

## تخمین عمق آبشستگی در پای سازه‌های ساحلی با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک

عباس یگانه‌بختیاری<sup>۱\*</sup>، علی پورزنگبار<sup>۲</sup> و فاطمه حاجی‌ولیئی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۳</sup> استادیار مهندسی سواحل، مؤسسه ملی اقیانوس‌شناسی

### چکیده

آبشستگی در پای سازه‌های ساحلی یکی از عوامل اصلی آسیب یا خرابی این سازه‌ها می‌باشد. بنابر این، تخمین دقیق عمق بیشینه آبشستگی در پای سازه‌های ساحلی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مطالعه، از روش روش برنامه‌ریزی ژنتیک برای تخمین عمق بیشینه آبشستگی استفاده شده است. برای آموزش و آزمایش مدل‌های ایجاد شده به وسیله شبکه عصبی و برنامه‌ریزی ژنتیک از ۴۵ مجموعه داده که از مقالات منتشر شده استخراج شده‌اند استفاده شده است. برای مقایسه عملکرد مدل‌های ایجاد شده و روابط موجود از شاخص‌های آماری مانند ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب پراکندگی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که روش برنامه‌ریزی ژنتیک مدل‌های به مراتب دقیق‌تری نسبت به روابط تجربی ارائه می‌دهد. علاوه بر این، از آنجائی که برنامه‌ریزی ژنتیک رابطه‌ای صریح بین متغیرها ارائه می‌کند می‌تواند به عنوان یک معیار برای تخمین عمق آبشستگی استفاده شود.

**واژگان کلیدی:** برنامه‌ریزی ژنتیک، روابط تجربی، سازه ساحلی، عمق آبشستگی.

### ۱- مقدمه

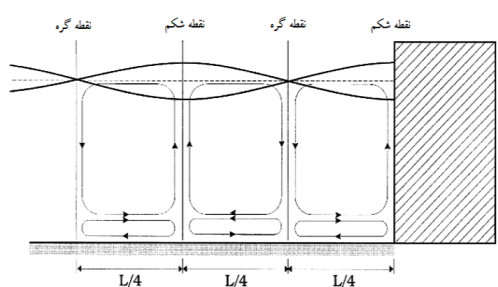
کاربرد برای تخمین آبشستگی در پای سازه‌های ساحلی حائز اهمیت است.

Xie [۳] به صورت آزمایشگاهی الگوی آبشستگی را در مجاورت موجشکن‌های دیوار قائم تحت اثر امواج ایستا مطالعه کرد. او نشان داد که بسته به خصوصیات موج تابشی و رسوبات بستر دو الگوی مختلف آبشستگی در پای سازه وجود دارد. در نهایت Xie عمق بیشینه آبشستگی را به صورت تابعی از عمق آب در پای سازه، ارتفاع موج تابشی و طول موج تابشی به صورت معادله (۱) بیان کرد:

$$\frac{S}{H} = \frac{0.4(or 0.3)}{\left[ \sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \right]^{1.35}} \quad (1)$$

در رابطه فوق، ضریب ۰/۴ برای رسوبات نسبتاً ریزدانه و ضریب ۰/۳ برای رسوبات نسبتاً درشت‌دانه به کار می‌رود.  $h$  عمق آب در پای سازه و  $L$  طول موج در آب عمیق است. شکل (۱) الگوی آبشستگی بیان شده توسط Xie را در دو حالت رسوبات نسبتاً ریزدانه و رسوبات نسبتاً درشت‌دانه نشان می‌دهد. همان طور که از شکل مشخص است، بیشینه عمق آبشستگی در حالت رسوبات ریزدانه بیشتر از رسوبات درشت‌دانه است. ولی با این

سازه‌های ساحلی به منظور حفاظت ساحل از نیروی امواج و تأمین محیطی آرام برای بارگیری کشتی‌ها و ... ساخته می‌شوند. یکی از عوامل اصلی خرابی یا ناکارآمدی سازه‌های ساحلی پدیده آبشستگی است. ناپایداری سازه‌های ساحلی در نتیجه آبشستگی در گزارش‌های لی لی کراپ و هیوز در سال ۱۹۹۳ و اومیراکی در سال ۱۹۹۴ آمده است [۱]. آبشستگی که در نتیجه قرار گرفتن سازه در محیط دریایی و به دلیل اندرکنش موج تابشی، سازه و رسوبات بستر، در پای سازه به وقوع می‌پیوندد عبارت از انتقال رسوبات بستر در مجاورت سازه به وسیله نیروهای هیدرودینامیکی است [۲]. به دلیل مکانیزم پیچیده آبشستگی در محیط‌های دریایی ایجاد یک مدل جامع تجربی برای تخمین عمق بیشینه آبشستگی امکان‌پذیر نیست. با این وجود، محققان بسیاری این پدیده را از جنبه‌های مختلف با کارهای آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. محققانی مانند Sumer و Fredsøe [۱]، Xie [۳]، Fowler [۴]، Sutherland و همکاران [۵] و Tsai و همکاران [۶] با انجام آزمایشاتی موفق به ارائه روابط تجربی برای پیش‌بینی بیشینه عمق فرسایش شدند. این روابط ساده و قابل فهم هستند؛ ولی به علت دقت کم و محدود بودن کاربرد، کارایی کافی را ندارند. لذا ایجاد مدل‌هایی با دقت کافی و محدودیت کم



شکل ۲- امواج ایستا و جریانات دائمی در مجاورت موج شکن دیوار قائم Fredsøe و Sumer [۱]

همچنین آن‌ها تفاوت میان میزان آبشستگی در موج شکن- های شیب‌دار و دیوار قائم را در اختلاف میزان ضریب انعکاس عنوان کردند.

Fredsøe و Sumer [۱] رابطه تجربی خود را همانند رابطه Xie ارائه کردند با این تفاوت که در رابطه Fredsøe و Sumer ضریب ثابت به صورت تابعی از شیب سازه بیان شده بود. رابطه (۳) فرمول پیشنهادی Fredsøe و Sumer [۱] را برای تخمین بیشینه عمق آبشستگی تحت اثر امواج ناشکنا نشان می‌دهد:

$$\frac{S}{H} = \frac{F(\alpha)}{\left[ \sinh \left( \frac{2\pi h}{L} \right) \right]^{1.35}} \quad (3)$$

$$F(\alpha) = 0.3 - 1.77 \exp\left(-\frac{\alpha}{15}\right), \quad 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

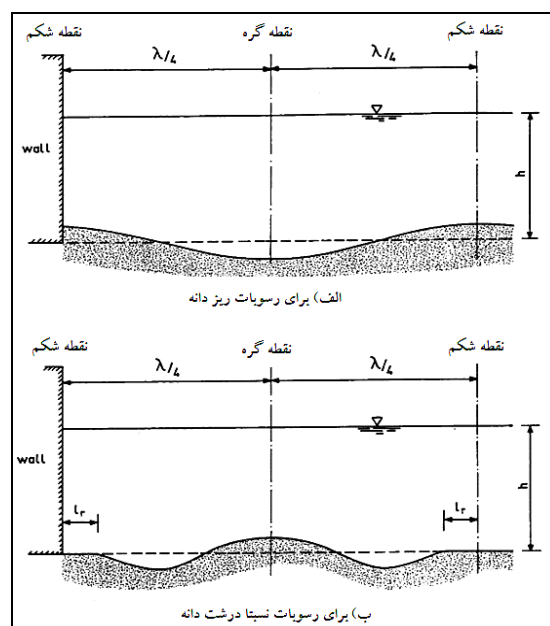
در رابطه فوق  $\alpha$  شیب سازه برحسب درجه است. همان طور که بیان شد هر کدام از محققان با بررسی آزمایشگاهی عوامل مؤثر بر آبشستگی مدل‌های تجربی را توسعه داده‌اند. ولی از آن‌جا که این روابط تجربی مبتنی بر روش‌های رگرسیون کلاسیک است؛ لذا دقت کافی برای برآورد میزان بیشینه عمق آبشستگی ندارند. در این مطالعه، از روش فوق ابتکاری و تکاملی برنامه‌ریزی ژنتیک و نیز روش شبکه عصبی مصنوعی برای ارائه مدل‌هایی با دقت کافی استفاده شده است. همچنین نتایج مدل‌سازی‌ها با شاخص‌های آماری مقایسه شده‌اند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- برنامه‌ریزی ژنتیک

برنامه‌ریزی ژنتیک که اولین بار توسط Koza [۷] معرفی شد، شاخه‌ای از الگوریتم ژنتیک است که جزء الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد [۸]. برنامه‌ریزی ژنتیک همانند الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند. با این تفاوت که الگوریتم ژنتیک بر روی رشته‌های بیتی ولی برنامه‌ریزی ژنتیک از ساختارهای درختی برای تولید جواب بهینه استفاده می‌کند.

وجود، موقعیت وقوع بیشینه عمق آبشستگی در حالت رسوبات درشت‌دانه (0.125 L) نزدیک‌تر از مواد ریزدانه (0.25 L) است.



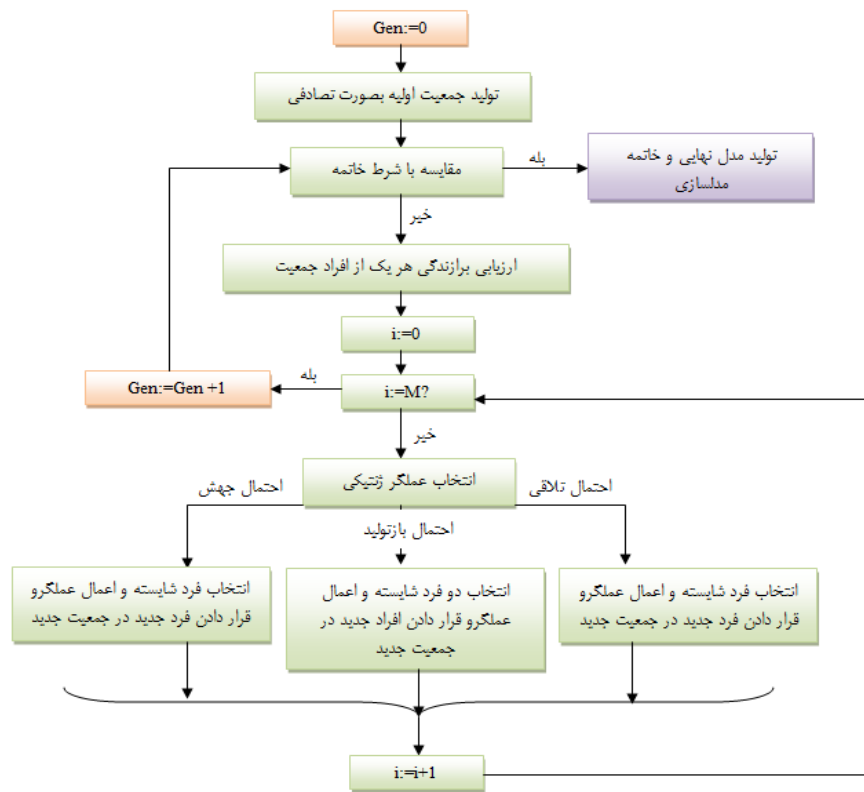
شکل ۱- الگوی آبشستگی بیان شده توسط Xie [۳]:

الف) رسوبات نسبتاً ریزدانه، ب) رسوبات نسبتاً درشت‌دانه

Fowler [۴] پدیده آبشستگی را در مجاورت دیوار ساحلی قائم تحت اثر امواج شکن به صورت آزمایشگاهی مطالعه کرد. او به این نتیجه رسید که بیشینه عمق آبشستگی در حالت امواج نامنظم کمتر از ارتفاع موج ناشکنا است. وی همچنین از عمق نسبی آب در پای سازه  $(d_w/L)$  برای ارائه رابطه تجربی خود استفاده کرد. رابطه (۲) فرمول توسعه داده شده توسط Fowler را نشان می‌دهد که برای محدوده‌های خاصی از تیزی موج و عمق آب در پای سازه قابل کاربرد است.

$$\frac{S}{H} = \sqrt{22.72 \frac{d_w}{L} + 0.25} \quad (2)$$

Sumer و Fredsøe [۱] با بررسی آبشستگی در مجاورت موج‌شکن‌های شیب‌دار و دیوار قائم تحت اثر امواج ناشکنا به این نتیجه رسیدند که عامل اصلی آبشستگی اندرکنش جریانات دائمی ناشی از تشکیل امواج ایستا با رسوبات بستر است. آبشستگی در نتیجه اندرکنش این جریانات دائمی که شامل سلول‌های چرخشی کف و بالا هستند با رسوبات بستر رخ می‌دهد. شکل (۲) چگونگی شکل‌گیری این جریانات دائمی را در مجاورت موج‌شکن دیوار قائم نشان می‌دهد.



شکل ۳- گام‌های اجرایی برنامه‌ریزی ژنتیک koza [۷]

جدول ۱- محدوده داده‌های استفاده شده برای مدل سازی

$\alpha^\circ$		$Cr$		$Ir$		$h/L$		تعداد	منبع داده
max	min	max	min	max	min	max	min		
۹۰	۳۰	۰/۹	۰/۱۹۹	۰	۰	۰/۱۹۹	۰/۴۰۵	۲۸	[۳] Xie
۹۰	۹۰	۰/۹	۰/۹	۰/۳۶۱	۰/۱۷۰	۰/۱۷۵	۰/۰۵	۳۹	Sumer و [۱] Fredsoe
۹۰	۹۰	۰/۹	۰/۹	۰/۴۲۱	۰/۳۲۱	۰/۰۱۵	-۰/۰۰۹	۲۲	[۴] Fowler
۹۰	۳۰۰	۰/۹	۰/۱۹۹	۰/۴۲۱	۰	۰/۱۹۹	-۰/۰۰۹	۸۰	Total

مختلف انتخاب مانند رتبه‌بندی<sup>۱</sup> (افراد با برازندگی بیشتر رتبه-های بالاتری کسب می‌کنند) و یا انتخاب تورنمتی<sup>۲</sup> یا مسابقه‌ای (از مجموعه مدل‌های موجود مدل‌هایی به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و این افراد بر اساس برازندگی مرتب می‌شوند و برازنده‌ترین آن‌ها انتخاب می‌شوند) افرادی برای اعمال عملگرهای ژنتیکی مانند تلاقی<sup>۳</sup> و یا جهش<sup>۴</sup> انتخاب می‌شوند.

در روش برنامه‌ریزی ژنتیک هیچ ساختار از قبل تعیین شده-ای بین متغیرهای ورودی و خروجی وجود ندارد و ساختار مدل و نیز ضرایب بهینه طی فرآیند مدل سازی تولید می‌شوند [۹]. ساختارهای درختی برنامه‌ریزی ژنتیک از مجموعه عملگرها یا توابع (که همان عملگرهای ریاضی و یا منطقی مورد استفاده در روابط است) و مجموعه ترمینال‌ها یا پایانه (که متغیرها و اعداد ثابت مسئله مورد بررسی را در بر می‌گیرد) تشکیل شده‌اند [۷].

برنامه‌ریزی ژنتیک کار مدل سازی را با انتخاب تصادفی مدل-هایی از فضای موجود شروع می‌کند. سپس بر اساس روش‌های

1- Ranking selection  
2- Tournament selection  
3- Crossover  
4- Mutation

در این مدل‌ها عملگرهای جمع (+)، تفریق (-)، ضرب (×)، تقسیم (÷)، جذر (sqrt)، توان نمایی متغییر مستقل (exp)، توان دوم متغییر مستقل ( $x^2$ )، توان اول متغییر مستقل ( $x$ )، سینوس و کسینوس (sin, cos)، عملگر لگاریتم طبیعی (Ln)، سینوس هایپربولیک (sinh) برای ایجاد معادلات حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) استفاده شده‌اند. همان طور که در جدول (۲) نیز نشان داده شده است با تغییر نوع عملگرها دقت مدل‌های تولید شده نیز طبیعتاً تغییر می‌کند. لذا برای به دست آوردن بهترین مدل حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک چهار مدل با عملگرهای مختلف در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- عملگرهای استفاده شده برای ایجاد مدل‌ها

مدل	مجموعه عملگرهای موجود در مدل
GP 1	$+, -, \times, \div, \sin, \cos, \exp, \sqrt{x}, x^2, x, \ln x$
GP 2	$+, -, \times, \div, \sinh, x^2, x$
GP 3	$+, -, \times, \div, \sqrt{x}, x$
GP 4	$+, -, \times, \div, \sinh, \exp, x$

پارامترهای لازم برای ایجاد مدل‌های GP طبق مقادیر پیش-فرض برنامه Gene xpro tool version 4 در نظر گرفته شده-اند. برای ارزیابی میزان خطای مدل‌های توسعه داده شده و روابط تجربی موجود از شاخص‌های آماری مانند شاخص پراکندگی (SI)، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$R^2 = \frac{\sum_i [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_i [(x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i [(y_i - x_i)^2]}{N}} \quad (5)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (6)$$

در رابطه اخیر،  $x_i$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $y_i$  مقادیر اندازه-گیری شده،  $N$  تعداد داده‌ها،  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  به ترتیب مقادیر میانگین پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده می‌باشند.

جدول (۳) نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده با برنامه‌ریزی ژنتیک را برای داده‌های Xie [۳] به ازای عملگرهای پیش‌فرض

این عملگرهای ژنتیکی به افراد انتخاب شده فرزندان<sup>۱</sup> تولید می-شوند. لازم به ذکر است که عملگر تلاقی ژن یا والد مربوطه را حفظ می‌کند ولی جهش باعث تغییر ناگهانی در ساختارهای درختی می‌شود [۹]. فرآیند مدل‌سازی با توجه به معیار خاتمه ادامه می‌یابد و زمانی که این معیار ارضا شود، بهترین مدل یا رابطه توسط برنامه تولید می‌شود. شکل (۳) گام‌های اجرایی برنامه‌ریزی ژنتیک را برای رسیدن به جواب بهینه نشان می‌دهد. در این مطالعه از برنامه Gene xpro tool version 4.0 برای مدل‌سازی استفاده شده است. برای مدل‌سازی از شکل بی‌بعد پارامترهای ورودی و خروجی استفاده گردیده است.

### ۳- داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه از داده‌های آزمایشگاهی Xie [۳]، Fowler [۴] و Sumer و Fredsøe [۱] استفاده شده است. برای افزایش کارایی مدل ایجاد شده از شکل بی‌بعد پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی استفاده شده است. جدول (۱) مقادیر حداقل و حداکثر داده‌های استفاده شده را نشان می‌دهد.

در این مطالعه برای ایجاد مدل‌ها از پارامترهای بی‌بعدی مانند عمق نسبی آب در پای سازه  $h/L$ ، پارامتر تشابه شکست موج ( $l/r$ ) و شیب سازه ( $\alpha$ ) و ضریب انعکاس ( $Cr$ ) استفاده شده است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که با افزایش عمق نسبی آب در پای سازه میزان عمق آبشستگی در پای سازه کاهش می‌یابد [۳]. Sutherland و همکاران [۵] و Ching-Tsai و همکاران [۶] با مطالعات آزمایشگاهی دریافتند که نوع شکست موج قبل از سازه تأثیر به‌سزایی بر میزان آبشستگی در پای سازه‌های ساحلی دارد. آن‌ها همچنین شیب سازه و ضریب انعکاس را به عنوان عوامل مؤثر بر میزان آبشستگی مطرح کردند. از آن جایی که مکانیزم آبشستگی ناشی از امواج شکسته شده<sup>۲</sup> و امواج ناشکنا<sup>۳</sup> متفاوت است لذا تأثیر هر یک از پارامترها به صورت مجزا برای هر یک از مجموعه داده‌های موجود بررسی شده است. برای توسعه مدل‌ها با GP مجموعه عملگرهای متفاوتی برای رسیدن به مدل بهینه انتخاب شده است. جدول (۲) مجموعه عملگرهای مختلف و نیز پارامترهای ابتدایی برای ایجاد مدل برنامه‌ریزی ژنتیک را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که مجموعه عملگرهای GP 2، GP 3، GP 4 استفاده شده در روابط تجربی است.

1- Offspring  
2- Broken waves  
3- Non-breaking

لازم به یادآوری است که برای ایجاد مدل‌ها از پارامترهای ورودی و خروجی بدون بعد استفاده شده است. لذا عمق آبشستگی نسبی محاسباتی و مشاهداتی و کلیه پارامترهای ورودی بدون بعد هستند. با توجه به شکل (۴) در می‌یابیم که رابطه تجربی Xie دارای پراکندگی بیشتر و همبستگی کمتری نسبت به مدل ایجاد شده با برنامه‌ریزی ژنتیک است. همچنین با توجه به این که می‌دانیم عمق نسبی آبشستگی نمی‌تواند بزرگ‌تر از یک باشد، ولی با این وجود رابطه Xie [۳] در برخی از حالات این عمق را بزرگ‌تر از یک تخمین زده است.

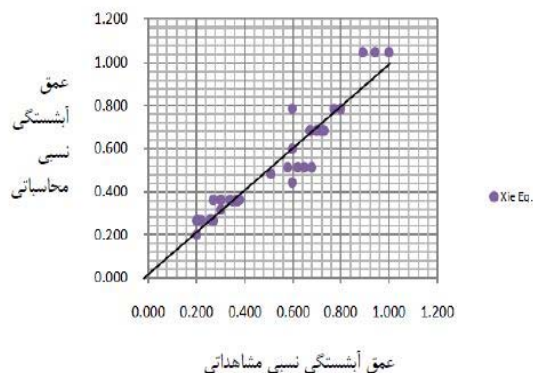
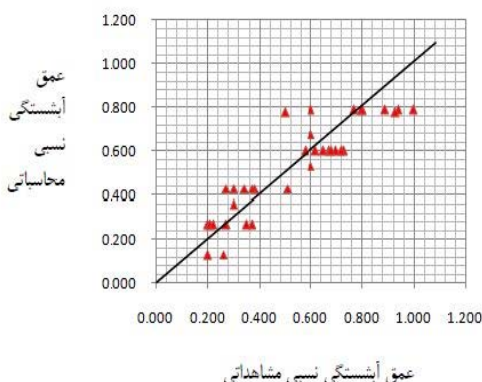
جدول (۴) نتایج حاصل از مدل‌های ایجاد شده توسط برنامه‌ریزی ژنتیک را برای داده‌های Fowler [۴] نشان می‌دهد.

برنامه (GP 1) و عملگرهای استفاده شده در رابطه تجربی (GP 2) نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مدل GP 1 اشاره به مدل ایجاد شده با مجموعه عملگرهای GP 1 دارد. همان طور که نشان داده شده است، مدل‌های ایجاد شده با برنامه‌ریزی ژنتیک اگرچه پیچیده‌تر از رابطه تجربی هستند، اما دقت این مدل‌ها به مراتب بالاتر از رابطه تجربی ارائه شده توسط Xie [۳] است. مدل ایجاد شده با عملگرهای GP 2 هر چند دقت کمی نسبت به مدل ایجاد شده با عملگرهای پیش فرض مدل دارد، ولی به دلیل این که عملگرهای این مجموعه قابل توجیه‌تر هستند (همان عملگرهای استفاده شده توسط Xie [۳] می‌باشند) بنابراین می‌توان این مدل را به عنوان مدل بهینه برای داده‌های Xie با پارامتر ورودی عمق نسبی آب در پای سازه در نظر گرفت.

شکل (۴) مقادیر مشاهداتی و محاسباتی عمق بیشینه آبشستگی را برای هر سه مدل موجود در جدول نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج مدل‌های ایجاد شده برای داده‌های Xie [۳]

پارامتر ورودی	مدل	رابطه	SI	RMSE	R <sup>2</sup>
h/L	Xie [۳]	$\frac{S}{H} = \frac{0.4 \text{ (or } 0.3)}{\left[ \sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \right]^{1.35}}$	۰.۳۴۰	۰.۱۸۰	۰.۶۷۳
	GP 1	$\frac{S}{H} = \left( \cos\left(\frac{1}{h/L}\right) \cos\left(9.91 \frac{h}{L}\right) \right)^2 + \left( \sqrt{\frac{h}{L} + \cos\left(\frac{h}{L}\right)} - 166.5 \frac{h}{L} \right) + \tan^{-1} \sqrt{\exp\left(\left(\frac{h}{L}\right)^4\right) - \frac{h}{L}}$	۰.۱۱۷	۰.۰۹۱	۰.۸۵۱
	GP 2	$\frac{S}{H} = -7.8 \left[ \left(\frac{h}{L}\right)^{\frac{2}{3}} - \sin \frac{h}{L} \right] + 1.32 + \sqrt{\sinh\left(7.4 \frac{h}{L}\right) - \sinh \sqrt[3]{\frac{h}{L}}}$	۰.۱۸۹	۰.۱۰۱	۰.۸۰۵



شکل ۴- مقادیر محاسباتی و مشاهداتی عمق نسبی آبشستگی حاصل از رابطه Xie [۳] و مدل GP 2

جدول ۴- نتایج مدل‌های ایجاد شده برای داده‌های Fowler [۴]

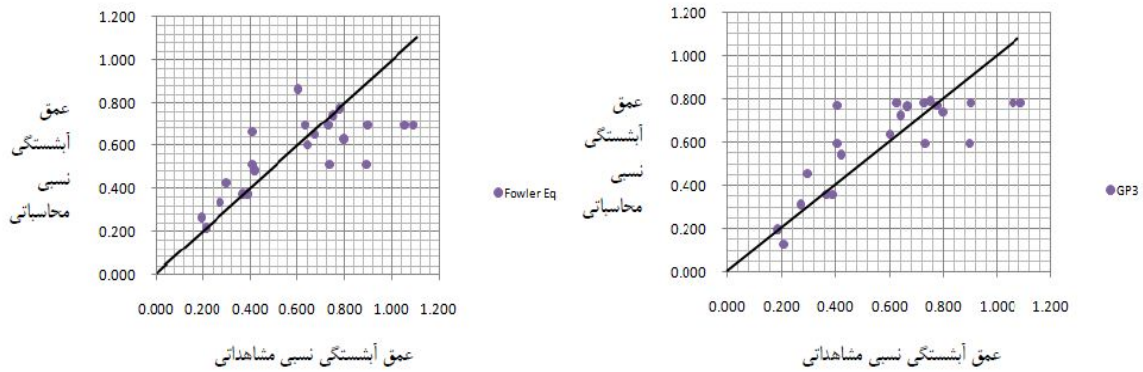
پارامتر ورودی	مدل	رابطه	SI	RMSE	R <sup>2</sup>
	Fowler [۴]	$\frac{S}{H} = \sqrt{22.72 \frac{d_w}{L} + 0.25}$	۱/۱۹۶	۰/۷۲۱	۰/۵۲۹
h/L	GP <sub>۱</sub>	$\frac{S}{H} = \cos(\cos(\frac{-1.68}{h/L})^6) + \cos(7.22 - 2(\frac{h}{L}) - \exp(\frac{h}{L}))^2 + \frac{0.000091}{h/L} + 0.96$	۰/۲۱۱	۰/۱۲۷	۰/۷۶۲
	GP <sub>۳</sub>	$\frac{S}{H} = -18.48(\frac{h}{L})^4 + 5.36(\frac{h}{L})^3 + 1528.3(\frac{h}{L})^2 + 35.9(\frac{h}{L}) + 0.58$	۰/۲۶۲	۰/۱۵۸	۰/۶۲۸

#### ۵- ایجاد مدل جامع و کلی

از نتایج جداول و نمودارهای فوق دیده شد که مدل‌های ایجاد شده با GP دقت به مراتب بالاتری نسبت به فرمول‌های تجربی دارند. حال برای این که یک رابطه کلی برای مجموعه داده‌های استفاده شده در این تحقیق استخراج شود، کل داده‌ها را برای مدل‌سازی کلی استفاده کرده‌ایم و از پارامترهایی مانند عمق نسبی آب در پای سازه، ضریب انعکاس، شیب سازه و نیز پارامتر تشابه شکست موج به عنوان پارامترهای ورودی استفاده کرده‌ایم. شکل (۷) مقادیر مشاهداتی و محاسباتی این مدل‌ها را نشان می‌دهد. از آن جایی که مدل نهایی پارامترهای مؤثر بیشتری را در بر می‌گیرد و محدوده این پارامترها نیز گسترده است لذا دقت بیشتری در تخمین عمق بیشینه آبشستگی در پای سازه‌های ساحلی خواهد داشت. جدول (۶) نتایج آماری مدل‌های ایجاد شده با استفاده از کلداده‌ها را به ازای عملگرهای پیش‌فرض (GP 1) و عملگرهای استفاده شده در روابط تجربی را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود، مدل‌های ایجاد شده توسط برنامه‌ریزی ژنتیک اگر چه پیچیده هستند، ولی دقت نسبتاً قابل قبولی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی دارند.

همان‌طور که دیده می‌شود، رابطه پیشنهادی Fowler دارای پراکندگی و خطای بسیار زیاد و همبستگی کمی در مقایسه با مدل‌های ایجاد شده توسط GP است. باز هم علی‌رغم این که مدل ایجاد شده توسط عملگرهای پیش‌فرض برنامه دارای دقت بیشتر و پراکندگی کمتری هستند، ولی برای سادگی مدل و نیز قابل توجه بودن عملگرهای استفاده شده مدل توسعه داده شده با GP 3 ترجیح داده می‌شود. همچنین شکل (۵) مقادیر محاسباتی و مشاهداتی را برای مجموعه داده‌های Fowler نشان می‌دهد.

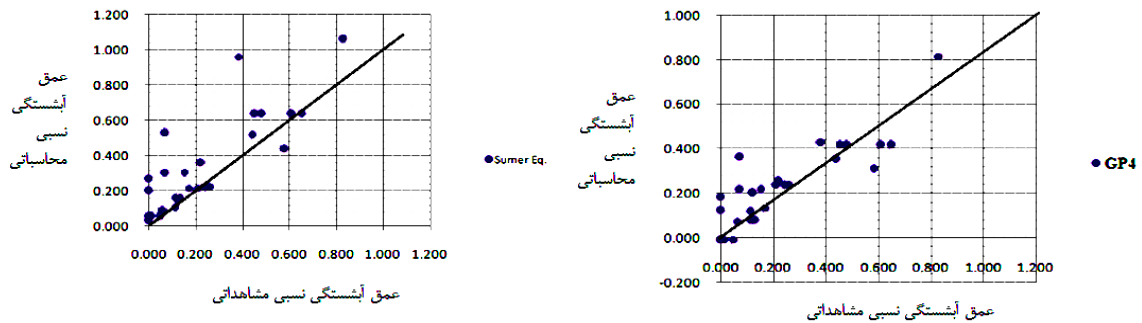
در جدول (۵) نتایج حاصل از مدل‌های ایجاد شده توسط برنامه‌ریزی ژنتیک برای داده Sumer و Fredsøe [۱] نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود رابطه پیشنهادی Sumer و Fredsøe دارای پراکندگی و خطای زیاد و همبستگی کمی در مقایسه با مدل‌های ایجاد شده توسط GP است. همچنین شکل (۶) مقادیر محاسباتی و مشاهداتی را برای مجموعه داده‌های Sumer و Fredsøe نشان می‌دهد. از نتایج جداول و نمودارهای فوق دیده شد که مدل‌های ایجاد شده با GP دقت به مراتب بالاتری نسبت به فرمول‌های تجربی دارند.



شکل ۵- مقادیر محاسباتی و مشاهداتی عمق نسبی آبستگي حاصل از رابطه Fowler [۴] و مدل GP 3

جدول ۵- نتایج مدل های ایجاد شده برای داده های Fredsøe و Sumer [۱]

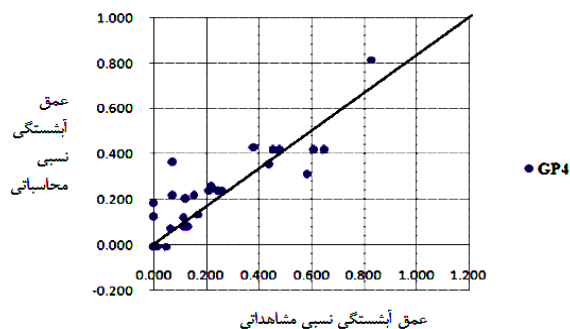
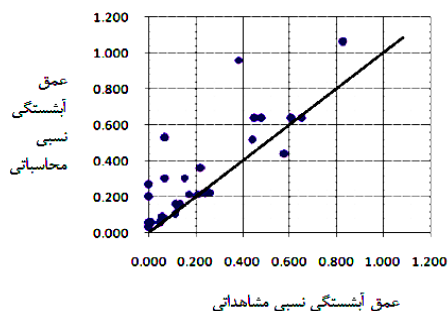
SI	RMSE	R <sup>2</sup>	رابطه	مدل	پارامتر ورودی
۰/۷۷۳	۰/۱۸۱	۰/۶۸۹	$\frac{S}{H} = \frac{F(\alpha)}{\left[\sinh\left(\frac{2.7\alpha}{L}\right)\right]^{1.35}}, F(\alpha) = 0.3 - 1.77 \exp\left(-\frac{\alpha}{15}\right)$	Sumer [۱]	h/L, α
۰/۴۳۳	۰/۱۰۱	۰/۸۰۴	$\frac{S}{H} = \log\left[\sqrt{\alpha} + \sin\left(\frac{8955.3}{h/L}\right)\right] + \tan^{-1}\left[\frac{h}{L}\left(\frac{1}{\alpha} - 2\right) - \sqrt{\frac{h}{L}}\right] + \frac{h}{L} + \frac{\cos(h/L)}{(9.41 - \alpha)(9.26 h/L)} - \sqrt[3]{-10.93 + \sqrt{h/L}} - 0.75$	GP 1	
۰/۴۸۹	۰/۱۱۴	۰/۷۵۱	$\frac{S}{H} = -9.94 \frac{\alpha}{h/L} [\exp(-6.2 \alpha h/L)] - 0.00014 \exp(\exp(9.34 h/L)) + \frac{\sqrt[3]{\alpha}}{\sqrt[3]{h/L (h/L + 6.75)}} - 0.86$	GP 4	



شکل ۶- مقادیر محاسباتی و مشاهداتی عمق نسبی آبستگي حاصل از رابطه Fredsøe و Sumer [۱] و مدل GP 4

جدول ۶- نتایج مدل های ایجاد شده برای کل داده ها

SI	RMSE	R <sup>2</sup>	رابطه	مدل	پارامتر ورودی
۰/۲۷۳	۰/۱۱۷	۰/۸۰۲	$\frac{S}{H} = Cr - Ir + \frac{h}{L} (Cr + \sqrt{Cr}) + 2Cr \cdot \frac{h}{L} \sin\left(\frac{h/L}{Cr} - Ir + \alpha\right) + Cr \cdot \tan^{-1}\left[\frac{h}{L} (Ir - 8.007) - \sin(h/L)\right]^3 + (h/L - \sqrt[3]{Ir}) (\tan^{-1}\left(\frac{-9.25}{h/L}\right))^3$	GP 1	h/L, α, Cr و Ir
۰/۳۴۴	۰/۱۵۷	۰/۶۴۱	$\frac{S}{H} = \exp\left\{\frac{\exp\left[\sinh\left(\exp\left(\frac{h}{L}\right)\right)\right]}{\sinh\left(\frac{h}{L} - Cr - 1.58\right)}\right\} - (h/L)^2 \sqrt{\alpha} + 0.168 Cr - 8Cr \left[Ir^2 - 1.12 \frac{h}{L}\right]^2$	GP 7	



شکل ۷- مقادیر محاسباتی و مشاهداتی عمق نسبی آبشستگی حاصل از مدل GP 1 و مدل GP 7

- [2] US Army Corps of Engineers, "Coastal Engineering Manual (CEM), Fundamentals of Design", Washington, DC US, 2006.
- [3] Xie, S. L., "Scouring Patterns in Front of Vertical Breakwaters and their Influence on the Stability of the Foundations of the Breakwaters", Report Prepared for Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, the Netherlands, 1981.
- [4] Fowler, J. E., "Scour Problems and Methods for Prediction of Maximum Scour at Vertical Sea Walls", Technical Report CERC-92-16, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, 1992.
- [5] Sutherland, J., Obhari, C., Whitehouse, R. J. S., "Laboratory Tests of Scour at a Seawall", Report Prepared for University of Southampton, UK, 2006.
- [6] Tsai, C-P., Chen H-B., You, S-S., "Toe Scour of Seawall on a Steep Seabed by Breaking Waves", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2009, 135 (2), 61-68.
- [7] Koza, J. R., "Genetic Programming", the MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992.
- [8] Goldberg, D. E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, Reading, Mass, 1989.
- [9] Ghorbani, M. A., Rahman, Khatibi, R., Aytek, A., Makarynsky, O., Shiri, J. "Sea water level Forecasting Using Genetic Programming and Comparing the Performance with Artificial Neural Networks", Computers & Geosciences, 2010, 36, 620-627.

## ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، از روش برنامه ریزی ژنتیک برای تخمین عمق بیشینه آبشستگی در پای سازه‌های ساحلی استفاده شده است. برای این منظور، از شکل بدون بعد پارامترهای ورودی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی برای ایجاد مدل استفاده گردیده است. نتایج مطالعات قبل نشان داده‌اند که عمق نسبی آبشستگی، ضریب انعکاس، شیب سازه و پارامتر تشابه شکست جزء پارامترهای مؤثر بر آبشستگی هستند. لذا از این پارامترها برای ایجاد مدل کلی استفاده شده است. برای ایجاد مدل GP برای هر مجموعه داده از دو سری عملگر که یکی عملگرهای پیش فرض برنامه و سایر عملگرها، آنهایی است که در روابط تجربی استفاده شده است. نتایج مدل‌های ایجاد شده با GP نشان دادند که مدل‌های ایجاد شده با عملگرهای روابط هر چند دقت کمتری نسبت به مدل‌های ایجاد شده با عملگرهای پیش فرض دارند ولی به دلیل سادگی و قابلیت فهم بر مدل‌های با عملگرهای پیش فرض ترجیح داده شده‌اند. همچنین نتایج مقایسه آماری مدل‌های ایجاد شده نشان دادند روابط حاصل از GP از دقت خیلی بیشتر و خطای کمتری نسبت به روابط تجربی دارا هستند. همچنین با ایجاد یک مدل کلی که در برگزیده پارامترهای مؤثر بیشتری است، محدودیت کاربرد روابط تجربی تا حدودی از بین رفت.

## ۷- مراجع

- [1] Sumer, B. M., Fredsøe, J., "Experimental Study of 2D Scour and its Protection at a Rubble-mound Breakwater", Coastal Engineering, 2000, 40 (1), 59-78.



**EXTENDED ABSTRACT**

## Genetic Programming to Predict Scour Depth at Coastal Structures

Abbas Yeganeh-Bakhtiary<sup>a,\*</sup>, Ali Pourzangbar<sup>a</sup>, Fatemeh Hajivalie<sup>b</sup>

<sup>a</sup> MSc, Department of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology, Narmak, Tehran 16844, IRAN

<sup>b</sup> Iranian National Institute for Oceanography (INIO)

**Received:** 02 August 2014; **Accepted:** 13 March 2015

**Keywords:**

Coastal structures, Genetic programming, Scour depth, Regression-based equations

### 1. Introduction

Scour could cause significant structural instability in front of the coastal structures, which can lead to their failure [1]; hence, prediction of scour depth at coastal structures is of great importance in coastal engineering discipline. Extensive experimental studies carried out to predict the maximum scour depth and resulted in some empirical formulas [2-4]. However, these empirical formulas have not been capable of predicting the maximum scour depth. Another drawback of the empirical formulas is their shortage in considering all of the effective parameters in scour processes; therefore, a comprehensible model for scour depth prediction at the coastal structures is very essential. The main objective of the current study is to present an alternative model in the form of genetic programming (GP) to the present empirical formulas. We utilized around forty eight data set to train and test the evolved GP models. To evaluate the accuracy of developed GP model the statistical parameters were determined, e.g. root mean square error (RMSE) and correlation coefficient ( $R^2$ ) and scatter index (SI). To verify the developed models, the predicted results were compared with those of the measurements and empirical relations. Moreover, a simplified analytic form of the GP proposed model also presented in this study.

### 2. Methodology

GP (genetic programming) is a branch of the genetic algorithm belonging to the family of evolutionary algorithms used to evolve models. In the first place, the capability of GP in developing accurate equations compared with those of empirical investigations. In order to have a logical comparison, firstly the same input and output parameters and also the same data set were utilized to evolve models with GP. To develop the best model, GP employs some operations that can affect strongly on the accurate of developed model. These operations depending on the weights relate the input parameters to each other and evolve the GP model. Since with the variation of operations, the evolved model and its accuracy changes, four types of operations considered to evolve GP models. Table. 1 shows these different operation sets.

**Table 1.** Various operation sets

Model	Operation sets
GP 1	$+, -, \times, \div, \sin, \cos, \exp, \sqrt{x}, x^2, x, \ln x$
GP 2	$+, -, \times, \div, \sinh, x^2, x$
GP 3	$+, -, \times, \div, \sqrt{x}, x$
GP 4	$+, -, \times, \div, \sinh, \exp, x$

The process of GP to evolve the best model is illustrated in Fig. 1.

\* Corresponding Author

E-mail addresses: yeganeh@iust.ac.ir (Abbas Yeganeh-Bakhtiary), pourzangbar.ali5@gmail.com (Ali Pourzangbar), hajivalie@inio.ac.ir (Fatemeh Hajivalie).

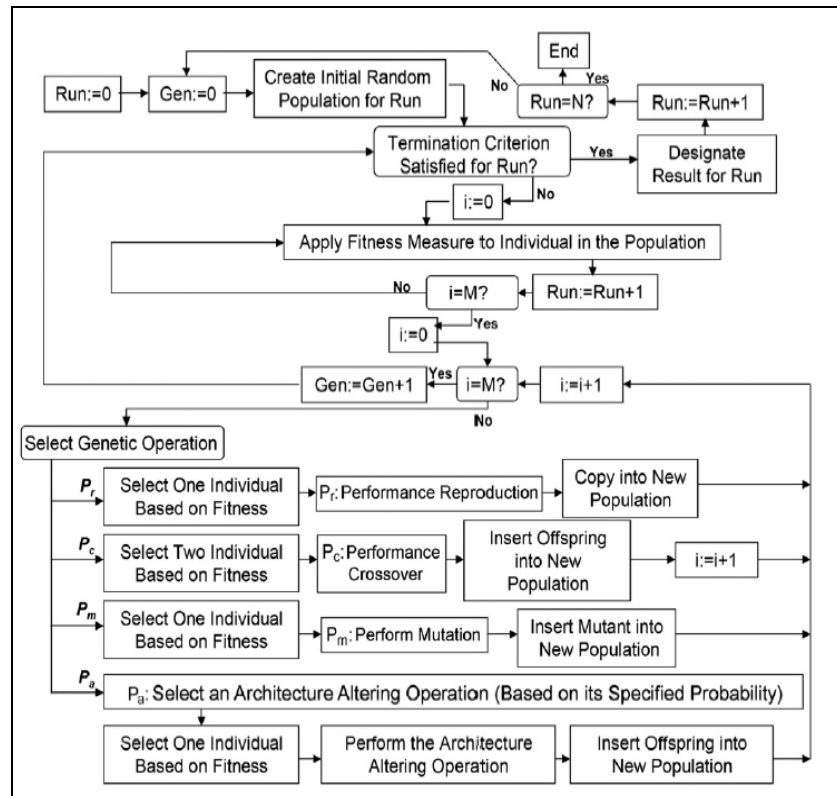


Fig. 1. Flowchart of Genetic Programming [7]

### 3. Results and discussion

Results of different models including GP and empirical ones showed that the trend of prediction is similar in both GP and empirical models. However, the discrepancy of the measured and predicted scour depth in empirical formulas are very larger in comparison with those of GP. Furthermore, the empirical formulas are not able to have an acceptable prediction for the other experiments' data set and this can be one of the most important shortage of these formulas. In most cases, the experimental investigations studied the effect of one or two important parameters on the scour at coastal structures. However, considering all of the experimental studies, various parameters can affect mainly on the scour process.

### 4. Conclusions

Results of the evolved models with GP showed that in almost all of the models, GP evolved equation significantly perform better than the empirical ones with the same input and output parameters and same data set. Furthermore, GP is capable to develop a comprehensive model includes all of the effective parameters on the scour at the coastal structures. The comprehensive model of GP showed acceptable accuracy and can be utilized for predicting the maximum scour depth.

### 5. References

- [1] Sumer, B. M., Fredsøe, J., "Experimental Study of 2D Scour and its Protection at a Rubble-mound Breakwater", Coastal Engineering, 2000, 40 (1), 59-78.
- [2] US Army Corps of Engineers, "Coastal Engineering Manual (CEM), Fundamentals of Design", Washington, DC US, 2006.
- [3] Xie, S. L., "Scouring Patterns in Front of Vertical Breakwaters and their Influence on the Stability of the Foundations of the Breakwaters", Report Prepared for Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, the Netherlands, 1981.
- [4] Fowler, J. E., "Scour Problems and Methods for Prediction of Maximum Scour at Vertical Sea Walls", Technical Report CERC-92-16, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, 1992.