شبیه‌سازی ( $COE$ )، ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) و ضریب همبستگی ( $R$ ) استفاده شده است (روابط ۳ تا ۵).



$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(X_m)_i - (X_p)_i]^2}{\sum_{i=1}^n [(X_m)_i - (\bar{X}_m)_i]^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(X_m)_i - (X_p)_i]^2} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_m)_i - (\bar{X}_m)_i] [(X_p)_i - (\bar{X}_p)_i]}{\left( \sum_{i=1}^n [(X_m)_i - (\bar{X}_m)_i]^2 \right)^{0.5} \left( \sum_{i=1}^n [(X_p)_i - (\bar{X}_p)_i]^2 \right)^{0.5}} \quad (5)$$

$(X_m)_i$  مقدار اندازه‌گیری شده،  $(X_p)_i$  مقدار پیش‌بینی شده با مدل،  $(\bar{X}_m)_i$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده،  $(\bar{X}_p)_i$  میانگین مقادیر پیش‌بینی شده با مدل و  $n$  تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده یا پیش‌بینی شده هستند. هر چه مقادیر خروجی مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده انطباق بیشتری داشته باشند، شاخص  $RMSE$  به صفر نزدیکتر می‌باشد و واضح است که قرابت بیشتر  $COE$  و  $R$  به یک، خطای کمتر مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

#### ۴- نتایج و بحث

مدل "وان‌درمیر و استم" از مزیت استخراج از داده‌های مورد پژوهش، سود می‌برد. با این وجود در شرایط یکسان با مدل GEP (ورودی به هر دو مدل فقط متغیر  $\xi_m$  بوده است)، هرچند عملکرد مطلوب‌تری در مرحله آموزش ارائه کرده است (کسب مقدار ۰/۵۸۲ توسط روابط تجربی برای میانگین شاخص  $COE$  در مرحله آموزش در جدول ۱) اما از ادامه این روند در مرحله آزمون بازمانده است و نتایج روش بیان ژن بر نتایج روابط تجربی برتری یافته است (کسب مقدار ۰/۵۹۲ توسط مدل GEP برای میانگین شاخص  $COE$  در مرحله آزمون در جدول ۱).

جدول ۱: نتایج روابط تجربی و روش برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد بالاروی موج

مرحله آزمون			مرحله آموزش			دسته	مدل
$R$	$RMSE$	$COE$	$R$	$RMSE$	$COE$		
۰/۸۳۵	۰/۲۲۲	۰/۵۸۹	۰/۷۹۲	۰/۲۸۲	۰/۵۶۷	۱	Van der Meer and Stam
۰/۷۵۱	۰/۲۶۲	۰/۵۵۶	۰/۷۷۴	۰/۲۶۲	۰/۵۹۹	۲	
۰/۷۱۵	۰/۳۲۴	۰/۴۲۳	۰/۸۲۹	۰/۲۴۷	۰/۶۲۶	۳	
۰/۸۳۸	۰/۲۷۶	۰/۶۴۲	۰/۷۸۱	۰/۲۶۶	۰/۵۳۸	۴	
۰/۷۸۴	۰/۲۷۱	۰/۵۵۲	۰/۷۹۴	۰/۲۶۴	۰/۵۸۲	میانگین دسته‌ها	
۰/۷۶۹	۰/۲۲۸	۰/۵۶۷	۰/۷۶۵	۰/۲۷۸	۰/۵۷۹	۱	GEP
۰/۸۱۵	۰/۲۴۰	۰/۶۲۸	۰/۷۹۵	۰/۲۷۷	۰/۵۵۲	۲	
۰/۷۴۱	۰/۲۹۳	۰/۵۲۷	۰/۷۸۰	۰/۲۵۴	۰/۶۰۵	۳	
۰/۸۰۵	۰/۲۷۵	۰/۶۴۶	۰/۷۵۴	۰/۲۵۷	۰/۵۶۸	۴	
۰/۷۸۲	۰/۲۵۹	۰/۵۹۲	۰/۷۷۳	۰/۲۶۶	۰/۵۷۶	میانگین دسته‌ها	

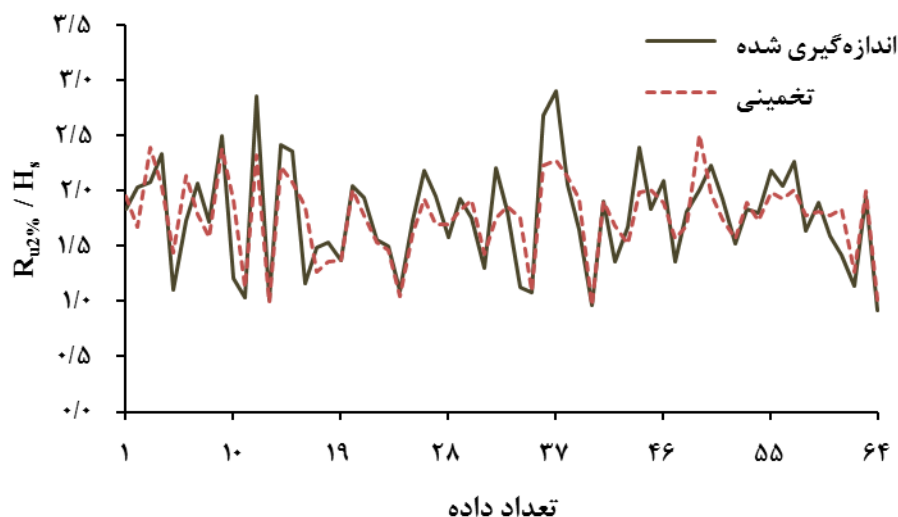


پس از محرز شدن عملکرد مطلوب روش برنامه‌ریزی بیان ژن در مدل‌سازی بالاروی نسبی موج، قابلیت استخراج معادله برازش، وجه تمایز این روش با سایر روش‌های داده‌محور فراکوشی را آشکار می‌کند. در حقیقت، روش بیان ژن قادر به تابع‌یابی بهینه میان پارامترهای ورودی به مدل و خروجی از آن بوده است. در این راستا، معادله برازش برای مدل برتر (مدل GEP، دسته ۴، با به دست آوردن COE برابر با ۰/۶۴۶ در مرحله آزمون) در رابطه ۶ آورده شده است.

$$R_{u2\%} / H_s = \sqrt{\xi_m} + \sin((\xi_m - 3.747251) \times (-0.06548)) - (0.568363 / \exp(\xi_m^2)) \quad (6)$$

جایی که  $\sin$  و  $\exp$  به ترتیب توابع سینوس و نمایی هستند.

نمودار بالاروی موج برای مدل برتر در مرحله آزمون نیز در شکل ۲ مشخص شده است.



شکل ۲: نمودار بالاروی نسبی موج برای مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مقادیر تخمینی با مدل برتر (مدل GEP، دسته ۴، مرحله آزمون)

## ۵- نتیجه‌گیری

برنامه‌ریزی بیان ژن به عنوان روش مورد بررسی در تحقیق حاضر، نقش مدل‌سازی بالاروی امواج را به عهده گرفته است و با تدوین رابطه برازشی میان پارامترهای ورودی و خروجی در مدل، گسترش آن رابطه در موارد مشابه را مقدور ساخته است. به بیان دیگر، مدل GEP قادر به ارائه‌ی معادله برای برآورد بالاروی نسبی موج بوده است که به دلیل افزایش دقت نسبت به روابط تجربی از قابلیت تعمیم و کاربرد بیشتری برخوردار می‌باشد.



## مراجع

- [۱] رسولی مقدم، ق.، ملک محمدی، ا.، امیری، ر. بررسی کارایی ماشین‌های بردار پشتیبان در پیش‌بینی ارتفاع بالاروی امواج، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۹-۲۱ اردیبهشت، ۱۳۹۱.
- [۲] یگانه‌بختیاری، ع.، حمزه‌ضیابری، س.م. پیش‌بینی بالاروی امواج در منطقه سواش ساحلی با استفاده از الگوریتم M5 درخت تصمیم، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۷-۱۸ اردیبهشت، ۱۳۹۳.
- [3] Najafi-Jilani A, Monshizadeh M. Laboratory investigations on wave run-up and transmission over breakwaters covered by antifer units. *Scientia Iranica*; 17(6): 457-470, 2010.
- [4] Hsu TW, Liang SJ, Young BD, Ou SH. Nonlinear run-ups of regular waves on sloping structures. *Natural Hazards and Earth System Sciences*; 12: 3811-3820, 2012.
- [5] Abolfathi S, Yeganeh-Bakhtiary A, Hamze-Ziabari SM, Borzooei S. Wave runup prediction using M5 model tree algorithm. *Ocean Engineering*; 112: 76-81, 2016.
- [6] van der Meer JW, Stam CJM. Wave runup on smooth and rock slopes of coastal structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*; 118(5): 534-550, 1992.
- [۷] شیریان، ن.، شفیعی‌فر، م.، آق‌تومان، پ.، چگینی، و. مطالعه مدل آزمایشگاهی و ارائه روابط جدید جهت تعیین میزان پایین‌آمدگی امواج نامنظم از موج‌شکن‌های شکل‌پذیر، مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال ۳، شماره ۱، صص. ۴۵-۵۵، بهار ۱۳۸۶.