علوم و مهندسی آبیاری
جلد ٤١، شماره‌ی۳، پاییز ۹۷، ص. ۱۸٤-۱۷۱

تخمین عمق استغراق بحرانی در آبگیرهای افقی منشعب از مخزن با استفاده از روش‌های هوشمند و آماری

یاسر شیخی[۱]، بابک لشکرآرا[۲*]، منوچهر فتحی مقدم[۳] و مهسا والی پور[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.
۲*- نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.Lashkarara@jsu.ac.ir
۳- استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

تاریخ دریافت:۹۵/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش:۹۶/۲/۱۲

چکیده

آبگیرهای افقی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای آبگیری از رودخانه‌ها و مخازن سدها به‌منظور تأمین آب شرب و یا اهداف صنعتی نصب می‌گردند. عمق استغراق جریان در دهانه‌های ورودی این آبگیرها می‌تواند منجر به تشکیل جریان گرداب شود. وقوع جریان گردابی در نتیجه اندرکنش بین عوامل مختلف باعث ایجاد مشکلاتی از جمله لرزش و ورود هوا به تأسیسات وابسته شده و کاهش ضریب تخلیه جریان را به‌همراه دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که عمق استغراق بحرانی در دهانه‌های آبگیر علاوه بر مشخصات هندسی دهانه آبگیر، به شدت آشفتگی و میزان تغییرات لحظه‌ای خصوصیات جریان نیز وابستگی شدید نشان می‌دهد. در این مقاله تلاش شده است تا با تلفیق نتایج آزمایشگاهی مختلف، دامنه تأثیر پارامترهای مؤثر بر تخمین عمق استغراق بحرانی در آبگیرهای افقی منشعب از مخازن گسترش یافته و در نهایت با اعمال اثر وزن کلیه عوامل هیدرولیکی و هندسی، رابطه‌ای غیر خطی برای تخمین عمق استغراق بحرانی معرفی گردد. نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با مدل Yildirim و معادله پیشنهادی Gurbuzdal، شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌سازی ژنتیک مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که هرچند نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌سازی ژنتیک از دقت بالاتری نسبت به معادله‌های پیشنهادی توسط محققین قبلی و تحقیق جاری برخوردارند ولی در بین معادله‌های ارائه شده، سازگاری بهتری بین رابطه پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی ذکر شده وجود دارد.

کلید واژه‌ها: عمق استغراق بحرانی، رگرسیون غیر خطی ، شبکه عصبی، برنامه‌سازی ژنتیک.

مقدمه

آبگیرها یکی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند که ابتدا با هدف آبگیری به‌منظور تولید برق، آبیاری یا تأمین آب آشامیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند و در مرحله بعد به‌عنوان سازه ورودی تخلیه کننده‌ها به‌کار می‌روند. عدم وجود عمق آب کافی در بالای آبگیر می‌تواند باعث ایجاد گرداب و ورود هوا به آن شود. راه‌های زیادی برای جلوگیری از ورود هوا به داخل آبگیر وجود دارد. یکی از متداول‌ترین راه‌ها ایجاد ارتفاع آب مناسب بالای آبگیر است. ارتفاع عمودی بین سطح آب تا دهانه آبگیر، عمق استغراق نامگذاری گردیده و عمق استغراقی که در آن ورود هوا به آبگیر آغاز می‌شود، عمق استغراق بحرانی (S_c) نامیده می‌شود (شکل۱). بنابراین تخمین عمق استغراق بحرانی بالای آبگیر به‌منظور جلوگیری از تشکیل گرداب و ورود هوا به آن از ضرورت‌های اصلی تحقیق به‌شمار می‌رود. مطالعه‌های تئوری و آزمایشگاهی متعددی برای تخمین عمق استغراق بحرانی صورت گرفته است. معمولاً روابط ارائه شده برای تخمین عمق استغراق بحرانی بر مبنای عدد فرود، عددرینولدز، عدد وبر و چرخش می‌باشد. مطالعه منابع پیشین به‌خصوص مطالعات Gurbuzdal (2009) نشان داد که اندرکنش پارامترهای هندسی دهانه آبگیر از جمله قطر ورودی لوله آبگیر(D_i)، فاصله کف مخزن تا مرکز لوله آبگیر (c)، عرض مخزن (b)و بیرون آمدگی لوله آبگیر (l) تأثیر به‌سزایی بر مقدار عمق استغراق بحرانی دارد. از سوی دیگر بررسی اثر هر یک از این پارامترها با معادله‌های پیچیده‌ای مواجه است. Bergi (1996) با انجام آزمایش‌هایی میزان عمق نسبی استغراق بحرانی را به‌صوت رابطه (۱) بیان نمود (به نقل از Daemi, 1998).

$$S_c / D = 3.3Fr^{.5} + 0.25 \quad (۱)$$

که در آن Fr عدد فرود جریان درون لوله آبگیر می‌باشد. Gordon (1970) روابط (۲) و (۳) را برای آبگیرهای از نوع افقی و چهار گوش در حالت‌های متقارن و نامتقارن ارائه نمود:

$$S_c / D = 1.7Fr \quad \text{آبگیر متقارن} \quad (۲)$$

$$S_c / D = 2.3Fr \qquad \text{آبگیر نامتقارن} \qquad (۳)$$

هم‌چنین بر اساس مطالعات، Amphlett (1977) برای تخمین عمق استغراق بحرانی رابطه (۴) را پیشنهاد نمود (به نقل از Daemi, 1998).

$$S_c / D = 3.95Fr^{0.5} - 0.5 \qquad (۴)$$

Knauss (1987) براساس آزمایش‌هایی که Gordon (1970) انجام داده بود، حداقل عمق استغراق مورد نیاز برای آبگیر را با شرایط ورودی نرمال به‌صورت رابطه (۵) توصیه نمود.

$$S_c / D = 0.5 + 2Fr \qquad (۵)$$

Yildirim و Kocabas (1995) براساس نظریه رانکین (Rankin)، ناحیه‌ای کروی در اطراف دهانه آبگیر فرض نمودند که در داخل این ناحیه آب به داخل آبگیر وارد شده و در خارج آن، آب وارد آبگیر نمی‌شود.

Yildirim و Kocabas (1995) با استفاده از رابطه پتانسیل و برقراری تعادل بین دبی ورودی و خروجی به سطح ریزش کره فرضی بحرانی (Critical Spherical Sink Surface)، توانستند شعاع کره مفروض را محاسبه نمایند. از این پس در این مطالعه سطح ریزش کره فرضی بحرانی به اختصار CSSS نمایش داده می‌شود. در این مطالعه مرکز کره CSSS برابر مرکز آبگیر می‌باشد. هم‌چنین Yildirim et al (2000) به بررسی اثر مرزهای نفوذ ناپذیر بر عمق استغراق بحرانی پرداختند.

Wang et al. (2011) با استفاده از مدل آزمایشگاهی نیروگاه سد Xiluodu به این نتیجه رسید که با افزایش شیب بالادست، می‌توان عمق استغراق بحرانی را کاهش داده و از قدرت گرداب کم نمود. Bina et al. (2012) آبگیرهای کفی مشبک با درصد بازشدگی مختلف را در کانالی با شیب‌های متفاوت نصب کردند و با عبور دادن دبی‌های مختلف ضریب تخلیه آبگیرهای کفی مشبک را تحت تأثیر پارامترهای مختلف هیدرولیکی و هندسی را مورد بررسی قرار دادند. Sheikhi et al. (2016) با استفاده از شبکه‌های هوشمند و الگوریتم ژنتیک میزان عمق استغراق بحرانی را در آبگیرهای افقی منشعب از کانال مورد ارزیابی قرار دادند.

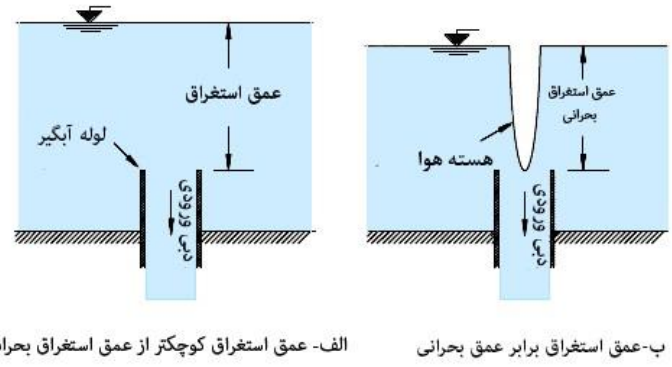
بررسی مطالعات کتابخانه‌ای و هم‌چنین مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تخمین و تقریب عمق استغراق بحرانی در دهانه‌های آبگیر علاوه بر خصوصیات هیدرولیکی جریان و مشخصات هندسی دهانه آبگیر، به شدت آشفتگی و میزان تغییرات لحظه‌ای سرعت زاویه‌ای جریان بستگی دارد. کمیت و چگونگی اثر این عوامل در بیشتر موارد تحت تأثیر عوامل تصادفی بوده که منجر خواهد شد تا تقریب‌های صورت گرفته با چالش مواجه شوند. لذا در این تحقیق تلاش شده است تا با تلفیق نتایج تحقیقات گوناگون اثر پذیری توابع احتمالی را بر تخمین میزان عمق استغراق بحرانی به حداقل مقدار ممکن کاهش داد. برای این منظور از روش‌های هوشمند و آماری استفاده شده است.

روش تحقیق

در تحقیق حاضر مطالعات انجام شده پیرامون سطح ریزش کره بحرانی CSSS مورد استفاده توسط Yildirim et al. (2000) با عنوان CSSS I نام‌گذاری شده است که دارای شعاعی برابر S_c است. بر مبنای رابطه پیوستگی و حل پتانسیل، این محققین رابطه (۶) را برای به‌دست آوردن عمق استغراق بحرانی در آبگیرهای افقی توسط مدل CSSS I ارائه کردند:

$$A_c = 4\pi S_c^2 - \left[A_{bb} + A_{pb}\right] \qquad (۶)$$

که در آن A_C : مساحت خالص CSSS پس از کم کردن انسداد لوله آبگیر و دیوارهای نفوذ ناپذیر، A_{bb} : میزان انسداد مرزهای نفوذناپذیر و A_{pb} : میزان انسداد لوله آبگیر می‌باشد.



الف- عمق استغراق کوچکتر از عمق استغراق بحرانی ب-عمق استغراق برابر عمق بحرانی

شکل ۱- عمق استغراق بحرانی در آبگیر. (الف) بدون ورود هوا ، (ب) شرایط بحرانی

در شرایط بحرانی اثر انسداد لوله فقط برای مواردی که در آن شرط $C \geq S_c\left[\left(1-0.25(D_0/S_c)^2\right)\right]^{0.5}$ برقرار است به‌صورت زیر محاسبه می‌شود :

$$A_{pb} = 2\pi S_c^2\left[1-\sqrt{1-0.25(D_o/D_i)^2(D_i/S_c)^2}\right] \quad (۷)$$

که در آن D_o : قطر خارجی لوله آبگیر و c : فاصله مرکز آبگیر از کف کانال است. در چنین شرایطی اثر انسداد مرزهای نفوذناپذیر نیز به‌صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$A_{bb} = 8\pi S_c^2 - 2\pi S_c(c+b_1+b_2+l) - 2\pi S_c(\overline{JH}+\overline{K_1Z_1}+\overline{K_2Z_2}+\overline{K_3Z_3}+\overline{K_4Z_4}) \quad (۸)$$

که در آن b_1 و b_2: فاصله از طرفین کانال، c : فاصله مرکز آبگیر از کف کانال و l: پیش آمدگی لوله آبگیر می‌باشد. پارامترهای $\overline{K_1Z_1}$، $\overline{K_2Z_2}$ ، $\overline{K_3Z_3}$، $\overline{K_4Z_4}$ و $\overline{JH}$ وترهایی از کره بحرانی می باشند که در شکل (۲) نمایش داده شده اند. Yildirim et al. (2000) مطابق شکل (۲) شرایط زیر را برای اعمال پارامترهای $\overline{K_1Z_1}$، $\overline{K_2Z_2}$ ، $\overline{K_3Z_3}$، $\overline{K_4Z_4}$ و $\overline{JH}$ ارائه کردند:

$$(S_c/D_i)^2 \leq \left[(c/D_i)^2+(l/D_i)^2\right]; \qquad \overline{JH}=0 \quad (۹)$$

$$(S_c/D_i)^2 \leq \left[(b_1/D_i)^2+(l/D_i)^2\right]; \qquad \overline{K_1Z_1}=0 \quad (۱۰)$$

$$(S_c/D_i)^2 \leq \left[(b_2/D_i)^2+(l/D_i)^2\right]; \qquad \overline{K_2Z_2}=0 \quad (۱۱)$$

$$(S_c/D_i)^2 \leq \left[(c/D_i)^2+(b_1/D_i)^2\right]; \qquad \overline{K_3Z_3}=0 \quad (۱۲)$$

$$(S_c/D_i)^2 \leq \left[(c/D_i)^2+(b_2/D_i)^2\right]; \qquad \overline{K_4Z_4}=0 \quad (۱۳)$$

هم‌چنین با استفاده از رابطه پیوستگی می‌توان نوشت :

$$Q_i = A_c.V_s \quad (۱۴)$$

که در آن Q_i : دبی آبگیر می‌باشد.

Yildirim et al. (2000) با حل تخمینی، مقدار V_s را معادل $U_\infty/2$ درنظر گرفتند. بنابراین با معلوم شدن A_c، عمق استغراق بحرانی (S_c) از روش آزمون و خطا به‌دست می‌آید.

Yildirim و Kocabas (2002) بیان کردند زمانی که تأثیر دیواره‌های نفوذناپذیر بر روی سطح ریزش کره بحرانی کوچک‌تر می‌شود، بهتر است از سطح ریزش کره بحرانی با شعاع کوچک‌تر استفاده شود. این محققین شعاع CSSS جدید را تابعی از عمق استغراق بحرانی معرفی کردند. در این مطالعه میزان سطح ریزش کره بحرانی مورد بحث در تحقیق Yildirim و Kocabas (2002) با عنوان CSSS II نام‌گذاری شده که دارای شعاعی برابر $r_S = S_C/\sqrt{2}$ است. در این مدل اثر انسداد لوله آبگیر فقط برای $C<(r-h)$ موجود است که در آن c : فاصله مرکز آبگیر تا کف کانال، r : فاصله شعاعی و h : ارتفاع قطاع دایره‌ای است.

$$A_{pb} = \pi S_c^2\left[1-\sqrt{1-0.5(D_o/D_i)^2(D_i/S_c)^2}\right] \quad (۱۵)$$

در این رابطه D_o : قطر خارجی لوله آبگیر و c: فاصله مرکز آبگیر از کف کانال است. اثر انسداد مرزهای نفوذناپذیر نیز رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود :

$$A_{bb} = 4\pi S_c^2 - \sqrt{2}\pi S_c(c+b_1+b_2+l) - \sqrt{2}\pi S_c(\overline{JH}+\overline{K_1Z_1}+\overline{K_2Z_2}+\overline{K_3Z_3}+\overline{K_4Z_4}) \quad (۱۶)$$

که در آن b_1و b_2 : فاصله از طرفین کانال، c : فاصله مرکز آبگیر از کف کانال و l : پیش آمدگی لوله آبگیر است.
مقادیر و شرایط اعمال وترهای $\overline{K_1Z_1}$، $\overline{K_2Z_2}$ ، $\overline{K_3Z_3}$، $\overline{K_4Z_4}$ و $\overline{JH}$ که در حالت CSSS I معرفی شدند در مطالعات Yildirim و Kocabaş (2002) نیز مجدداً مطابق شکل (۲) مورد استفاده قرار گرفتند.

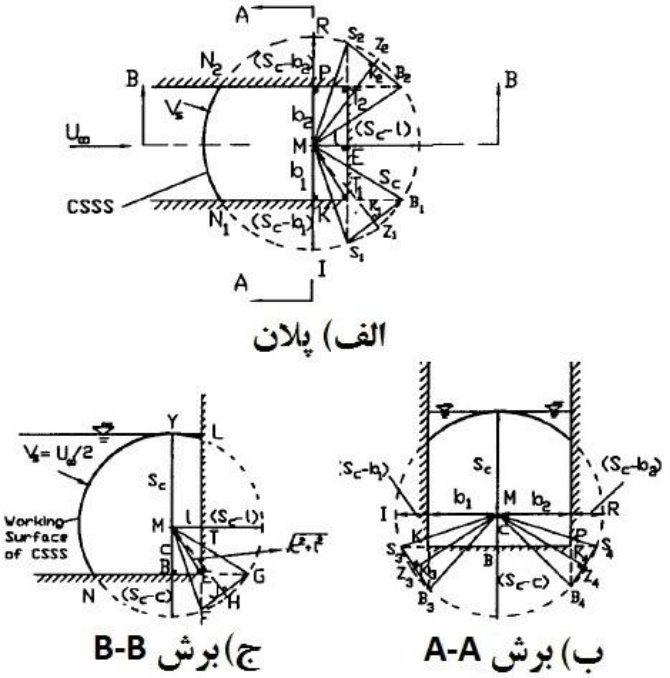
$$Q_i = A_c.V_s \quad (۱۷)$$

که در آن Q_i: دبی آبگیر است. با حل تخمینی، می‌توان V_S را معادل U_∞ در نظر گرفت. بنابراین با معلوم شدن A_c، عمق استغراق بحرانی (S_c) از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

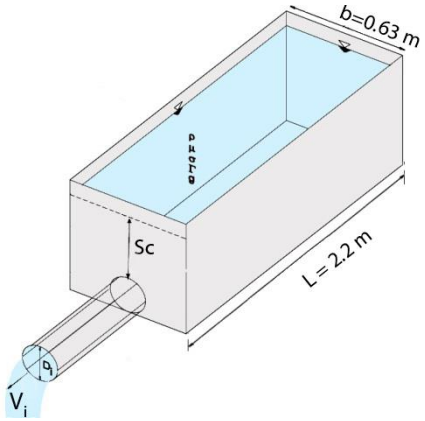
$$A_c = 4\pi r_s^2 - \left[A_{bb}+A_{pb}\right] \quad (۱۸)$$

Gurbuzdal (2009) با استفاده از نتایج حاصل از مدل فیزیکی، رابطه (۱۹) را برای تعیین عمق استغراق بحرانی پیشنهاد نمود.

$$S_C/D = Fr^{0.865}(b/D_i)^{-0.565}Re^{0.0424} \quad (۱۹)$$

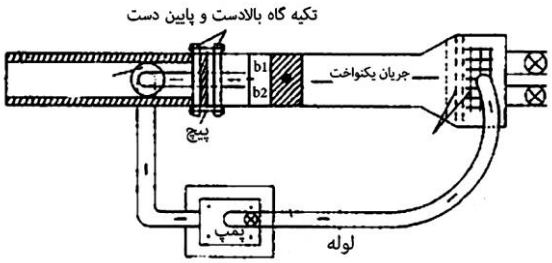


شکل ۲- انسداد مرزهای نفوذ ناپذیر در شرایط بحرانی (Yildirim and Kocabas 2002)



شکل ۳- شماتیک سیستم آزمایشگاهی Gurbuzdal (2009)

هدف اصلی تحقیق حاضر به‌کارگیری ابزارهای متداول رگرسیون غیرخطی برای معرفی رابطه‌ای عمومی و ساده برای تخمین عمق استغراق بحرانی در دهانه‌های آبگیرهای افقی منشعب از مخازن می‌باشد. هم‌چنین در این تحقیق توانایی شبکه عصبی و سیستم برنامه‌سازی ژنتیک نیز در تخمین عمق استغراق بحرانی مورد ارزیابی قرار گرفته است. وجود عدم قطعیت در فرآیندهای حاکم بر سیستم‌های آبی از یکسو و غیر خطی بودن پارامترها بر نتایج از سوی دیگر منجر به استفاده از روش‌های ژنتیک شده است. در این تحقیق از نتایج آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی گرداب تشکیل شده در دهانه آبگیرهای افقی استفاده شده است. برای این منظور از نتایج آزمایشگاهی Yildirim et al. (2000)، Yildirim و Kocabaş (2002) و نتایج پایان نامه کارشناسی ارشد Gurbuzdal (2009) بهره‌گیری شده است. آزمایش‌ها در چندین بخش مختلف با تغییر در قطر لوله آبگیر به ازای قطرهای داخلی ۵/۳۲، ۶/۱۲، ۹/۲۸، ۱۵/۲۳، ۱۹/۷۲ سانتی‌متر به اجرا در آمده است. موقعیت لوله آبگیر نسبت به عرض مخزن (b) در حالت تقارن قرار داشته و آستانه رقوم ارتفاعی نصب لوله آبگیر به کف مخزن (c)، در دو حالت D_i و $2D_i$ منظور شده است. مخزن آبگیر در تحقیق Yildirim et al. (2002) به‌صورت مستطیلی به عرض ۰/۵ متر و طول ۱۰ متر (شکل ۳) و در تحقیق Gurbuzdal (2009) نیز به‌صورت مستطیلی به عرض ۰/۶۳ متر و طول ۲/۲ متر مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۴).



شکل ٤- شماتیک سیستم آزمایشگاهی (Yildirim et al., 2000)

بر اساس تئوری تحلیل ابعادی و هم‌چنین مشخصات سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده، کلیه پارامترهای مؤثر بر فضای تحقیق را می‌توان به شرح زیر لیست نمود:

خصوصیات سیال: وزن مخصوص سیال (ρ)، لزوجت سیال (μ)، کشش سطحی(σ).

خصوصیات جریان: سرعت در ورودی لوله آبگیر (V_i)، سرعت جریان نزدیک شونده (U)، چرخش اعمال شده به جریان(r)، شتاب ثقل (g).

خصوصیات هندسی: قطر ورودی لوله آبگیر(D_i)، فاصله کف مخزن تا مرکز لوله آبگیر(c)، عرض مخزن(b)، بیرون آمدگی لوله آبگیر(l).

بنابراین میزان عمق استغراق بحرانی در دهانه ورودی آبگیر را می‌توان بصورت رابطه (۲۰) معرفی نمود:

$$S_c = f\left(\rho,\mu,\sigma,V_i,U,\Gamma,g,D_i,c,b,l\right) \qquad (۲۰)$$

با استفاده از تئوری π باکینگهام می‌توان رابطه حاکم بر فضای تحقیق را به‌منظور تخمین عمق استغراق بحرانی در دهانه‌های آبگیر افقی به‌صورت رابطه (۲۱) نشان داد:

$$\frac{S_c}{D_i} = f\left(\frac{b}{D_i},\frac{c}{D_i},\frac{l}{D_i},\frac{V_i}{U},\frac{\rho V_i D_i}{\mu},\frac{V_i}{\sqrt{g D_i}},\frac{\rho V_i^2 D_i}{\sigma},\frac{\Gamma}{V_i D_i}\right) \qquad (۲۱)$$

که در آن $\rho V_i D_i/\mu$ معرف عدد رینولدز Re، $V_i/\sqrt{g D_i}$ معرف عدد فرود Fr، $\rho V_i^2 D_i/\sigma$ معرف عدد وبر We و $\Gamma/V_i D_i$ معرف عدد کلف Ko می‌باشد.

Hecker (1987) در مطالعات خود نشان داد که چنانچه توان دوم عدد وبر از ۱۰۰۰۰ بزرگ‌تر باشد می‌توان از اثر کشش سطحی صرف‌نظر نمود. همچنین وی در تحقیقات خود نشان داد که اثر نیروی لزجت وقتی مهم است که عدد رینولدز کوچکتر از ۳۰۰۰۰ باشد. بنابراین می‌توان ویژگی عمق استغراق بحرانی را با استفاده از عدد چرخش (Kolf) و عدد فرود و خصوصیات هندسی مخزن مدل نمود. بر اساس مطالعات Hecker (1987) از آنجایی‌که محاسبه پارامتر چرخش مشکل است و عموماً با استفاده از روش‌های عددی تعیین می‌شود، پس در این تحقیق نیز از بررسی اثر آن بر میزان عمق استغراق صرف‌نظر شده است. بنابراین می‌توان رابطه حاکم بر فضای تحقیق را تحت تأثیر پارامترهای معرفی شده در رابطه (۲۲) دانست:

$$S_c/D_i = f\left(b/D_i,c/D_i,l/D_i,V_i/U,Fr\right) \qquad (۲۲)$$

جدول (۱) محدوده پارامترهای مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. بررسی محدوده تغییرات نشان می‌دهد که به استناد مطالعات Hecker (1987) اثر پارامترهای بدون بعد رینولدز، وبر و کلف در این تحقیق نیز کم اثر بوده و می‌توان از اثر آنها صرف‌نظر نمود. ازآنجایی‌که افزایش دقت رابطه تخمین حداقل عمق استغراق از اهداف اصلی تحقیق می‌باشد بنابراین سناریوی حاکم بر فضای تحقیق به شرح رابطه (۲۳) تدوین می‌گردد.

$$\frac{S_c}{D_i} = f\left(\frac{b}{D_i},\frac{c}{D_i},\frac{l}{D_i},\frac{V_i}{U},\frac{\rho V_i D_i}{\mu},\frac{V_i}{\sqrt{g D_i}},\frac{\rho V_i^2 D_i}{\sigma},\frac{\Gamma}{V_i D_i}\right) \qquad (۲۳)$$

ابتدا با بهره‌گیری از رگرسیون غیرخطی رابطه‌ای عمومی که توانایی تخمین واقع گرایانه حداقل عمق استغراق را در دهانه آبگیرهای افقی داشته باشد معرفی گردید. این امر اثر نسبی عرض مخزن، فاصله از کف، پیش آمدگی لوله آبگیر درون مخزن، سرعت جریان و عدد فرود را به‌طور هم‌زمان در بر دارد. سپس به ارزیابی و مقایسه نتایج رابطه پیشنهادی با تحقیقات پیشین پرداخته شده است. از طرفی با توجه به پیشرفت علم در زمینه هیدروانفورماتیک، به‌منظور افزایش دقت از نتایج حاصله از مدل شبکه عصبی و برنامه‌سازی ژنتیک نیز بهره‌گیری شده است. به‌منظور ارزیابی کارایی بخش‌های مختلف این تحقیق از جذر میانگین مربعات خطا (Root-Mean-Square Error)، درصد میانگین خطا (Mean Percentage Error)، خطای استاندارد تخمین (Standard Error of Estimate)، راندمان مدل‌سازی (Model Efficiency) و هم‌چنین ضریب زاویه خط رگرسیون برازش داده شده از بین نتایج در مقایسه با خط ۴۵ درجه استفاده شده است.

جدول۱- محدوده تغییرات پارامترهای حاکم بر فضای تحقیق

پارامتر	واحد	تغییرات
قطر لوله آبگیر (D_i)	سانتی متر	۵,۳۲ ، ۶,۱۲، ۹,۲۸، ۱۵,۳۲، ۱۹,۷۲
b/D_i	بی بعد	۳/۱۹ ، ۴/۱۳ ، ۶/۷۸، ۹/۳۹، ۱۰/۲۹
دبی آبگیر (Q_i)	لیتر بر ثانیه	۰/۷۶ الی ۳۸/۸۵
سرعت در آبگیر (V_i)	متر بر ثانیه	۰/۳۴۲ الی ۴/۵۵
عدد فرود (Fr)	بی بعد	۰/۴۷ الی ۶/۲۵
عدد رینولدز (Re)	بی بعد	۲۹۶۲۴ الی ۲۸۹۰۰۰
عدد وبر (We)	بی بعد	۸۵/۳۵۷ الی ۱۴۸۹۶/۳۳

نتایج و بحث

همان‌طوری که در روش تحقیق بدان اشاره شد، برای تعیین رابطه حاکم بر فضای تحقیق از نرم‌افزار تحلیل‌گر آماری SPSS استفاده شده است. برای تعیین فضای نگاشت بین پارامترهای مستقل و وابسته نشان داده شده در رابطه (۲۳)، مقادیر مشاهداتی پارامترهای نسبی بدون بعد l/D_i، b/D_i، c/D_i، V_i/D_i و عدد فرود جریان در لوله آبگیر $V_i/\sqrt{g\,D_i}$ در مقابل حداقل عمق استغراق نسبی مشاهداتی S_c/D_i مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۲۰ درصد داده‌ها برای اعتبارسنجی آن مورد استفاده قرار گرفت. نگاشت صورت گرفته بر فضای بین پارامترهای مستقل و وابسته را می‌توان به‌صورت رابطه (۲۴) نشان داد:

$$\frac{S_c}{D}=4.6+\left[\frac{-39.828\left(542987\ \frac{L}{D_i}+\frac{c}{D_i}+\frac{b}{D_i}+\frac{V_i}{U}\right)^{-0.028}}{\left(1+\exp\ (Fr+21.73\ )\right)^{0.104}}\right] \quad (۲۴)$$

به‌منظور ارزیابی نتایج رابطه (۲۴) از توابع تحلیل‌گر خطا استفاده شده است و نتایج حاصله در جدول (۲) خلاصه شده است. میزان ضریب همبستگی رابطه پیشنهادی ۰/۷۵۹۵ و ریشه میانگین خطای استاندارد ۰/۳۴۸۷ برآورد گردید. شکل (۵) نحوه انطباق نتایج حاصل از پیش‌بینی رابطه رگرسیون غیر خطی را با مشاهدات نظیر آزمایشگاهی برای تخمین عمق نسبی استغراق بحرانی نشان می‌دهد. از بررسی میزان ضریب زاویه خط برازش شده از بین نتایج نظیر مشاهداتی و محاسباتی توسط رابطه (۲۴) می‌توان دریافت که رابطه (۲۴) مقادیر پارامتر S_c/D_i را حدود ۱/۵ درصد کمتر از مقادیر مشاهداتی محاسبه می‌نماید. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج رابطه پیشنهادی (۲۴) در مقایسه با تحقیقات پیشین، از نتایج حاصل از تحقیق Gurbuzdal (2009)، مدل‌های CSSS I و CSSS II استفاده گردید. نتایج حاصل از تحلیل آماری در جدول (۳) خلاصه شده است. مقایسه جداول (۲) و (۳) نشان دهنده این است که رابطه (۲۴) دارای عملکرد بهتری نسبت به رابطه (۱۹) که از مطالعه Gurbuzdal (2009) حاصل گردیده است می‌باشد.

در بین مطالعات پیشین نیز مقایسه توابع خطا نشان دهنده برتری مدل CSSS II نسبت به مدل CSSS I و رابطه پیشنهادی Gurbuzdal (2009) می‌باشد.

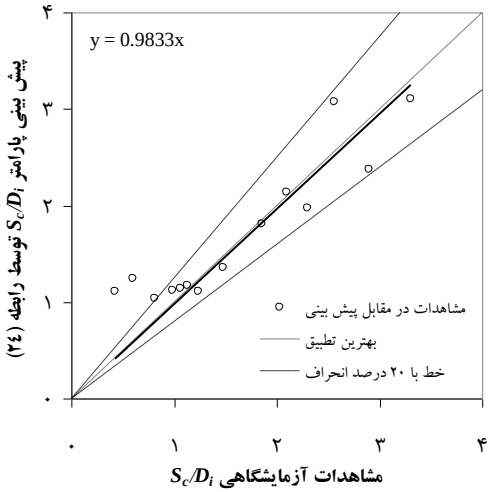
هم‌چنین از اختلاف بین ضریب زاویه خط برازش داده شده از بین نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۵) ، (۶)، (۷) و (۸) در مقایسه با شیب خط ۱ : ۱ می‌توان دریافت که رابطه (۲۴) و (۱۹) به‌ترتیب ۱/۵ و ۴۳ درصد مقدار S_c/D_i را در مقابل نتایج آزمایشگاهی کمتر و مدل‌های CSSS I و CSSS II به‌ترتیب ۲۵ و ۷ درصد مقدار S_c/D_i را در مقابل نتایج آزمایشگاهی بیشتر پیش‌بینی می‌نمایند. این نتایج گویای دقت بیشتر و برتری رابطه پیشنهادی تحقیق حاضر (۲۴) در برآورد عمق استغراق بحرانی نسبت به تحقیقات پیشین می‌باشد.

جدول ۲- توابع خطای حاصل از نتایج رابطه پیشنهادی (۲٤)

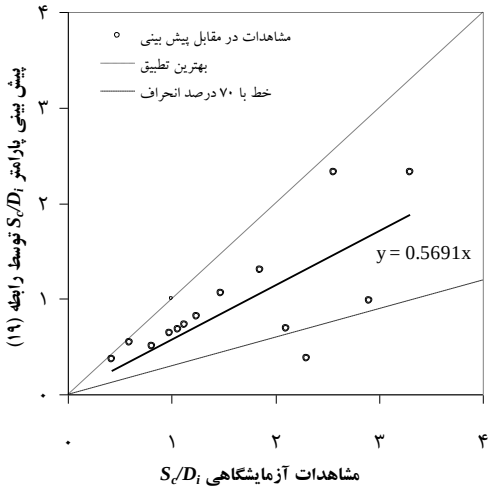
پارامتر	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	درصد میانگین خطا MPE	خطای استاندارد تخمین SEE	راندمان معادلات EF	ضریب زاویه m
S_c/D_i	۰/۳۴۸۷	۲۰/۶۰	۰/۲۹۱۳	۰/۸۳۶۳	۰/۹۸۳۳

جدول ۳- ارزیابی آماری روش‌های پیشین در تخمین S_c/D_i با استفاده از مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی

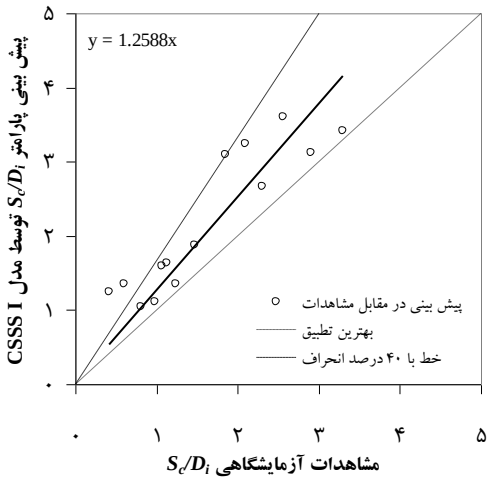
مدل	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	درصد میانگین خطا MPE	خطای استاندارد تخمین SEE	راندمان معادلات EF	ضریب زاویه m
مدل CSSS I	۰/۶۶۴۳	۴۹/۰۱۹۹	۰/۴۰۳۴	۰/۴۰۳۴	۱/۲۵۸۸
مدل CSSS II	۰/۴۲۰۸	۳۳/۹۶۷۸	۰/۷۶۰۶	۰/۷۶۰۶	۱/۰۷۵
Gurbuzdal	۰/۹۰۶۸	-۳۶/۵۳۸۴	-۰/۳۹۸۴	-۰/۱۱۱۷	۰/۵۶۹۱



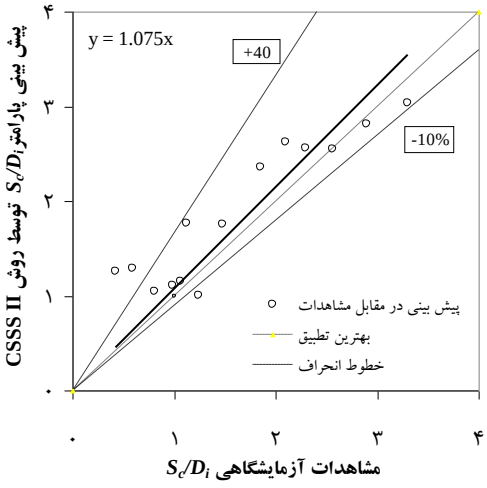
شکل ۵-ارزیابی عملکرد رابطه (۲٤) در مقایسه با مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی مورد استفاده



شکل ٦- ارزیابی عملکرد تحقیق Gurbuzdal (2009) در مقایسه با مشاهدات آزمایشگاهی



شکل ۷-ارزیابی عملکرد مدل CSSS I در مقایسه با مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی مورد استفاده



شکل ۸- ارزیابی عملکرد مدل CSSS II در مقایسه با مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی مورد استفاده

شبکه عصبی مصنوعی

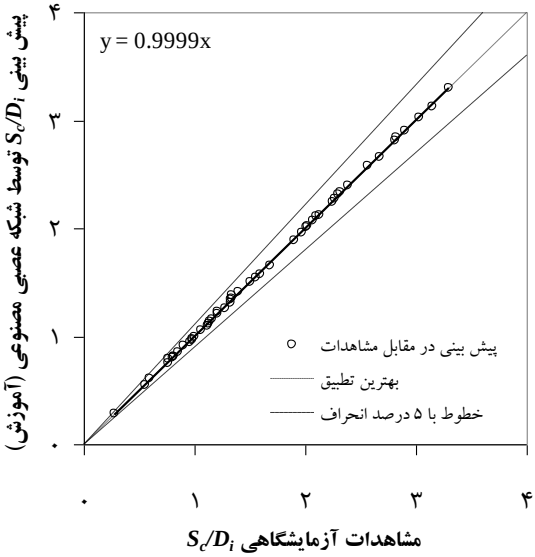
به‌منظور تحقق اهداف از پیش تعیین شده و افزایش دقت در تخمین عمق استغراق بحرانی از مدل شبکه عصبی نیز استفاده گردید. برای این امر از نرم‌افزار Qnet2000 استفاده گردید. برای این منظور ۸۰ درصد از داده‌های آزمایشگاهی به‌منظور آموزش شبکه و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای کنترل نتایج مورد استفاده قرار گرفت. سپس پارامترهای l/D_i، b/D_i، c/D_i، V_i/D_i و عدد فرود جریان به‌عنوان پارامترهای ورودی به مدل معرفی و مدل برای تخمین پارامتر S_c/D_i به‌عنوان خروجی ساخته شد. تغییر در معماری شبکه نشان داد که شبکه با معماری ۱-۴-۵ به‌دلیل برخورداری از ضریب همبستگی بالاتر و جذر میانگین مربعات خطا کمتر، دارای بهترین عملکرد می باشد.

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری صورت گرفته در مراحل مختلف آموزش و آزمون شبکه عصبی برای تخمین عمق استغراق در جدول (۴) و شکل‌های (۹) و (۱۰) نمایش داده شده‌اند. هم‌چنین می‌توان دریافت که شبکه عصبی پارامتر S_c/D_i را در مرحله آموزش یک درصد کم‌تر از نتایج مشاهداتی و در مرحله آزمون ۰/۱۵ درصد بیشتر از نتایج مشاهداتی پیش‌بینی می‌نماید.

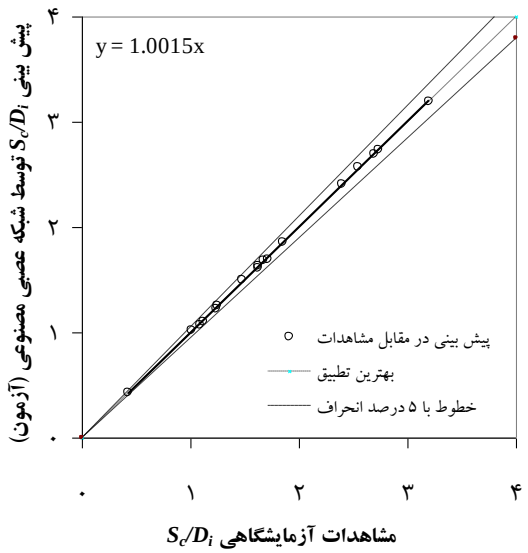
مقایسه جداول (۲) و (۴) نشان می‌دهند که مدل شبکه عصبی در مجموع به‌صورت نسبی از جذر میانگین مربعات خطا و درصد میانگین خطا کمتر و راندمان مدل‌سازی بهتری نسبت به رابطه (۲۴) برخوردار است. از طرفی مقایسه ضریب زاویه خط برازش شده از بین نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۵) و (۱۰) نشان می‌دهد که شبکه عصبی در مجموع مقدار S_c/D_i را ۰/۱۵درصد بیشتر از نتایج آزمایشگاهی و رابطه (۲۴) این مقدار را ۱/۵ درصد کم‌تر از نتایج آزمایشگاهی تخمین می‌زند. علاوه بر این مطلب، فرم ساده رابطه (۲۴) و امکان بهره‌گیری از این تابع پارامتریک در شرایط مختلف منجر به این نتیجه گردید که تا این مرحله رابطه (۲۴) به‌عنوان یک مدل ساده، عمومی و کارآمد توصیه گردد.

جدول ٤ - نتایج توابع خطا حاصل از شبکه عصبی مصنوعی در تخمین پارامتر S_c/D_i برای بهترین معماری شبکه

پارامتر	مرحله آموزش				مرحله آزمایش			
	MPE	RMSE	EF	R^2	MPE	RMSE	EF	R^2
S_c/D_i	۰/۱۷۵	۰/۰۰۸۹	۰/۹۹۶۸	۰/۹۹۹۷	۰/۹۱۱	۰/۰۲۱۸	۰/۹۹۵	۰/۹۹۹۷



شکل۹- نتایج حاصل از شبکه عصبی جهت تخمین پارامتر S_c/D_i در مقابل مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی در مرحله آموزش



شکل۱۰- نتایج حاصل از شبکه عصبی جهت تخمین پارامتر S_c/D_i در مقابل مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی در مرحله آزمون

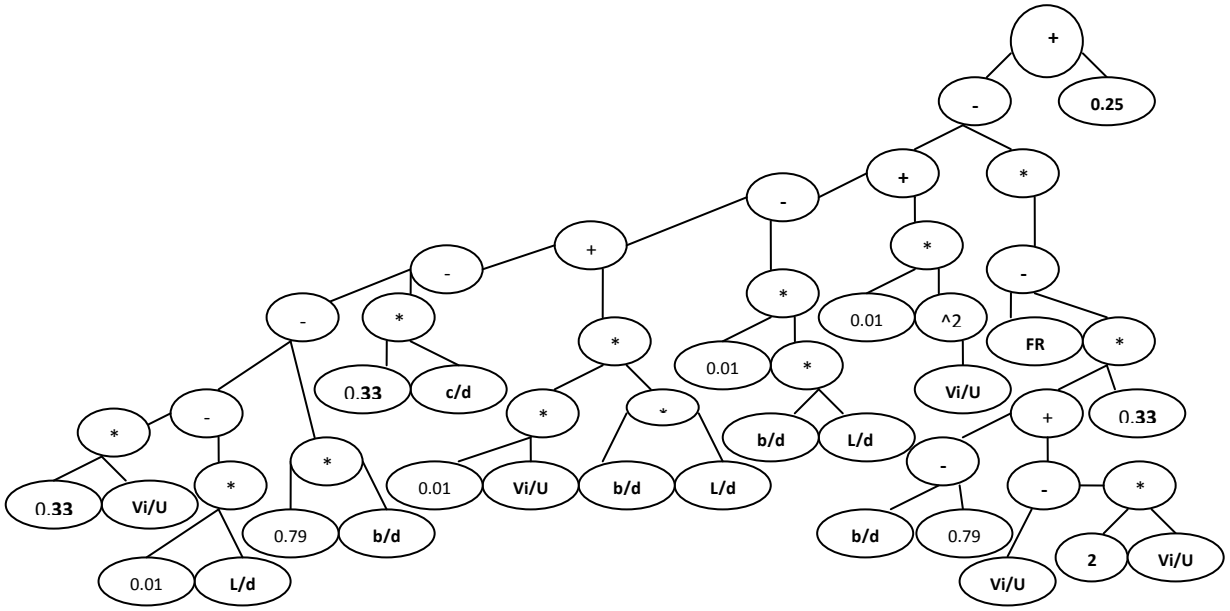
برنامه سازی ژنتیک

برنامه‌سازی ژنتیک عضوی از خانواده الگوریتم‌های تکاملی می‌باشند. الگوریتم‌های تکاملی از جمله روش‌های بهینه‌سازی هوشمند بوده که قابلیت یافتن بهترین راه‌حل را در چندین راه‌حل شبیه‌سازی شده، دارند. اصل بنیادی در مورد این الگوریتم‌ها، تطابق آن‌ها با اصول نظریه تکامل تدریجی داروین به‌منظورِ یافتن پاسخ‌های مناسبی برای مسائل دشوار است. برنامه‌سازی ژنتیک برخلاف الگوریتم ژنتیک، روی ساختار درختی فرمول‌ها به جای رشته‌ای از ارقام دودویی عمل می‌کند که این ساختارهای درختی شامل توابع و پایانه‌ها می‌باشند.

در این روش در ابتدای فرآیند، مجموعه پایانه‌ها (ثابت و متغیرهای مسأله) و مجموعه توابع (عمل‌گرهای ریاضی مورد استفاده در رابطه‌ها) و پارامترهای دیگری که در ارائه پاسخ نهایی تأثیر دارند، توسط کاربر تعیین می‌شود. سپس برنامه به‌صورت خودکار قادر به ارائه پاسخ خواهد بود. در واقع مراحل مدل‌سازی به روش برنامه‌سازی ژنتیک عبارت است از: تولیدجمعیت اولیه (شامل انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و توابع)، تعیین تابع برازش، تعیین پارامترهای کنترل و تعیین معیار خاتمه و یافتن بهترین پاسخ این روش با تولید جمعیتی اولیه از ساختارهای درختی (هر ساختار درختی بیانگر یک رابطه صریح ریاضی است) که به‌طور تصادفی تولید شده‌اند، آغاز می‌شود.

هر یک از ساختارهای درختی تولید شده در نسل اولیه از نظر میزان سازگاری و چگونگی عملکرد آن در ارتباط با مسئله‌ی موردنظر ارزیابی می‌گردد. پس از آن، متناسب‌ترین افراد جمعیت جاری انتخاب شده و برای تولید جمعیت اصلاح‌شده جدید تکثیر می‌شوند. برای تولید جمعیت جدید از عملگرهای ژنتیکی بازتولید، ترکیب و جهش استفاده می‌شود. به این ترتیب مراحل ارزیابی ساختارهای تولید شده در هر نسل و تکثیر سازگارترین ساختارهای نسل قبل به نسل جدید در جهت افزایش میزان دقت تا یافتن بهینه‌ترین پاسخ تکرار خواهد شد (Koza, 1992).

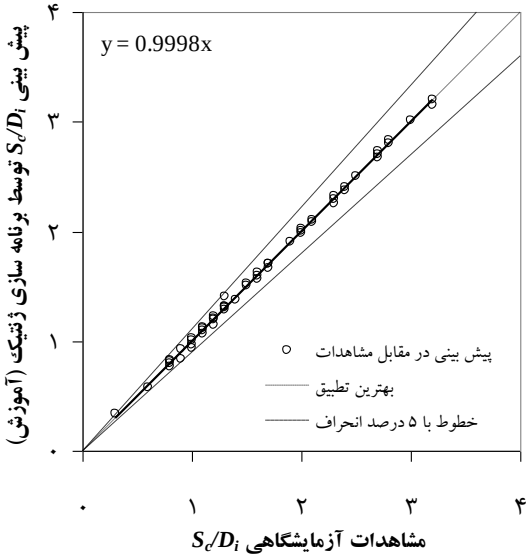
پارامترهای تعیین شده برای مدل‌سازی با برنامه‌سازی ژنتیک در جدول (۵) ارائه شده است. ساختار درختی برنامه سازی ژنتیک مورد استفاده در تحقیق در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. مدل استخراج شده از این روش در رابطه (۲۵) و نمودارهای مربوط به دوره‌های آموزش و آزمون به‌ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. هم‌چنین نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری صورت گرفته در مراحل مختلف آموزش و آزمون روش برنامه‌سازی ژنتیک برای تخمین عمق استغراق نسبی S_c/D_i در جدول (۶) خلاصه شده است. مطابق نتایج می‌توان دریافت مدل برنامه‌سازی ژنتیک پارامتر S_c/D_i را در مرحله آموزش ۰/۱۶ درصد کم‌تر و در مرحله آزمون ۰/۵۲ درصد کم‌تر از نتایج مشاهداتی پیش‌بینی می‌نماید. با توجه به برتری رابطه پیشنهادی و نتایج استخراج شده از مدل شبکه عصبی مصنوعی نسبت به رابطه Gurbuzdal (2009)، مدل‌های CSSS I و CSSS II، نتایج مدل برنامه‌سازی ژنتیک با نتایج حاصل از این دو روش مقایسه می‌گردد.



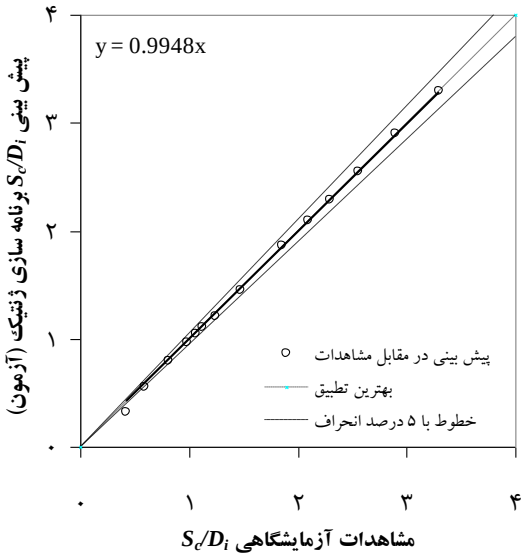
شکل ۱۱- ساختار درختی برنامه سازی ژنتیک

جدول ۵- مشخصات پارامترهای معرفی شده جهت مدل‌سازی برنامه‌سازی ژنتیک

ردیف	پارامتر	مقدار	ردیف	پارامتر	مقدار
۱	تعداد اعضای جمعیت	۱۰۰	۶	روش تولید جمعیت ابتدایی	Ramped half & half
۲	تعداد نسل	۱۰۰	۷	روش ارزیابی میزان سازگاری	Tournament selection
۳	حداکثر عمق ساختار درختی	۵	۸	احتمال عمل‌گر ترکیب	۰/۸۵
۴	مجموعه توابع	$\times,+,-,tanh, Exp^*$	۹	احتمال عمل‌گر جهش	۰/۱
۵	مجموعه پایانه‌ها	l/D_i ،b/D_i ،c/D_i ،V_i/D_i و Fr	۱۰	احتمال عمل‌گر بازتولید	۰/۰۵



شکل۱۲- نتایج حاصل از مدل برنامه‌سازی ژنتیک جهت تخمین پارامتر S_c/D_i در مقابل مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی در مرحله آموزش



شکل۱۳- نتایج حاصل از مدل برنامه‌سازی ژنتیک جهت تخمین پارامتر S_c/D_i در مقابل مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی در مرحله آزمون

جدول ٦- نتایج توابع خطا حاصل از برنامه‌سازی ژنتیک در تخمین پارامتر S_c/D_i

پارامتر	مرحله آموزش				مرحله آزمایش			
	MPE	RMSE	EF	R^2	MPE	RMSE	EF	R^2
S_c/D_i	۰/۱۰۳۸	۰/۰۲۸۷	۰/۹۹۸۴	۰/۹۹۸۴	-۲/۹۲۶۶	۰/۰۳۲۳	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۸۸

$$\frac{S_c}{D}=1.482\left(\frac{V_i}{U}\right)-0.01\left(\frac{L}{D}\right)-0.7919\left(\frac{b}{D}\right)-0.3373\left(\frac{C}{D}\right)+0.01194\left(\frac{V_i}{U}\right)\left(\left(\frac{L}{D}\right)+\left(\frac{b}{D}\right)\right)$$
$$-0.01194\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{b}{D}\right)+0.01\left(\frac{V_i}{U}\right)^2-(Fr)\left(\left(\frac{b}{D}\right)-0.7952\right)\left(\left(\frac{b}{D}\right)-2\left(\frac{V_i}{U}\right)\right)0.3327+0.254 \quad (۲۵)$$

مقایسه ضریب زاویه خط برازش داده شده از بین نتایج شکل‌های (۲)، (۷) و (۹) حاکی از آن است که مقادیر پارامتر S_c/D_i در مدل برنامه‌سازی ژنتیک ۰/۵۲ درصد کم‌تر، در شبکه عصبی مصنوعی ۰/۱۵ درصد بیش‌تر و در رابطه پیشنهادی ۱/۵ درصد کم‌تر در مقابل نتایج آزمایشگاهی تخمین زده شده است. از طرفی مقایسه نتایج توابع خطای محاسبه شده در جدول‌های (۲)، (۴) و (۶) نشان‌دهنده‌ی برتری مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌سازی ژنتیک می‌باشد. این در حالی است که رابطه پیشنهادی دارای فرم ساده‌تری نسبت به مدل برنامه‌سازی ژنتیک می‌باشد.

نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از تحلیل نتایج آزمایشگاهی و بهره‌گیری از روش رگرسیون غیرخطی نسبت به معرفی رابطه‌ای عمومی برای تعیین شرایط عمق استغراق بحرانی S_c/D_i با در نظر گرفتن شرایط عدد فرود جریان ورودی به آبگیر و اثر عرض نسبی کانال تقرب b/D_i، فاصله نسبی از کف c/D_i، بیرون آمدگی نسبی لوله آبگیر l/D_i و سرعت نسبی جریان V_i/D_i اقدام گردید. سپس به‌منظور 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 ضریب زاویه خط برازش شده و توابع خطای توصیه شده نسبتاً کمتری در مقایسه با رابطه پیشنهادی تحقیق حاضر در تخمین S_c/D_i برخوردار هستند. به بیان دیگر مقدار S_c/D_i توسط شبکه عصبی ۰/۱۵ درصد بیشتر، در مدل برنامه‌سازی ژنتیک ۰/۵۲ درصد کم‌تر، در رابطه پیشنهادی این مقدار ۱/۵ درصد کمتر از نتایج آزمایشگاهی تخمین زده شده است. این در حالی‌است که مقدار S_c/D_i در رابطه Gurbuzdal (2009)۴۱ درصد کمتر، در مدل‌های CSSSI و CSSSII به‌ترتیب ۲۵ و ۷ درصد بیشتر در مقابل نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی شده است. با توجه به کم‌تر بودن درصد خطای رابطه پیشنهادی (۱/۵ درصد) در تخمین مقادیر S_c/D_i نسبت به معادله‌های پیشنهادی توسط محققین پیشین و با توجه به فرم ساده آن، این رابطه را می‌توان به‌عنوان مدلی ساده و کارآمد برای تخمین عمق نسبی استغراق بحرانی در دهانه‌های آبگیر افقی توصیه کرد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله نگارندگان از دانشگاه صنعتی جندی شاپور به پاس فراهم آوردن امکان این تحقیق قدردانی می‌نمایند.

منابع

1- Bina, K., Faghfoor, M.M. and Abrishami, J., 2012. Experimental comparison of discharge coefficient for mesh panel bottom intakes with and without sediment. Irrigation Sciences and Engineering, 35(1): 35-47.(In Persian).

2- Daemi, A., 1998. Study on effective parameters on vortex formation at horizontal intake. Proceeding of Water Resources Engineering Conference, (2): 1900- 1906.

3- Gordon, J.L., 1970. Vortices at intakes. International Water Power & Dam Construction, (4): 137-138.

4- Gurbuzdal, F., 2009. Scale effects on the formation of vortices at intake structures. *Master Thesis, Ankara, Turkey, Middle East Technical University*.

5- Hecker, G.E. 1987. Fundamentals of vortex intake flow, swirling flow problems at intakes. IAHR hydraulic structures design manual, Vol. 1, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 13–38.

6- Knauss, J. 1987. Prediction of critical submergence, swirling flow problems at intakes. IAHR hydraulic structures design manual, Vol. 1, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 57–76

5- Koza, J.R., 1992. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Natural Selection, Cambridge, MA.

6- Sheikhi, Y., Lashkar-Ara, B., and Valipour, M. 2016. Evaluation of critical submergence for horizontal intakes derived from the channel. Journal of Water and Soil Conservation, 23(4): 331-338. (In Persian).

7- Wang, Y., Jiang, C. and Liang, D., 2011. Study on the critical submergence of surface vortices and the design of anti-vortex intakes. Science China Technological Sciences, 54(4): 799-804.

8- Yildirim, N. and Kocabaş, F., 1995. Critical submergence for intakes in open channel flow. Journal of Hydraulic Engineering, 121(12): 900-905.

9- Yildirim, N. and Kocabaş, F., 2002. Prediction of critical submergence for an intake pipe. Journal of Hydraulic Research, 40(4): 507-518.

10- Yildirim, N., Kocabaş, F. and Gülcan, S.C., 2000. Flow-boundary effects on critical submergence of intake pipe. Journal of Hydraulic Engineering, 126(4): 288-297.

Irrigation Sciences and Engineering Vol. 41, No. 3, Fall 2018, p. 171-184

Shahid Chamran University of Ahvaz

EXTENDED ABSTRACT

Critical Submergence Estimation For Horizontal Intakes Derived From Reservoir Using Intelligent and Statistical Methods

Y.Sheikhi[1], B. Lashkar-Ara [2*] M. Fathi-Moghadam[3] and M. Valipour[4]

1- Master student, Civil Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

2*- Corresponding Author, Assistant Professor, Civil Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran *(Lashkarara@jsu.ac.ir).*

3- Professor, Department of Water and Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

4- Master student, Civil Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

Received: 14 March 2017 Accepted: 2 May 2017

Keywords: Critical Submergence, Nonlinear Regression, Genetic Programming, Neural Network.

Introduction

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.

Methodology

To develop and build the predictive models to estimate the critical submergence for a horizontal intake and evaluate the performance of these models, laboratory or field data are required. Gurbuzdal (2009) and Yildirim et al (2000) carried out an experimental study on critial submergence for horizontal intakes at a hydraulic laboratory. Yildirim et al (2000) experiments were performed at rectangular flume with 10m length and 0.5m width (Figure 1). Gurbuzdal (2009) was performed his experiments in a rectangular flume with 2.2m length and 0.63m width (Figure. 2).

■ .

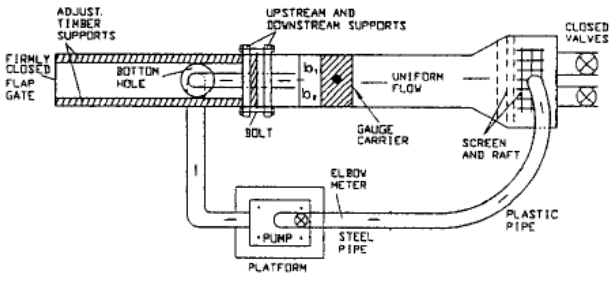


Fig 1- experimental setup by Yildirim et al. (2002)

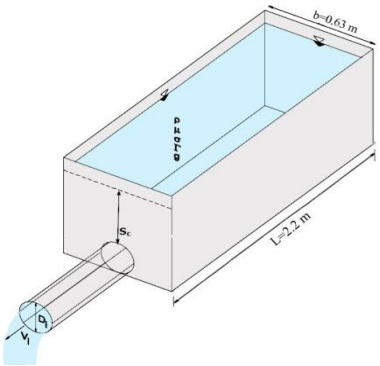


Fig 2- experimental setup by Gurbuzdal (2009)

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. A summary of the data collected in the present study are shown in

table (1). In the next step, the artificial neural network and the genetic programming models were used to investigate the accuracy of the results. At first, a functional predictors for critical submergence using nonlinear regression was proposed. The proposed model includes the effect of relative width, horizontal distance of center point of intake to impervious dead, vertical distance of intake to bottom of canal, velocity and Froude number. Then the results of the proposed model were evaluated and compared with the previous studies. As well, with development of the hydroinformatics the Artificial Neural Network model and the genetic programming model are used. The results of these models are statically compared according to the root mean square error (RMSE), mean percentage error (MPE), standard error of the estimate (SEE), modeling efficiency (EF), correlation coefficient (R^2) and The gradient of regression line between results and observations, m, is calculated for evaluating the performance of the model in a way that the intercept of the equation is zero. The results of previous research are used on this equation validation. The predicted results are close to the observations.

Table 1- Range of data collected in the present study

Parameters	Dimension	Range
Intake pipe diameter, D_i	cm	19.72, 15.32, 9.28, 6.12, 5.32
Relative width,b/D_i	dimensionless	10.29, 9.39, 6.78, 4.13, 3.19
Intake discharge, Q_i	m^3/s	0.76-38.85
Velocity of flow in intake, V_i	m/s	0.342-4.55
Froude number, Fr	dimensionless	0.47-6.25
Reynolds, Re	dimensionless	18125.86-29624
Weber number, We	dimensionless	85.357-14896.33

Results and Discussion

Nonlinear regression is a method of finding a nonlinear model of the relationship between the dependent variable and a set of independent variables. Unlike traditional linear regression, which is restricted to estimating linear models, nonlinear regression can estimate models with arbitrary relationship between independent and dependent variables. In this study, the statistical analysis was performed using nonlinear regression on critical submergence results using a statistical package for social sciences (SPSS). The below equation is yielded from nonlinear regression:

$$\frac{S_c}{D} = 4.6 + \left[\frac{-39.828 \left(542987 \quad \frac{L}{D_i} + \frac{C}{D_i} + \frac{b}{D_i} + \frac{V_i}{U} \right)^{-0.028}}{\left(1 + exp\ \left(\left(Fr + 21.73 \right) \right)\right)^{0.104}} \right] \tag{1}$$

In this study, the critical submergence of intakes was investigated for horizontal intakes in the Reservoir. Five different methods for estimating critical submergence were developed using experimental data. The results of these experimental studies were used to compare with presented the equation in this study, the equation presented by Gurbuzdal (2009), the CSSS I and CSSS II approaches, the artificial neural network (ANN) model and the genetic programming model. The error functions which are used for evaluating the performance of the equation (1) are summarized in Tables 2,3,4 and 5

Table 2- Statistical error functions of the equation presented in this study to estimate S_c/D_i

Parameters	RMSE	MPE	SEE	EF	m
S_c/D_i	0.3487	20.60	0.2913	0.8363	0.9833

Table 3- Statistical error functions of various approaches to estimate S_c/D_i

Approach	Parameters	RMSE	MPE	SEE	EF	m
CSSS I	S_c/D_i	0.6643	49.01	0.4034	-0.8150	1.258
CSSS II	S_c/D_i	0.4208	33.96	0.7706	0.4817	1.075
Gurbuzdal	S_c/D_i	0.9068	-36.53	0.1117	-0.2762	0.5691

Table 4- Statistical error functions of Artificial Neural Network for estimating S_c/D_i

Parameter	Training stage				Testing stage			
	MPE	RMSE	EF	R^2	MPE	RMSE	EF	R^2
S_c/D_i	0.175	0.0089	0.9968	0.9997	0.911	0.0218	0.995	0.9997

Table 5- Statistical error functions of the genetic programming model for estimating S_c/D_i

Parameter	Training stage				Testing stage			
	MPE	RMSE	EF	R^2	MPE	RMSE	EF	R^2
S_c/D_i	0.1038	0.0287	0.9984	0.9984	-2.92	0.0323	0.9986	0.9988

All the results was compared and Gurbuzdal(2009) in comparison with experimental results predicted the depth of critical submergence 41% less; even though experimental results of CSSSI and CSSSII predicted it 25% and 7% less respectively and the proposed equation of this research predicted the value 1.5% less. However, the artificial neural network predicted the depth of critical submergence 0.15% less in comparison with experimental results, while the genetic programming model estimates the depth of critical submergence 0.52% more.

Conclusions

The analysis of the results showed that the artificial neural network (ANN) and genetic programming model performed better in error functions than the proposed equation. As well, the ANN model was developed in compared with experimental results predicted the critical submergence 0.15% more, while genetic programming model and the proposed equation in compared with experimental results estimates the critical submergence 0.52% and 1.5% less, respectively.

The results showed that equation presented by Gurbuzdal (2009) estimated the critical submergence 41% less, while the CSSS I and CSSS II approaches estimated the critical submergence 25% and 7% more respectively. This study shows that there is better agreement between the presented equation and experimental results than the equation presented by Gurbuzdal (2009), the CSSS I and CSSS II approaches. Therefor the presented equation as a simple, general and precise equation is recommended to estimation the critical submergence

References

1- Gurbuzdal, F. 2009. Scale effects on the formation of vortices at intake structures. *M. Sc. Degree, Scienc Civil Engineering, Middle East technial University.*

2- Yildirim, N. and Kocabaş, F., 2002. Prediction of critical submergence for an intake pipe. *Journal of Hydraulic Research, 40*(4): pp.507-518.

3- Yıldırım, N., Kocabaş, F. and Gülcan, S.C., 2000. Flow-boundary effects on critical submergence of intake pipe. *Journal of Hydraulic Engineering, 126*(4): pp.288-297.