

تخمین ابعاد چاله آبستگي پايين دست جام پرتابي سدها با استفاده از مدل محاسبات دانه‌ای

علی نقی خانی¹، روح اله نوری^{2*}، حسین شیخیان³، بهزاد قیاسی¹

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست منابع آب، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

2- استادیار مهندسی محیط زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست، دانشگاه تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - نقشه برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

* تهران، صندوق پستی 14155 - 6135

noor@ut.ac.ir

چکیده - تخمین دقیق پارامترهای آبستگي مانند طول - عرض - پهنا، سهم عمده‌ای در مدیریت این پدیده کاملاً غیرخطی دارد. هدف اصلی این تحقیق ارائه روشی بر مبنای مدل محاسبات دانه‌ای (GRC) برای تخمین پارامترهای آبستگي است. برای این منظور پارامترهای آبستگي پايين دست جام پرتابي سدها (توابع هدف) به عنوان تابعی از متغیرهای هیدرولیکی، مورفولوژیکی و ژئوتکنیکی قرار داده شد و مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل GRC انجام گرفت. تحلیل خطی انجام شده در این تحقیق مشخص کرد که توابع هدف مورد بررسی بیشتر تحت تأثیر تغییرات دبی، ارتفاع آبشار و متوسط اندازه ذرات رسوبات می‌باشند و تأثیرپذیری ناچیزی از زاویه لبه قوس جام دارند. همچنین یافته‌های این تحقیق حاکی از دقت بالا و بسیار مطلوب مدل GRC در تخمین توابع هدف بود، به گونه‌ای که پیش‌بینی انجام شده توسط مدل برای پارامترهای آبستگي در تمام موارد منطبق بر نتایج اندازه‌گیری شده بود یا تفاوت بسیار ناچیزی با یکدیگر داشتند. بررسی‌های بیشتری کمک معیارهای ضریب تبیین، میانگین خطای نسبی، مجذور میانگین مربعات خطا و همچنین آماره نسبت تفاوت توسعه داده شده نشان داد که مدل GRC ارائه شده در این تحقیق برای تخمین عمق آبستگي برتری مطلق و محسوسی بر روابط شناخته شده پیشنهادی توسط دیگر محققان دارد.

کلیدواژگان: جام پرتابی، چاله آبستگي، محاسبات دانه‌ای، پارامتر بی‌بعد.

1- مقدمه

سرتاسر جهان استفاده می‌شود (Chanson, 2004).

مهمترین مشکل در استفاده از این سازه، پدیده آبستگي ناشی از جت‌های ریزشی در پايين دست آن است که به عنوان پدیده‌ای کاملاً غیرخطی، تابعی از عوامل هیدرولیکی، مورفولوژیکی و ژئوتکنیکی است. آبستگي

یکی از متداول‌ترین سازه‌های استهلاک انرژی در سدهای بلند، جام پرتابی¹ است که به دلیل داشتن اطمینان قابل قبول در زمینه استهلاک انرژی، به طور وسیعی در

1. Flip Bucket

تجربی (2) را برای محاسبه عمق چاله آبشستگی ارائه کردند:

$$d_s = 3.27 \frac{q^{0.6} H_1^{0.05} d_w^{0.15}}{g^{0.3} d^{0.1}} \quad (2)$$

که در آن d شاخص قطر ذرات بستر و مطابق پیشنهاد ایشان برابر d_{50} قطر متوسط ذرات است. d_w و g نیز به ترتیب عمق پایاب و شتاب جاذبه می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این رابطه عمق پایاب و اندازه ذرات بستر وجود دارد، اما به زاویه جت آب و شعاع جام توجه نشده است. به هر حال از مزایای رابطه‌های تجربی ارائه شده، آسان بودن استفاده از آن‌ها و نیاز نداشتن به داده‌های ورودی زیاد است. اما از آنجا که این روابط بر مبنای تعداد محدودی مطالعات آزمایشگاهی به دست آمده‌اند، معمولاً خطاهای نسبتاً بزرگی در نتایج آن‌ها مشاهده می‌شود. از طرفی دیگر روابط موجود به منظور تخمین عمق چاله آبشستگی توسعه داده شده‌اند و بنابراین قادر به تخمین سایر ابعاد چاله مثل پهنا و فاصله تشکیل آن تا پایین دست سرریز نیستند (Azmathullah et al., 2005). امروزه مطالعات تخمین ابعاد چاله آبشستگی با رویکرد نوینی از مدل‌های هوشمند جایگزین شده‌اند (Azmathullah et al., 2008; Goyal, 2011). این مدل‌ها برتری‌هایی نسبت به مدل‌های آماری و همچنین مطالعات آزمایشگاهی دارند. به طور کلی عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی عموماً رضایت‌بخش‌تر از معادلات رگرسیونی کلاسیک می‌باشد و این به علت خطاهای کم و ضریب همبستگی بالای این روش‌ها است.

Azmathullah et al. (2005) کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی² (ANN) را برای برآورد آبشستگی پایین دست سرریز پرتابی جامی شکل مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج حاصل از ANN با روش‌های آماری قبلی نشان داد که مدل ANN از کارایی بهتری در تخمین ابعاد چاله آبشستگی برخوردار است. هوشیاری پور و نوری (1392)

فرایندی کاملاً پویاست که به اندرکنش سه فاز مختلف (هوا، آب و مصالح بستر) مرتبط می‌شود و با ایجاد فشار انتقالی ناشی از امواج و کاهش نیروهای چسبندگی مابین مصالح بستر اهمیت می‌یابد. روند آبشستگی را می‌توان به صورت یک سری فرایندهای فیزیکی-مکانیکی که به صورت پیوسته هستند، تشریح کرد. این روند به ترتیب با اثر جت هوادهی، پخش لایه برشی آشفته در پایاب، اختلاف فشار در برخورد آب و سنگ، انتقال این فشارها به سنگ‌های زیرین و شکسته شدن آن‌ها، بالابردن ذرات خرد شده و در نهایت جابه‌جایی آن‌ها به سمت پایین دست کامل می‌شود (Erik Bollaert et al., 2003). برای تعیین پارامترهای آبشستگی که عمدتاً شامل عرض، عمق و طول چاله هستند تاکنون مطالعات زیادی صورت گرفته است. این مطالعات شامل روش‌های متنوعی از قبیل روابط تجربی (Veronese, 1937; Martin, 1975; Taramovich, 1978)، روابط آزمایشگاهی و میدانی (Rajaratnamand Mazurek, 2003; Hager and Minor, Wittler, 2004; Vesalian et al., 2006)، روابط تحلیلی (Wittler, 1998) و همچنین روش‌های مبتنی بر مدل‌های هوش مصنوعی¹ (Azmathullah et al., 2005; Hooahyarypor and Noori, 2012) می‌باشند.

Veronese (1937) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، رابطه تجربی (1) را برای تخمین عمق چاله آبشستگی (d_s) در پایین دست یک جریان ریزشی ارائه نمود:

$$d_s = 1.9q^{0.54} H_1^{0.225} \quad (1)$$

در معادله (1) از میان پارامترهای موثر بر چاله آبشستگی، فقط از دو پارامتر دبی (q) و ارتفاع آبشار (H_1) استفاده شده است، در صورتی که جنس مصالح پایین دست و عمق پایاب می‌تواند تأثیر زیادی بر این پدیده داشته باشد. همچنین در تحقیق دیگر Mason and Arumugan (1985) با استفاده از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی رابطه

کمتری برخوردار است. مدل GRC به دلیل جدید بودن تنها در برخی از شاخه‌های علوم و مهندسی مرتبط با کامپیوتر به ندرت مورد استفاده قرار گرفته و مطالعات اندکی برای آن موجود می‌باشد. بنابراین هدف اصلی این پژوهش معرفی مدل GRC و استفاده از آن در یکی از شاخه‌های مرتبط با هیدرولیک و مهندسی آب، یعنی تخمین ابعاد چاله آبستگي می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- اطلاعات مسأله

پارامترهای ژئوتکنیکی، مورفولوژیکی و هیدرولیکی گوناگونی عمق آبستگي پایین دست جام پرتابی سدها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این متغیرها عبارتند از: H_1 , q , شعاع قوس جام (R), زاویه لبه قوس (ϕ), نوع سنگ، درجه همگونی سنگ‌ها، زمان و مد (شکل) به کار بردن سرریز. بر مبنای مطالعات انجام گرفته می‌توان عمق آبستگي (که از پایاب سرریز اندازه‌گیری می‌شود) را به صورت تابعی از عوامل متعدد مطابق معادله (3) نشان داد (سیفی و همکاران، 1392):

$$d_s = (q, H_1, R, d_w, d_{50}, g, \rho_w, \rho_s) \quad (3)$$

در رابطه (3)، ρ_w و ρ_s به ترتیب جرم مخصوص رسوبات و آب می‌باشند. همچنین عرض و محل حداکثر (طول از پایاب سرریز) آبستگي نیز می‌تواند به ترتیب مانند معادله (4) و (5) بیان شود (سیفی و همکاران، 1392).

$$W_s = (q, H_1, R, d_w, d_{50}, g, \rho_w, \rho_s) \quad (4)$$

$$I_s = (q, H_1, R, d_w, d_{50}, g, \rho_w, \rho_s) \quad (5)$$

با استفاده از تئوری باکینگهام، معادله بدون بعد این توابع به صورت زیر قابل ارائه می‌باشد (سیفی و همکاران، 1392).

$$\frac{d_s}{d_w} = f \left(\frac{q}{\sqrt{gd_w^3}}, \frac{H_1}{d_w}, \frac{R}{d_w}, \frac{d_{50}}{d_w}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \phi \right) \quad (6)$$

به بررسی ابعاد چاله آبستگي با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان¹ (SVM) در دو حالت با بعد و بدون بعد پرداختند و با مقایسه این روش با روش‌های تجربی و ANN دریافتند که هر دو روش SVM و ANN دقت قابل قبولی دارند؛ بطوری که برتری این دو روش نسبت به فرمول‌های تجربی کاملاً مشخص است.

(Azamathullah et al. (2008) در تحقیقی به مقایسه الگوریتم ژنتیک² (GP) با روش ANN برای تخمین عمق آبستگي پرداختند که نتایج، عملکرد بهتر GP را نشان داد. (Goyal (2011) به بررسی قابلیت‌های SVM و مدل درختی $M5P^3$ با ANN و مدل رگرسیون برای تخمین عمق آبستگي پرداخت که نتایج بیانگر عملکرد بهتر SVM و $M5P$ بود.

یکی از جدیدترین مدل‌هایی که اخیراً معرفی گردیده و دارای قابلیت بالایی در پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده و غیرخطی است، مدل‌های محاسبات دانه‌ای⁴ (GRC) می‌باشند. GRC یک نظریه محاسبات عمومی است که از دانه‌ها مثل کلاس‌ها، خوشه‌ها، گروه‌ها و بازه‌ها برای ساختن یک مدل محاسباتی مناسب برای کاربردهای پیچیده با حجم بالایی از داده‌ها و اطلاعات استفاده می‌کند (Yao and Yan, 2007). این روش از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که در آن قوانین کلاسه‌بندی با حداقل ناسازگاری در قالب درخت دانه‌ای استخراج می‌شود. استفاده از GRC با ساده‌سازی مسأله به سطوح مختلف و استخراج قوانین با کمترین ناسازگاری، عدم قطعیت در حل مسأله را به پایین‌ترین مقدار می‌رساند. یکی از محدودیت‌های مدل GRC این است که در استخراج قوانین، بازه‌های مورد نظر به صورت قطعی در نظر گرفته می‌شوند و این روند به گونه‌ای است که این مدل نسبت به مدل‌های هوشمند دیگر از انعطاف‌پذیری

1. Support Vector Machine (SVM)
2. Genetic Programming (GP)
3. M5P Tree Model
4. Granular Computing (GRC)

ضریب تورم واریانس³ (VIF) استفاده می شود. مقدار ایده آل برای این پارامتر برابر یک بوده و برای مقادیر بزرگتر از خاصیت هم راستایی چندگانه⁴ بین متغیرها بیشتر می شود.

3-2- مدل GRC

GRC به عنوان برجسیبی از تئوری ها، روش ها، ابزارها و فنون تعبیر می شود که از دانه ها (کلاس ها، گروه ها و خوشه های مجموعه مرجع) در حل مسأله استفاده می کند. در این روش از شباهت یا جدایی ناپذیری اشیا برای تشکیل دانه های اطلاعات و استخراج قوانین کلاسه بندی استفاده می شود (Yao, 2002). در مدل GRC تمام اطلاعات موجود در مسأله به صورت مجموعه ای از اشیا دارای تعداد معینی از صفات مرتب می شود، به طوری که یکی از صفات مشخص کننده کلاس یا مقادیر خروجی باشد. الگوریتم قوانین مدل GRC با استفاده از مجموعه ای از صفات مرتب شده که جدول اطلاعات⁵ نامیده می شود، عملاً استخراج قوانین طبیعی موجود بین داده ها را انجام می دهد (Yao, 2002). جدول اطلاعات در مدل GRC توصیف کننده یک تعداد از اشیا یا الگوها می باشد. هر سطر و ستون این جدول به ترتیب به یک شیء و صفات اشیا اختصاص دارد، به نحوی که هر شیء با این صفات تشریح می شود. رابطه ریاضی جدول اطلاعات به صورت رابطه (11) نمایش داده می شود (2Yao, 2000).

$$s = \{U, At, L, \{Va | a \in At\}, \{fa | a \in At\}\} \quad (11)$$

در رابطه (11)، U یک مجموعه غیر تهی از اشیا، At یک مجموعه غیر تهی از صفات، L یک زبان گفتاری از ویژگی های مجموعه At ، Va یک مجموعه مقادیر برای ویژگی های At و fa یک تابع بوده، به طوری که به ازای هر $a \in At$ و $X \in U$ تابع اطلاعات $f(x, a) \in Va$

$$\frac{W_s}{d_w} = f\left(\frac{q}{\sqrt{gd_w^3}}, \frac{H_1}{d_w}, \frac{R}{d_w}, \frac{d_{50}}{d_w}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \phi\right) \quad (7)$$

$$\frac{I_s}{d_w} = f\left(\frac{q}{\sqrt{gd_w^3}}, \frac{H_1}{d_w}, \frac{R}{d_w}, \frac{d_{50}}{d_w}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \phi\right) \quad (8)$$

در روابط (6) تا (8) نسبت جرم مخصوص رسوبات به آب (ρ_s/ρ_w) مقداری ثابت است و می توان از رابطه تحلیل ابعادی آن را حذف کرد و همچنین پارامتر (ϕ) زاویه لبه قوس است.

در ادامه با توجه به معادلات (6) تا (8)، مدل هایی مناسب برای تخمین طول، عرض و پهنای آبستنگی پایین دست جام پرتابی سدها توسط مدل GRC و همچنین روش رگرسیون خطی چندمتغیره توسعه داده شده است. برای این منظور از اطلاعات 95 مجموعه داده پارامترهای هیدرولیکی، ژئوتکنیکی و مورفولوژیکی (جدول 1 پیوست) برگرفته از مطالعات آزمایشگاهی پیشین استفاده شد (قدسیان و اسدی سریزدی، 1381؛ Azmathullah et al., 2005).

2-2- مدل رگرسیونی خطی چندمتغیره¹

مدل رگرسیونی با فرم ماتریسی زیر بیان می شود:

$$Y = \beta X + e \quad (9)$$

در معادله (9)، β ضریب رگرسیونی ماتریس، e ماتریس خطا و Y ماتریس پاسخ است. با حل کردن معادله (9) برای β رابطه (10) بدست می آید:

$$\beta = (X'X)^{-1}(X'Y) \quad (10)$$

که X' ترانزاده² ماتریس X است. برای محاسبه معکوس ماتریس $(X'X)$ ، باید متغیرهای مستقل کمترین اندرکنش را دارا باشند، زیرا در غیر این صورت ماتریس $(X'X)$ قابلیت معکوس شدن نداشته و مدل با خطای زیادی همراه خواهد بود. معمولاً برای بررسی چنین شرایطی از پارامتر

3. Variance Inflation Factor

4. Multi-Colinearity

5. Information Table

1. Multivariable Regression Model

2. Transverse

دیگر، احتمال شرطی اینکه اگر شیئی که به طور تصادفی انتخاب شده، در ψ قرار داشته باشد، در φ نیز صدق کند. این مقدار از رابطه (14) محاسبه می‌شود (Yao, 2002).

$$CV(\varphi|\psi) = \frac{|m(\varphi \cap \psi)|}{|m(\psi)|} \quad (14)$$

ناسازگاری شرطی $H(\psi|\varphi)$ از رابطه (15) بدست می‌آید و از جمله دلایل آن می‌توان به حجم زیاد اطلاعات، دانش کم موجود در مورد داده‌ها و ناسازگاری موجود در نظرات ارائه شده توسط محققان اشاره کرد (Yao, 2004; Yao and Yan, 2007):

$$H(\psi|\varphi) = -\sum_{i=1}^n p(\psi_i|\varphi) \text{Log}p(\psi_i|\varphi) \quad (15)$$

در رابطه (15)، $P(\psi_i|\varphi)$ بیانگر احتمال درستی فرمول برای کلاس ψ_i است. مطابق مطالب ذکر شده در مورد مدل GRC، مراحل استفاده از این مدل در تخمین ابعاد آبشستگی به صورت شماتیک در شکل 1 نشان داده شده است.

4-2- معیارهای ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها در این تحقیق از سه مشخصه آماری ضریب تبیین R^2 ، مجذور میانگین مربعات خطا $RMSE$ و میانگین خطای نسبی MRE مطابق فرمول‌های ارائه شده توسط Azmathullah et al. (2005) استفاده شد. مقدار ضریب همبستگی بین صفر و یک است و هر چقدر این ضریب به یک نزدیک باشد، بیانگر دقت بالاتر مدل است. مقدار $RMSE$ نیز هرچه کمتر باشد، بهتر بوده و مقدار ایده‌آل آن صفر است.

همچنین علاوه بر آماره‌های ذکر شده در بالا و به منظور بررسی بهتر عملکرد مدل، از آماره نسبت تفاوت آماری توسعه یافته DDR ، ارائه شده توسط نوری و همکاران (1390)، مطابق فرمول (16) استفاده شد.

$$DDR = \left(\frac{\text{Predicted}_{\text{value}}}{\text{Observed}_{\text{value}}} \right) - 1 \quad (16)$$

بدست می‌آید. در این مدل قوانین به شکل اگر-آنگاه به نحوی بیان می‌شوند که اگر یک شی دارای یک مجموعه مقادیر معین از صفات جدول اطلاعات در فرم مفهوم φ باشد و درعین حال به کلاس یا مقدار معینی از متغیر تصمیم‌گیری ψ تعلق یابد، رابطه این دو به شکل "اگر یک شی در مفهوم φ بگنجد، آنگاه دارای مقدار ψ از متغیر تصمیم‌گیری خواهد بود" بیان می‌شود (Yao, 2002). برای استخراج قوانین داده‌ها، اندازه‌گیری‌های متعددی با مدل GRC روی اشیاء، مفهوم‌ها و قوانین انجام می‌شود. مفاهیم عمومیت¹، حمایت مطلق² و پوشش³ پارامترهای مورد استفاده در مدل GRC هستند (Yao, 2002) که در ادامه مورد بحث قرار گرفته‌اند. این پارامترها برای استخراج و اولویت‌بندی قوانین استفاده می‌شوند؛ بدین شکل که قوانین دارای بیشترین مقادیر عمومیت، حمایت مطلق و پوشش با قید داشتن کمترین ناسازگاری برای پیش‌بینی‌های بعدی در نظر گرفته می‌شوند.

عمومیت یک مفهوم مثل φ که نشان‌دهنده اندازه نسبی دانه شکل‌دهنده φ است، به صورت رابطه (12) نشان داده می‌شود که بیانگر میزان فراگیری مفهوم در بین داده‌های موجود است (Yao, 2002).

$$G(\varphi) = \frac{|m(\varphi)|}{|U|} \quad (12)$$

در این رابطه $|m(\varphi)|$ نشان‌دهنده اندازه دانه تشکیل‌دهنده φ و $|U|$ اندازه دانه تشکیل‌دهنده مجموعه مرجع است.

حمایت مطلق بیان‌کننده درستی مطلق رابطه یا قانون $\psi \rightarrow \varphi$ است و به صورت احتمال شرطی $\varphi \rightarrow \psi$ تعریف می‌شود (Yao, 2002).

$$AS(\psi|\varphi) = \frac{|m(\varphi \cap \psi)|}{|m(\varphi)|} \quad (13)$$

$|m(\varphi \cap \psi)|$ نشان‌دهنده اندازه دانه‌ای است که اشیای تشکیل‌دهنده آن هم در φ و هم در ψ صدق می‌کنند. مقدار کمی پوشش ψ توسط φ بیان‌کننده قابلیت احتمال فراخوانی قانون و همچنین دقت قانون می‌باشد. به عبارتی

4. Correlation Coefficient

5. Root Mean Square Error

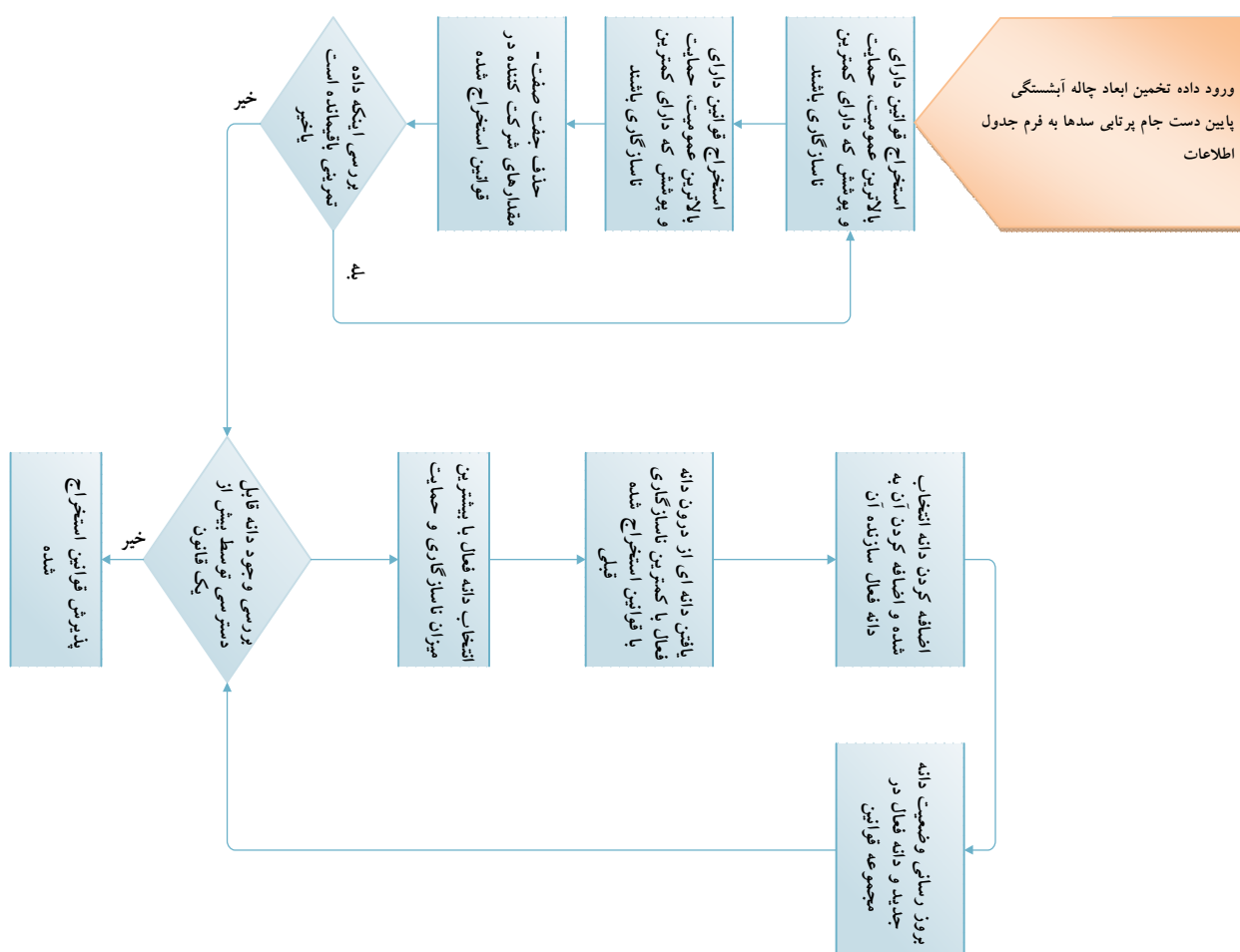
6. Mean Relative Error

7. Developed Discrepancy Ratio (DDR)

1. Generality

2. Absolute Support

3. Coverage



شکل 1 فلوچارت مدل GRC برای تخمین آبخستگی (خامس پناه و همکاران، 1393)

بررسی آماری هر یک از نه پارامتر مورد استفاده در این تحقیق در جدول 2 آمده است. در این جدول دامنه تغییرات هر یک از پارامترهای مذکور و مقادیر میانه آنها نشان داده شده است. مطابق این جدول مشخص است که برای ϕ ، d_s مقادیر میانه با میانگین تقریباً مساوی هستند و برای دیگر پارامترها عملاً تفاوت معنی داری بین آنها وجود دارد. تفاوت معنی دار بین میانگین و میانه برای یک پارامتر بیانگر عدم توزیع نرمال برای آن است (نوری و همکاران، 1386). بنابراین می توان استنباط کرد که از بین متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق پارامترهای H_1 ، q ، H_1 ، d_{50} ، R ، d_w ، I_s ، W_s دارای توزیع نرمال نیستند. همچنین پارامترهای d_s و H_1 دارای دامنه تغییرات زیادی هستند که

برای قضاوت بهتر در مورد عملکرد مدل با استفاده از آماره DDR ، می توان تابع گوسی مقادیر DDR را محاسبه و به صورت یک توزیع نرمال استاندارد رسم کرد. برای این منظور ابتدا لازم است مقادیر DDR استاندارد شده و سپس با استفاده از تابع گوسی، مقادیر نرمال شده DDR (Q_{DDR})¹ محاسبه شود (نوری و همکاران، 1390).

2-5- بررسی آماری داده های موجود

تجزیه و تحلیل آماری پارامترهای مورد استفاده می تواند اطلاعات مهمی در مورد مقادیر کمینه، بیشینه، پراکنش و دیگر خصوصیات آماری آنها ارائه کند. بنابراین نتایج

1. Gaussian Standardized Developed Discrepancy Ratio Function

(al., 2012). از طرفی مطابق یافته‌های مطالعات قبلی، پارامتر بی بعد H_1 نیز به عنوان عاملی تأثیرگذار بر عمق بی‌بعد شده گزارش گردیده است که همخوانی مناسبی با نتایج جدول 3 ندارد؛ زیرا در این جدول ضریب همبستگی بین این دو پارامتر از مقدار بالایی برخوردار نیست و دارای مقداری متوسط است. این واقعیت می‌تواند ناشی از تحلیل خطی انجام شده در این تحقیق باشد، در حالی که در واقع رابطه بین عمق آبشستگی با متغیرهای هیدرولیکی، مورفولوژیکی و دینامیکی غیرخطی و پیچیده است و نتایج یک تحلیل خطی در برخی موارد به خوبی توجیه‌کننده رفتار و تغییرپذیری عمق آبشستگی نمی‌باشد. برای طول آبشستگی نیز هر چهار پارامتر به غیر از ϕ حائز اهمیت می‌باشند، هرچند که اثرات پارامتر بی‌بعد دبی با ضریب همبستگی بالای 0/9 از بقیه برجسته‌تر است. همچنین نتایج جدول یک حاکی از همبستگی بالای بین تمام متغیرهای بی‌بعد با عرض بی‌بعد شده آبشستگی است، هرچند که در این میان پارامتر بی‌بعد d_{50} از ضریب همبستگی متوسطی برخوردار است. به طور کلی می‌توان از نتایج جدول 3 استنباط نمود که هر سه مجهول بی‌بعد این تحقیق بیشتر تحت تأثیر تغییرات H_1 q d_{50} می‌باشند؛ واقعیتی که از همسویی مناسبی با نتایج دیگر تحقیقات نیز برخوردار است.

این تغییرات گسترده بیانگر تغییرپذیری بالای این پارامترها و به تبع آن طبیعت پیچیده و غیرخطی آنهاست.

3- بحث و نتایج

3-1- تحلیل همبستگی داده‌ها

با توجه به اینکه تحلیل همبستگی بین متغیرهای موجود و پارامتر هدف، اطلاعات مناسبی در مورد نحوه ارتباط داده‌ها را بازگو می‌کند، بنابراین در ادامه، تحلیل همبستگی متغیرهای هدف (I_w, W_s, d_s) انجام شد که نتایج آن در جدول 3 آمده است. همانطور که از جدول همبستگی پیداست، هر پارامتر با خودش رابطه کامل داشته و درایه‌های قطر اصلی ماتریس یک است. در ابتدا مشخص است که کم‌اهمیت‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر مجهولات این تحقیق (پارامترهای بی‌بعد عمق، طول و پهنای آبشستگی) ϕ می‌باشد که کمترین میزان همبستگی را با آنها دارد. به همین علت در پژوهش‌های گذشته محققان این پارامتر را در مطالعاتشان وارد نکرده‌اند که فرمول‌های تجربی و مطالعات آزمایشگاهی نیز مؤید این موضوع می‌باشد (Mason et al., 1985). پارامتر بی‌بعد عمق آبشستگی با پارامترهای بی‌بعد q و d_{50} به ترتیب بالاترین همبستگی را دارد که این واقعیت در راستای نتایج ارائه شده در پژوهش‌ها پیشین می‌باشد (Kumar et

جدول 2 نتایج آماری داده‌های موجود

آماره	W_s	I_w	d_s	d_w	ϕ	d_{50}	R_m	H_1	q
میانگین	0/8735	0/8944	0/2105	0/9964	0/5480	0/0058	0/2593	0/0273	0/5465
میانه	0/7100	0/6500	0/1848	0/0687	0/5240	0/0080	0/2000	0/3578	0/0374
خطای استاندارد میانگین	0/043	0/0502	0/0100	0/0071	0/0086	0/0002	0/0165	0/0505	0/0049
انحراف استاندارد	0/4196	0/0049	0/0983	0/0700	0/0841	0/0028	0/1611	0/4929	0/0477
کمینه	0/6	0/42	0/0512	0/0286	0/174	0/002	0/1	0/2791	0/0089
بیشینه	2/14	2/24	0/55	0/265	0/78	0/008	0/61	0/7962	0/2042

3-2- استخراج معادلات

در توسعه مدل تخمین طول، عرض و عمق آبشستگی توسط مدل‌های رگرسیونی خطی و GRC، 70 درصد از اطلاعات بدون بعد به عنوان داده‌های واسنجی و 30 درصد مابقی به عنوان داده‌های آزمون در نظر گرفته شد. برای توسعه مدل رگرسیونی خطی چند متغیره، ابتدا متغیرها را بی‌بعد کرده و به روش مدل رگرسیونی خطی، معادلات زیر به ترتیب برای عمق، طول و پهنای چاله آبشستگی پایین دست جام پرتابی سدها، به دست آمد.

$$\frac{d_s}{d_w} = 1.94 + 0.389 \frac{q}{\sqrt{qd_w^3}} - 19.414 \frac{d_{50}}{d_w} - 0.504 \frac{R}{d_w} \quad (17)$$

$$\frac{L_s}{d_w} = 3.117 + 0.904 \frac{H_1}{d_w} + 0.21 \frac{q}{\sqrt{qd_w^3}} \quad (18)$$

$$\frac{W_s}{d_w} = 3.380 + 0.526 \frac{q}{\sqrt{qd_w^3}} + 0.532 \frac{H_1}{d_w} - 28.841 \frac{d_{50}}{d_w} + 0.387 \frac{R}{d_w} \quad (19)$$

نتایج مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل رگرسیونی خطی چندمتغیره توسعه داده شده برای هر یک از پارامترهای آبشستگی پایین دست جام پرتابی در جدول‌های 4 و 5 آمده است. نتایج جدول 4 مشخص می‌کند که مدل رگرسیونی، اگرچه برای پارامترهای طول و عرض از عملکرد مطلوبی برخوردار است، اما برای تخمین عمق چاله آبشستگی دارای تفاوت معناداری بین نتایج مراحل واسنجی و صحت‌سنجی است. همچنین مقدار بالای VIF (جدول 5) برای معادله‌های (17) تا (19) بیانگر عدم اعتماد به نتایج این مدل‌هاست. همچنین نتایج مراحل واسنجی و صحت‌سنجی هر یک از مدل‌های توسعه داده شده توسط مدل رگرسیونی برای پارامترهای آبشستگی پایین دست جام پرتابی سدها در شکل 2 نشان داده شده است.

جدول 3 ماتریس همبستگی بین پارامترهای بدون بعد مورد استفاده در این تحقیق

	d_s/d_w	W_s/d_w	L_s/d_w	$q/\sqrt{gd^3}$	H_1/d_w	R/d_w	d_{50}/d_w	ϕ
d_s/d_w	1/000							
W_s/d_w	0/592	1/000						
L_s/d_w	0/829	0/884	1/000					
$q/\sqrt{gd^3}$	0/812	0/895	0/942	1/000				
H_1/d_w	0/430	0/900	0/789	0/823	1/000			
R/d_w	0/426	0/872	0/796	0/792	0/867	1/000		
d_{50}/d_w	0/801	0/572	0/711	0/631	0/329	0/388	1/000	
ϕ	-0/167	-0/002	-0/024	-0/067	0/105	0/177	-0/254	1/000

جدول 4 نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل رگرسیونی خطی برای تخمین ابعاد آبشستگی

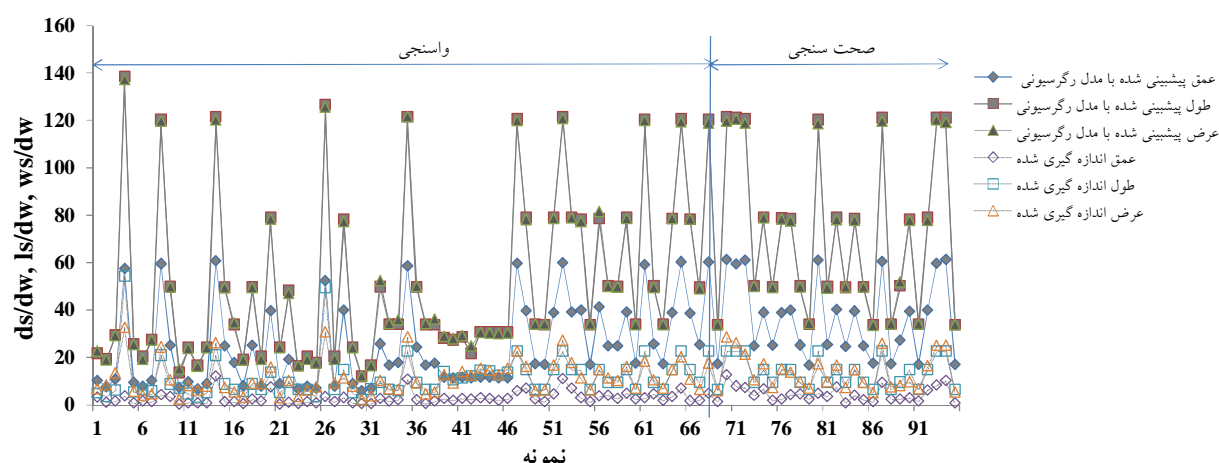
مرحله	پارامترهای بدون بعد								
	عمق			طول			عرض		
	R^2	RMSE	MRE	R^2	RMSE	MRE	R^2	RMSE	MRE
واسنجی	0/92	0/76	0/875	0/93	1/54	0/751	0/95	1/39	0/744
صحت‌سنجی	0/48	2/72	0/882	0/93	4/51	0/810	0/83	6/16	0/812

جدول 5 نتایج مدل رگرسیونی خطی برای تخمین ابعاد آبشستگی

آماره	VIF	Sig F Change
معادله 17	9/77	0/00
معادله 18	3/59	0/00
معادله 19	12/65	0/035

قوانین به کارگرفته شده در فرایند مدل‌سازی توسط مدل GRC تنها برای پیش‌بینی مقدار بی‌بعد عمق چاله آبشستگی ارائه شده است. بعد از واسنجی و صحت‌سنجی مدل GRC، با استفاده از نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل و اطلاعات اندازه‌گیری شده، آماره‌های R^2 و $RMSE$ برای هر یک از مدل‌های عمق، عرض و پهنا محاسبه شد (جدول 7). نتایج نشان می‌دهد که هر سه مدل توسعه داده شده توسط GRC برای تخمین پارامترها بسیار مناسبند، به طوری که مقدار R^2 آنها به یک نزدیک بوده و از مقدار $RMSE$ و MRE اندکی برخوردارند.

در گام بعد برای مدل‌سازی پارامترهای آبشستگی چاله فرسایشی پایین دست سدها از مدل GRC استفاده گردید مراحل مدل‌سازی ابعاد چاله فرسایشی دقیقاً مطابق شکل 1 انجام پذیرفت و قوانین موجود بین داده‌ها با استفاده از مدل GRC استخراج گردید. در جدول 6 عملاً برخی از



شکل 2 نتایج پیش‌بینی ابعاد چاله آبشستگی با مدل رگرسیونی خطی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده

جدول 6 قوانین مدل GRC در تخمین عمق آبشستگی

عمومیت حمایت مطلق پوشش ناسازگاری			قانون
0	1	0/89	0/12 If $R/d_w > 1.14827$ and $0.355 < \phi < 0.655$ and $d_{50}/d_w \geq 0.0168493$ and $5.237 < q/\sqrt{gd^3} < 6.37196$ and $H_s/d_w < 6.40653$ then $0.3 < d_s/d_w < 0.4$
0	0/78	0/91	0/06 If $3.798 < R/d_w < 4.0512$ and $0.3144 < \phi < 0.3275$ and $0.0216 < d_{50}/d_w < 0.0162$ and $3.0044 < q/\sqrt{gd^3} < 3.755$ then $1.96 < d_s/d_w < 2.205$
0/03	0/92	0/86	0/08 If $6.8364 < R/d_w < 7.0896$ and $4.0512 < d_{50}/d_w < 4.3044$ and $23.2080 < q/\sqrt{gd^3} < 24.175$ then $4.902 < d_s/d_w < 5.1471$

جدول 7 نتایج واسنجی و صحت سنجی مدل GRC برای تخمین ابعاد آبستنگی

مرحله	پارامترهای بی بعد								
	عرض			طول			عمق		
	R^2	MRE	$RMSE$	R^2	MRE	$RMSE$	R^2	MRE	$RMSE$
واسنجی	0/99	0/013	0/199	0/99	0/008	0/113	0/99	0/021	0/055
صحت سنجی	0/99	0/011	0/192	0/99	0/005	0/084	0/99	0/025	0/089

است. خطای روش GRC نیز کمتر از خطای روابط Mason and Arumugan (1985) و Veronese (1937) است. همچنین این روش نسبت به روش رگرسیونی خطی هم از همه لحاظ دقیق تر می باشد، به نحوی که از مقدار R^2 بالاتر و همچنین $RMSE$ و MRE کمتری نسبت به بقیه برخوردار است. بر همین اساس می توان نتیجه گرفت که در مقایسه با روش های تجربی، مدل GRC توانسته است با دقت بیشتری مقادیر عمق چاله فرسایشی را پیش بینی کند.

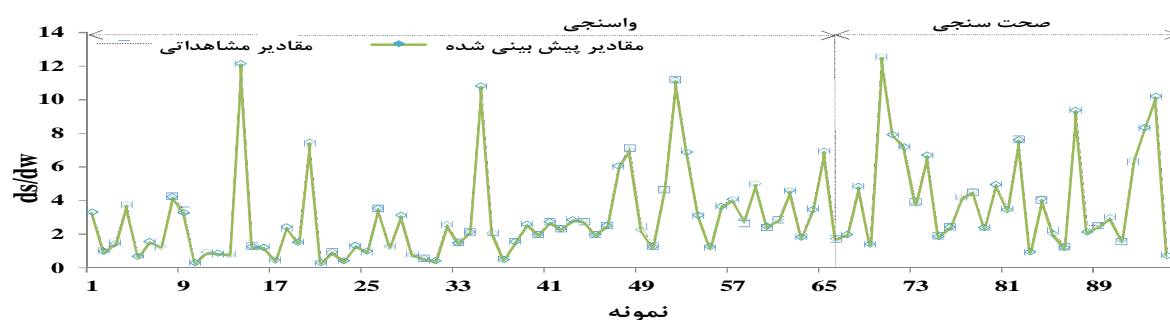
در ادامه از آنجا که آماره های R^2 ، MRE ، $RMSE$ بیانگر معیار متوسطی از خطا در مدل بوده و از روی آن ها نمی توان قضاوتی صحیح در مورد عملکرد مدل و نحوه توزیع خطا در مدل انجام داد، با رسم نمودار Q_{DDR} سعی در فراهم آوردن مقایسه ای هدفمندتر گردید. برای این منظور مدل توسعه داده برای عمق چاله آبستنگی پایین دست جام پرتابی سدها توسط مدل GRC با روش های شناخته شده تجربی (Veronese (1937) و Mason and Arumugan (1985) مطابق شکل 6 مورد مقایسه قرار گرفت.

در شکل 6 تمایل بیشتر گراف به خط مرکزی و بزرگ تر بودن مقدار بیشینه Q_{DDR} برای هر مدل نشان دهنده دقت بیشتر آن است (Noori et al., 2011). بنابراین از این شکل برتری محسوس مدل ارائه شده توسط GRC به وضوح مشخص است.

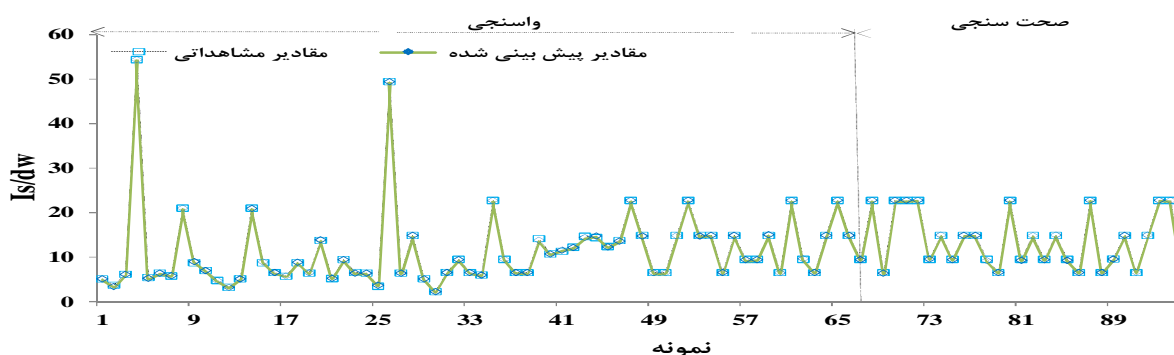
ضمناً به منظور ایجاد درکی بهتر از دقت مدل GRC در فرایند واسنجی و صحت سنجی، مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقادیر اندازه گیری شده پارامترهای بی بعد چاله آبستنگی در شکل های 3 تا 5 نشان داده شده است. از این شکل به وضوح پیداست که مقادیر پیش بینی شده توسط مدل GRC برای هر سه پارامتر بی بعد چاله فرسایشی در تمامی موارد منطبق بر مقادیر اندازه گیری شده بوده، به نحوی که می توان اشاره کرد که عملاً این مدل از قابلیت بسیار بالایی در تخمین ابعاد چاله فرسایشی برخوردار است.

3-3- مقایسه نتایج مدل GRC با فرمول های تجربی

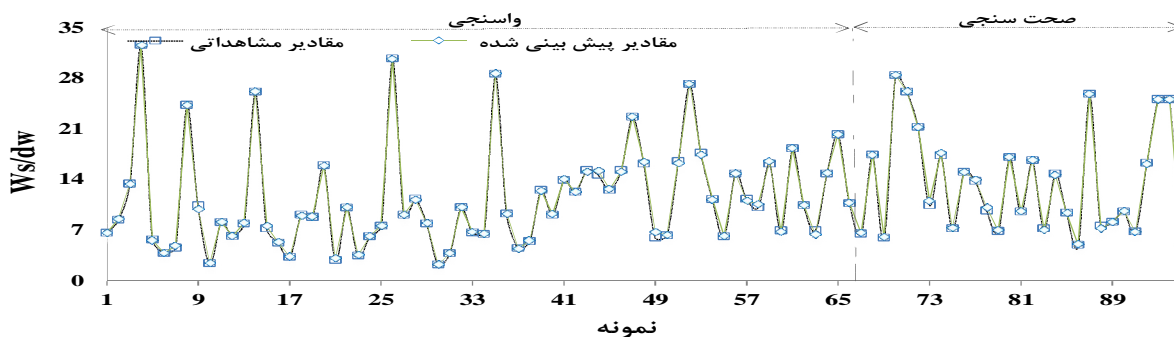
همان طور که در بخش مقدمه نیز ذکر گردید، مطالعات تجربی تنها به منظور تخمین عمق چاله آبستنگی توسعه داده شده اند و بنابراین قادر به تخمین سایر ابعاد چاله مثل پهنا و فاصله تشکیل آن تا پایین دست سرریز نیستند. بنابراین در ادامه این تحقیق برای مشخص شدن عملکرد بهتر مدل ارائه شده GRC، به مقایسه نتایج با روش رگرسیونی خطی انجام شده در این تحقیق و دو مدل تجربی شناخته شده (Veronese (1937) و Mason and Arumugan (1985) در تخمین عمق چاله آبستنگی اقدام شده است. نتایج مقایسه انجام شده در جدول 8 آمده است. مطابق این جدول با مقایسه نتایج مدل GRC با نتایج روش های تجربی مشخص می شود که مقدار R^2 روش GRC برای پیش بینی مقادیر عمق چاله آبستنگی بیش از دو برابر همین مقدار در روابط ارائه شده مذکور



شکل 3 نتایج پیش‌بینی مقادیر عمق چاله آبستگي با مدل GRC در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده



شکل 4 نتایج پیش‌بینی مقادیر فاصله چاله آبستگي با مدل GRC در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده



شکل 5 نتایج پیش‌بینی مقادیر پهناي چاله آبستگي با مدل GRC در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده

پارامترهای آبستگي پایین‌دست جام پرتابی سدها و همچنین محدود بودن این معادلات تنها برای تخمین عمق آبستگي، هدف اصلی این تحقیق معرفی مدل GRC برای رفع محدودیت‌های ذکر شده در نظر گرفته شد. برای این منظور از اطلاعات هیدرولیکی، مورفولوژیکی و ژئوتکنیکی استفاده گردید و مدل‌های مطلوبی با دقت بالا برای تخمین عمق، عرض و پهنا ارائه شد.

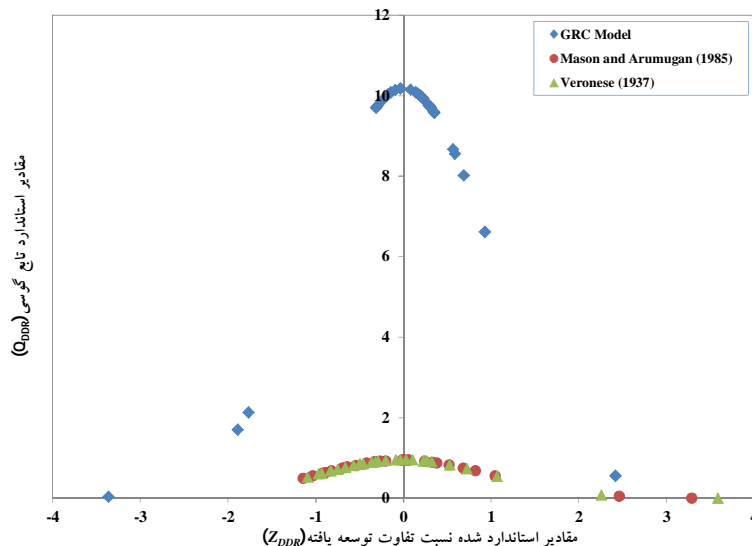
مطابق این شکل مقدار بیشینه Q_{DDR} برای معادلات Mason and Arumugan (1985) و Veronese (1937) حدوداً معادل 1 است، درحالی که برای مدل GRC این مقدار حدود 10 برابر بزرگتر است.

4- نتیجه‌گیری

با توجه به دقت پایین معادلات تجربی ارائه شده برای

جدول 8 مقایسه نتایج مدل GRC با مدل‌ها و روش‌های دیگر

مدل	آماره	عمق بی بعد	فاصله‌ی بی بعد	پهنای بی بعد
مدل GRC	R^2	0/99	0/99	0/99
	MRE	0/021	0/008	0/013
	$RMSE$	0/055	0/113	0/199
مدل رگرسیونی خطی	R^2	0/92	0/93	0/95
	MRE	0/875	0/751	0/744
	$RMSE$	0/76	1/54	1/39
Veronese (1937)	R^2	0/45	-	-
	MRE	0/807	-	-
	$RMSE$	0/26	-	-
Mason and Arumugan (1985)	R^2	0/44	-	-
	MRE	0/884	-	-
	$RMSE$	0/13	-	-

شکل 6 نمودار مقایسه Q_{DDR} مدل GRC با مدل‌های تجربی

دقت بالایی برخوردارند، به گونه‌ای که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل برای هر سه پارامتر در تمامی موارد منطبق بر مقادیر اندازه‌گیری شده بود، یا تفاوت بسیار ناچیزی با یکدیگر داشتند. در نهایت مقایسه نتایج مدل GRC با نتایج روش‌های تجربی ارائه شده توسط Mason and Arumugan (1985) و Veronese (1937) بیانگر این واقعیت بود که مدل GRC به طور محسوسی دارای دقت بالاتری در تخمین عمق چاله فرسایشی است.

نتایج به دست آمده از تحلیل همبستگی خطی بین پارامترهای آبستگي با متغیرهای هیدرولیکی، مورفولوژیکی و ژئوتکنیکی در این پژوهش مشخص کرد که کم اهمیت‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر عمق، عرض و پهنا، پارامتر ϕ می‌باشد. بیشترین تأثیرپذیری عمق، عرض و پهنا نیز به ترتیب از متغیرهای q ، H_1 ، d_{50} بود.

همچنین نتایج به دست آمده از مدل GRC نشان داد که هر سه مدل توسعه داده شده برای عمق، طول و پهنا از

		5- فهرست علائم	
R	شعاع قوس جام		مجموعه غیرتهی از صفات
U	مجموعه غیرتهی اشیا	At	متوسط اندازه رسوبات
$ U $	اندازه دانه تشکیل دهنده مجموعه مرجع	d_{50}	عمق آبستنگی
Va	مجموعه‌ای از ویژگی‌های At	d_s	عمق پایاب
W_s	پهنای آبستنگی	d_w	خطای مناسب‌سازی ماتریس
X	ماتریس متغیرهای مستقل	e	تابع اطلاعات
X'	ترانهاده ماتریس X	fa	شتاب ثقل
Y	ماتریس پاسخ	g	ناسازگاری شرطی
β	ضریب رگرسیونی	$H(\psi \varphi)$	ارتفاع آبشار
ρ_s	جرم مخصوص رسوبات	H_1	فاصله آبستنگی
ρ_w	جرم مخصوص آب	I_s	توضیحی از مجموعه At
ϕ	زاویه لبه قوس	L	اندازه دانه تشکیل دهنده φ
φ	مجموعه مقادیر معینی از جدول اطلاعات	$m(\varphi)$	اندازه دانه‌ای که اشیاء تشکیل دهنده آن هم در φ وجود دارد.
ψ	متغیر تصمیم‌گیری	$ m(\varphi \sim \psi) $	احتمال درستی فرمول برای کلاس ψ_i
		$P(\psi_i \varphi)$	شدت جریان
		q	

6- پیوست

جدول 1 اطلاعات هیدرولیکی، ژئوتکنیکی و مورفولوژیکی مورد استفاده برای تخمین طول، عرض و عمق پرش

(Azmathullah et al., 2005)

No	q	H_1	R_m	d_{50}	ϕ	d_w	d_s	I_w	W_s	No	q	H_1	R_m	d_{50}	ϕ	d_w	d_s	I_w	W_s
1	0/1703	0/5083	0/4	0/0040/472	0/1667	0/55	1/1116	0/85	49	0/0471	0/3113	0/14	0/0080/524	0/1	0/2459	0/6	0/65		
2	0/1792	1/4268	0/4060/0020/612	0/23	0/2439	1/9512	0/85	50	0/0285	0/2875	0/18	0/0080/524	0/1	0/1297	0/63	0/65			
3	0/0842	1/4268	0/6090/0020/698	0/15	0/2246	2/0202	0/92	51	0/0374	0/3578	0/2	0/0080/524	0/0437	0/2032	0/725	0/65			
4	0/0634	1/1328	0/4060/0020/612	0/03	0/1128	0/9807	1/63	52	0/0471	0/3827	0/18	0/0080/524	0/0286	0/3199	0/78	0/65			
5	0/0266	1/3659	0/61	0/0020/698	0/17	0/1259	0/9756	0/92	53	0/0471	0/3676	0/18	0/0080/524	0/0437	0/3036	0/775	0/65		
6	0/1616	1/7962	0/2540/0020/349	0/2337	0/3608	0/9055	1/5	54	0/0204	0/3354	0/1	0/0080/524	0/0437	0/136	0/495	0/65			
7	0/0709	1/4146	0/61	0/0020/698	0/16	0/1922	0/7378	0/92	55	0/0285	0/2875	0/2	0/0080/524	0/1	0/1207	0/62	0/65		
8	0/0204	1/3505	0/18	0/0080/524	0/0286	0/1218	0/697	0/6	56	0/0285	0/3438	0/18	0/0080/524	0/0437	0/1607	0/65	0/65		
9	0/0374	1/3328	0/14	0/0080/524	0/0687	0/236	0/72	0/6	57	0/0471	0/3426	0/18	0/0080/524	0/0687	0/2808	0/78	0/65		
10	0/0093	0/0718	0/4060/0020/612	0/234	0/0762	0/5742	1/63	58	0/0374	0/3328	0/18	0/0080/524	0/0687	0/181	0/7	0/65			
11	0/1239	1/3659	0/4060/0020/612	0/18	0/1677	1/4634	0/85	59	0/0374	0/3578	0/18	0/0080/524	0/0437	0/2172	0/71	0/65			
12	0/1446	1/3902	0/4060/0020/126	0/265	0/2165	1/6463	0/85	60	0/0471	0/3113	0/1	0/0080/524	0/1	0/2394	0/7	0/65			
13	0/0399	1/3902	0/61	0/0020/698	0/18	0/1485	1/4329	0/92	61	0/0204	0/3505	0/2	0/0080/524	0/0286	0/0816	0/525	0/65		
14	0/0471	1/3827	0/14	0/0080/524	0/0286	0/347	0/75	0/6	62	0/0471	0/3426	0/1	0/0080/524	0/0687	0/3153	0/72	0/65		

15	0/0204	0/3104	0/18	0/0080/524	0/0687	0/0889	0/5	0/6	63	0/0374	0/3015	0/14	0/0080/524	0/1	0/1848	0/7	0/65
16	0/0204	0/2991	0/14	0/0050/524	0/1	0/1235	0/53	0/65	64	0/0285	0/3438	0/2	0/0080/524	0/0437	0/1542	0/65	0/65
17	0/0186	1/0822	0/4060/0020/612	0/215	0/1037	0/7165	1/23		65	0/0285	0/3589	0/14	0/0080/524	0/0286	0/1986	0/58	0/65
18	0/0285	0/3188	0/14	0/0080/524	0/0687	0/1609	0/63	0/6	66	0/0204	0/3354	0/2	0/0080/524	0/0437	0/0752	0/47	0/65
19	0/1616	1/7962	0/2540/002	0/78	0/2337	0/3608	2/0709	1/5	67	0/0204	0/3104	0/1	0/0080/524	0/0687	0/135	0/45	0/65
20	0/0471	1/3676	0/14	0/0080/524	0/0437	0/3238	0/7	0/6	68	0/0204	0/3505	0/14	0/0080/524	0/0286	0/139	0/5	0/65
21	0/0089	1/3415	0/61	0/0020/698	0/178	0/0512	0/5183	0/92	69	0/0285	0/2875	0/14	0/0080/524	0/1	0/1405	0/6	0/65
22	0/0725	1/3415	0/4060/0020/612	0/09	0/0854	0/9146	0/85		70	0/0471	0/3827	0/1	0/0080/524	0/0286	0/3587	0/815	0/65
23	0/025	1/0922	0/4060/0020/612	0/25	0/1098	0/8781	1/63		71	0/0374	0/3729	0/2	0/0080/524	0/0286	0/2263	0/75	0/65
24	0/1616	1/7962	0/2540/0020/174	0/2337	0/2998	1/4482	1/5		72	0/0285	0/3589	0/2	0/0080/524	0/0286	0/2065	0/61	0/65
25	0/1626	1/4146	0/4060/0020/612	0/248	0/2317	1/8902	0/85		73	0/0471	0/3426	0/2	0/0080/524	0/0687	0/2693	0/72	0/65
26	0/087	1/1532	0/4060/0020/612	0/033	0/1169	1/0163	1/63		74	0/0471	0/3676	0/2	0/0080/524	0/0437	0/292	0/76	0/65
27	0/1616	1/7962	0/2540/0020/523	0/2337	0/2998	1/1439	1/5		75	0/0204	0/3304	0/14	0/0080/524	0/0687	0/1309	0/5	0/65
28	0/0204	0/3354	0/1	0/0080/524	0/0437	0/136	0/497	0/65	76	0/0204	0/3554	0/18	0/0080/524	0/0437	0/1068	0/66	0/65
29	0/0398	1/3902	0/61	0/0020/698	0/18	0/1485	1/4329	0/92	77	0/0285	0/3438	0/1	0/0080/524	0/0437	0/1839	0/605	0/65
30	0/0285	0/3589	0/25	0/0080/567	0/286	0/1642	0/65	0/65	78	0/0471	0/3426	0/14	0/0080/524	0/0687	0/3091	0/67	0/65
31	0/0435	1/1125	0/3	0/0020/612	0/248	0/1113	0/9502	1/63	79	0/0471	0/3113	0/25	0/0080/524	0/1	0/243	0/69	0/65
32	0/0374	0/3328	0/25	0/0030/567	0/0687	0/1772	0/7	0/65	80	0/0204	0/3505	0/1	0/0080/524	0/0286	0/1424	0/49	0/65
33	0/0374	0/3015	0/25	0/0080/567	0/1	0/1516	0/67	0/65	81	0/0374	0/3324	0/1	0/0080/524	0/0687	0/2426	0/66	0/65
34	0/0374	0/3015	0/25	0/0020/567	0/1	0/2135	0/65	0/6	82	0/0471	0/3676	0/1	0/0080/524	0/0437	0/3343	0/73	0/65
35	0/0471	0/3827	0/25	0/0080/567	0/0286	0/3085	0/82	0/65	83	0/0204	0/3104	0/2	0/0080/524	0/0687	0/0643	0/5	0/65
36	0/0285	0/3188	0/25	0/0080/567	0/0687	0/1432	0/64	0/65	84	0/0285	0/3438	0/14	0/0080/524	0/0437	0/1765	0/65	0/65
37	0/0204	0/2991	0/25	0/0080/567	0/1	0/0512	0/455	0/65	85	0/0285	0/3188	0/18	0/0080/524	0/0687	0/1526	0/65	0/65
38	0/0285	0/2875	0/3	0/0020/612	0/1	0/157	0/55	0/65	86	0/0204	0/2791	0/1	0/0080/524	0/1	0/1255	0/5	0/65
39	0/1532	1/075	0/56	0/0020/611	0/146	0/38	1/84	2/06	87	0/0374	0/3729	0/14	0/0080/524	0/0286	0/2685	0/74	0/65
40	0/0511	0/965	0/56	0/0020/611	0/146	0/29	1/34	1/56	88	0/0471	0/3113	0/18	0/0080/524	0/0678	0/2497	0/765	0/65
41	0/2042	1/13	0/56	0/0020/611	0/146	0/4	2/04	1/65	89	0/0285	0/3188	0/1	0/0030/524	0/0678	0/1706	0/555	0/65
42	0/1021	0/03	0/56	0/0020/611	0/146	0/34	1/8	1/78	90	0/0204	0/3354	0/14	0/0080/524	0/0437	0/1325	0/42	0/65
43	0/2042	1/477	0/56	0/0020/611	0/146	0/42	2/24	2/14	91	0/0374	0/3015	0/18	0/0080/524	0/1	0/156	0/685	0/65
44	0/1532	1/485	0/56	0/0020/611	0/146	0/4	2/144	2/1	92	0/0374	0/3578	0/1	0/0080/524	0/0437	0/2755	0/715	0/65
45	0/0511	1/505	0/56	0/0020/611	0/146	0/29	1/84	1/8	93	0/0374	0/3729	0/18	0/0080/524	0/0286	0/2382	0/72	0/65
46	0/1021	1/5	0/56	0/0020/611	0/146	0/368	2/24	2	94	0/0374	0/3729	0/1	0/0080/524	0/0286	0/2915	0/72	0/65
47	0/0285	0/3589	0/18	0/0080/524	0/0286	0/1725	0/65	0/65	95	0/0204	0/2791	0/18	0/0080/524	0/1	0/0785	0/55	0/65
48	0/0374	0/3578	0/14	0/0080/524	0/0437	0/3112	0/71	0/65									

7- منابع

علوم و فنون نقشه برداری، سال چهارم، شماره 3، ص.ص.
145-156.

خامس پناه، ف.، دلاور، م.ر.، صمدی علی نیا، ح.، زارعف، م.
(1393). "تشکیل مدل محاسبات دانه‌ای بر اساس رابطه
شباهت عمومی در ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای"، فصلنامه

سیفی.ا، حسین زاده دلیر.ع، فرسادی زاده. د، (1392).
"آبشستگی در پایین دست سرریز لبه پهن دو طرف شیب‌دار"،

channel flow”, Elsevier.

Chandan K. P. S, (2012), “Evaluation of selected equations for predicting scour downstream of Ski-Jump spillway using laboratory and field data”, Technical Note, Indian Institute of Technology Guwahati, Journal of Engineering Geology, 129, pp. 98-103.

Goyal, M. K. (2011), “Estimation of scour downstream of a ski jump bucket using support vector and M5 model tree”, Journal of Water Resour. Manage., 25, pp. 2177-2195.

Hager, W.H. and Minor, H.E. (2004), “Plunge pool scour in prototype and laboratory”, Proceeding of 2004 International Conf. on hydraulics of dam and river structures, April 29-28, Tehran, Iran.

Mason, P.J. and Arumugan, K. (1985), “Free jet scour below dams and flip bucket”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 111(2), pp. 220-235.

Martins, RBF. (1975). “Scouring of rocky river beds by free jet spillways.” Journal of Water Power and Dam Construction, 27(4), pp. 152-153.

Momeni Vesalian, R. (2006), “Investigation of scour downstream of dam by physical model”, Ph.D. thesis, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, pp. 170.

Noori, R., Karbassi, A. R., Moghaddamnia, A., Han, D., Zokaie-Ashtiani, M. H., Forokhnial, A., and Ghafari-Goushesh, M., (2011), “Assessment of input variables determination on the SVM model performance using PCA, Gamma test, and forward selection techniques for monthly stream flow prediction”, Journal of Hydrology, 401, pp. 177-189.

Rajaratnam, N. and Mazurek, K. (2003), “Erosion of sand by circular impinging water jets with small tailwater”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 129(3), pp. 225-229.

Veronese, A. (1937), “Erosion of a bed downstream from an outlet”, Colorado A & M College, Fort Collins, United States.

Wittler, R.J., Annandale, G.W. Abt, S.R. and Ruff, J.F. (1998), “New technology for estimating plunge pool spillway scour”, Proceeding of 1998 Annual Conference of The Association of State Safety Officials, October 11-14, Las Vegas.

Yao, Y., and Zhong, N. (2002), “Granular computing using information tables”, Data mining, rough sets and granular computing, Springer, pp. 02-124.

نشریه دانش آب و خاک، جلد 23، شماره 4، ص.ص. 177-188.

قدسیان، م، اسدی سریزدی، م.ح، (1381)، "ابعاد حفره آبستگي پایین دست جام‌های پرتابی"، فصلنامه فنی و مهندسی مدرس، شماره 8، ص.ص. 107-114.

مومنی وصالیان، ر، موسوی جهرمی، ح، شفاعی بجستان، م، (1387)، "آبستگي ناشی از جت‌های مستطیلی در پایین دست پرتابه های جامی شکل با مصالح غیریکنواخت"، شماره 2، ص.ص. 203-216.

نوری، ر، کراچیان، ر، خدادادی دربان، ا، شکیبایی نیا، ا، (1386)، "ارزیابی اهمیت ایستگاه‌های پایش کیفی رودخانه‌ها با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی و آنالیز فاکتور، مطالعه موردی رودخانه کارون"، مجله آب و فاضلاب، شماره 63، ص.ص. 60-69.

هوشیاری‌پور، ف، نوری، ر، (1392)، "استفاده از تکنیک ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی ابعاد چاله آبستگي پایین دست یک پرتابه جامی شکل"، مهندسی آب و محیط زیست ایران، دوره 1، شماره 1، ص.ص. 35-45.

نوری، ر، خاکپور، ا، دهقانی، م، فرخ‌نیا، ا، (1390)، "پیش‌بینی ماهانه جریان با استفاده از ماشین بردار پشتیبان بر مبنای آنالیز مؤلفه‌های اصلی"، یادداشت فنی، مجله آب و فاضلاب، شماره 1، ص.ص. 118-129.

Azmathullah, H.Md, Deo, M.C, and Deolalikar, P.B., (2005), “Neural networks for estimation of scour downstream of ski-jump bucket”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 131(10), pp. 898-908.

Azmathullah, H.Md, Ghani A.A.B, Zakaria, N, Hin, L.S, Kiat, C.C, Siang, L.C. and Hasan, Z.A. (2008), “Genetic programming to predict ski-jump bucket spillway scour”, Journal of Hydrodynamic, 20(4), pp. 477-484.

Bollaert, E.F.R. and Schleiss, A.J. (2003), “Scour of rock due to the impact of plunging high-velocity jets”, PartII: experimental results of dynamic pressures at pool bottoms and in one and two-dimensional closed end rock joints”, Journal of Hydraulic Research, 40(5), pp. 15-30.

Chanson, H. (2004), “The hydraulic of open

input variables determination on the SVM model performance using PCA, Gamma test, and forward selection techniques for monthly stream flow prediction”, *Journal of Hydrology*, 401, pp. 177-189.

Chandan K. P. S. (2012), “Evaluation of selected equations for predicting scour downstream of ski-jump spillway using laboratory and field data”, Technical Note, Indian Institute of Technology Guwahati, *Journal of Engineering Geology*, 129, pp. 98-103.

Yao, Y.Y. (2004). “A partition model of granular computing, transactions on rough set”, *Journal of Subline*, 3100, pp. 232-253.

Yao, Y.Y. and Yan, M. (2007), “ICS: An interactive classification system”, *Proceedings of the 20th Canadian Conference on Artificial Intelligence (CAI'07)*, pp. 134-145.

Noori, R, Karbassi, A. R, Moghaddamnia, A, Han, D, Zokaei-Ashtiani, M. H., Forokhnial, A. and Ghafari-Goushesh, M. (2011), “Assessment of