

# استفاده از الگوریتم ژنتیک برای شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم در مخازن مستطیلی

حسن ساقی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری

مهندسی مکانیک شریف، (بهار ۱۳۹۷)  
دوره‌ی ۳ - ۳۴، شماره‌ی ۱، ص. ۲۲-۱۳

در این تحقیق، الگوریتم ژنتیک<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم<sup>۲</sup> در مخازن مستطیلی مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور، یک مدل عددی با عرض و ارتفاع قابل تغییر، تحت یک حرکت خطی با دامنه و فرکانس زاویه‌ی قابل تنظیم تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله‌ی بعد، با استفاده از نتایج مدل عددی و به کمک الگوریتم ژنتیک، روابطی برای تخمین بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب و بیشینه نیروی افقی وارد بر بدنه مخزن ارائه شد. نتایج به دست آمده نشان داد، مدل ارائه شده در پیش‌بینی این دو پارامتر دارای دقت خوبی است. لذا می‌توان الگوریتم ژنتیک را به‌عنوان روشی مناسب برای شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم مورد استفاده قرار داد.

واژگان کلیدی: مخزن مستطیلی، بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب، نیروی افقی، الگوریتم ژنتیک.

ha.saghi@yahoo.com

## ۱. مقدمه

پدیده‌ی تلاطم یکی از مسائل پیچیده در مسائل مختلفی است که در آن‌ها جریان دارای سطح آزاد است. بررسی این پدیده کاربرد زیادی در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی دارد که از آن جمله می‌توان به «بررسی رفتار کشتی‌های حمل سوخت و گاز مایع» اشاره کرد. این پدیده از دیدگاه سازه‌ی می‌تواند شرایط بحرانی را برای سازه‌های دریایی به وجود آورد که می‌توان به افزایش فشار وارد بر بدنه مخزن، ناشی از این پدیده اشاره کرد. لذا نحوه‌ی توزیع فشار بر بدنه‌ی مخزن و تخمین دقیق بیشینه نیروی وارد بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. اهمیت این پدیده در مواردی است که به دلیل نوسان سیال در تجهیزات همچون کپسول‌های گاز LNG، کشتی‌ها و ... نیروهایی بر اجزاء این تجهیزات وارد شده و لازم است به منظور حفظ پایداری، جنس و شکل هندسی مناسبی برای آن‌ها انتخاب شود. این پدیده همچنین در کشتی‌های حمل سوخت، مخازن سدها (بر اثر زمین لرزه) و مخازن نفتی که نفت درون آن در اثر زلزله متلاطم می‌شود قابل مشاهده است.

تحقیقات انجام گرفته در زمینه‌ی بررسی پدیده‌ی تلاطم به صورت تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی بوده است. بعضی از محققین نیز از چند روش به طور همزمان برای بررسی این پدیده استفاده کردند. به‌عنوان مثال برخی از آنان پدیده‌ی تلاطم را در مخازن سهمی‌گون و به صورت تحلیلی مورد ارزیابی قرار دادند.<sup>[۱]</sup> آنها در تحقیقات‌شان سیال را ایده‌آل فرض کرده و لذا معادله‌ی لاپلاس را به‌عنوان معادله‌ی حاکم به کار بردند. به دلیل محدودیت‌های موجود در استفاده از روش‌های

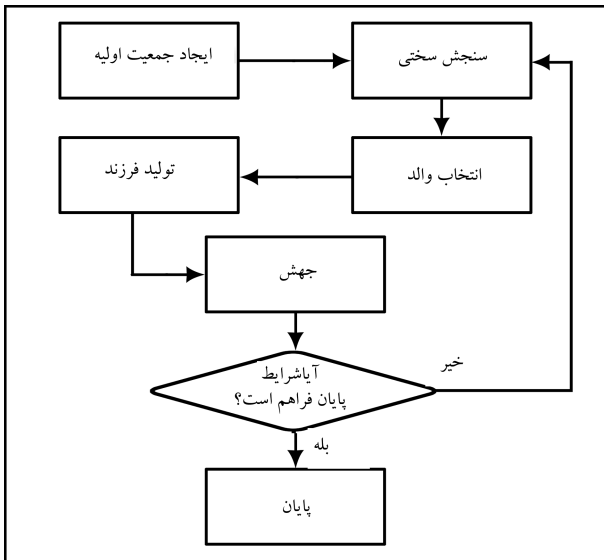
بعضی از محققین از روش‌های آزمایشگاهی برای بررسی پدیده‌ی تلاطم استفاده کردند. به‌عنوان مثال، پدیده‌ی تلاطم را در یک مخزن مستطیلی، حاوی بافل مشبک افقی و به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند.<sup>[۹]</sup> نتایج این تحقیقات نشان داد که وجود بافل مشبک افقی تأثیر قابل ملاحظه‌ی در کاهش اثرات پدیده‌ی تلاطم دارد. در نهایت، تعدادی از محققین از دو روش عددی و آزمایشگاهی به‌طور هم‌زمان برای شبیه‌سازی این پدیده استفاده کردند.<sup>[۱۱]</sup> شکل مخزن، یکی دیگر از پارامترهایی است که در تحقیقات انجام گرفته مورد توجه محققین قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به مخازن مستطیلی،<sup>[۱۱]</sup> استوانه‌ی بی،<sup>[۱۲]</sup> بیضوی<sup>[۱۳]</sup> و کروی<sup>[۱۴]</sup> اشاره کرد. یکی از مسائل مهم در استفاده از روش‌های عددی برای شبیه‌سازی یک پدیده، انتخاب

از مسائل پیچیده در مسائل مختلفی است که در آن‌ها جریان دارای سطح آزاد است. بررسی این پدیده کاربرد زیادی در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی دارد که از آن جمله می‌توان به «بررسی رفتار کشتی‌های حمل سوخت و گاز مایع» اشاره کرد. این پدیده از دیدگاه سازه‌ی می‌تواند شرایط بحرانی را برای سازه‌های دریایی به وجود آورد که می‌توان به افزایش فشار وارد بر بدنه مخزن، ناشی از این پدیده اشاره کرد. لذا نحوه‌ی توزیع فشار بر بدنه‌ی مخزن و تخمین دقیق بیشینه نیروی وارد بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. اهمیت این پدیده در مواردی است که به دلیل نوسان سیال در تجهیزات همچون کپسول‌های گاز LNG، کشتی‌ها و ... نیروهایی بر اجزاء این تجهیزات وارد شده و لازم است به منظور حفظ پایداری، جنس و شکل هندسی مناسبی برای آن‌ها انتخاب شود. این پدیده همچنین در کشتی‌های حمل سوخت، مخازن سدها (بر اثر زمین لرزه) و مخازن نفتی که نفت درون آن در اثر زلزله متلاطم می‌شود قابل مشاهده است.

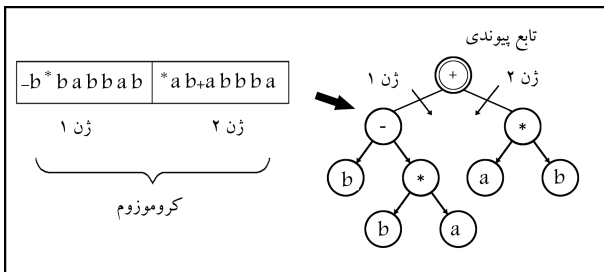
تحقیقات انجام گرفته در زمینه‌ی بررسی پدیده‌ی تلاطم به صورت تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی بوده است. بعضی از محققین نیز از چند روش به طور همزمان برای بررسی این پدیده استفاده کردند. به‌عنوان مثال برخی از آنان پدیده‌ی تلاطم را در مخازن سهمی‌گون و به صورت تحلیلی مورد ارزیابی قرار دادند.<sup>[۱]</sup> آنها در تحقیقات‌شان سیال را ایده‌آل فرض کرده و لذا معادله‌ی لاپلاس را به‌عنوان معادله‌ی حاکم به کار بردند. به دلیل محدودیت‌های موجود در استفاده از روش‌های

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۶/۲، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۱/۲۷، پذیرش ۱۳۹۵/۱۲/۳.

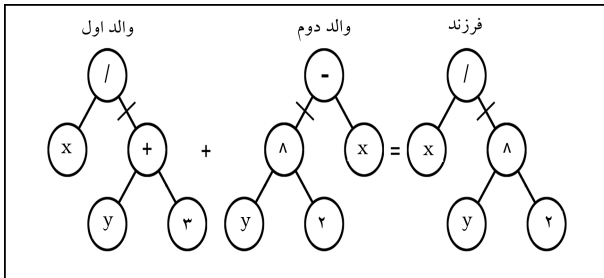
DOI:10.24200/J40.2018.6397



شکل ۱. روند کلی روش ژنتیک الگوریتم.



شکل ۲. نمایش رمزگذاری درختی کروموزوم.



شکل ۳. تشکیل کروموزوم نسل بعد.

بیشینه نیروی افقی وارد بر جداره مخزن، از دو مدل درختی استفاده شده است. متغیرهای ورودی و خروجی برای پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب در مخزن و نیروی افقی وارد به مخزن به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. نمایش درختی کروموزوم نسل آخر برای محاسبه نیروی افقی وارد به جداره‌ی مخزن و جابه‌جایی بیشینه سطح آب در مخزن، به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

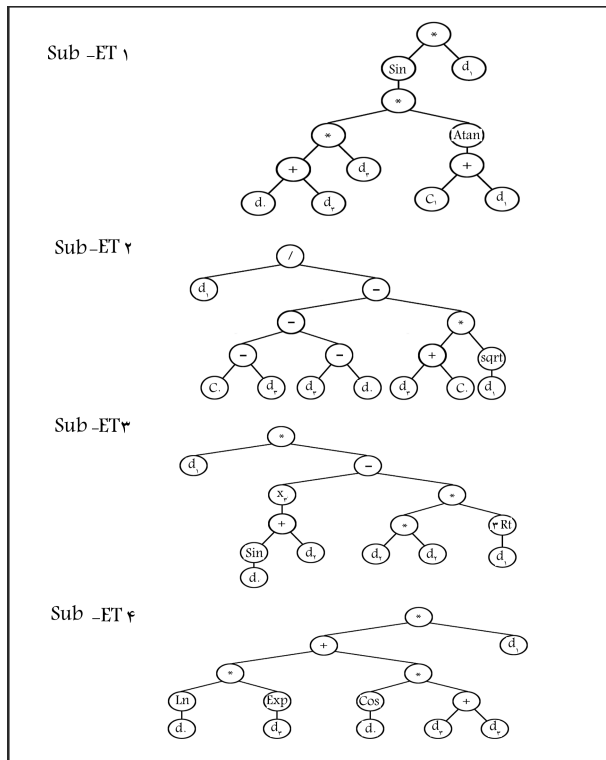
در شکل‌های ۴ و ۵، علائم +، \*، -، / و sqrt به ترتیب عملگرهای جمع، ضرب، تقریق، تقسیم و جذر و عبارات  $\text{Exp}$ ،  $\text{Cos}$ ،  $\text{Rt}$ ،  $\text{Sin}$ ،  $\text{Atan}$  و  $\text{Ln}$  به ترتیب توابع تانژانت معکوس، سینوس، توان یک سوم، کسینوس، نمایی و لگاریتم بر مبنای عدد نپر هستند. بیشینه تعداد ژن در نظر گرفته شده چهار عدد است که در شکل‌های ۴ و ۵ با  $ET_1$ ،  $ET_2$ ،  $ET_3$  و  $ET_4$  برای کروموزوم اعضای جمعیت نهایی نشان داده شده است و در نهایت توسط تابع پیوندی جمع برای تشکیل

مناسب معادلات حاکم است. در این راستا، برای شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم نیز لازم است براساس فرضیات صورت گرفته، معادلات حاکم در نظر گرفته شود. بدین منظور برخی از محققین با ایده‌آل فرض کردن سیال، از معادله‌ی لاپلاس به‌عنوان معادله‌ی حاکم بهره گرفتند.<sup>[۱۵]</sup> این در حالی است که برخی از محققین نیز سیال را لزج فرض کرده و از معادلات ناویر-استوکس به‌عنوان معادلات حاکم استفاده کردند.<sup>[۱۶]</sup> استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی برای مدل‌سازی پدیده‌ی تلاطم به ترتیب زمان برو هزینه‌براست و لذا ارائه‌ی روشی مناسب برای کاهش زمان و هزینه می‌تواند بسیار کاربردی و مفید باشد. در این راستا، محققین مختلف از روش‌های فرآینتکاری همچون روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی،<sup>[۱۷]</sup> الگوریتم ژنتیک<sup>[۱۸]</sup> و منطق فازی<sup>[۱۹]</sup> برای مسائل هیدرولیکی و پیش‌بینی رفتار مایعات در حالت‌های مختلف استفاده کرده‌اند. در پدیده‌ی تلاطم، با توجه به رفتار غیرخطی بین متغیرها و نیز در جهت کاهش خطای پیش‌بینی پارامترهای مورد نظر، «الگوریتم ژنتیک» روش مناسبی برای بررسی مدل‌سازی پدیده‌ی تلاطم تشخیص داده شد. لذا در این تحقیق، از این روش (ژنتیک الگوریتم) برای ارائه‌ی روابطی جهت پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی آب در مخزن و بیشینه نیروی افقی وارد به مخزن، به‌عنوان دو پارامتر مهم در طراحی مخازن، استفاده شد.

## ۲. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، اولین بار توسط جان هولند پیشنهاد شد.<sup>[۲۰]</sup> و بعدها جان کوزا از آن برای حل و بهینه‌سازی مسائل مهندسی پیشرفته استفاده کرد.<sup>[۲۱]</sup> در ساختار کلی الگوریتم ژنتیک، ابتدا پیش از هر چیز باید سازوکاری برای تبدیل هر جواب مسئله به یک کروموزوم تعریف کرد. پس از آن مجموعه‌ی از کروموزوم‌ها که در حقیقت مجموعه‌ی از جواب‌های مسئله‌اند، به‌عنوان جمعیت آغازین یا اولیه تهیه می‌شود. این مجموعه که در اندازه‌ی دلخواه و توسط کاربر تعریف می‌شود، اغلب به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شود. سپس با به‌کارگیری عملیات ژنتیک، کروموزوم‌های جدیدی موسوم به «فرزند» ایجاد می‌شود. این عملیات به دو روش عمده تقسیم‌بندی می‌شود: تقاطعی و جهشی. همچنین برای گزینش کروموزوم‌هایی که باید نقش والدین را بازی کنند، دو مفهوم نرخ تقاطعی و نرخ جهشی کاربرد فراوان دارند که این دو نیز پیش از شروع الگوریتم توسط کاربر تعیین می‌شود. بعد از تولید یک سری کروموزوم جدید یا اولاد، لازم است با استفاده از عمل تحول، برازنده‌ترین کروموزوم‌ها انتخاب شود. این فرایند به منظور انتخاب کروموزوم‌های برازنده در میان والدین و اولاد انجام گرفته و لازم است تعداد کروموزوم‌های منتخب برابر اندازه جمعیت اولیه باشد. فرایند این انتخاب مبتنی بر مقدار برزندگی هر رشته است. در حقیقت فرایند ارزیابی، محوری‌ترین بحث در فرایند انتخاب است. تا این مرحله یک تکرار یا یک نسل از الگوریتم طی شده است. الگوریتم، بعد از طی چندین نسل به تدریج به سمت جواب بهینه همگرا می‌شود. شرط توقف مسئله را نیز می‌توان «طی کردن تعداد معین تکرار» قرار داد که پیش از آغاز الگوریتم توسط کاربر تعیین می‌شود. با توجه به نسل آخر که منجر به رسیدن به جواب بهینه می‌شوند، می‌توان رابطه متغیر وابسته با متغیرهای مستقل را پیدا کرد. روند کلی الگوریتم ژنتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

با توجه به رمزگذاری درختی<sup>[۲۲]</sup> در مدل کردن مخزن آب، ایجاد جمعیت جدید با تعویض ژن‌های دو کروموزوم والد میسر می‌شود. نحوه‌ی رمزگذاری یک کروموزوم و همچنین تولید فرزند به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. در این نوشتار برای پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب در مخزن، و



شکل ۵. نمایش درختی کروموزوم نسل آخر برای محاسبه‌ی نیروی افقی وارد به جداره‌ی مخزن.

کروموزوم نهایی به یکدیگر متصل می‌شوند. به طور کلی هر ژن خصوصیات منحصر به فردی را رمزگذاری می‌کند که این خصوصیات بسته به نوع متغیرهای تعریف شده و عملگرهای ریاضی مربوطه در نمایش درختی شکل گرفته و با قرار دادن در الگوریتم در هر نسل تا رسیدن به جواب بهینه خصوصیات بهتری را کسب می‌کند. ژن‌ها با استفاده از نسخه‌ی ۵ نرم‌افزار GeneXpro Tools و به زبان کاروا<sup>۲</sup> ایجاد و توسط یک مولد به صورت درختی نمایش داده شده است. در واقع در این نمایش، هر یک از ژن‌های نشان داده شده بیانگر یک فرمول ریاضی است که اعداد ثابت و متغیرهای مستقل توسط عملگرهای ریاضی به یکدیگر متصل شده‌اند. هر یک از عملگرهای ریاضی بیشینه دو زیرشاخه می‌تواند داشته باشد که آنها را به یکدیگر متصل کند. در نهایت پس از تشکیل هر ژن و نمایش ریاضی آن به صورتی که اشاره شد، با جمع آنها و برابر قرار دادن با متغیر وابسته، معادله‌ی برای پیش‌بینی جابه‌جایی بیشینه‌ی سطح آزاد آب و بیشینه نیروی افقی وارد به مخزن به دست می‌آید.

### ۳. مدل عددی تهیه شده برای تولید اطلاعات

در این تحقیق، ابتدا یک مدل عددی برای شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم تهیه و پس از معتبرسازی، نتایج حاصله مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور، با فرض ایده‌آل و تراکم‌ناپذیر بودن سیال، و نیز غیرچرخشی بودن جریان، از معادله‌ی اوایلر به عنوان معادله‌ی حاکم استفاده شد. به منظور مدل‌سازی حرکت مخزنی با شتاب  $(a_x, a_y)$ ، مخزن ثابت فرض شده و شتابی در جهت عکس به سیال اعمال شد. لذا معادلات حاکم چنین مورد استفاده قرار گرفت: [۲۳]

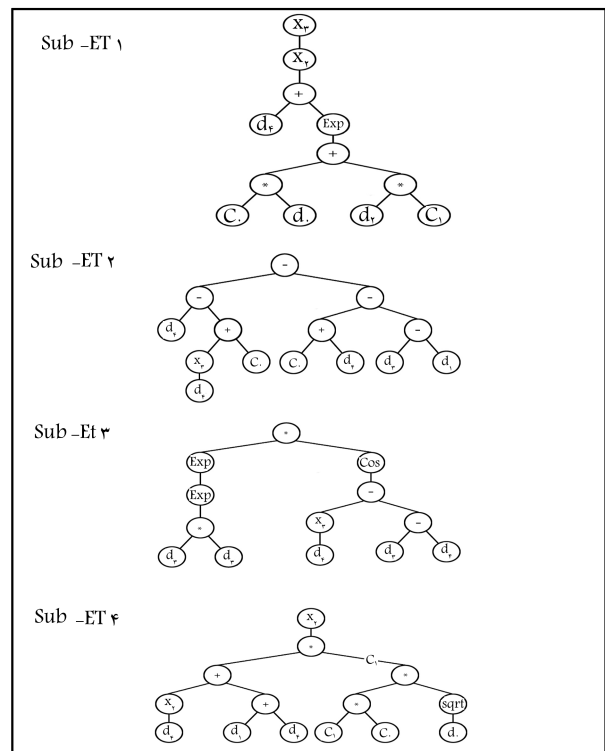
$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (uV) = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - a_x \quad (1)$$

جدول ۱. متغیرهای ورودی و خروجی برای پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب در مخزن.

نوع پارامتر	نام پارامتر	علامت اختصاری
خروجی	بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب	$\eta$
ورودی	دامنه نوسان مخزن	$d_0$
	فرکانس زاویه‌ی نوسان مخزن	$\omega$
	عرض مخزن	$b$
	ارتفاع آب	$h$

جدول ۲. متغیرهای ورودی و خروجی برای پیش‌بینی نیروی افقی وارد به مخزن.

نوع پارامتر	نام پارامتر	علامت اختصاری
خروجی	بیشینه نیروی افقی وارد بر مخزن	$F_{max}$
ورودی	بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب	$\eta$
	دامنه نوسان مخزن	$d_0$
	فرکانس زاویه‌ی نوسان مخزن	$\omega$
	عرض مخزن	$b$
	ارتفاع آب	$h$



شکل ۴. نمایش درختی کروموزوم نسل آخر برای محاسبه‌ی جابه‌جایی بیشینه‌ی سطح آب در مخزن.

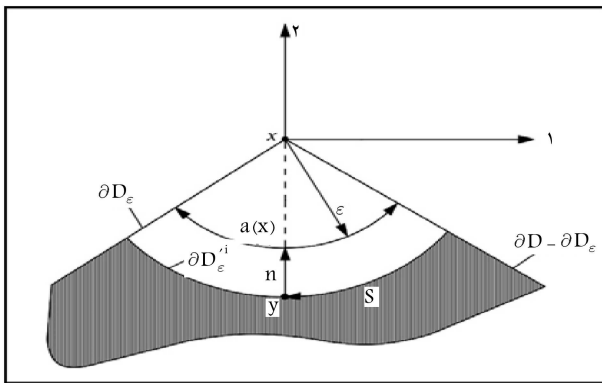
که در آن،  $\alpha(x)$  زاویه‌ی میان دو مماس در محل گره مرزی است (شکل ۷). در رابطه‌ی ۸،  $\varphi$  تابع پتانسیل و  $\psi(x, y)$  راه حل اساسی است که در حالت دوبعدی به صورت  $\frac{1}{\sqrt{\pi}} \ln \frac{1}{r}$  تعریف می‌شود. در این رابطه  $r$  فاصله‌ی میان گره مورد نظر ( $x$ ) و سایر گره‌های محیطی ( $y$ ) است (شکل ۸).

در این تحقیق، برای حل شرط مرزی دینامیکی سطح آزاد آب از روش اجزاء محدود استفاده شده است. بدین منظور از توابع شکل خطی استفاده شده است. پس از حل همزمان معادلات حاکم و تعیین مقدار تابع پتانسیل در المان‌های مرزی (شکل ۹)، فشار وارده بر بدنه‌ی مخزن مطابق رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود. در نهایت بیشینه نیروی افقی وارد بر مخزن مطابق رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود: [۲۲]

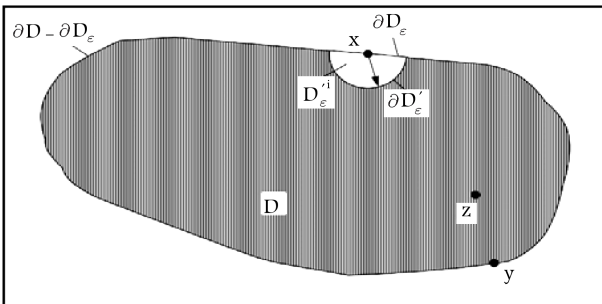
$$p_T = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{\gamma} \rho (\nabla \phi)^T + \rho g Z \quad (10)$$

$$F_x = \sum_{i=1}^{n_s} \frac{1}{\gamma} (p_{T_i} + p_{T_{i+1}}) L_{i,i+1} n_{x_{i,i+1}} \quad (11)$$

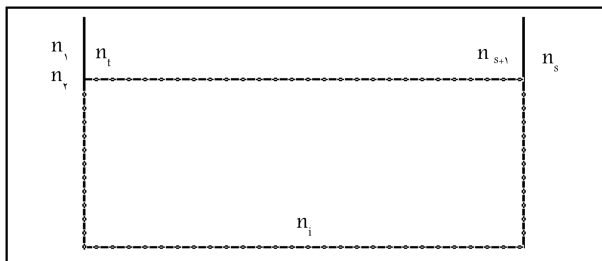
برای معتبرسازی مدل عددی تهیه شده، مخزن مستطیلی با عرض ۰٫۹ متر و عمق



شکل ۷. توضیح در مورد پارامتر  $\alpha(x)$  در گره مرزی.



شکل ۸. توصیف محدوده‌ی محاسبات انتگرال مرزی در قضیه گرین.



شکل ۹. مقطع شماتیک از المان‌های مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم در مخزن مستطیلی.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (vV) = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + g - a_y \quad (2)$$

که در آن،  $u$  و  $v$  مؤلفه‌های بردار سرعت در دو جهت  $x$  و  $y$ ،  $V$  بردار سرعت،  $P$  فشار هیدرودینامیکی،  $\rho$  چگالی سیال،  $g$  شتاب ثقل و  $a_x$  و  $a_y$  به ترتیب شتاب افقی و قائم ناشی از حرکت مخزن در دو راستای  $x$  و  $y$  هستند. در این حالت معادله‌ی پیوستگی عبارت است از: [۲۳]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

با استفاده از پارامتر پتانسیل سرعت و معادله‌ی پیوستگی، معادله‌ی لاپلاس به صورت زیر به دست می‌آید: [۲۳]

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

برای مدل‌سازی پدیده‌ی تلاطم، شرط عدم نفوذ بر روی بدنه مخزن و شرط مرزی سطح آزاد مطابق روابط زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_1 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = n_y \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \text{on } S_2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{\gamma} \left( \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right) + (a_y + g) \eta \beta + a_x x = 0 \quad \text{on } S_2 \quad (7)$$

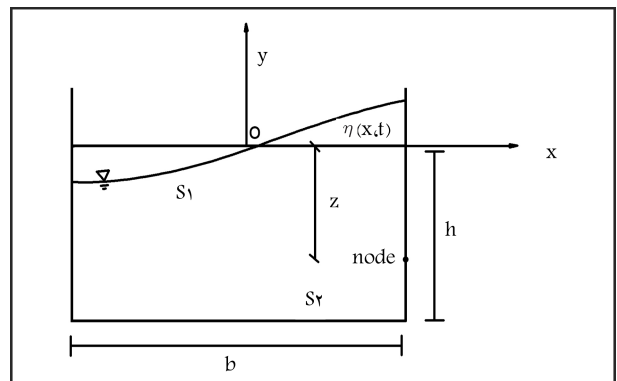
در روابط فوق،  $n_y$  بردار واحد عمود بر سطح،  $\eta$  جابه‌جایی سطح آزاد آب و  $\varphi$  تابع پتانسیل هستند. بعضی از پارامترهای به کار رفته در شکل ۶ نشان داده شده است. برای مدل‌سازی پدیده‌ی تلاطم، معادلات لاپلاس و شرط مرزی دینامیکی سطح آزاد آب را به عنوان معادلات حاکم در نظر گرفته و آنها را با استفاده از روش المان محدود و اجزاء مرزی حل شدند. به منظور حل معادله‌ی لاپلاس با استفاده از روش المان مرزی، قضیه گرین مورد استفاده قرار گرفت: [۲۳]

$$c(x) \varphi(x) + \oint_{\partial D} \varphi(y) \frac{\partial \psi}{\partial n}(x, y) ds(y) = \int_{\partial D} \psi(x, y) \frac{\partial \varphi}{\partial n}(y) ds(y) \quad (8)$$

$x, y \in \partial D$

که در آن  $c(x)$  مقدار ثابتی است که با توجه به شکل هندسی محدوده مورد مطالعه در محل گره مورد نظر و مطابق رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید: [۲۳]

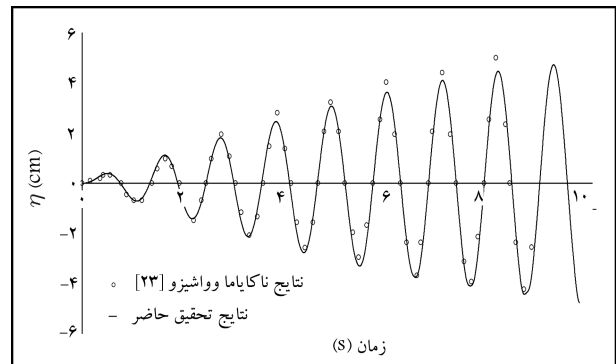
$$c(x) = \frac{\alpha(x)}{2\pi} \quad (9)$$



شکل ۶. پارامترهای به کار رفته در معادلات حاکم.

جدول ۳. نتایج خروجی مدل عددی.

بیشینه نیروی افقی (تجربی)	بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب (پیش‌بینی)	فرکانس زاویه‌یی (رادیان بر ثانیه)	دامنه		بیشینه نیروی افقی (تجربی)
			ارتفاع نوسان (متر)	عرض مخزن (متر)	
۲۱۳٫۹	۰٫۴۸۸	۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۶	۰٫۹
۷۸٫۹	۰٫۰۸۶	۹	۰٫۰۰۲	۰٫۶	۰٫۹
۱۱۳٫۱	۰٫۱۳۵	۹	۰٫۰۰۳	۰٫۶	۰٫۹
۱۸۰٫۶	۰٫۲۳۹	۹	۰٫۰۰۵	۰٫۶	۰٫۹
۱۴۷٫۴	۰٫۱۸۷	۹	۰٫۰۰۴	۰٫۶	۰٫۹
۱۰۵٫۰	۰٫۱۶۴	۷	۰٫۰۰۲	۰٫۷	۰٫۹
۷۹٫۹	۰٫۰۸۷	۹	۰٫۰۰۲	۰٫۷	۰٫۹
۴۵٫۴	۰٫۰۴۲	۹	۰٫۰۰۱	۰٫۷	۰٫۹
۱۹۲٫۹	۰٫۲۵۵	۹	۰٫۰۰۵	۰٫۷	۰٫۹
۱۷۶٫۴	۰٫۳۹۳	۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۸	۰٫۹
۱۰۵٫۳	۰٫۱۶۶	۷	۰٫۰۰۲	۰٫۸	۰٫۹
۳۰۷٫۲	۰٫۵۹۹	۵٫۵	۰٫۰۰۳	۰٫۸	۰٫۹
۱۱۷٫۴	۰٫۱۴۲	۹	۰٫۰۰۳	۰٫۸	۰٫۹
۴۵٫۷	۰٫۰۴۲	۹	۰٫۰۰۱	۰٫۸	۰٫۹
۱۸۷٫۶	۰٫۲۵۳	۹	۰٫۰۰۵	۰٫۸	۰٫۹
۱۵۳٫۰	۰٫۱۹۹	۹	۰٫۰۰۴	۰٫۸	۰٫۹
۱۰۵٫۹	۰٫۱۶۸	۷	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۹
۸۳٫۰	۰٫۰۸۵	۹	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۹
۱۱۹٫۵	۰٫۱۳۷	۹	۰٫۰۰۳	۰٫۹	۰٫۹
۴۶٫۴	۰٫۰۴۱	۹	۰٫۰۰۱	۰٫۹	۰٫۹
۱۵۶٫۰	۰٫۱۹۳	۹	۰٫۰۰۴	۰٫۹	۰٫۹
۷۲٫۶	۰٫۱۷۴	۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۸
۱۰۳٫۸	۰٫۲۶۴	۵٫۵	۰٫۰۰۳	۰٫۹	۰٫۸
۷۶٫۵	۰٫۱۰۱	۹	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۸
۱۰۹٫۹	۰٫۱۵۴	۹	۰٫۰۰۳	۰٫۹	۰٫۸
۴۳٫۲	۰٫۰۴۹	۹	۰٫۰۰۱	۰٫۹	۰٫۸
۱۴۳٫۲	۰٫۲۰۸	۹	۰٫۰۰۴	۰٫۹	۰٫۸
۱۶۷٫۰	۰٫۴۴۶	۵٫۵	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۸
۴۰٫۴	۰٫۱۰۴	۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۷
۲۰۶٫۶	۰٫۴۹۳	۷	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۷
۶۹٫۳	۰٫۱۱۰	۹	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۷
۳۹٫۷	۰٫۰۵۲	۹	۰٫۰۰۱	۰٫۹	۰٫۷
۱۶۰٫۶	۰٫۲۷۹	۹	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۷
۱۲۹٫۴	۰٫۲۲۳	۹	۰٫۰۰۴	۰٫۹	۰٫۷
۶۶٫۷	۰٫۱۴۲	۹	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۶
۳۸٫۳	۰٫۰۶۹	۹	۰٫۰۰۱	۰٫۹	۰٫۶
۴۹٫۲	۰٫۱۶۰	۵٫۵	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۶



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج مدل عددی در شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم با نتایج بررسی‌های قبلی. [۲۴]

آب ۰٫۶ متر تحت نوسان هارمونیک با دامنه‌ی ۰٫۰۰۲ متر و نوسان ۵٫۵ رادیان بر ثانیه قرار گرفته و جابه‌جایی سطح آزاد آب در محل تماس سیال با دیواره‌ی سمت راست مخزن محاسبه شد. در این مرحله، استقلال نتایج مدل به گام زمانی و ابعاد شبکه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا مدل با استفاده از شبکه‌هایی با ابعاد ۰٫۴ تا ۰٫۷ متر و به‌ازای گام زمانی ۰٫۰۰۲ ثانیه برای شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حاصله با یکدیگر مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان‌گر استقلال از شبکه برای ابعاد کم‌تر از ۰٫۵ متر است. لذا ابعاد شبکه ۰٫۵ متر انتخاب شد و سپس مدل با استفاده از ابعاد ۰٫۵ متر و گام زمانی ۰٫۰۰۲ تا ۰٫۰۰۴ ثانیه برای شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم مورد استفاده قرار گرفت. در این حالت نیز استقلال از گام زمانی در گام‌های زمانی کم‌تر از ۰٫۰۰۲۵ ثانیه مشاهده شد. بنابراین ابعاد شبکه و گام زمانی به‌ترتیب ۰٫۵ متر و ۰٫۰۰۲۵ ثانیه انتخاب و مدل نهایی برای شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، نتایج مدل با نتایج بررسی‌های قبلی [۲۴] مقایسه و در شکل ۱۰ نشان داده شد.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، بیشینه خطای نسبی مدل در حدود ۵٫۵ درصد، و قابل قبول است.

#### ۴. نتایج تحقیق

در این مرحله، مخازن مستطیلی با ابعاد مختلف، با استفاده از مدل عددی تهیه شده برای تولید اطلاعات تحت حرکت نوسانی با دامنه و فرکانس زاویه‌یی متفاوت قرار گرفته و نتایج به دست آمده شامل بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب و بیشینه نیروی افقی وارد بر مخزن در جدول ۳ ثبت شده است.

در این مرحله، با استفاده از اطلاعات ارائه شده در جدول ۳ و نیز به کمک روش مدل درختی الگوریتم ژنتیک، روابط ۱ و ۲ به‌ترتیب برای پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب و نیروی افقی وارد بر مخزن به دست آمد.

$$\eta_{\max} = a \sin \left[ (\omega + b) \tanh^{-1} (4,4637 + a) \right] + \frac{a}{(3,7691 - 2b + \omega - (b + 3,7691) \sqrt{a})} + a \left[ (h + \sin \omega)^2 - h^2 a^{1/2} \right] + a \left[ \ln \omega + e^b + 2b \cos \omega \right] \quad (12)$$

جدول ۴. ضرایب ثابت موجود در نمایش درختی کروموزوم‌های نسل آخر.

	بیشینه جابه‌جایی سطح آب		بیشینه نیروی افقی	
	$C_1$	$C_0$	$C_1$	$C_0$
$ET_1$	۴,۴۶	۶,۱۶۰۳	۱۱,۶۹	
$ET_T$		۸,۳۱۳۴		
$ET_F$				
$ET_T$		۱,۶۷۸۶	۳,۸۱۱۱	

$$F_{max} = [b + e^{(6,16 \times 10^3 \eta) + 11,69a}]^6 + b^2 + h - \omega - 16,6268 + [6,3897 \sqrt{\eta_{max}} (b^2 + b + \omega)]^2 \quad (13)$$

در روابط فوق،  $\eta_{max}$  بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب (بر حسب متر)،  $F_{max}$  بیشینه نیروی افقی وارد بر مخزن (بر حسب نیوتن)،  $a$  دامنه نوسان مخزن (بر حسب متر)،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ی نوسان مخزن (بر حسب رادیان بر ثانیه)،  $b$  عرض مخزن و  $h$  ارتفاع آب (بر حسب متر) است. در این تحقیق ابتدا بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه و سپس خود به‌عنوان یکی از پارامترهای ورودی در رابطه ۱۱ برای تخمین بیشینه نیروی افقی وارد بر بدنه مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرد. تابع‌های انتخاب شده در فرمولاسیون باید مناسب و به تعداد کافی انتخاب شوند. در غیر این صورت، الگوریتم ژنتیک برای تولید نسل آینده ابزار کافی را نداشته و به نتیجه مطلوب نمی‌رسیم. اگر توابع پیچیده‌تر و با تعداد زیادتر هم انتخاب شوند، باز هم الگوریتم ژنتیک برای تولید نسل آینده دچار سردرگمی شده و با تابع‌هایی درگیر می‌شود که اگر در نسل‌های آینده با آنها به نتیجه مطلوب نرسد، قادر به حذف آنها نیست. زیرا با حذف آنها ساختار کلی خراب می‌شود. مقدار ضرایب ثابت موجود در نمایش درختی در جدول ۴ نشان داده شده است.

در این مقاله، برای مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و به‌دست آمده از مدل عددی در آموزش و آزمایش داده‌ها، از پارامتر ضریب همبستگی استفاده شده است. باید توجه داشت، در صورتی نتایج قابل قبول است که در روند رسیدن به بیشینه سختی و همگرایی شدن نتایج، تغییر ناگهانی در مقدار سختی اتفاق نیفتد. این اتفاق در حلقه‌های اولیه و جمعیت نسل اولیه از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. بدین منظور، مدل درختی الگوریتم ژنتیک مورد استفاده برای تخمین بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب (شکل ۴) در دو مرحله‌ی آموزش و آزمایش مورد استفاده قرار گرفته و نتایج در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است.

نتایج حاصله نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع آب، خطای روابط تهیه شده به کمک الگوریتم ژنتیک برای پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب در بیشتر موارد افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، مخزنی با عرض ۰/۹ متر، در صورتی که تحت نوسان خطی با دامنه ۰/۴ متر و فرکانس زاویه‌ی ۹ رادیان بر ثانیه قرار می‌گیرد، چنانچه ارتفاع آب از ۰/۶ متر به ۰/۹ متر افزایش یابد، درصد خطای مدل در پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب از حدود ۳ درصد به ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. از طرفی، با افزایش دامنه‌ی نوسان مخزن، این خطا در اکثر موارد کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، مخزنی با عرض ۰/۹ متر و ارتفاع آب ۰/۷ متر، اگر تحت نوسان خطی با فرکانس زاویه‌ی ۹ رادیان بر ثانیه قرار گیرد، با افزایش دامنه نوسان مخزن از ۰/۰۱ متر به ۰/۰۵ متر، درصد خطای مدل در پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب از حدود ۱۵ درصد به ۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد، با افزایش فرکانس زاویه‌ی نوسان مخزن، خطای مدل

در بیشتر موارد زیاد می‌شود. به‌عنوان مثال، یک مخزن با عرض ۰/۹ متر ارتفاع آب ۰/۶ متر، در صورتی که تحت نوسان خطی با دامنه ۰/۰۲ متر قرار می‌گیرد، با افزایش فرکانس زاویه‌ی نوسان مخزن از ۵/۵ رادیان بر ثانیه به ۹ رادیان بر ثانیه، درصد خطای مدل در پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب از حدود ۴ درصد به ۵ درصد افزایش می‌یابد.

در این مرحله، مدل درختی الگوریتم ژنتیک برای تخمین نیروی افقی وارد بر بدنه مخزن (شکل ۵) در دو مرحله‌ی آموزش و آزمایش مورد استفاده قرار گرفته و نتایج در جداول ۷ و ۸ ارائه شده است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، با افزایش ارتفاع آب، خطای مدل تهیه شده برای پیش‌بینی بیشینه نیروی وارد بر بدنه مخزن ناشی از پدیده‌ی تلاطم در بیشتر موارد افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، مخزنی با عرض ۰/۹ متر، در صورتی که تحت نوسان خطی با دامنه ۰/۰۵ متر و فرکانس زاویه‌ی ۹ رادیان بر ثانیه قرار گیرد، با افزایش ارتفاع آب از ۰/۷ متر به ۰/۹ متر، درصد خطای مدل در پیش‌بینی بیشینه نیروی افقی وارد بر بدنه مخزن از حدود ۰/۰۶ درصد به ۰/۳۸ درصد افزایش می‌یابد. از طرفی، با افزایش دامنه نوسان مخزن، خطای مدل ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک برای پیش‌بینی بیشینه نیروی وارد بر بدنه مخزن در اکثر موارد کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، یک مخزن با عرض ۰/۹ متر و ارتفاع آب ۰/۶ متر، در صورتی که تحت نوسان خطی با فرکانس زاویه‌ی ۹ رادیان بر ثانیه قرار می‌گیرد، با افزایش دامنه‌ی نوسان مخزن از ۰/۰۲ متر به ۰/۰۵ متر، درصد خطای مدل از ۲/۶۴ درصد به ۰/۳۸ درصد کاهش می‌یابد. در نهایت، نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش فرکانس زاویه‌ی نوسان مخزن، خطای مدل در پیش‌بینی بیشینه نیروی افقی وارد بر بدنه مخزن کم‌تر می‌شود. به‌عنوان مثال، مخزنی با عرض ۰/۹ متر و ارتفاع آب ۰/۹ متر، در حالی که تحت نوسان خطی با دامنه‌ی ۰/۰۲ متر قرار می‌گیرد، اگر فرکانس زاویه‌ی نوسان مخزن از ۵/۵ رادیان بر ثانیه به ۷ رادیان بر ثانیه افزایش یابد، درصد خطای مدل از ۳/۱۴ درصد به ۰/۷۸ درصد افزایش می‌یابد.

در مجموع، متوسط خطای روابط ارائه شده، به‌وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک، برای پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب و بیشینه نیروی افقی وارد بر بدنه مخزن به‌ترتیب در حدود ۱۱ و ۵ درصد است. لذا می‌توان الگوریتم ژنتیک را به‌عنوان روشی مناسب برای شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم مورد استفاده قرار داد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدل درختی ژنتیک الگوریتم برای شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم در مخزن مستطیلی ناشی از حرکت نوسانی افقی با دامنه محدود مورد استفاده قرار گرفت. بدین‌منظور ابتدا مدل عددی برای شبیه‌سازی این پدیده توسعه داده شده و نتایج به دست آمده برای آموزش مدل درختی ژنتیک الگوریتم مورد استفاده قرار گرفت. مدل عددی بر اساس سیال ایده‌آل تهیه شده و از روش ترکیبی المان مرزی و اجزاء محدود برای معادلات حاکم استفاده شد. الگوریتم ژنتیک با استفاده از نتایج به دست آمده از مدل عددی آموزش و برای شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم مورد استفاده قرار گرفت. سپس روابطی برای پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب و نیروی افقی وارد بر بدنه مخزن ارائه شد. برای بررسی دقت روابط ارائه شده، معیار ضریب همبستگی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد، مدل ارائه شده در پیش‌بینی این دو پارامتر دقت خوبی دارد، اما دقت مدل در پیش‌بینی نیروی افقی وارد بر بدنه مخزن بیشتر از دقت مدل در پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح

جدول ۵. بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک (در مرحله‌ی آموزش).

فرکانس زاویه‌ی مدی ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک (رادیان بر ثانیه)	دامنه‌ی نوسان (متر)	ارتفاع آب (متر)	عرض مخزن (متر)	بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب (تجربی)	بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب (پیش‌بینی)	درصد خطای مدل ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک
۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۶	۰٫۹	۰٫۰۴۸۸	۰٫۰۴۶۷	۴٫۳۰
۹	۰٫۰۰۲	۰٫۶	۰٫۹	۰٫۰۰۸۶	۰٫۰۰۹۰۶	۵٫۳۵
۹	۰٫۰۰۳	۰٫۶	۰٫۹	۰٫۰۱۳۵	۰٫۰۱۳۶	۰٫۷۴
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۶	۰٫۹	۰٫۰۲۳۹	۰٫۰۲۲۵	۵٫۸۶
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۶	۰٫۹	۰٫۰۱۸۷	۰٫۰۱۸۱	۳٫۲۱
۷	۰٫۰۰۲	۰٫۷	۰٫۹	۰٫۰۱۶۴	۰٫۰۱۸۰۹	۱۰٫۳۰
۹	۰٫۰۰۲	۰٫۷	۰٫۹	۰٫۰۰۸۷	۰٫۰۰۹۷	۱۱٫۴۹
۹	۰٫۰۰۱	۰٫۷	۰٫۹	۰٫۰۰۴۲	۰٫۰۰۴۸۷	۱۵٫۹۵
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۷	۰٫۹	۰٫۰۲۵۵	۰٫۰۲۴۱	۵٫۴۹
۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۸	۰٫۹	۰٫۰۳۹۳	۰٫۰۴۶۶	۱۸٫۵۸
۷	۰٫۰۰۲	۰٫۸	۰٫۹	۰٫۰۱۶۶	۰٫۰۱۹۲	۱۵٫۶۶
۵٫۵	۰٫۰۰۳	۰٫۸	۰٫۹	۰٫۰۵۹۹	۰٫۰۵۳۲	۱۱٫۱۹
۹	۰٫۰۰۳	۰٫۸	۰٫۹	۰٫۰۱۴۲	۰٫۰۱۵۷	۱۰٫۵۶
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۸	۰٫۹	۰٫۰۲۵۳	۰٫۰۲۶	۲٫۷۷
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۸	۰٫۹	۰٫۰۱۹۹	۰٫۰۲۰۹	۵٫۰۳
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۹	۰٫۹	۰٫۰۱۹۳	۰٫۰۲۲۶۶	۱۷٫۳۸
۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۰۱۷۴	۰٫۰۱۸۳	۵٫۱۷
۹	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۰۱۰۱	۰٫۰۰۹۸۷	۲٫۲۸
۹	۰٫۰۰۳	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۰۱۵۴	۰٫۰۱۴۸	۳٫۹۰
۹	۰٫۰۰۱	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۰۰۴۹	۰٫۰۰۴۹۶	۱٫۲۲
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۰۲۰۸	۰٫۰۱۹۶	۵٫۷۷
۵٫۵	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۰۴۴۶	۰٫۰۴۱۲	۷٫۶۲
۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۷	۰٫۰۱۰۴	۰٫۰۱۲۱	۱۶٫۳۵
۹	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۷	۰٫۰۱۱۰	۰٫۰۱۱۶	۵٫۴۵
۹	۰٫۰۰۱	۰٫۹	۰٫۷	۰٫۰۰۵۲	۰٫۰۰۵۸۳	۱۲٫۱۲
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۷	۰٫۰۲۷۹	۰٫۰۲۸۸	۳٫۲۳
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۹	۰٫۷	۰٫۰۲۲۳	۰٫۰۲۳۱	۳٫۵۹
۹	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۶	۰٫۰۱۴۲	۰٫۰۱۲۶	۱۱٫۲۷
۹	۰٫۰۰۱	۰٫۹	۰٫۶	۰٫۰۰۶۹	۰٫۰۰۶۳۳	۸٫۲۶
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۶	۰٫۰۳۶۵	۰٫۰۳۱۳	۱۴٫۲۵

جدول ۶. بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک (در مرحله‌ی آزمایش).

فرکانس زاویه‌ی مدی نوسان (رادیان بر ثانیه)	دامنه‌ی نوسان (متر)	ارتفاع آب (متر)	عرض مخزن (متر)	بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب (تجربی)	بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب (پیش‌بینی)	درصد خطای مدل ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک
۷	۰٫۰۰۲	۰٫۶	۰٫۹	۰٫۰۱۵۶	۰٫۰۱۷۱	۹٫۶۰
۹	۰٫۰۰۱	۰٫۶	۰٫۹	۰٫۰۰۴۲	۰٫۰۰۴۵۴	۸٫۱۰
۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۷	۰٫۹	۰٫۰۴۱۹	۰٫۰۴۶۶۴	۱۱٫۳۰
۹	۰٫۰۰۳	۰٫۷	۰٫۹	۰٫۰۱۴۳	۰٫۰۱۴۵	۱٫۴۰
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۷	۰٫۹	۰٫۰۲۰۱	۰٫۰۱۹۳	۳٫۹۸
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۹	۰٫۰۲۴۶	۰٫۰۲۸۲۶	۱۴٫۸۹
۷	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۰۲۳۷	۰٫۰۲۱۲	۱۰٫۵۵
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۰۲۶۳	۰٫۰۲۴۵	۶٫۸۴
۵٫۵	۰٫۰۰۳	۰٫۹	۰٫۷	۰٫۰۱۵۸	۰٫۰۱۷۷	۱۲٫۰۳
۹	۰٫۰۰۳	۰٫۹	۰٫۷	۰٫۰۱۶۷	۰٫۰۱۷۴	۴٫۱۹
۹	۰٫۰۰۳	۰٫۹	۰٫۶	۰٫۰۲۱۴	۰٫۰۱۸۸۶	۱۱٫۸۶
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۹	۰٫۶	۰٫۰۲۸۸	۰٫۰۲۵۱	۱۲٫۸۵

جدول ۷. مقدار بیشینه نیروی افقی وارد بر بدنه مخزن با استفاده از مدل ژنتیک الگوریتم (در مرحله‌ی آموزش).

فرکانس زاویه‌ی نوسان (رادیان بر ثانیه)	دامنه نوسان (متر)	ارتفاع آب (متر)	عرض مخزن (متر)	بیشینه نیروی افقی (تجربی)	بیشینه نیروی افقی (پیش‌بینی)	درصد خطای مدل ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک
۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۶	۰٫۹	۲۱۳٫۹	۲۲۴٫۹۴۵	۵٫۱۶
۹	۰٫۰۰۲	۰٫۶	۰٫۹	۷۸٫۹	۷۶٫۸۱۸۲	۲٫۶۴
۹	۰٫۰۰۳	۰٫۶	۰٫۹	۱۱۳٫۱	۱۰۸٫۶۸۶	۳٫۹۰
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۶	۰٫۹	۱۸۰٫۶	۱۸۱٫۲۹۱	۰٫۳۸
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۶	۰٫۹	۱۴۷٫۴	۱۴۳٫۹۹	۲٫۳۱
۷	۰٫۰۰۲	۰٫۷	۰٫۹	۱۰۵٫۰	۱۰۰٫۷	۴٫۱۰
۹	۰٫۰۰۲	۰٫۷	۰٫۹	۷۹٫۹	۷۸٫۴۰۸۳	۱٫۸۷
۹	۰٫۰۰۱	۰٫۷	۰٫۹	۴۵٫۴	۵۰٫۱۰۳۱	۱۰٫۳۶
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۷	۰٫۹	۱۹۲٫۹	۱۹۳٫۰۱۹	۰٫۰۶
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۷	۰٫۹	۱۵۳٫۵	۱۵۳٫۹۳۱	۰٫۲۸
۷	۰٫۰۰۲	۰٫۸	۰٫۹	۱۰۵٫۳	۱۰۳٫۱۴۹	۲٫۰۴
۵٫۵	۰٫۰۰۳	۰٫۸	۰٫۹	۳۰۷٫۲	۲۹۹٫۶۹	۲٫۴۴
۹	۰٫۰۰۳	۰٫۸	۰٫۹	۱۱۷٫۴	۱۱۵٫۵۰۵	۱٫۶۱
۹	۰٫۰۰۱	۰٫۸	۰٫۹	۴۵٫۷	۵۱٫۶۴۱۹	۱۳٫۰۰
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۸	۰٫۹	۱۸۷٫۶	۱۹۳٫۲۱	۲٫۹۹
۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۹	۱۷۱٫۸	۱۷۷٫۱۹۲	۳٫۱۴
۷	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۹	۱۰۵٫۹	۱۰۶٫۷۲۱	۰٫۷۸
۹	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۹	۸۳٫۰	۸۱٫۴۲۸۳	۱٫۸۹
۹	۰٫۰۰۱	۰٫۹	۰٫۹	۴۶٫۴	۵۳٫۷۲۹	۱۵٫۸۰
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۹	۱۹۱٫۹	۱۹۱٫۱۶۹	۰٫۳۸
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۹	۰٫۹	۱۵۶٫۰	۱۵۳٫۰۱۲	۱٫۹۲
۵٫۵	۰٫۰۰۳	۰٫۹	۰٫۸	۱۰۳٫۸	۱۰۶٫۵۰۷	۲٫۶۱
۷	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۸	۱۲۱٫۸	۱۱۵٫۴۶	۵٫۲۱
۹	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۸	۷۶٫۵	۷۳٫۸۷۱۲	۳٫۴۴
۹	۰٫۰۰۱	۰٫۹	۰٫۸	۴۳٫۲	۴۴٫۴۰۰۱	۲٫۷۸
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۸	۱۷۶٫۱	۱۷۳٫۹۷۲	۱٫۲۱
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۹	۰٫۸	۱۴۳٫۲	۱۳۸٫۳۱۳	۳٫۴۱
۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۷	۴۰٫۴	۳۹٫۸۵۲۹	۱٫۳۵
۵٫۵	۰٫۰۰۳	۰٫۹	۰٫۷	۵۵٫۸	۵۵٫۶۷۹۱	۰٫۲۲
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۹	۰٫۷	۱۲۹٫۴	۱۲۶٫۲۱۳	۲٫۴۶
۹	۰٫۰۰۱	۰٫۹	۰٫۶	۳۸٫۳	۳۳٫۰۳۹۱	۱۳٫۷۴
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۹	۰٫۶	۱۲۷٫۱	۱۴۱٫۳۹۸	۱۱٫۲۵
۵٫۵	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۶	۴۹٫۲	۴۶٫۰۰۴۴	۶٫۵۰



جدول ۸. بیشینه نیروی افقی وارد بر بدنه مخزن با استفاده از الگوریتم ژنتیک (در مرحله‌ی آزمایش).

فرکانس زاویه‌یی نوسان (رادیان بر ثانیه)	دامنه نوسان (متر)	ارتفاع آب (متر)	عرض مخزن (متر)	بیشینه نیروی افقی (تجربی)	بیشینه نیروی افقی (پیش‌بینی)	درصد خطای مدل ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک
۷	۰٫۰۰۲	۰٫۶	۰٫۹	۱۰۰٫۲	۹۶٫۰۷۱	۴٫۱۲
۹	۰٫۰۰۱	۰٫۶	۰٫۹	۴۵٫۳	۴۹٫۱۰۳	۸٫۳۹
۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۷	۰٫۹	۱۸۸٫۰	۱۹۱٫۲۱	۱٫۷۱
۹	۰٫۰۰۳	۰٫۷	۰٫۹	۱۱۵٫۸	۱۱۴٫۵۸	۱٫۰۵
۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۸	۰٫۹	۱۷۶٫۴	۱۸۰٫۵	۲٫۳۲
۹	۰٫۰۰۲	۰٫۸	۰٫۹	۸۱٫۶	۷۹٫۳۵۷	۲٫۷۵
۹	۰٫۰۰۴	۰٫۸	۰٫۹	۱۵۳٫۰	۱۵۴٫۱۹	۰٫۷۸
۹	۰٫۰۰۳	۰٫۹	۰٫۹	۱۱۹٫۵	۱۱۵٫۱۱	۳٫۶۸
۵٫۵	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۸	۷۲٫۶	۷۴٫۳۷۸	۲٫۴۵
۹	۰٫۰۰۳	۰٫۹	۰٫۸	۱۰۹٫۹	۱۰۵٫۰۷	۴٫۳۹
۵٫۵	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۸	۱۶۷٫۰	۱۸۶٫۶۲	۱۱٫۷۵
۷	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۷	۲۰۶٫۶	۲۰۳٫۹۳	۱٫۲۹
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۷	۱۶۰٫۶	۱۵۹٫۱۱	۰٫۹۳
۹	۰٫۰۰۲	۰٫۹	۰٫۶	۶۶٫۷	۶۷٫۶۴۹	۱٫۴۲
۹	۰٫۰۰۵	۰٫۹	۰٫۶	۲۲۲٫۵	۱۸۳٫۶۱	۱۷٫۴۸

دامنه‌ی نوسان مخزن، این خطا در هر دو مورد کاهش می‌یابد. با افزایش فرکانس زاویه‌یی نوسان مخزن، خطای مدل در پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب و بیشینه نیروی وارد بدنه مخزن به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. در نهایت متوسط خطای مدل برای پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب و بیشینه نیروی افقی وارد بر بدنه مخزن به ترتیب در حدود ۱۱ و ۵ درصد است. لذا می‌توان الگوریتم ژنتیک را به عنوان روشی مناسب برای شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم مورد استفاده قرار داد.

آزاد آب است. به عنوان مثال، ضریب همبستگی در پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب در مراحل آموزش و آزمایش به ترتیب در حدود ۸۲ و ۹۳ درصد و ضریب همبستگی در پیش‌بینی بیشینه نیروی افقی وارد بر بدنه مخزن در مراحل آموزش و آزمایش به ترتیب در حدود ۹۹ و ۹۵ درصد است. نتایج به دست آمده همچنین نشان داد، با افزایش ارتفاع آب، خطای مدل تهیه شده به کمک الگوریتم ژنتیک برای پیش‌بینی بیشینه جابه‌جایی سطح آزاد آب و بیشینه نیروی وارد بدنه مخزن ناشی از پدیده‌ی تلاطم در بیشتر موارد افزایش می‌یابد. از طرفی، با افزایش

## پانویس‌ها

1. genetic algorithm
2. sloshing
3. Carva

## منابع (References)

1. Patrick, W. "Analytical solutions of first-mode sloshing in new axisymmetric containers", *Wave Motion*, **66**, pp. 45-55 (2016).
2. Liu, D., Tang, W., Wang, J., Xue, H. and Wang, K. "Comparison of laminar model, RANS, LES and VLES for simulation of liquid sloshing", *Applied Ocean Research*, **59**, pp. 638-649 (2016).
3. Wang, W., Peng, Y., Zhou, Y. and Zhang, Q., "Liquid sloshing in partly-filled laterally-excited cylindrical tanks equipped with multi baffles", *Applied Ocean Research*, **59**, pp. 543-563 (2016).
4. Celebi, M.S. and Akyildiz, H. "Nonlinear modeling of liquid sloshing in moving rectangular tank", *Ocean Engineering*, **29**(12), pp. 1527-1553 (2002).
5. Akyildiz, H. and Unal, N.E. "Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: Numerical simulation and experimental validation", *Ocean Engineering*, **33**(16), pp. 2135-2149 (2006).
6. Chowdhury, S.D. and Sannasiraj, S.A. "Numerical simulation of 2D sloshing waves using SPH with diffusive terms", *Applied Ocean Research*, **47**, pp. 219-240 (2014).
7. Zhao Y. and Chen, H.-C. "Numerical simulation of 3D sloshing flow in partially filled LNG tank using a coupled level-set and volume-of-fluid method", *Ocean Engineering*, **104**, pp. 10-30 (2015).

8. Elahi, R., Passandideh-Fard, M. and Javanshir, A. "Simulation of liquid sloshing in 2D containers using the volume of fluid method", *Ocean Engineering*, **96**, pp. 226-244 (2015).
9. Jin, H., Liun, Y. and Li, H.-J. "Experimental study on sloshing in a tank with an inner horizontal perforated plate", *Ocean Engineering*, **82**, pp. 75-84 (2014).
10. Yu, Y.-M., Ma, N., Fan, S.-M. and Gu, X.-C. "Experimental and numerical studies on sloshing in a membrane-type LNG tank with two floating plates", *Ocean Engineering*, **129**, pp. 217-227 (2017).
11. Lu, L., Jiang, S.-C., Zhao, M. and Tang, G.-Q. "Two-dimensional viscous numerical simulation of liquid sloshing in rectangular tank with/without baffles and comparison with potential flow solutions", *Ocean Engineering*, **108**, pp. 662-677 (2015).
12. Wang, W., Peng, Y., Zhou, Y. and Zhang, Q. "Liquid sloshing in partly-filled laterally-excited cylindrical tanks equipped with multi baffles", *Applied Ocean Research*, **59** pp. 543-563 (2016).
13. Hasheminejad, S.M. and Mohammadi, M.M. "Active sloshing control in a smart flexible cylindrical floating roof tank", *Journal of Fluids and Structures*, **66**, pp. 350-381 (2016).
14. Curadelli, O., Ambrosini, D., Mirasso, A. and Amani, M. "Resonant frequencies in an elevated spherical container partially filled with water: FEM and measurement", *Journal of Fluids and Structures*, **26**(1), pp. 148-159 (2010).
15. Boroomand, B., Bazazzadeh, S. and Zandi, S.M. "On the use of Laplace's equation for pressure and a mesh-free method for 3D simulation of nonlinear sloshing in tanks", *Ocean Engineering*, **122** pp. 54-67 (2016).
16. Wu, C.H., Faltinsen, O.M. and Chen, B.F. "Numerical study of sloshing liquid in tanks with baffles by time-independent finite difference and fictitious cell method", *Computers & Fluids*, **63**, pp. 9-26 (2012).
17. Jeng, D.S., Cha, D. and Blumenstein, M. "Application of neural network in civil engineering problems", in *Proceedings of the International Conference on Advances in the Internet, Processing, Systems and Interdisciplinary Research (IPSI-2003)*, Citeseer (2003).
18. Hyun-Soo, K. and Young-Shin, L. "Optimization design technique for reduction of sloshing by evolutionary methods", *Journal of Mechanical Science and Technology*, **22**(1), pp. 25-33, (2008).
19. Yuan, X., Chen, Z., Yuan, Y. and Huang Y. "Design of fuzzy sliding mode controller for hydraulic turbine regulating system via input state feedback linearization method", *Energy*, **93**(1), pp. 173-187 (2015).
20. Holland, J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, First edition, University of Michigan Press (1975), Second edition, Cambridge, MA: MIT Press (1992).
21. Koza, J.R., *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, The MIT Press. Koza, J.R. (1994).
22. Ferreira, C., *Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence*, Springer, **21**, 480 p. (2006).
23. Saghi, H. "The pressure distribution on the rectangular and trapezoidal storage tanks' perimeters due to liquid sloshing phenomenon", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, **8**(2), pp. 153-168 (2016).
24. Nakayama, T. and Washizu, K. "Boundary element analysis of nonlinear sloshing problems", Published in *Developments in Boundary Element Method-3*, Bauerjee P. K, Mukherjee S., Elsevier Applied Science Publishers, Newyork (1984).