

## بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین دست پرتاب کننده جامی شکل

غلامحسین اکبری<sup>۱</sup>، محمدرضا کاویانپور اصفهانی<sup>۲</sup>، احسان سلطانی سامانی<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۸

### چکیده

به منظور بررسی تاثیر تغییرات دبی واحد عرض و عمق پایاب بر ابعاد حفره آبشستگی آزمایش‌هایی در مرکز تحقیقات آب، برای پنج دبی و چهار عمق پایاب مختلف انجام شده است. در این آزمایش‌ها از مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد آزاد کمک گرفته شده است. بعد از اتمام هر آزمایش ابعاد حفره آبشستگی از قبیل حداکثر عمق آبشستگی، فاصله محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از محل جام، بیش‌ترین طول حفره آبشستگی و بیش‌ترین عرض حفره اندازه‌گیری گردید. با استفاده از رگرسیون‌های چند متغیره غیر خطی روابط مناسبی برای پارامترهای حفره آبشستگی بدست آمد. برای بررسی توانمندی مدل‌های بدست آمده در این پژوهش، مجموعه‌ای از داده‌های محققان دیگر نیز جمع آوری و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاکی از توانایی نسبی مدل‌های ارائه شده در این پژوهش می‌باشد. عرض حفره و موقعیت طولی بیش‌ترین عمق با استفاده از روابط توسعه داده شده در این پژوهش به خوبی پیشگویی شدند. بیش‌ترین عمق پیشگویی شده توسط رابطه رگرسیونی با روابط مشهور عمق آبشستگی مقایسه شد و عملکرد ضعیف‌تری را نشان داد. بهترین پیشگویی برای تخمین آبشستگی توسط مدل مارتینز B ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: جت پرتابی، مدل هیدرولیکی، آبشستگی، رگرسیون غیر خطی

<sup>۱</sup> - استادیار مهندسی آب، دانشگاه سیستان و بلوچستان

<sup>۲</sup> - دانشیار مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی

<sup>۳</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد عمران (آب)، دانشگاه سیستان و بلوچستان

\* - نویسنده مسئول مقاله: ehsansoltani22@gmail.com

## مقدمه

جریان خروجی از سرریزها بصورت فوق بحرانی می‌باشد و دارای سرعت و انرژی زیادی می‌باشد. این انرژی در صورتیکه به طریقی مهار نشود می‌تواند به بدنه سد و سازه‌های جانبی آن صدمه وارد کند. یک راه برای مهار انرژی جریان خروجی استفاده از حوضچه آرامش است. اما حوضچه آرامش سازه گرانی است و استفاده از آن هزینه اقتصادی زیادی را تحمیل می‌کند. لذا بجای آن می‌توان از حوضچه‌های پرتابی استفاده کرد. در این نوع مستهلک کننده‌های انرژی جریان بصورت جت در هوا پراکنده می‌شود و در مکانی دورتر نسبت به بدنه سد به سطح بستر رودخانه برخورد می‌کند و سبب فرسایش در آن ناحیه می‌شود. قسمتی از انرژی جریان فوق بحرانی در اثر پراکنده شدن در هوا مستهلک می‌گردد و عمده انرژی در اثر اختلاط و تلاطم در حفره فرسایش که در محل فرود جت آب تشکیل می‌گردد مستهلک می‌گردد. بررسی ابعاد حفره فرسایش اهمیت فراوانی دارد زیرا در صورتی که بستر رودخانه در محل برخورد فوران بطور مناسب مقاوم سازی نشده باشد، ابعاد حفره بسیار بزرگ خواهد شد و حتی ممکن است پایداری سد را به مخاطره اندازد. فرآیند آبشستگی را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد: ۱- مرحله جدا شدن ذرات که در این مرحله، فشارهای دینامیکی بوجود آمده در محل برخورد جت سبب شکسته شدن بستر می‌شود ۲- در مرحله دوم ذرات معلق شده در حفره توسط جریان حمل می‌شود و در پایین دست حفره آبشستگی ته‌نشین می‌شوند. تا کنون پرداختند. میسن (۱۹۸۵) در تحقیقات خود نشان داد که اگر از شدت جریان، ارتفاع ریزش و اندازه ذرات در روابط پیش بینی عمق آبشستگی استفاده شود، نتایج دارای دقت خوبی خواهند بود. راجاراتنام و مازوک (۲۰۰۳) پدیده آبشستگی را در شرایط مصالح غیر چسبنده با پایاب‌های کوچک بررسی کردند. وایتلر و همکاران (۱۹۹۸) روش آناندال را برای پیشگویی حداکثر عمق آبشستگی ارائه نمودند. در این روش با تعریف شاخص فرسایش پذیری، انرژی جنبشی لازم جهت فرسایش مصالح بستر در هر عمق حاصل می‌شود و آنرا

مطالعات زیادی بر روی پدیده آبشستگی انجام شده است. سعیدی نژاد (۱۳۸۴) با انجام آزمایش‌هایی بر روی سرریز ریزشی آزاد با مصالح یکنواخت‌شان داد که عمق پایاب بر مقدار حداکثر عمق آبشستگی اثر افزایشی-کاهشی دارد. محبوبی (۱۳۷۵)، به منظور بررسی اثر قطر مصالح بر حداکثر عمق آبشستگی آزمایش‌هایی با قطر مصالح ۱، ۲/۵۷، ۷/۱۵ و ۱۱ میلیمتر، ارتفاع ریزش ۴۵، ۶۰، ۷۵ سانتیمتر و دبی ۱۰ و ۱۵ لیتر بر ثانیه انجام داده است. وصالیان و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی آبشستگی ناشی از جت‌های مستطیلی در پایین دست پرتاب کننده‌های جامی شکل با مصالح غیر یکنواخت پرداختند. عظمت الله و همکاران (۲۰۰۵) ابعاد حفره آبشستگی را با استفاده از شبکه‌های عصبی بررسی کردند. ایشان همچنین مدل شبکه‌های عصبی را با نتایج رگرسیون‌های غیر خطی مقایسه کردند. بوهر و همکاران (۱۹۹۸) به بررسی استهلاک انرژی جت ورودی به استخر آب پرداختند. مطالعات انجام شده توسط چی و لیم (۱۹۹۶) بر روی جت‌های دیواره‌ای و ریزشی استوانه‌ای مستغرق آب و هوا نشان می‌دهد که شکل حفره آبشستگی در آب و هوا متفاوت می‌باشد و برای پارامتر فرود ذره یکسان، ابعاد آبشستگی در هوا بزرگتر از آب است. ولی ارتفاع بالا آمدگی رسوبات در آب خیلی بیشتر از هوا است که در واقع تفاوت اصلی بین آب و هوا محسوب می‌شود. قدسیان و عباسی (۲۰۰۱) تغییرات توپوگرافی بستر را در پایین دست جت‌های ریزشی مطالعه کردند. هگر و کنیا (۲۰۰۳) به بررسی اثر هوادهی جت بر آبشستگی با انرژی جریان مقایسه و میزان حداکثر عمق آبشستگی را بدست می‌آورند.

از روابط حاصل شده در تحقیقات گذشته برای بیشترین عمق آبشستگی می‌توان به ورونس (A)، ورونس (B)، اگنبرگر، هارتونگ، فرانکی، دامل (A)، دامل (B)، دامل (C)، چی و پادیر، بی ساز و تی شاپ، چی و کونگ، مارتینز (B)، تارامویچ، ماکادو و سوفرلک اشاره کرد (وصالیان و همکاران ۱۳۸۷). روابط مذکور از پارامترهای  $q, H$  و  $d$  برای پیش بینی عمق آبشستگی استفاده می‌کنند. در تحقیق حاضر سعی شده است که ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای موثر شناسایی

جاده شهرستان مریوان بر رودخانه جم گوره از سرشاخه- های مهم رودخانه جا نمایی و اجرا گردیده است. این سد از نوع خاکی با هسته نفوذ ناپذیر رسی با ارتفاع ۱۱۸ متر از بستر رودخانه و عرض ۱۴ و طول ۵۹۷ متر می‌باشد. این مدل شامل مخزن، یک سرریز اوجی با پایه‌های جدا کننده و یک تنداب می‌باشد. سرریز اوجی دریچه‌دار دارای معادله  $y=0.0584x^{1.85}$  می‌باشد که بر اساس معیارهای USBR ساخته شده است. تنداب مدل دارای دو هواده می‌باشد که برای جلوگیری از وقوع کاویتاسیون در مدل واقعی، تعبیه شده است. به منظور استهلاک انرژی، از پرتاب کننده جامی شکل در انتهای تنداب استفاده شده است. عرض تنداب ۹۰ سانتی متر می‌باشد که با عرض پرتاب کننده برابر است. پرتاب‌کننده دارای شعاع ۴۵ سانتیمتر، زاویه مرکزی ۴۶/۱۴ درجه و زاویه مماس با لبه پرتاب ۲۴/۶۹ درجه می‌باشد. شکل ۱ مدل مربوطه را نمایش می‌دهد.

شده و سپس با استفاده از رگرسیون های غیر خطی و انجام چندین آزمایش روابطی بدون بعد برای ابعاد حفره بدست آید. پارامترهای مورد بررسی شامل بیشترین عمق آبستگي، فاصله بیشترین عمق آبستگي از لبه پرتاب کننده، بیشترین عرض و طول حفره آبستگي می‌باشند. دقت مدل‌های ارائه شده بوسیله داده‌های منتشر شده توسط سایر محققین مورد بررسی قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی میزان و نحوه وابستگی بین پارامترها در روابط بدست آمده از تحلیل ابعادی، یک سری آزمایش ترتیب داده می‌شود که در آن‌ها اثرات عمق پایاب، دبی بر واحد عرض، اختلاف ارتفاع جریان بین سطح مخزن و پایاب، مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. آزمایش‌ها در مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد مخزنی آزاد با مقیاس  $\frac{1}{33.33}$  ساخته شده در موسسه تحقیقات آب انجام می‌شود. سد مخزنی آزاد در



شکل ۱- تنداب و هواده‌های آن در مدل سد آزاد.

کنترل، جریانی اندک بصورت ریزشی از پرتاب کننده وارد حوضچه می‌شود و دریچه تنظیم پایاب در ارتفاع مشخصی ثابت نگه داشته می‌شود تا حوضچه رسوب پر از آب شود. پس از قرار گرفتن عمق پایاب در اعداد مشخص و تعیین شده، شیر کنترل ورودی به مخزن به تدریج باز می‌شود تا سطح آب در مخزن افزایش یابد و دبی در مدل بیشتر شود. در این حالت جت آب بصورت پرتابی به داخل حوضچه فرو می‌آید و سبب شسته شدن مصالح بستر می‌گردد.

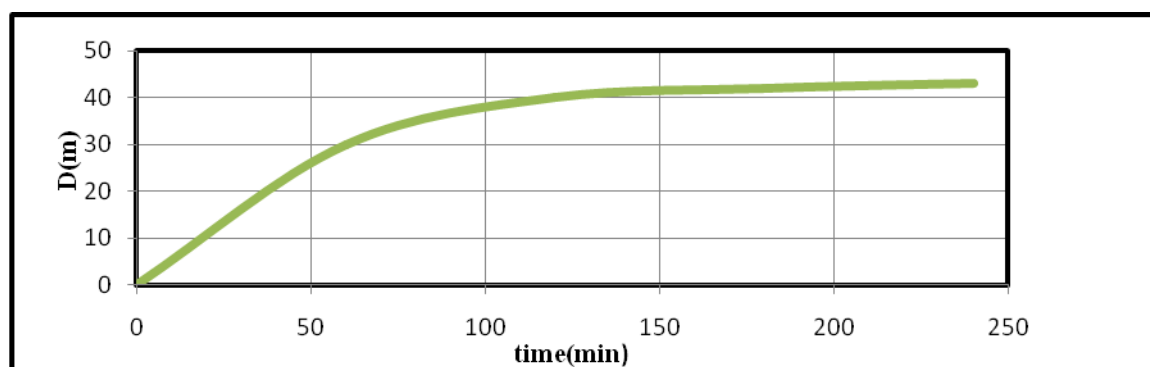
### روش انجام آزمایش‌ها و ایجاد پایاب

ابتدا سطح مصالح موجود در حوضچه رسوب در تراز ۵۰ سانتیمتر زیر لبه پرتاب کننده تسطیح می‌شود. سپس شیر ورودی به مخزن باز و جریان وارد مخزن می‌شود. هنگامیکه سطح آب در مخزن به لبه سرریز برسد، جریان از روی سرریز عبور می‌کند و جام انتهای تنداب جریان را به داخل حوضچه پرتاب می‌کند. برای اینکه جریان اولیه در مصالح ایجاد آبستگي نکند، باید ابتدا اجازه داد تا حوضچه از آب پر شود، سپس جت آب به داخل آن رها شود. بدین منظور ابتدا با تنظیم شیر

عمق پایاب  $h_f=0/11$  متر به عنوان بحرانی ترین حالت در نظر گرفته شده است. در این تحقیق برای تعیین زمان تعادل، ۴ آزمایش انجام شده است. در طی انجام آزمایش زمانی که دیگر هیچ رسوبی از حفره آبشستگی خارج نشود به عنوان زمان تعادل شناخته می‌شود. یعنی در این حالت افزایش حداکثر عمق آبشستگی برابر صفر می‌شود. ولی چون این اتفاق در زمان بی نهایت روی می‌دهد لذا باید در تحقیقات عملی زمانی را به عنوان زمان تعادل انتخاب کنیم که تفاوت ابعاد حفره در رین حالت نسبت به گام زمانی بعدی ناچیز باشد. همانطور که در شکل ۲ مشخص است روند افزایش حداکثر عمق آبشستگی در گامهای انتهایی کم شده است و با توجه به اینکه در زمان ۲ ساعت حداکثر عمق آبشستگی به بیش از ۹۰ درصد حداکثر این عمق برای زمان ۴ ساعت رسیده است که با تقریب زمان بی نهایت فرض می‌شود، لذا این زمان به عنوان زمان تعادل در نظر گرفته می‌شود.

### تعیین مدت زمان انجام آزمایش

زمان تعادل در بررسی پدیده آبشستگی از مهمترین گامها می باشد. در زمان تعادل حفره آبشستگی نسبت به گام زمانی قبل تغییر محسوس نخواهد داشت. اگر در این آزمایش ابعاد حفره آبشستگی بعد از مدت زمانی خاص تغییرات محسوس نداشته باشند، آزمایش به تعادل رسیده است. در این تحقیق نیز همچنانکه معمول می‌باشد عمق آبشستگی به عنوان پارامتر تعیین کننده زمان تعادل در نظر گرفته شده است. در بررسی پدیده آبشستگی در ساعات اولیه بیشترین میزان آبشستگی رخ می دهد. تعیین دقیق زمان تعادل بسیار با اهمیت می‌باشد چراکه در صورت تعیین اشتباه زمان تعادل عملاً درستی تمامی نتایج زیر سوال خواهد رفت. آزمایش‌های تعیین زمان تعادل برای بحرانی‌ترین حالت یعنی حالتی که انتظار داریم بیشترین عمق آبشستگی در آن رخ دهد انجام می‌پذیرد. در این تحقیق حداکثر دبی واحد عرض  $q=0/1039$  متر مربع بر ثانیه و کمترین



شکل ۲- منحنی توسعه آبشستگی با زمان.

می‌شوند. در این شرایط ذرات درشت تر بخاطر وزن بیشتر زودتر از ذرات ریز و در فاصله کمتری نسبت به محل برخورد جت ته نشین می‌شوند. البته نمی‌توان مرز مشخصی برای ذرات ریزدانه و درشت دانه در نظر گرفت زیرا در اثر آشفتگی‌ها و اغتشاشات ممکن است ذرات ریز دانه به درشت دانه برخورد کرده و در ابتدای مسیر ته نشین شوند. جریان‌های برگشتی ایجاد شده در درون حفره قسمتی از مواد فرسایش یافته را به بالادست منتقل می‌کنند که جریان‌های موجود قسمتی از آنها را مجدداً

### مکانیزم فرآیند آبشستگی

در شروع آزمایش و با برخورد جت به سطح پایاب فرسایش آغاز می‌شود. با شروع فرسایش مواد ریز و درشت بستر از جای خود کنده شده، به سطح آمده و بصورت تصادفی به اطراف پراکنده می‌شوند. حفره آبشستگی نیز با آغاز این پدیده تشکیل می‌گردد. در این آزمایش جریان غالب جت به سمت پایین دست می‌باشد و لذا عمده مصالح فرسایش یافته بستر، به سمت پایین دست منتقل شده و تحت اثر وزنشان براساس ریزی و درشتی ته نشین

گردد. در شکل ۳ نحوه شکل‌گیری پدیده آبشستگی و پارامترهای موثر بر آن نشان داده شده است. پارامترهای متعددی در ایجاد پدیده آبشستگی در زیر جت‌ها دخیل می‌باشند که عبارتند از  $Q$ : دبی جریان در واحد عرض،  $\rho_s$ : جرم حجمی مصالح بستر،  $\rho_w$ : جرم حجمی آب،  $\mu$ : لزجت دینامیکی آب،  $h_t$ : عمق پایاب،  $d_s$ : اندازه ذرات مصالح بستر،  $g$ : شتاب ثقل،  $b$ : ضخامت جت در جام سرریز،  $H$ : ارتفاع ریزش یا اختلاف بین رقوم آب سطح مخزن و پایاب،  $D$ : حداکثر عمق آبشستگی که از سطح اولیه بستر اندازه‌گیری می‌شود،  $\theta$ : زاویه برخورد جت به پایاب،  $R$ : شعاع پرتابه جامی شکل،  $\varphi$ : زاویه پرتابه جامی شکل،  $Y$ : فاصله عمودی بین لبه پرتاب کننده و سطح اولیه، و  $t$ : زمان.

در نتیجه می‌توان نوشت:

$$f(q, \rho_w, \rho_s, D, d_s, g, b, h_t, Y, H, R, \theta, \cos \varphi, \mu, t) = 0 \quad (1)$$

از آنجاییکه در این پایان نامه هدف بررسی آبشستگی در حالت تعادل می‌باشد، لذا عامل زمان از رابطه فوق حذف می‌گردد و همچنین به نظر نمی‌رسد  $b$  برای دبی‌های مورد استفاده در این تحقیق زیاد تغییر کند، بنابراین از رابطه حذف می‌شود. از طرفی  $\theta$  می‌تواند با رسم مماس بر منحنی مسیر حرکت جت در نقطه برخورد به پایاب بصورت تئوریک محاسبه شود. از آنجاییکه محاسبه  $\theta$  به سختی امکان پذیر است و وجود آن در رابطه نهایی کاربری آنرا مشکل می‌کند، از آن صرف‌نظر می‌شود (وصالیان و همکاران ۱۳۸۷). جریان در این آزمایش آشفته می‌باشد که دارای تلاطم زیادی است، لذا  $\mu$  نیز می‌تواند حذف گردد. در نتیجه تابع مذکور به شکل زیر تبدیل خواهد شد:

$$f(q, \rho_w, \rho_s, D, d_s, g, h_t, Y, H, R, \cos \varphi) = 0 \quad (2)$$

با انتخاب سه متغیر تکراری  $H, \rho_w, Q$  و بکار بردن تئوری با کینگهام، معادله بدون بعد زیر بدست می‌آید:

$$f\left(\frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{q}{\sqrt{QH^3}}, \frac{d_s}{H}, \frac{D}{H}, \frac{h_t}{H}, \frac{R}{H}, \frac{Y}{H}, \cos \varphi\right) = 0 \quad (3)$$

به سطح آورده و به پایین دست منتقل می‌کند و البته مقداری نیز در دیواره داخلی و نیمه بالایی حفره ته نشین می‌شوند. با گذشت زمان آزمایش، عمق حفره ایجاد شده و به تبع آن ارتفاع برآمدگی پایین دست افزایش می‌یابد. برآمدگی ایجاد شده در جلوی حفره مانند سدی است که جلوی خروج ذرات را می‌گیرد و خروج آنها را با مشکل مواجه می‌کند. چرا که در این حالت ذرات باید مسیر طولانی‌تری را برای خروج از حفره طی کنند. یعنی ابتدا به بالا آمده و سپس همراه جریان به پایین دست منتقل شوند. درصدی از ذرات ریز دانه نیز در جهت عرضی حفره به حرکت درآمده و بدین طریق از حفره خارج می‌گردند. در این حالت به نظر می‌رسد ذرات ریزدانه بیشتر از درشت دانه‌ها از حفره خارج می‌شوند، زیرا وزن کمتری دارند و جت ریزشی آنها را راحت‌تر از جای خود کنده و به اطراف منتقل می‌کند. به همین دلیل با گذشت زمان آزمایش ذرات درشت دانه کمتر می‌توانند به آن سوی برآمدگی منتقل شوند. در این شرایط ذرات درشت دانه تنها می‌توانند درون حفره آبشستگی در حال چرخش باشند و نمی‌توانند از حفره خارج شوند در حالیکه ذرات ریز دانه از فضای بین درشت دانه بالا آمده و به آن سوی برآمدگی منتقل می‌شوند. آزمایش تا جایی پیش می‌رود که دیگر ذرات قادر به خروج از درون حفره نیستند و این یعنی آزمایش به زمان تعادل رسیده است. در این زمان ذرات تنها در درون حفره به حالت معلق در حال چرخش می‌باشند. با قطع جریان در زمان تعادل، ذرات معلق تحت اثر وزنشان درون حفره ته نشین می‌شوند. پس از تخلیه مخزن پایین دست، یک حفره آبشستگی همراه با برآمدگی جلوی آن ایجاد شده است که هدف بررسی ابعاد آن و شناسایی تاثیرات پارامترهای جریان بر آن می‌باشد.

## آنالیز ابعادی

در این تحقیق با توجه به پارامترهای موثر بر پدیده آبشستگی، مکانیزم آبشستگی و تغییرات بستر ناشی از آن، به دنبال روابطی برای محاسبه ابعاد حفره آبشستگی هستیم. برای انجام این امر پارامترهای موثر بر پدیده آبشستگی، شناسایی شده و با استفاده از آنالیز ابعادی، پارامترهای بدون بعد مورد نظر استخراج می‌-

$$\frac{x}{H} = A \left( \frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{h_t}{H} \right) \quad (5)$$

$$\frac{l_s}{H} = B \left( \frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{h_t}{H} \right) \quad (6)$$

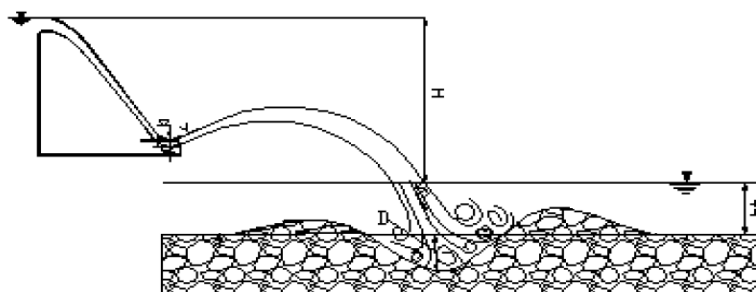
$$\frac{w}{H} = C \left( \frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{h_t}{H} \right) \quad (7)$$

در تحقیق حاضر از  $\cos\phi$ ،  $\rho_w$ ،  $\rho_s$ ،  $R$ ،  $Y$  به علت ثابت بودن در فرآیند آزمایش صرفنظر می‌شود، در نهایت تابعی به شکل رابطه (۴) برای بیشترین عمق آبستگی  $\frac{D}{H}$  می‌توان ارائه کرد:

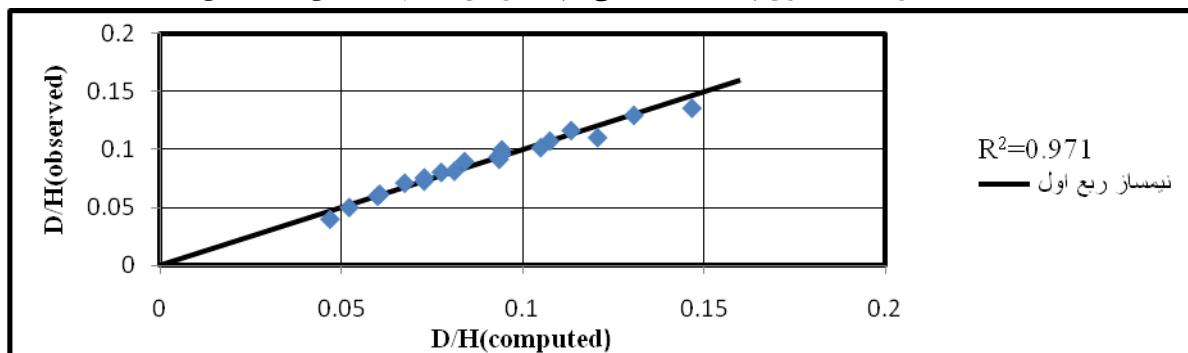
$$\frac{D}{H} = F \left( \frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{h_t}{H} \right) \quad (4)$$

(۴) میزان و نحوه وابستگی بین پارامترها در روابط فوق را به کمک داده‌های آزمایشگاهی می‌توان تعیین نمود.

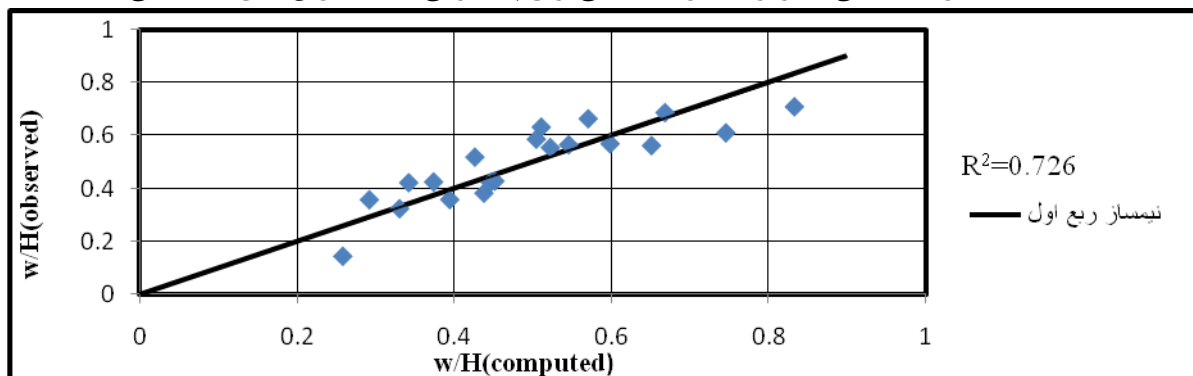
همچنین برای فاصله محل وقوع حداکثر عمق آبستگی از لبه جام  $x$ ، طول حفره آبستگی  $l_s$ ، بیشترین عرض حفره آبستگی  $w$  می‌توان تابعی به شکل روابط (۵)، (۶) و (۷) ارائه کرد:



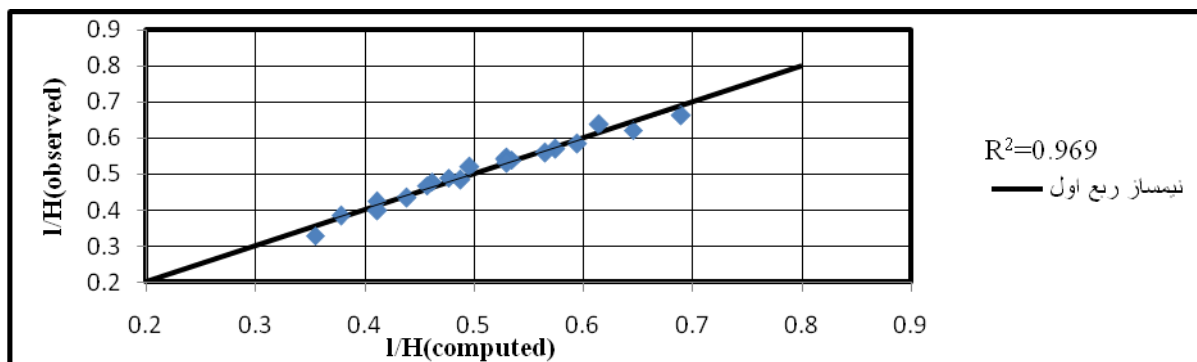
شکل ۳- نحوه شکل گیری پدیده آبستگی و پارامترهای حاکم (وصالیان و همکاران).



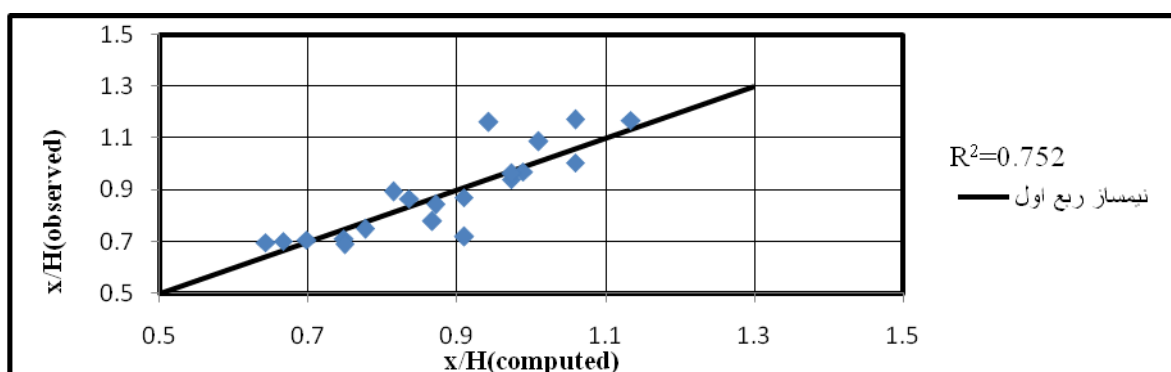
شکل ۴- مقادیر مشاهداتی در برابر مقادیر محاسباتی برای پارامتر بی بعد بیشترین عمق آبستگی.



شکل ۵- مقادیر مشاهداتی در برابر مقادیر محاسباتی برای پارامتر بی بعد بیشترین عرض آبستگی.



شکل ۶- مقادیر مشاهداتی در برابر مقادیر محاسباتی برای پارامتر بیشترین طول آبشستگی.



شکل ۷- مقادیر مشاهداتی در برابر مقادیر محاسباتی برای پارامتر بی بعد موقعیت طولی بیشترین عمق آبشستگی.

همچنین در حداقل مقادیر انتخاب شده دبی، پدیده آبشستگی اتفاق بیافتد.

### نتایج و بحث

یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی استفاده از روش‌های آماری است. در این روش ارتباط بین پارامترها با استفاده از رگرسیون چند متغییره برآورد می‌گردد.

روابط رگرسیون برای پارامترهای بیشترین عمق آبشستگی و محل وقوع آن، عرض حفره اختلاف بین نقطه شروع و پایان حفره آبشستگی که به عنوان طول حفره معرفی می‌شود ارائه می‌شوند. جدول ۲ روابط ارائه شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

$$\frac{x}{H} = 4.137 \left( \frac{q}{\sqrt{gH^3}} \right)^{0.388} \left( \frac{h_t}{H} \right)^{-0.2} \quad (8)$$

$$\frac{w}{H} = 2.547 \left( \frac{q}{\sqrt{gH^3}} \right)^{0.616} \left( \frac{h_t}{H} \right)^{-0.602} \quad (9)$$

### دامنه تغییرات پارامترهای مورد آزمایش

با توجه به اینکه پارامترهای مورد آزمایش بر اساس قوانین آنالیز ابعادی بی بعد شده‌اند لذا در تعیین و انتخاب محدوده آزمایش‌ها تنها عامل محدود کننده امکانات و شرایط موجود در آزمایشگاه می‌باشد. همچنین انتخاب دامنه تغییرات پارامترها باید به گونه‌ای باشد که روند تغییرات در آزمایش‌ها قابل بررسی و ارائه نتایج راحت تر صورت گیرد.

با توجه به اهداف تحقیق حاضر با انتخاب تعداد پنج دبی ۰/۰۳۱، ۰/۰۴۷، ۰/۰۶۲، ۰/۰۷۷، ۰/۰۹۴ لیتر بر ثانیه و چهار عمق پایاب ۰/۱۱، ۰/۱۶، ۰/۲۱، ۰/۲۶ متر، آزمایش‌های مربوطه انجام می‌شوند. از عامل  $d_5$  برای تعیین اندازه ذرات بستر استفاده شده است. محدوده تغییرات پارامترهای مورد آزمایش در این تحقیق در جدول ۱ درج شده است.

انتخاب پارامترها به گونه ای بوده است که در بحرانی‌ترین حالت آبشستگی به کف مدل نرسد و

ثابت فرض شوند مقادیر  $\frac{x}{H}$ ،  $\frac{W}{H}$ ،  $\frac{L}{H}$ ،  $\frac{D}{H}$  کاهش می‌یابند. به عبارت دیگر با فرض ثابت ماندن تمامی پارامترها، کاهش  $h_t$  که باعث افزایش  $H$  خواهد گردید افزایش  $\frac{W}{H}$ ،  $\frac{L}{H}$ ،  $\frac{D}{H}$  را به همراه خواهد داشت. مطالعه روابط مذکور همچنین نشان می‌دهد که عدد فرود  $Fr = \frac{q}{\sqrt{gH^3}}$  اثر مستقیمی روی تمامی روابط دارد. یعنی افزایش  $Q$  که اثر مستقیم روی افزایش  $Fr$  دارد باعث افزایش  $D$  مقادیر  $x$ ،  $W$ ،  $L$  خواهد شد.

### بررسی توانایی مدل‌ها

به منظور بررسی قابلیت مدل‌های ارائه شده در این پژوهش، تعداد ۹۵ داده آزمایشگاهی مربوط به مطالعات محققان دیگر که اخیراً توسط عظمت الله و همکاران (۲۰۰۵) منتشر شده است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این داده‌ها مربوط به بیشترین عمق آبشستگی  $D$ ، موقعیت طولی بیشترین عمق آبشستگی از پرتاب کننده  $x$  و بیشترین عرض حفره آبشستگی  $w$  می‌باشند. برای این منظور در هر یک از پارامترهای مورد بررسی نسبت  $r$  بصورت روابط ۱۲ الی ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$r_1 = \frac{D_m}{D} \quad (12)$$

$$r_2 = \frac{w_m}{w} \quad (13)$$

$$r_3 = \frac{x_m}{x} \quad (14)$$

در روابط ۱۲ تا ۱۴  $x_m$ ،  $w_m$ ،  $D_m$  پارامترهای پیش بینی شده از داده‌های این پژوهش و  $D$ ،  $w$ ،  $x$  پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط سایر محققان در آزمایشگاه می‌باشد. لذا هر چقدر این نسبت به یک نزدیک‌تر باشد دقت مدل بیشتر است. سپس درصد داده‌هایی را که مقدار  $r$  در آنها در بازه  $0.5 < r < 2$  قرار گرفته است به عنوان امتیاز مدل مذکور می‌گردد (هافمن ۱۹۹۸).

### نتایج پیشگویی مدل‌های ارائه شده

شکل‌های ۸ الی ۱۰ پیشگویی بیشترین عمق آبشستگی، عرض حفره و موقعیت طولی بیشترین عمق حفره آبشستگی را با استفاده از بهترین روابط ارائه شده

$$\frac{D}{H} = 0.643 \left( \frac{q}{\sqrt{gH^3}} \right)^{0.648} \left( \frac{h_t}{H} \right)^{-0.541} \quad (10)$$

$$\frac{L}{H} = 1.556 \left( \frac{q}{\sqrt{gH^3}} \right)^{0.371} \left( \frac{h_t}{H} \right)^{-0.32} \quad (11)$$

مقادیر  $R^2$  برای معادله‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب عبارتند از ۰/۷۵۲، ۰/۷۲۶، ۰/۹۷۱ و ۰/۹۶۹. همانطور که دیده می‌شود برای پارامترهای بیشترین عمق و بیشترین طول حفره آبشستگی معادلات قوی‌تری حاصل شده است و برای موقعیت طولی بیشترین عمق و عرض حفره روابط ضعیف‌تر می‌باشند. شکل‌های ۴ الی ۷ نتایج مدل‌های ارائه شده را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهند. تراکم نقاط اطراف خط نیمساز ربع اول حاکی از پراکندگی مناسب نقاط در نمودارهای مربوطه می‌باشد. پراکندگی نقاط بصورتی است که تعدادی از نقاط بالای خط نیمساز و قسمتی دیگر در زیر خط نیمساز واقع شده‌اند. با توجه به شکل‌ها و اعداد بدست آمده برای ضرایب همبستگی، به نظر می‌رسد مدل‌های غیر خطی ارائه شده برای پارامتر بیشترین عمق آبشستگی و طول حفره دارای دقت بالاتری می‌باشند بطوریکه در شکل‌های ۴ و ۶، نقاط اطلاعاتی تقریباً بر روی خط نیمساز قرار گرفته‌اند. در حالی که نقاط اطلاعاتی در مورد پارامتر موقعیت طولی بیشترین عمق و بیشترین عرض حفره، دارای فاصله بیشتری از نیمساز بوده و دقت مدل‌ها کمتر می‌باشند.

در بررسی شکل‌ها، تراکم نقاط اطراف خط ۴۵ درجه در تمامی شکل‌ها نشان از توانایی مدل‌های ارائه شده در پیش بینی ابعاد حفره آبشستگی دارند، بنابراین مدل‌های توانی ارائه شده می‌توانند موفق باشند. منتها در مورد  $x$  و  $w$  این مدل‌ها کمی ضعیف‌تر بوده و ضریب همبستگی آنان  $R^2$  کمتر است.

### بررسی کیفی روابط حاصل شده

در بررسی مدل‌های بدست آمده بر مبنای سد آزاد مشاهده می‌شود که در تمامی روابط عامل  $\frac{h_t}{H}$  اثر معکوس روی پارامترهای مورد نظر داشته است. بدین معنی که با افزایش  $\frac{h_t}{H}$  در صورتیکه تمام پارامترهای دیگر



عرض می‌توان در مجموع عملکرد مدل مربوطه را مناسب ارزیابی کرد.

عملکرد مدل ارائه شده برای محاسبه موقعیت طولی بیشترین عمق در شکل ۹ دیده می‌شود. مدل دارای امتیاز ۹۸ درصد می‌باشد. مدل توانی ارائه شده عملکرد بسیار خوبی داشته است و مقدار محاسباتی پارامتر X را در اطراف خط نیمساز به خوبی پیشگویی می‌کند. پراکندگی داده‌ها بسیار مناسب و بصورت متقارن در اطراف خط نیمساز می‌باشد. در بررسی دقیق‌تر شکل مشخص می‌شود که با افزایش پارامتر مربوطه خطای مدل بیشتر می‌شود به گونه‌ای که در اعداد پایین‌تر، فاصله نقاط اطراف خط مزبور کمتر می‌شود و با افزایش مقدار X، فاصله نقاط از خط بیشتر شده و در نتیجه خطا بیشتر می‌شود. امتیاز ۹۸ درصد در شرایطی برای این رابطه حاصل شده است که ضریب همبستگی مدل ۰/۷۵۲ می‌باشد که دقت کمی را نشان می‌دهد.

در این تحقیق نشان می‌دهد. امتیاز هر یک از مدل در کنار شکل مربوط به آن منظور شده است.

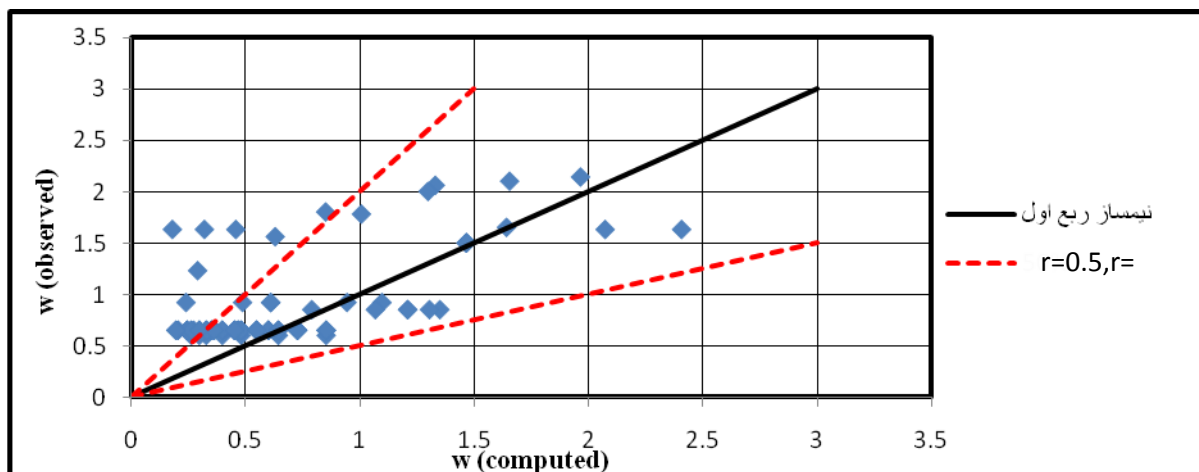
شکل ۸ مربوط به عرض حفره آبستگي می‌باشد. امتیاز مدل ۷۶ درصد است. در این شرایط مدل توانی در پیشگویی عرض قابلیت خوبی از خود نشان داده است. اما پراکندگی نقاط اطراف خط نیمساز ربع اول چندان مناسب نیست. بیشتر نقاط اطلاعاتی بالای خط نیمساز قرار گرفته‌اند و این یعنی که مدل توانی عرض محاسبه شده را کمتر از مقدار مشاهداتی نشان می‌دهد. در بررسی دقیق‌تر شکل ۸ مشخص می‌شود که پراکندگی داده‌ها در عرض‌های کمتر نامناسب‌تر می‌باشد. البته شاید یکی از دلایل این امر در این موضوع نهفته باشد که در ۶۵ تست از ۹۵ داده آزمایشگاهی مقاله عظمت الله (۲۰۰۵) عرض مقدار ثابت ۰/۶۵ را دارا بوده است با توجه به ضریب همبستگی پایین در مورد مدل توانی بیشترین

#### جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترها.

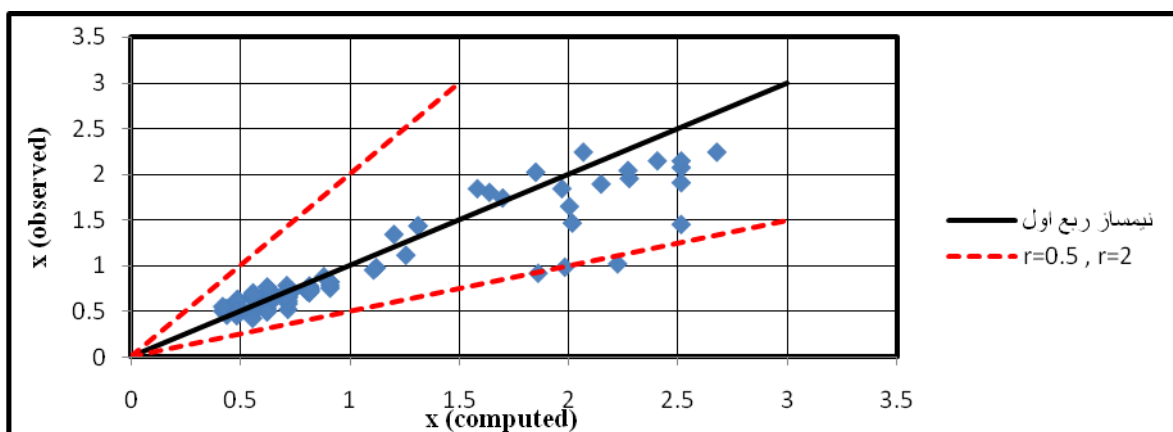
قطر ذرات	شعاع جام	عمق پایاب	ارتفاع ریزش	دبی جریان
$d_s$ (mm)	R(m)	$h_i$ (m)	H(m)	q(lit/s/m)
۸	۰/۴۵	۰/۱۱-۰/۲۶	۲/۷۳-۲/۹۶	۳/۶-۱۰۳/۹

#### جدول ۲- امتیاز هر یک از مدل‌های ارائه شده.

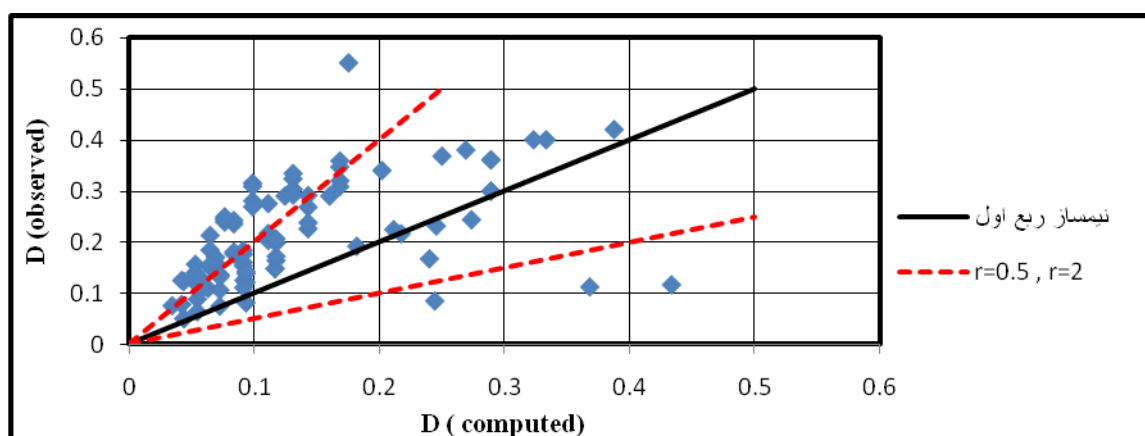
مدل‌های مختلف	امتیاز هر مدل
B مارتینز	۹۲ درصد
میسن	۷۱ درصد
A ورونس	۶۸ درصد
B ورونس	۶۸ درصد
مدل توانی	۵۵ درصد



شکل ۸- مقادیر مشاهداتی - محاسباتی بیشترین عرض بوسیله بهترین رابطه توانی با امتیاز ۷۶ درصد.



شکل ۹- مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسباتی برای بیشترین موقعیت طولی بوسیله بهترین رابطه خطی با امتیاز ۹۸ درصد.



شکل ۱۰- مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسباتی برای بیشترین عمق بوسیله بهترین رابطه توانی با امتیاز ۵۵ درصد.

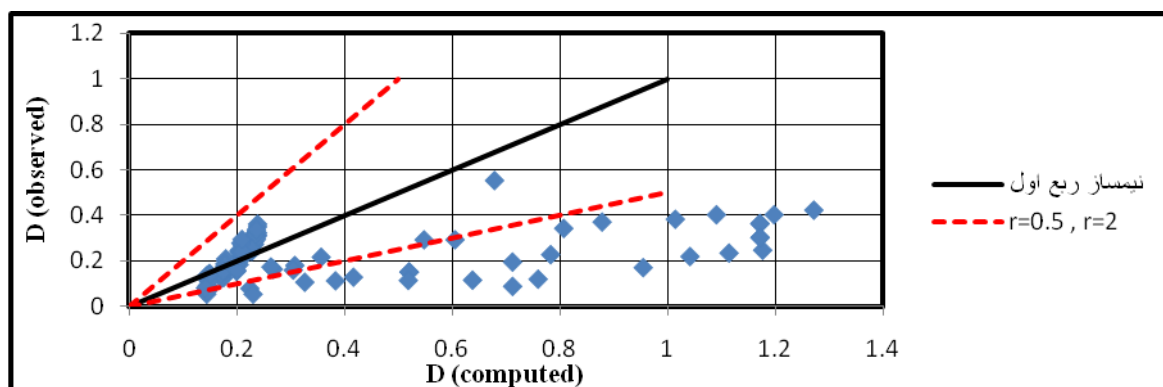
**بیشترین عمق**

در مورد بیشترین عمق امتیاز مدل توانی ۵۵ درصد می‌باشد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که تراکم نقاط اطراف خط ۴۵ درجه بصورتی است که بیشتر نقاط بالای خط ۴۵ درجه می‌باشند و لذا پراکندگی نقاط بسیار نامناسب می‌باشد. این بدین معنی است که مدل توانی مقدار محاسبه شده را کمتر از مقدار مشاهداتی نشان می‌دهد. با اینکه در مدل ارائه شده برای بیشترین عمق ضریب همبستگی مناسبی حاصل شد و انتظار می‌رفت مدل مربوطه در پیشگویی سایر داده‌های آزمایشگاهی موفق باشد اما امتیاز مدل پایین می‌باشد و عملکرد مدل چندان مناسب نیست. در این شرایط می‌توان اظهار کرد برای بررسی پدیده آبستگي در پایین دست پرتاب کننده‌های جامی شکل تنها زمانی می‌توان از نتیجه کار اطمینان حاصل کرد که نتایج با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی برای مدل مورد نظر بدست آمده باشند. داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط عظمت الله (۲۰۰۵) برای مدل‌های مختلف و تحت شرایط مختلف آزمایشگاهی بوده است و نمی‌توان رابطه‌ای کلی برای همه پرتاب کننده‌های جامی شکل ارائه کرد.

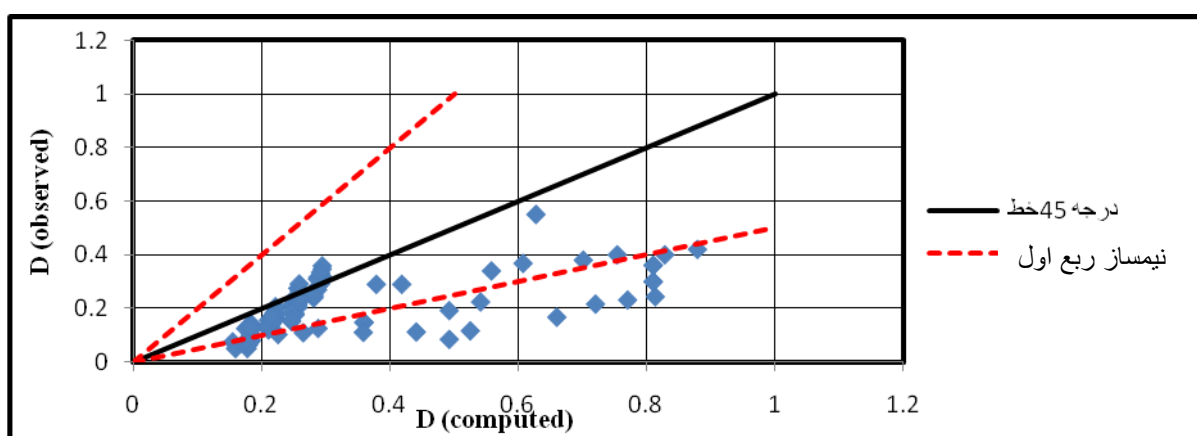
برای قیاس بین مدل ارائه شده برای بیشترین عمق در این پژوهش با مدل‌های سایر محققان، مقدار نسبت  $r$  و مقدار امتیاز هر مدل محاسبه گردید. مدل‌های ورونس  $A$  و  $B$ ، میسن و مارتیتر  $B$  که کاربرد بیشتری دارند برای این منظور انتخاب می‌شوند. لازم به ذکر است رابطه ورونس  $B$  توسط U.S.B.R (۱۹۷۳) توصیه شده است (بروسز و رادکیوی، ۱۹۹۱). میسنو مارتینز  $B$  رابطه‌های خود را براساس داده‌های حاصل از نمونه‌های واقعی بدست آورده‌اند (وصالیان). شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ پیشگویی‌های این روابط را ارائه کرده است

روابط ورونس  $A$  و ورونس  $B$  امتیاز برابر ۶۸ درصد را بدست آورده‌اند. هر دو مدل پراکندگی مناسبی را ارائه نکرده‌اند و مقدار محاسباتی را معمولاً بیشتر از مقدار مشاهداتی نشان می‌دهند. هر دو مدل در اعداد بالاتر عمق ماکزیمم دارای خطای بیشتری بوده و در مقادیر کمتر خطای کمتری دارند در مجموع توزیع کلی نقاط در هر دو مدل تقریباً یکسان می‌باشد. مدل مارتینز  $B$  دارای امتیاز ۹۲ درصد می‌باشد. این مدل بهترین نتایج را ارائه کرده است و پراکندگی بسیار مناسبی را اطراف خط نیمساز نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد رابطه مارتینز  $B$  مناسب‌ترین رابطه برای پیشگویی داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط عظمت الله می‌باشد. امتیاز مدل میسن ۷۱ درصد می‌باشد که امتاز نسبتاً مناسبی است. البته پراکندگی خوبی برای رابطه مذکور بدست نیامده است و مدل میسن داده‌های محاسباتی را معمولاً بالاتر از مقدار مشاهده شده نشان می‌دهد و پراکندگی نقاط مشابه روابط ورونس  $A$  و  $B$  می‌باشد.

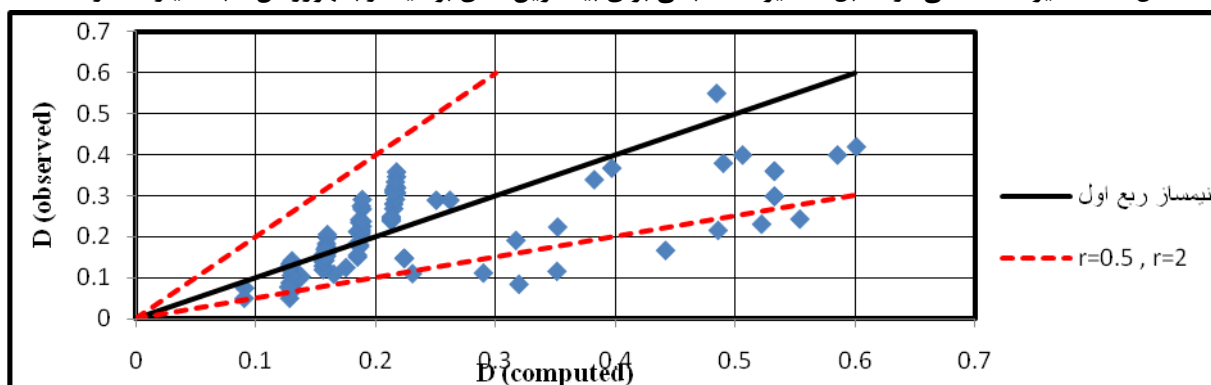
همانطور که دیده می‌شود بهترین عملکرد مربوط به رابطه مارتیتر  $B$  است که امتیاز ۹۲ درصد را دارا می‌باشد. ضعیف‌ترین عملکرد مربوط است به مدل توانی بیشترین عمق آبستگي با امتیاز ۵۵ درصد. مدل توانی معرفی شده در این تحقیق در زمینه تخمین ۹۵ داده آزمایشگاهی جمع آوری شده ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. البته نتایج این تحقیق در مورد فاصله محل وقوع بیشترین عمق دقت بالاتری دارد و امتیاز بسیار بالاتری بدست آورده است. جدول ۳ همچنین نشان می‌دهد که رابطه ورونس  $B$  که توسط U.S.B.R توصیه شده است مدل چندان توانایی نمی‌باشد و امتیاز پایین کسب کرده است.



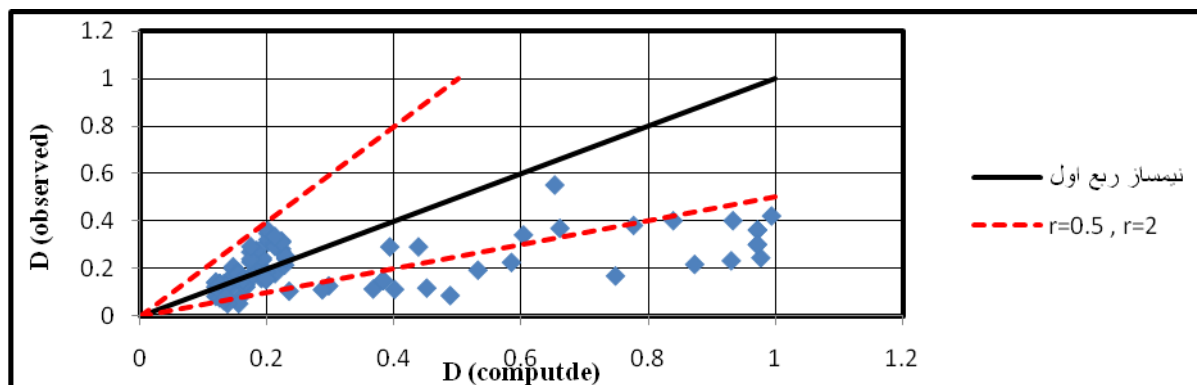
شکل ۱۱- مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسباتی برای بیشترین عمق بوسیله رابطه رونس A با امتیاز ۶۸ درصد.



شکل ۱۲- مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسباتی برای بیشترین عمق بوسیله رابطه رونس B با امتیاز ۶۸ درصد.



شکل ۱۳- مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسباتی برای بیشترین عمق بوسیله رابطه مارتینز B با امتیاز ۹۲ درصد.



شکل ۱۴- مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسباتی برای بیشترین عمق بوسیله رابطه‌ی مینیمم با امتیاز ۷۱ درصد. جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترها.

## نتیجه گیری

در این تحقیق آبشستگی پایین دست پرتاب کننده جامی شکل در مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد مخزنی آزاد بررسی شد. با استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای بدون بعد موثر استخراج شدند و تعدادی آزمایش انجام شد. با استفاده از رگرسیون‌های چند متغیره غیر خطی روابط متفاوتی برای بیشترین عمق حفره آبشستگی، بیشترین طول حفره آبشستگی، بیشترین عرض حفره و موقعیت طولی بیشترین عمق از لبه پرتاب کننده بدست آمد. با بررسی ضریب همبستگی مدل‌های توانی ظاهراً مدل‌های بدست آمده برای بیشترین عمق و بیشترین طول حفره آبشستگی دارای دقت بیشتری در مقایسه با مدل‌های بدست آمده برای بیشترین عرض و موقعیت طولی بیشترین عمق بودند. اما هنگامی که از سایر داده‌های آزمایشگاهی برای محک زدن توانایی مدل‌ها استفاده شد نتایج متفاوتی بدست آمد. برای مثال مدل معرفی شده برای موقعیت طولی بیشترین عمق دارای دقت بیشتر و برای بیشترین عمق حفره دارای دقت کمتری بودند. لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد روابط بدست آمده برای یک مدل خاص نمیتواند با اطمینان در حالت کلی بررسی شود. برای بررسی آبشستگی پایین دست پرتاب کننده جامی شکل مناسب‌ترین راه استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی می‌باشد، هر چند ممکن است هزینه‌های بیشتری را شامل شود.

## منابع

۱. سعیدی نژاد، م. ۱۳۸۴. تحلیل آبشستگی در پایین دست جت‌های ریزشی مستطیل شکل. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده فنی و مهندسی. دانشگاه تربیت مدرس.
۲. محبوبی، ا. ۱۳۷۵. اثر قطر مصالح بر میزان آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی آزاد. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده فنی و مهندسی. دانشگاه علم و صنعت.
۳. مومنی و صالحیان، ر.، ح. موسوی جهرمی و م. شفافی بجنستان. ۱۳۸۷. آبشستگی ناشی از جت‌های مستطیلی در پایین دست پرتابه‌های جامی شکل با مصالح غیر یکنواخت. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. جلد پانزدهم. شماره دوم.
4. Azmathullah, H. Md., Deo, M.C., and Deolalikar, P.B. 2005. Neural networks for estimation of scour downstream of ski-jump bucket. Journal of Hydr. Engrg. ASCE. 131(10): 898-908.
5. Bohrer, J.G., Abt, S.R., and Wittler, R. J. 1998. Prediction plunge pool velocity decay of free falling rectangular jet. Journal of Hydr. Engrg. ASCE. 124(10): 1043-1048.
6. Breusers, H.N.C., and Raudkivi, A.J. 1991. Scouring. 2nd Hydraulics Structures Design Manual.

10. Hoffmans, G.J.C.M. 1998. Jet scour in equilibrium phase. *Journal of Hydr. Engrg, ASCE*, 124(4): 430-437.
11. Mason, P.J., Arumugam, K. 1985. Free jet scour below dams and flip bucket. *J. Hyd. Engg. ASCE*. 111(2): 220-235.
12. Rajaratnam, N., and Mazurek, K. 2003. Erosion of sand by circular impinging water jets with small tailwater. *Journal of Hydr. Engrg. ASCE*. 129(3): 225-229.
13. Wittler, R.J., Annandale, G.W., Abt, S.R., and Ruff, J.F. 1998. New technology for estimating plunge pool or spillway scour. *Proceeding of 1998 annual conference of the association of state safety officials*. October 11-14 Las Vegas
- International Association for Hydraulic Research. A.A. Bakema. Rotterdam/ Brook eld. 125p
7. Chiew, Y.M., Lim, S.Y. 1996. Local scour by a deeply submerged horizontal circular Jet. *Journal of Hydraulic Engineering. ASCE*. 122 (9): 529-531.
8. Ghodsian, M., and Abbasi, A. 2001. Laboratory investigation of scour profile downstream of free falling jet. 2nd Hydr. Conference. Iran university of science and technology. Tehran. Iran. p. 87-93
9. Hager, W.H., and Canepa, S. 2003. Effect of jet air content on plunge pool scour. *Journal of Hydr. Engrg. ASCE*, 129(5): 358-365.