



## ارزیابی عمق استغراق بحرانی در آبگیرهای افقی منشعب از کانال

یاسر شیخی<sup>۱</sup>، بابک لشکرآرا<sup>۲\*</sup> و مهسا والی‌پور<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول،

<sup>۲</sup>استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول

تاریخ دریافت: ۹۴/۱/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۹

### چکیده

**سابقه و هدف:** استفاده از آبگیرهای افقی یکی از روش‌های رایج در برداشت آب از مخازن و رودخانه‌ها می‌باشد. وقوع جریان گردابی در دهانه‌های آبگیر یکی از مشکلات عمده این نوع سازه‌ها است. گرداب تشکیل شده در دهانه آبگیر در مرحله اول منجر به کاهش راندمان آبگیری شده و در مرحله دوم بسته به نوع سازه، هوای ورودی به دهانه آبگیر می‌تواند منجر به بروز خسارت به آن شود. بنابراین تخمین عمق استغراق بحرانی بالای آبگیر به منظور جلوگیری از تشکیل گرداب و ورود هوا به آن از ضروریات اصلی پژوهش به‌شمار می‌رود. مطالعه پژوهش‌های پیشین نشان داد که در بیش‌تر روابط پیشنهادی توسط پژوهش‌گران، اثر فاصله از کف کانال  $C$  در معادلات لحاظ نشده و معادلات تنها در دو حالت  $C = D_i/2$  و  $C = 0$  به صورت دو معادله مجزا ارائه شده‌اند.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف جریان و فاصله آبگیر از کف کانال بر عمق استغراق بحرانی برای آبگیرهای افقی در شرایط جریان آزاد ارائه شده است. در این راستا نخست معادله حاکم بر فضای پژوهش با استفاده از تئوری باکینگهام و رگرسیون غیرخطی تعیین گردید و در مرحله بعد جهت تدقیق نتایج از مدل‌های شبکه عصبی و برنامه‌سازی ژنتیک استفاده شد. بدین منظور در ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی معادله حاکم بر فضای پژوهش مشخص گردید. سپس با استفاده از رگرسیون غیرخطی و نرم‌افزار تحلیل‌گر آماری SPSS معادله حاکم بر فضای پژوهش تعیین شد. تحلیل نتایج آماری نشان داد که معادله پیشنهادی جهت تخمین عمق نسبی استغراق بحرانی  $S_c/D_i$  در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دارای ضریب همبستگی  $0/9363$  و دارای مجذور میانگین مربعات خطای  $0/3165$  می‌باشد. به‌منظور اعتبارسنجی این معادله از نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین استفاده گردید.

**یافته‌ها:** مقایسه نتایج نشان داد، معادله حاصل از مطالعه احمد و همکاران مقدار عمق استغراق بحرانی را  $8/3$  درصد بیش‌تر از نتایج آزمایشگاهی، معادله پیشنهادی ایوب‌لو و همکاران  $6/8$  درصد کم‌تر از نتایج آزمایشگاهی و در نهایت معادله پیشنهادی پژوهش حاضر، این مقدار را  $0/5$  درصد بیش‌تر از نتایج آزمایشگاهی تخمین می‌زند. از طرفی مدل شبکه عصبی مصنوعی مقدار  $S_c/D_i$  را  $1/03$  درصد کم‌تر از نتایج آزمایشگاهی و مدل برنامه‌سازی ژنتیک این مقدار را  $1/63$  درصد بیش‌تر از نتایج آزمایشگاهی تخمین می‌زند.

\* مسئول مکاتبه: [lashkarara@jsu.ac.ir](mailto:lashkarara@jsu.ac.ir)

**نتیجه‌گیری:** مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های شبکه عصبی و برنامه‌سازی ژنتیک نشان داد که هر دو مدل دارای توابع خطای مناسب‌تری نسبت به معادله پیشنهادی هستند، این در حالی است که مقایسه توابع خطای محاسبه شده این دو روش هوشمند بیانگر برتری نسبی عمل‌کرد شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. از طرفی به دلیل فرم ساده و کارآمد معادله پیشنهادی، استفاده از این معادله جهت تخمین عمق نسبی استغراق بحرانی در دهانه‌های آبگیر افقی در شرایط جریان آزاد توصیه می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** عمق استغراق، رگرسیون غیرخطی، شبکه عصبی، برنامه‌سازی ژنتیک

### مقدمه

ایجاد گرداب سبب کاهش راندمان تجهیزات هیدروالکتریکی، خوردگی، ارتعاش و لرزش سیستم‌های انتقال آب می‌شود. ارتفاع عمودی بین سطح آب تا مرکز آبگیر عمق استغراق نامیده می‌شود. عمق استغراقی که در آن ورود هوا به آبگیر آغاز می‌گردد، عمق استغراق بحرانی  $S_c$  نامیده می‌شود. بنابراین تخمین عمق استغراق بحرانی بالای آبگیر به منظور جلوگیری از تشکیل گرداب و ورود هوا به آن از ضروریات اصلی پژوهش به‌شمار می‌رود. احمد و همکاران (۲۰۰۸) با انجام آزمایش‌هایی روابط زیر را برای تعیین میزان عمق نسبی استغراق بحرانی برای آبگیرهای افقی در شرایط جریان آزاد ارائه کردند (۱).

برای شرایط  $C = 0$

$$S_c / D_i = 0.354(Fr)^{-0.11} (V_i / U)^{0.91} \quad (1a)$$

برای شرایط  $C = D_i / 2$

$$S_c / D_i = 0.29(V_i / U) \quad (1b)$$

که در آن، Fr بیانگر عدد فرود داخل لوله،  $V_i$  سرعت درون آبگیر و  $U$  سرعت جریان تقرب می‌باشد. ایوب‌لو و همکاران (۲۰۱۱) براساس آزمایش‌های احمد و همکاران (۲۰۰۸)، حداقل عمق استغراق برای

آبگیرهای افقی در شرایط جریان آزاد را به صورت زیر ارائه نمودند (۱، ۲):

برای شرایط  $C = 0$

$$S_c / D_i = 0.00001839 Re - 0.0336 Fr + 0.194(V_i / U) - 0.0002213 We - 0.624 \quad (2a)$$

برای شرایط  $C = D_i / 2$

$$S_c / D_i = 0.00000665 Re + 0.166 Fr + 0.189(V_i / U) - 0.00008234 We + 0.166 \quad (2b)$$

با بررسی به عمل آمده در پژوهش‌های پیشین ملاحظه گردید که در بیش‌تر روابط پیشنهادی در پژوهش‌های گذشته اثر فاصله از کف کانال  $C$  در معادله‌ها لحاظ نشده است و معادلات ارائه شده توسط پژوهش‌گران پیشین تنها برای دو حالت  $C = 0$  و  $C = D_i / 2$  و به صورت دو معادله مجزا از هم ارائه شده است. در پژوهش حاضر با استفاده از نتایج آزمایشگاهی رابطه‌ای عمومی جهت تخمین عمق استغراق بحرانی برای آبگیرهای افقی در شرایط جریان آزاد پیشنهاد شده است. هم‌چنین جهت افزایش دقت در تخمین عمق استغراق بحرانی از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌سازی ژنتیک نیز استفاده گردید.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش از نتایج آزمایشگاهی جهت شبیه‌سازی گرداب تشکیل شده در دهانه آبیگرهای افقی استفاده شده است. برای این منظور از نتایج آزمایشگاهی احمد و همکاران (۲۰۰۸) بهره‌گیری شده است (۱). آزمایش‌ها در سه سناریو با تغییر در قطر لوله آبیگر به‌ازای قطرهای داخلی ۶/۲۵، ۱۰/۱۶، ۱۰/۵۰ سانتی‌متر به اجرا در آمده است. آستانه ارتفاعی نصب مرکز لوله آبیگر به کف مخزن  $C$  در دو حالت  $C=0$  و  $C=D_i/2$  منظور شده است. مخزن آبیگر به‌صورت مستطیلی به عرض ۰/۳۷ متر و طول ۱۰ متر مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس تئوری آنالیز ابعادی و همچنین مشخصات سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در پژوهش‌های احمد و همکاران (۲۰۰۸)، همه پارامترهای مؤثر بر فضای پژوهش را می‌توان چنین بیان نمود:  $\rho$  وزن مخصوص سیال،  $\mu$  لزوجت سیال،  $\sigma$  کشش سطحی،  $V_i$  سرعت در ورودی لوله آبیگر،  $\Gamma$  چرخش اعمال شده به جریان،  $g$  شتاب ثقل،  $D_i$  قطر ورودی لوله آبیگر،  $C$  فاصله کف مخزن تا مرکز لوله آبیگر (۱).

با توجه به شرایط میزان عمق استغراق بحرانی در دهانه ورودی آبیگر را می‌توان به‌صورت معادله زیر معرفی نمود:

$$S_c = f(\rho, \mu, \sigma, V_i, \Gamma, g, D_i, C) \quad (3)$$

با استفاده از تئوری  $\pi$ -باکینگهام می‌توان معادله حاکم بر فضای پژوهش را به‌منظور تخمین عمق استغراق بحرانی در دهانه‌های آبیگر افقی به‌صورت رابطه ۴ نشان داد:

$$\frac{S_c}{D_i} = f\left(\frac{C}{D_i}, \frac{\rho V_i D_i}{\mu}, \frac{V_i}{\sqrt{g D_i}}, \frac{\rho V_i^2 D_i}{\sigma}, \frac{\Gamma}{V_i D_i}\right) \quad (4)$$

که در آن،  $\rho V_i D_i / \mu$  معرف عدد رینولدز،  $V_i / \sqrt{g D_i}$  معرف عدد فرود،  $\rho V_i^2 D_i / \sigma$  معرف عدد وبر و  $\Gamma / V_i D_i$  معرف عدد کلف می‌باشد. بنابراین می‌توان نوشت:

$$S_c / D_i = f(C / D_i, V_i / U, Re, Fr, We, Ko) \quad (5)$$

با استناد به مطالعات هیکر (۱۹۸۷)، چنانچه توان دوم عدد وبر از ۱۰۰۰۰ بزرگ‌تر باشد و همچنین عدد رینولدز بزرگ‌تر از ۳۰۰۰۰ باشد، به‌ترتیب می‌توان از اثر کشش سطحی و لزوجت جریان صرف‌نظر نمود (۴). از سوی دیگر، از آنجایی‌که تعیین پارامتر چرخش جریان به‌صورت عددی امکان‌پذیر است (گوربوزدال، ۲۰۰۹)، از اثر آن صرف‌نظر شده است (۳). بنابراین می‌توان معادله حاکم بر فضای پژوهش را تحت‌تأثیر پارامترهای معرفی شده در رابطه ۶ دانست:

$$S_c / D_i = f(C / D_i, V_i / U, Fr) \quad (6)$$

### نتایج و بحث

جهت تعیین معادله حاکم بر فضای پژوهش از رگرسیون غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل‌گر آماری SPSS استفاده شده است. نگاشت صورت گرفته بر فضای بین پارامترهای مستقل و وابسته را می‌توان به‌صورت رابطه ۷ نشان داد:

$$\frac{S_c}{D_i} = 0.0421(Fr)^{0.02} \left(\frac{V_i}{U}\right)^{0.774} + 0.142\left(\frac{C}{D_i}\right) \quad (7)$$

معادله پیشنهادی از ضریب همبستگی ۰/۹۳۶۳ و ریشه میانگین مربعات خطا معادل با ۰/۳۱۶۵ برخوردار است. به‌منظور ارزیابی رابطه ۷ از توابع تحلیل‌گر خطا استفاده شده است که در جدول ۱ خلاصه شده است.

از مطالعه احمد و همکاران (۲۰۰۸) نسبت به معادله پیشنهادی ایوب‌لو و همکاران (۲۰۱۱) می‌باشد (۱، ۲). با توجه به ضریب زاویه خط برازش داده شده از بین نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۱ و ۲، می‌توان دریافت که رابطه‌های ۷ و ۱ به ترتیب ۰/۵ و ۸/۳ درصد مقدار  $S_e/D_i$  را در مقابل نتایج آزمایشگاهی بیش‌تر و رابطه ۲، ۶/۸ درصد مقدار  $S_e/D_i$  را در مقابل نتایج آزمایشگاهی کم‌تر پیش‌بینی می‌نمایند که نشان از برتری معادله پیشنهادی حاصل از رگرسیون غیرخطی نسبت به سایر معادله‌ها دارد. همان‌طور که پیش‌تر بدان اشاره شد، جهت افزایش دقت در تخمین عمق استغراق بحرانی از مدل‌های شبکه عصبی و برنامه‌سازی ژنتیک بهره‌گیری شد.

شکل ۱ نحوه انطباق نتایج حاصل از پیش‌بینی معادله رگرسیون غیرخطی را با مشاهدات نظیر آزمایشگاهی جهت تخمین عمق نسبی استغراق بحرانی نشان می‌دهد.

به‌منظور اعتبارسنجی معادله پیشنهادی از نتایج حاصل از پژوهش‌های احمد و همکاران (۲۰۰۸) و ایوب‌لو و همکاران (۲۰۱۱) استفاده گردید (۱، ۲). نتایج حاصل از تحلیل آنان در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی در جدول ۱ خلاصه شده است. مقایسه نتایج مندرج در جدول ۱ نشان می‌دهد که رابطه ۷ دارای توابع خطای ریشه میانگین مربعات خطا، خطای استاندارد تخمین و راندمان بهتری نسبت به رابطه‌های ۱ و ۲ می‌باشد. در بین مطالعات پیشین نیز مقایسه توابع خطا نشان‌دهنده برتری رابطه ۱ حاصل

جدول ۱- توابع خطای حاصل از نتایج رابطه ۷، مطالعات احمد و همکاران (۲۰۰۸) و ایوب‌لو و همکاران (۲۰۱۱) در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی  $S_e/D_i$ .

**Table 1. The error function of the equation (7), Ahmad et al. (2008) and Ayoubloo et al. (2011) research via experimental observations of  $S_e/D_i$ .**

ضریب زاویه m	راندمان معادلات EF	خطای استاندارد تخمین SEE	درصد میانگین خطا MPE	ریشه مربع خطا RMSE	روش Method
1.005	0.9376	0.3165	13.622	0.3165	رابطه ۷ Equation 7
1.083	0.8802	0.4387	4.9322	0.4387	احمد و همکاران Ahmad et al.
0.931	0.8952	0.4102	8.8602	0.4102	ایوب‌لو و همکاران Ayoubloo et al.

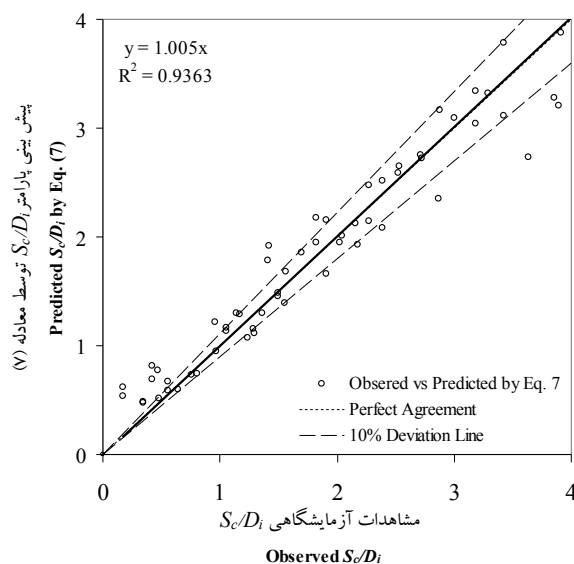
کم‌تر بهره‌گیری شد. از سوی دیگر با بهره‌گیری از مدل برنامه‌سازی ژنتیک (۵). رابطه ۸ جهت تخمین عمق استغراق بحرانی ارائه گردید. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری صورت گرفته در مراحل مختلف آموزش و آزمون شبکه عصبی و مدل برنامه‌سازی ژنتیک برای تخمین عمق استغراق بحرانی در جدول ۲ خلاصه شده است.

برای این منظور از ۸۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی جهت مرحله آموزش و از ۲۰ درصد بقیه داده‌ها که هیچ‌گونه نقشی در آموزش ایفا نکرده‌اند، نسبت به کنترل و بررسی عملکرد مدل در مرحله آزمون، مبادرت ورزیده شد. در مدل شبکه عصبی از شبکه‌ای با معماری ۱-۵-۳ به دلیل برخورداری از ضریب همبستگی بالاتر و ریشه میانگین مربعات خطا

نسبی از مقادیر توابع خطای ریشه میانگین خطا و درصد میانگین خطای کم تر و راندمان بالاتری نسبت به رابطه ۷ برخوردار است. هم چنین می توان دریافت مدل برنامه سازی ژنتیک دارای توابع خطای مناسب تری نسبت به معادله پیشنهادی می باشد، این در حالی است که توابع خطای محاسبه شده ناشی از مدل شبکه عصبی با مقدار اختلاف به نسبت کم دارای دقت مناسب تری می باشند.

$$\frac{S_c}{D_i} = \exp(Fr) \times \left( 0.06 \left( \frac{V_i}{U} \right) + 0.06 \left( \frac{C}{D} \right) \right) \times 0.6372 \exp \left( - \frac{V_i}{U} \right) + 0.7958 \quad (8)$$

شکل های ۳ و ۴ به ترتیب نحوه قرارگیری مقادیر محاسباتی توسط مدل های شبکه عصبی و برنامه سازی ژنتیک را در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی در مرحله آزمون نشان می دهد. مقایسه جدول های ۱ و ۲ نشان می دهند که مدل شبکه عصبی در مجموع به صورت



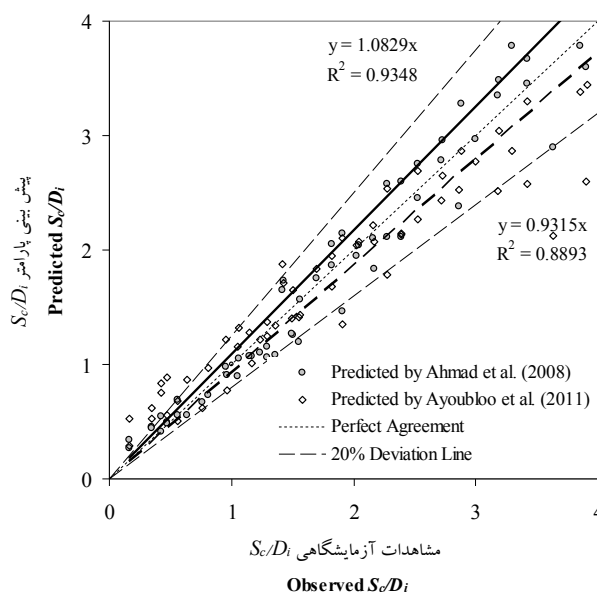
شکل ۱- مقایسه نتایج حاصل از رابطه ۷ در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی.

Figure 1. Comparison of results of equation (7) via the experimental observations.

جدول ۲- مقادیر توابع خطا حاصل از شبکه عصبی مصنوعی و مدل برنامه سازی ژنتیک در تخمین پارامتر عمق استفراف بحرانی  $S_c/D_i$ .

Table 2. Error function results of Artificial Neural Network and Genetic Programming in the depth of critical submergence  $S_c/D_i$  estimation.

مرحله آزمایش Testing				مرحله آموزش Training				پارامتر Parameter
R <sup>2</sup>	EF	RMSE	MPE	R <sup>2</sup>	EF	RMSE	MPE	
0.977	0.9775	0.1772	1.3871	0.9743	0.9747	0.1909	1.3504	ANN
0.9615	0.9591	0.2563	1.5318	0.9615	0.9626	0.2275	5.5629	GP



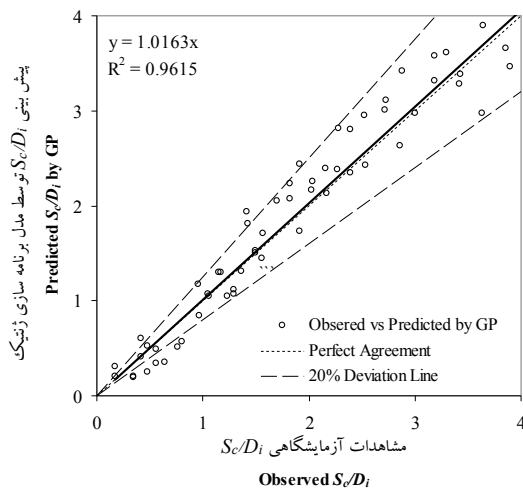
شکل ۲- مقایسه نتایج حاصل از رابطه‌های ۱ و ۲ حاصل از پژوهش احمد و همکاران (۲۰۰۸) و ایوب‌لو و همکاران (۲۰۱۱) در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی.

Figure 2. A comparison of results of equations (1) and (2) investigate from Ahmad et al. (2008) and Ayoubloo et al. (2011) via the experimental observations.

برخوردار هستند. این در حالی است که مقایسه توابع خطای محاسبه شده این دو روش هوشمند بیانگر برتری نسبی عمل‌کرد شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. از طرفی مدل شبکه عصبی مصنوعی مقدار  $S_c/D_i$  را ۱/۰۳ درصد کم‌تر از نتایج آزمایشگاهی، مدل برنامه‌سازی ژنتیک این مقدار را ۱/۶۳ درصد بیشتر از نتایج آزمایشگاهی، معادله حاصل از مطالعه احمد و همکاران ۸/۳ درصد بیشتر از نتایج آزمایشگاهی، معادله پیشنهادی ایوب‌لو و همکاران ۶/۸ درصد کم‌تر از نتایج آزمایشگاهی و در نهایت معادله پیشنهادی این مقدار را ۰/۵ درصد بیشتر از نتایج آزمایشگاهی تخمین می‌زند.

### نتیجه‌گیری

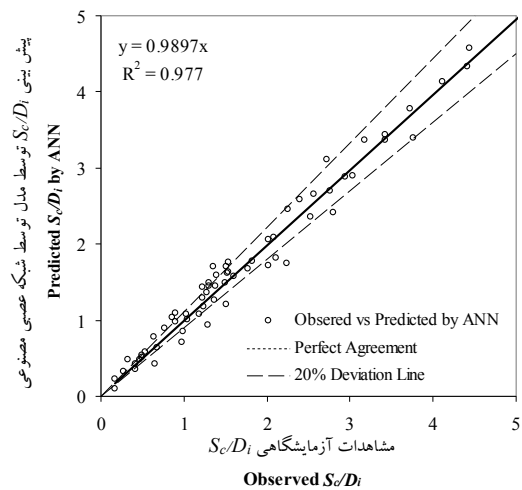
در این پژوهش با استفاده از تحلیل نتایج آزمایشگاهی و بهره‌گیری از روش رگرسیون غیرخطی نسبت به معرفی رابطه‌ای عمومی جهت تعیین شرایط عمق استغراق بحرانی  $S_c/D_i$  با در نظر گرفتن شرایط عدد فرود جریان ورودی به آبگیر، فاصله نسبی از کف و سرعت نسبی جریان اقدام گردید. سپس به منظور ارزیابی دقت نتایج از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌سازی ژنتیک نیز استفاده شده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. تحلیل نتایج نشان داد که مدل‌های شبکه عصبی و برنامه‌سازی ژنتیک از توابع خطای توصیه شده به نسبت کم‌تری در مقایسه با معادله پیشنهادی پژوهش حاضر در تخمین  $S_c/D_i$



شکل ۴- نتایج حاصل از برنامه‌سازی ژنتیک جهت تخمین پارامتر  $S_e/D_i$  در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی در مرحله آزمون.

Figure 4. The results of testing phase of GP via experimentation to estimate of  $S_e/D_i$ .

اختلاف در توابع خطای حاصل از تخمین و همچنین برخوردار از شکلی عمومی و ساده و عدم نیاز به کامپیوتر به‌هنگام کاربرد، از جمله دلایلی است که منجر به توصیه معادله پیشنهادی حاصل از پژوهش حاضر به‌عنوان مدلی ساده و کارآمد جهت تخمین عمق نسبی استغراق بحرانی در دهانه آبیگرهای افقی تحت شرایط جریان آزاد شده است.



شکل ۳- نتایج حاصل از شبکه عصبی جهت تخمین پارامتر  $S_e/D_i$  در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی در مرحله آزمون.

Figure 3. The results of testing phase of ANN via experimentation to estimate of  $S_e/D_i$ .

همان‌طورکه مشخص است مدل‌های برنامه‌سازی ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی با در نظر گرفتن مقادیر محاسبه شده توابع خطا دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به معادله پیشنهادی پژوهش حاضر، مطالعات احمد و همکاران و مطالعات ایوب‌لو و همکاران می‌باشند. تقرب گرادیان خط برازش شده از بین نتایج مشاهداتی و محاسباتی توسط معادله پیشنهادی به شیب خط ۴۵ درجه، ناچیز بودن میزان

### منابع

- Ahmad, Z., Roa, K.V., and Mittal, M. 2008. Critical submergence for horizontal intakes in open channel flows. *Dam Engineering*. 19: 2. 71-90.
- Ayoubloo, M.K., Azamathulla, H.M., Jabbari, E., and Zanganeh, M. 2011. Predictive model-based for the critical submergence of horizontal intakes in open channel flows with different clearance bottoms using CART, ANN and linear regression approaches. *Expert Systems with Applications*. 38: 8. 10114-10123.
- Gurbuzdal, F.A. 2009. Scale effects on the formation of vortices at intake structures. M.Sc. degree, scienc civil engineering, middle east technial University.
- Hecker, G. 1981. Model prototype comparison of free surface vortices. *J. Hydraul. Div. ASCE*. 107: 10. 1243-1259.
- Koza, J.R. 1992. *Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection*. Cambridge, MA: MIT Press, Pp: 73-120.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(4), 2016*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

### Short Technical Report

## Evaluation of critical submergence for horizontal intakes derived from the channel

Y. Sheikhi<sup>1</sup>, \*B. Lashkar-Ara<sup>2</sup> and M. Valipour<sup>1</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran,

<sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

Received: 04/04/2015; Accepted: 05/29/2016

### Abstract

**Background and Objectives:** Horizontal intakes are one of the most important parts of hydraulic sets such as rivers for irrigation or reservoirs for power generation and industrial purposes. Air entrainment, by means of a free air-core vortex occurring at intake pipes, is an important problem encountered in hydraulic engineering. Intake submergence depth could result in formation of the vortices. In the current literature, the distance from the bottom of channel ( $C$ ) had no effect on the equations and this equation was presented only in two states as two separate equations as follows,  $C=0$  and  $C=D/2$ .

**Materials and Methods:** In this study, equations for estimating critical submergence are developed using experimental data. At first, the equation of present study was determined using dimensional analysis, nonlinear regression and SPSS software. In the next step, the artificial neural network and the genetic programming models were used to investigate the accuracy of the results. The proposed equation includes the effect of vertical distances of intake to the bottom of channel, velocity and Froud number. In this equation, the value of RMSE and  $R^2$  are 0.3165 and 0.9363, respectively. The results of previous research are used in validating of this equation.

**Results:** All the results was compared and Ahmad et al. in comparison with experimental results predicted the depth of critical submergence 8.3% more; even though experimental results of Ayoubloo et al. predicted it 6.8% less and the proposed equation of this research predicted the value 0.5% more. However, the artificial neural network predicted the depth of critical submergence 1.03% less in comparison with experimental results, while the genetic programming model estimates the depth of critical submergence 1.63% more.

**Conclusion:** Comparing the results of artificial neural network and genetic programming represent that the error function of the proposed method is less than both of them.

**Keywords:** Submergence depth, Nonlinear regression, Neural network, Genetic programming

---

\* Corresponding Author; Email: [lashkarara@jsu.ac.ir](mailto:lashkarara@jsu.ac.ir)