

# Jet-Breaker Dimensions Effect on Drop Manhole Energy Dissipation

Seyedreza Hasheminejad <sup>1\*</sup>, Mohammad-Javad Khanjani <sup>2</sup>, Gholam-Abbas Barani <sup>2</sup>

1- Ph.D., Postdoctoral Fellow, Department of Hydraulic Engineering, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China.

2- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

\* [srhn61@gmail.com](mailto:srhn61@gmail.com)

Received: 12 May 2018, Accepted: 5 April 2020  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Drop manholes are widely used in sewer and drainage systems in steep urban catchments. Those are often employed to provide energy dissipation in order to control high flow velocity and minimize structural damage. Under Regime R2 insufficient energy dissipation and excessive air entrainment could lead to hydraulic problems in the downstream system. Therefore, the plane jet-breaker device was recommended by Granata et al. (2014) to improve drop manhole performance. It would have some positive impacts on hydraulic features of the drop manhole if is properly designed.

**Methodology:** In the present study, the effects of the jet-breaker length, width, sagitta, and angle, on drop manhole energy dissipation (as response variable) have been analysed under various inlet pipe filling ratios. Dimensional analysis and modern statistical Design of Experiment (DoE) have been brought together and experiments have been designed according to the 2<sup>5</sup> full factorial design with four replications at the center point. Seventeen jet-breakers have been examined and about 350 tests have been performed on a physical model of drop manhole at the Hydraulic Structures Laboratory of Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

**Results and discussion:** Energy dissipation is closely related to the flow regimes. The variation of  $E_d/E_o$  versus the impact number (I) showed that some jet-breakers effectively leveled  $E_d/E_o$  at one (1) over different flow regimes, which is the optimum condition. Moreover, reduction of the filling ratio from 80% to 40% causes obvious deviation from manhole optimum energy dissipation operation.

Significant main and interaction effects were distinguished from the full model Analysis of Variance (ANOVA). This analysis revealed that inlet pipe filling ratio (factor A) effect was significant at 0.01 significance level ( $\alpha = 0.01$ ), whilst AD (inlet pipe filling ratio and jet-breaker sagitta ratio interaction) and AE (inlet pipe filling ratio and jet-breaker angle interaction) effects were significant at  $\alpha = 0.05$ .

The significant effects of the full model ANOVA (i.e. A, AD, and AE), together with factors D and E, were used to perform reduced model ANOVA and fit a regression model to the response variable. The former factors were considered to maintain the model hierarchy. The result shows that all considered effects are statistically significant at  $\alpha = 0.01$ , apart from factor

E effect which is significant at  $\alpha = 0.05$ . The statistical significance is determined by using p-value, which shows the probability value and is associated with the test statistic F0 value; smaller p-value (or larger F0 value) leads to a more significant effect. The ANOVA indicates that there is no evidence of second-order curvature in the response over the region of exploration at 0.01 significance level. Additionally, the lack of fit (LOF), which is defined as the deviation of the data from the fitted model, is not significant. It means that there is a strong indication that the regression function is linear and the model fitted to the data well. Moreover, a regression model was introduced regarding the result of the reduced model ANOVA.

**Conclusion:** The statistical analysis of the results revealed that the response variable was significantly improved when the inlet pipe filling ratio was 80% and jet-breaker sagitta was equal to zero, and its angle was at  $70^\circ$ . Jet-breaker length ratio and width ratio had neither significant main nor significant interaction effects on the response variable. Even though with reference to practical considerations and previous investigations, jet-breaker length equals manhole diameter and jet-breaker width of 140% larger than inlet pipe diameter, were suggested. Moreover, the use of DoE resulted in straightforward data analysis and unbiased concluding.

**Keywords:** Drop manhole, Energy dissipation, Factorial design, Jet-breaker, Optimization.

# بررسی تاثیر ویژگی‌های هندسی صفحه شکست جت بر استهلاک انرژی در چاهک ریزشی

سیدرضا هاشمی نژاد<sup>۱\*</sup>، محمدجواد خانجانی<sup>۲</sup> و غلامعباس بارانی<sup>۲</sup>

۱- محقق پسا دکتری، بخش مهندسی هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ژجیانگ، هانگژو، ژجیانگ، چین.  
۲- استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

\*srhn61@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۷، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** چاهک‌های ریزشی به منظور استهلاک انرژی در مسیر خطوط شبکه‌های جمع‌آوری روان آب سطحی و یا فاضلاب در منطقه‌هایی که اختلاف شیب زیاد است استفاده می‌شوند. یکی از روش‌های افزایش استهلاک انرژی و بهبود عملکرد سامانه در رژیم جریان R2 استفاده از صفحه شکست جت می‌باشد که بررسی تاثیر طول، عرض، انحناء، زاویه قرارگیری صفحه، و نسبت پر شدگی لوله ورودی بر استهلاک انرژی از هدف‌های این مطالعه می‌باشد. در این پژوهش آزمایش‌ها بر مبنای طرح ۳<sup>۵</sup> فاکتوریل کامل، با استفاده از روش‌های طرح نوین آزمایش‌ها و تحلیل ابعادی، طرح شدند. هدفه صفحه شکست جت مورد آزمایش قرار گرفت و حدود ۳۵۰ آزمون انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری نتایج نشان داد که نسبت پر شدگی لوله ورودی برابر ۰/۸۰، انحناء صفحه شکست جت برابر ۰ و زاویه آن نسبت به راستای قائم برابر ۷۰°، موجب بهبود شاخص استهلاک انرژی در این سازه شده‌اند. همچنین، تجزیه و تحلیل نتایج گویای آن بود که تاثیر طول و عرض صفحه بر متغیر پاسخ در حدود مورد بررسی معنی‌دار نبوده است. افزون بر این، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از روش طرح آزمایش‌ها، انجام، تحلیل، و نتیجه‌گیری از مدل‌سازی را می‌تواند به ترتیب آسان، کمی، و بی‌اغماض نماید.

**واژگان کلیدی:** استهلاک انرژی، بهینه‌سازی، صفحه شکست جت، طرح فاکتوریل، چاهک ریزشی.

## ۱- مقدمه

سازه‌ها با توجه به محل برخورد جت ورودی طبقه‌بندی می‌شوند. بر این مبنا سه نوع رژیم جریان اصلی و سه زیررژیم برای این سازه معرفی شده است. انواع رژیم جریان در چاهک ریزشی عبارت‌اند از: R1، R2a، R2b، R2c، R3a، R3b و R3b. ویژگی‌های هر یک از این رژیم‌ها توسط (Granata et al., 2011) به‌طور مفصل شرح داده شده است. همچنین برای تعیین حدود هر رژیم، فراسنجه بدون بعد عدد برخورد (Inpact number, I) توسط ایشان معرفی شده است. بر این مبنا، تغییر رژیم جریان از R1 به R2a در عدد برخورد ۰/۶، تغییر رژیم از R2c به R3a در حدود ۰/۹۵ تا ۱، و تغییر رژیم جریان از R3b به R3a در ۱ برابر ۱/۵ روی می‌دهد (Granata et al., 2011). بتازگی، با توجه به اینکه در مجرای خروجی چاهک ریزشی جریان تحت تاثیر

چاهک‌های ریزشی به‌طور گسترده در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب و روان آب سطحی در منطقه‌های مسکونی پرشیب به‌کار برده می‌شوند. وجود این سازه‌ها موجب کاهش شیب خطوط انتقال و قرار گرفتن سرعت جریان در محدوده سرعت مجاز می‌شود (Chanson, 2004; Granata, 2016). کارایی هیدرولیکی این سازه در بعضی شرایط کارکرد هیدرولیکی کاهش می‌یابد. این شرایط موجب استهلاک کم انرژی، بالا آمدن سطح آب درون چاهک ریزشی، ورود زیاد هوا به مجرای خروجی، و بروز خفگی در خروجی سازه می‌شوند. کارکرد هیدرولیکی چاهک‌های ریزشی تحت تاثیر مستقیم رژیم جریان عبوری از آن‌ها است. انواع رژیم جریان در این

در نهایت (Granata et al., 2014) با توجه به استهلاک انرژی، جنبه‌های اجرایی، خطر گرفتگی، و سادگی کاربرد، صفحه شکست جت مسطح با عرض ۱۲۰٪ قطر لوله ورودی و طولی برابر با قطر چاهک ریزشی را توصیه کردند. آنان همچنین در بررسی خود به این مطلب اشاره کردند که اگر ویژگی‌های هندسی صفحه شکست جت به‌طور مناسب تعیین شوند، کارکرد هیدرولیکی چاهک ریزشی به‌طور قابل توجه‌ای بهبود می‌یابد. تعیین ابعاد مناسب صفحه مسطح شکست جت توصیه شده توسط آنان موضوع این تحقیق می‌باشد.

در این پژوهش با استفاده از یک مدل فیزیکی تاثیر ویژگی‌های هندسی صفحه شکست جت بر استهلاک انرژی در چاهک ریزشی بررسی و ارزیابی شده است. طول، عرض، انحناء و زاویه صفحه شکست جت و همچنین میزان پرشدگی لوله ورودی به چاهک ریزشی به‌عنوان عامل‌های طراحی، و استهلاک انرژی در سازه به‌عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شده‌اند. برای محاسبه اثرهای اصلی و اندرکنشی عامل‌های طراحی بر متغیر پاسخ از ترکیب دو روش تحلیل ابعادی و طرح آماری آزمایش‌ها<sup>۱</sup> (DoE) استفاده شده است. طرح آماری آزمایش‌ها روشی برای وارد کردن ساختارمند آمار و احتمالات به آزمایش‌ها است که در اوایل ۱۹۲۰ توسط Ronald A. Fisher معرفی شد؛ با این حال استفاده از آن در هیدرولیک هنوز در مرحله‌های اولیه می‌باشد (Sangsefidi et al., 2017). در این بررسی از طرح ۲<sup>۵</sup> فاکتوریل کامل با چهار تکرار در نقطه مرکزی برای طرح آزمایش‌ها استفاده شده است و هریک از ابعاد هندسی صفحه شکست جت در سه سطح و با سه نسبت پرشدگی لوله ورودی بررسی شده‌اند. هفده صفحه شکست جت تحت نه عدد برخورد متفاوت آزمایش و در مجموع حدود ۳۵۰ آزمون انجام شد. سپس اثرهای اصلی و اندرکنشی عامل‌های طراحی بر استهلاک انرژی توسط تجزیه و تحلیل آماری نتایج مشخص شد؛ و در ادامه ابعاد مناسب صفحه شکست جت به منظور ایجاد استهلاک انرژی بهینه در چاهک ریزشی، با توجه به اثرهای معنی‌دار و رویه پاسخ به‌دست آمده از مدل رگرسیونی، تعیین شده است.

بالادست یا پایین دست است، چهار طبقه‌بندی برای جریان عبوری از چاهک ریزشی توسط (Ma et al., 2017) ارائه شده است (رژیم‌های: I, II, III, و IV). ایشان همچنین برای محاسبه استهلاک انرژی در چاهک ریزشی در این چهار رژیم رابطه‌هایی ارائه کردند. طبقه‌بندی پیشین تنها در رژیم I روی می‌دهند و برقراری رژیم I یا II در چاهک ریزشی تحت دبی طراحی توسط ایشان توصیه شده است (Ma et al., 2017).

فراسنجه‌های مرتبط با کارکرد هیدرولیکی چاهک ریزشی مانند استهلاک انرژی، جریان هوا، و ارتفاع سطح آزاد آب در حوضچه سازه، توسط محققان زیادی بررسی شده‌اند، پژوهشگرانی مانند: (Christodoulou 1991), (2004), (Chanson, 2011, 2014, 2016), (Granata et al., 2016), (Ma et al., 2018), و (Zheng et al., 2018). بررسی نتایج پژوهش‌های پیشین شاهد این مدعا است که کارکرد این سازه در رژیم جریان R2 دچار اختلال می‌شود. زیرا در این رژیم جت ورودی به سازه به‌طور مستقیم به خروجی آن برخورد می‌کند و باعث کاهش استهلاک انرژی، افزایش ورود هوا به مجرای پایین دست، و نیز افزایش آشفتگی جریان در خروجی می‌شود. برای جلوگیری از این برخورد مستقیم (Granata et al., 2014) دو روش متفاوت شکست جت را بررسی کردند؛ صفحه شکست جت مسطح و گوه در ورودی. صفحه شکست جت بررسی شده توسط ایشان، یک صفحه تخت بود که در مرکز سطح چاهک ریزشی، عمود بر مسیر جریان ورودی، و در ارتفاع مناسب نصب می‌شد. این صفحه در رژیم جریان R2 مسیر جت ورودی را قطع می‌کند و مانع از برخورد مستقیم آن به خروجی سازه می‌شود. ایشان صفحه شکست جت را با دو عرض متفاوت بررسی کردند. عرض این صفحه‌ها ۶۰٪ و ۱۲۰٪ قطر لوله ورودی به چاهک ریزشی بود. روش دیگر شکست جت که توسط آنان بررسی شد استفاده از گوه در ورودی چاهک ریزشی بود. گوه موجب دو شاخه شدن جت ورودی به سازه تحت همه رژیم‌های جریان می‌شود و به این صورت از برخورد مستقیم آن به خروجی چاهک ریزشی جلوگیری می‌کند. دو نوع گوه با زاویه راس ۲۰° و ۴۰° توسط آنان بررسی شد.

<sup>1</sup> Design of Experiments

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۱-۲- استهلاک انرژی و تحلیل ابعادی

تحلیل ابعادی روشی شناخته شده در علوم مختلف و بویژه مکانیک سیالات و هیدرولیک می‌باشد. روش‌های چندی برای انجام این تحلیل وجود دارد که در این میان روش رایلی، پی بکینگهام، سنتزس<sup>۱</sup>، و ماتریسی پرکاربردتر می‌باشند (Islam et al., 2009). در این پژوهش از روش ماتریسی برای انجام تحلیل ابعادی استفاده شده است. این روش دارای برتری‌های کاربردی زیادی است، و مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: (۱) اعداد بدون بعد دلخواه را می‌توان به مجموعه بدون بعد نهایی وارد کرد؛ (۲) همه‌ی مجموعه‌های بدون بعد مستقل قابل محاسبه می‌باشند (Sziertes, 2006). با این وجود، محاسبات ریاضی این روش کمی پیچیده است و در مواردی که شمار متغیرها زیاد می‌باشد لازم است از کدنویسی رایانه‌ای استفاده شود. پیش از انجام تحلیل ابعادی، ضروری است که پدیده مورد مطالعه به خوبی شناخته شود و عامل‌های موثر بر آن مشخص گردند. بنابراین در ادامه به بررسی دقیق‌تر استهلاک انرژی در چاهک ریزشی پرداخته شده است و پس از آن تحلیل ابعادی انجام شده است.

در شرایط کارکرد بهینه، میزان استهلاک انرژی جریان در چاهک ریزشی برابر ارتفاع ریزش آن است. با این وجود استهلاک انرژی در بعضی از شرایط کارکرد هیدرولیکی بیش از ارتفاع ریزش و در بعضی دیگر کمتر از آن می‌باشد. اگر انرژی اضافی ناشی از ارتفاع ریزش،  $z$ ، در چاهک ریزشی مستهلک نشود، انرژی مخصوص در مجرای خروجی بیش از انرژی مخصوص در مجاری ورودی می‌شود (Chanson, 2004; 2012; Carvalho); این وضعیت موجب فرسایش مجرای پایین‌دست، ورود بیش از حد هوا به خروجی و ایجاد تنش در سازه می‌شود (Granata, Christodoulou, 1991; 2016). از این رو لازم است انرژی مخصوص در ورودی و خروجی سازه تاحدودی برابر باشند (Camino et al., 2009; Granata et al., 2011). اما این شرایط به سادگی قابل دستیابی نمی‌باشد، زیرا دبی عبوری از سامانه‌های

جمع‌آوری فاضلاب و روان‌آب سطحی بسیار متغیر است (Zheng et al., 2017).

انرژی جریان در چاهک ریزشی در نتیجه افزایش آشفتگی جریان، چرخش جریان در حوضچه، و پاشیدگی جت ورودی مستهلک می‌شود. رخداد هریک از این سازوکارها به رژیم جریان عبوری از چاهک ریزشی و نیز شرایط جریان در پایین‌دست آن بستگی دارد. اگر چاهک ریزشی در شرایط تخلیه آزاد خروجی (رژیم I بر مبنای طبقه‌بندی (2017) Ma et al.) باشد، اتلاف انرژی در رژیم R1 به‌طور عمده در اثر برخورد جت با حوضچه چاهک ریزشی، چرخش جریان در آن، و افزایش آشفتگی روی می‌دهد؛ در رژیم R3 استهلاک انرژی در نتیجه برخورد جت ورودی با دیواره چاهک ریزشی و حرکت آب روی دیواره ایجاد می‌شود؛ با این حال در رژیم R2، که در آن جت ورودی به دهانه خروجی چاهک برخورد می‌کند، استهلاک انرژی ناچیز است. در این رژیم بخش زیادی از دبی ورودی به‌طور مستقیم وارد مجرای خروجی می‌شود و موجب ایجاد شرایط بحرانی در خروجی سازه و همچنین استهلاک کم انرژی می‌شود (Granata et al., 2011). برای رفع این مشکل، صفحه شکست جت مسطح توسط (Granata et al., 2014) معرفی و بررسی شد. برابر تحقیق آنان، این صفحه موجب بهبود کارکرد سازه می‌شد. با این حال (Granata et al., 2014) تنها دو نوع صفحه شکست جت را که عرض‌های متفاوتی داشتند بررسی کردند، یعنی عرض‌های  $0/16$  و  $1/2$  برابر قطر مجرای ورودی به چاهک ریزشی. آنان در نهایت صفحه شکست جت مسطح با عرض بیشتر را پیشنهاد کردند. تاثیر دیگر ویژگی‌های هندسی صفحه شکست جت، مانند طول، زاویه، و انحنا آن، در پژوهش آنان بررسی و ارزیابی نشده است. لاکن برای اینکه بتوان از صفحه شکست جت به‌طور بهینه برای بهبود کارکرد هیدرولیکی چاهک ریزشی سود جست، لازم است همه‌ی ابعاد هندسی آن به‌طور دقیق بررسی و تعیین شوند.

استهلاک انرژی در چاهک ریزشی که مجهز به صفحه شکست جت است و در شرایط تخلیه آزاد خروجی و ورود کافی هوا کار می‌کند، تحت تاثیر متغیرهای زیادی است.

<sup>1</sup> Synthesis Method

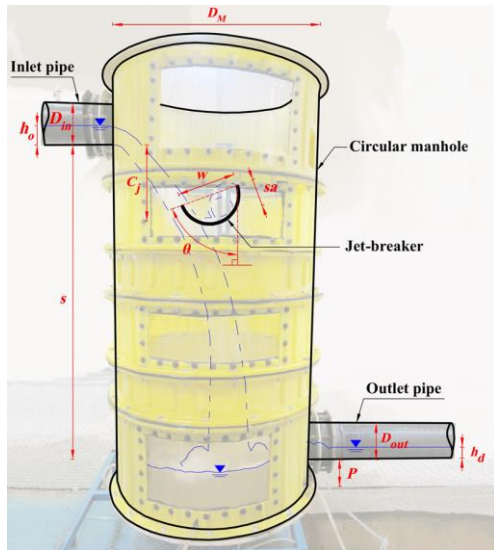


Fig 1 Geometric properties of drop manhole and jet-breaker

شکل ۱ مشخصات هندسی چاهک ریزشی و صفحه شکست جت

برای متغیرهای رابطه (۱) که داری بعد هستند و زاویه نمی‌باشند انجام شد. ۷۹ مجموعه بدون بعد مستقل به دست آمد و مجموعه‌ای که دارای اعداد بدون بعد کاربردی‌تری بود برای طرح آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج انتخاب شد. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل ابعادی می‌توان رابطه (۱) را به صورت رابطه بدون بعد (۲) ارائه کرد.

$$\frac{E_d}{E_o} = \Psi_2 \left( \frac{V_o}{D_M}, \frac{h_o}{D_{in}}, \frac{s}{D_M}, \frac{\rho V_o^2 D_M}{\sigma}, \frac{V_o D_{in}^2}{v h_o}, \frac{P}{D_{out}}, \frac{D_{out}}{D_{in}}, \frac{s^2}{D_M D_{out}}, \frac{l}{D_{in}}, \frac{w}{D_{in}}, \frac{sa}{w}, \frac{C_j}{s}, \theta, \delta_{in}, \phi, \delta_{out} \right) \quad (2)$$

در این رابطه متغیر بدون بعد اول در سمت راست شکلی از عدد برخورد است و در ادامه به جای آن از عدد برخورد،  $a = V_o / D_M (2s/g)^{1/2}$  استفاده شده است؛ متغیر دوم نسبت پرشدگی لوله ورودی و متغیر سوم عدد بدون بعد ارتفاع ریزش می‌باشند. اغلب این اعداد بدون بعد در بررسی‌های انجام شده پیشین روی چاهک‌های ریزشی پرکاربرد بوده‌اند (Ma et al., 1991; Christodoulou, 2011; Granata et al., 2017). از اعداد بدون بعد به دست آمده از تحلیل ابعادی برای گزینش عامل‌های طراحی و متغیر پاسخ در بخش ۲-۲-۱ و ارائه نتایج در بخش ۳ استفاده شده است. همچنین از این اعداد بدون بعد می‌توان برای برقراری تشابه و تعمیم نتایج این بررسی به دیگر چاهک‌های ریزشی مشابه استفاده کرد.

این عامل‌های موثر را می‌توان در سه مجموعه اصلی قرار داد: (۱) ویژگی‌های جریان ورودی، (۲) ابعاد چاهک ریزشی، و (۳) ویژگی‌های هندسی صفحه شکست جت. در شرایط کارکرد بهینه، بار انرژی باقی مانده (نسبت انرژی مخصوص خروجی به ورودی) به طور تقریبی برابر با ۱ است (Granata et al., 2014). این نسبت را می‌توان به صورت تابعی از متغیرهای موجود در سه مجموعه بیان شده برابر رابطه (۱) بیان کرد.

$$\frac{E_d}{E_o} = \Psi_1 (V_o, h_o, s, D_M, D_{in}, \delta_{in}, P, \phi, D_{out}, \delta_{out}, C_j, l, w, sa, \theta, g, \rho, \nu, \sigma) \quad (1)$$

در این رابطه،  $E_d = h_d + \alpha V_d^2 / 2g$  انرژی مخصوص در پایین دست چاهک ریزشی،  $E_o = h_o + \alpha V_o^2 / 2g$  انرژی مخصوص در بالادست چاهک ریزشی،  $g$  شتاب جاذبه،  $h_d$  عمق جریان در پایین دست،  $V_d$  سرعت میانگین جریان در پایین دست،  $h_o$  عمق جریان در بالادست،  $V_o$  سرعت میانگین جریان در بالادست،  $\alpha$  ضریب انرژی جنبشی برای جریان غیریکنواخت (برابر ۱ فرض شده است)،  $s$  ارتفاع ریزش،  $D_M$  قطر داخلی چاهک،  $D_{in}$  قطر داخلی لوله ورودی،  $\delta_{in}$  شیب لوله ورودی،  $P$  عمق حوضچه چاهک،  $\phi$  زاویه بین لوله ورودی و خروجی،  $D_{out}$  قطر داخلی لوله خروجی،  $\delta_{out}$  شیب لوله خروجی،  $C_j$  فاصله بین مرکز صفحه شکست جت تا کف لوله ورودی،  $l$ ،  $w$ ،  $sa$  و  $\theta$  به ترتیب طول، عرض، میزان انحناء و زاویه صفحه شکست جت با راستای قائم،  $\rho$  چگالی یا دانسیته،  $\nu$  لزجت سینماتیکی، و  $\sigma$  کشش سطحی سیال می‌باشند (شکل ۱). همان‌طور که این رابطه نشان می‌دهد شمار زیادی متغیر بر بار انرژی باقی مانده ( $E_d/E_o$ ) موثر می‌باشند. با استفاده از تحلیل ابعادی می‌توان این متغیرهای مستقل و جدا از هم را در مجموعه‌های بدون بعد مستقل قرار داد و افزون بر کاهش شمار متغیرها، امکان تعمیم نتایج این پژوهش به دیگر چاهک‌های ریزشی مشابه را فراهم کرد (Szirtes, 2006).

برای انجام تحلیل ابعادی با روش ماتریسی کدی در محیط نرم‌افزار MATLAB 2016b نوشته شد و تحلیل ابعادی

## ۲-۲- طرح آماری آزمایش‌ها

پژوهشگران بسیاری در روند تحقیقات خویش از مدل‌سازی فیزیکی استفاده می‌کنند. به‌طور کلی آزمایش‌های فیزیکی برای دستیابی به این هدف‌ها انجام می‌شوند: ارزیابی طرح اولیه، انتخاب مصالح مناسب، تعیین فراسنجه‌های طراحی به‌طوری که سامانه مورد نظر در شرایط مختلف کارایی خود را حفظ کند، و مشخص کردن عامل‌های طراحی اثرگذار بر کارکرد سامانه (Montgomery, 2013). برای بررسی تاثیر چندین متغیر مستقل بر پاسخ (یا پاسخ‌های) یک سامانه نیاز به انجام تعدادی آزمایش به همراه تجزیه و تحلیل آماری است. با این حال، انجام آزمایش‌ها به‌طوری که شمار آن‌ها کمترین شده و نتایج نیز معنی‌دار باشند امری چالش برانگیز است (Islam et al., 2009).

در علوم کاربردی آزمایش‌ها اغلب با یکی از دو روش بهترین حدس و یا تک-عاملی<sup>۱</sup> انجام می‌شوند. در این روش‌ها افزون بر اینکه به انجام شمار زیادی آزمایش نیاز است، اندرکنش عامل‌های طراحی نیز قابل محاسبه نمی‌باشد. از سوی دیگر طرح آماری آزمایش‌ها (DoE) یک روش جایگزین توانمند است. این روش در اوایل ۱۹۲۰ معرفی شد، با این وجود هنوز کاربرد آن در هیدرولیک در مرحله‌های اولیه و محدود می‌باشد (Sangsefidi et al., 2017).

در مقایسه با روش‌های قدیمی، DoE با شمار آزمایش کمتری قادر به معرفی مدل ریاضی قوی‌تر و دقیق‌تری است. این موضوع سبب می‌شود که DoE موجب صرفه جویی در وقت و هزینه نیز شود (Sangsefidi Hawkins et al., 2006; et al., 2017). طرح آماری آزمایش‌ها یک روش جامع بوده که دارای زیرشاخه‌هایی مانند: طرح فاکتوریل عمومی، طرح فاکتوریل دو-سطحی، طرح فاکتوریل جزئی، رویه پاسخ، و غیره می‌باشد. به‌طور کلی از این روش می‌توان برای دستیابی به این هدف‌های پژوهشی استفاده کرد: بررسی رفتار یک سامانه، اندازه‌گیری اثرهای اصلی و اندرکنشی عامل‌های مورد بررسی، مشخص کردن عامل‌های اثرگذار، ایجاد یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی پاسخ، و بهینه‌سازی پاسخ (Islam et al., 2009). این روش را می‌توان تاحدودی در همه‌ی زمینه‌های علمی و برای انجام انواع آزمایش‌ها

## جدول ۱ عامل‌های طراحی و سطح‌های مورد بررسی آن‌ها

به‌صورت مقادیر واقعی و کد شده

Table 1 Design factors and their levels at real and coded values

| Design Factors                 | Expression   | Factor Levels |            |           |
|--------------------------------|--------------|---------------|------------|-----------|
|                                |              | Low (-1)      | Center (0) | High (+1) |
| A: (Inlet pipe filling ratio)  | $h_o/D_{in}$ | 0.4           | 0.6        | 0.8       |
| B: (Jet-breaker length ratio)  | $l/D_{in}$   | 1             | 1.5        | 2         |
| C: (Jet-breaker width ratio)   | $w/D_{in}$   | 0.6           | 1          | 1.4       |
| D: (Jet-breaker sagitta ratio) | $sa/w$       | 0             | 0.25       | 0.5       |
| E: (Jet-breaker angle)         | $\theta$     | 0°            | 35°        | 70°       |

به‌کار برد. در دو بخش پیش‌رو طرح آزمایش‌های به‌کار رفته در این پژوهش معرفی شده است.

## ۲-۲-۱- انتخاب عامل‌های طراحی و متغیر پاسخ

پیش از طرح آزمایش‌ها لازم است که عامل‌های مورد بررسی (عامل‌های طراحی) و متغیر پاسخ به‌دقت تعیین شوند. همچنین باید سطح‌های مورد بررسی هر عامل طراحی مشخص شوند. در این تحقیق اعداد بدون بعد مربوط به ویژگی‌های هندسی صفحه شکست جت و نیز نسبت پرشدگی لوله ورودی (رابطه ۲) به‌عنوان عامل‌های طراحی بررسی شده‌اند. این عامل‌ها و سطح‌های مورد بررسی آن‌ها، بر اساس طرح فاکتوریل دو-سطحی همراه با نقطه مرکزی، در جدول ۱ ارائه شده‌اند. بر مبنای الزام‌های طرح فاکتوریل دوسطحی و بدون تکرار به‌کار رفته در این پژوهش، سطح‌های بالا و پایین عامل‌های طراحی روی بازه‌ای گسترده انتخاب شده‌اند. از آنجا که در این طرح، آزمایش‌ها در نقطه‌های فاکتوریل تنها یک بار انجام می‌شوند و از سوی دیگر در برداشت‌های آزمایشگاهی امکان بروز خطا وجود دارد، لذا ممکن است نتیجه‌گیری نهایی بر مبنای خطا و نوسان‌های موجود در برداشت‌ها انجام شود. برای رفع این مشکل لازم است که سطح‌های عامل‌های طراحی روی بازه-ای گسترده و با توجه به شرایط کاربردی انتخاب شوند (Montgomery, 2013). سطح عامل‌ها در جدول ۱ با توجه به این نکته انتخاب شده‌اند. در این پژوهش ترکیب‌های مشخصی از سطح‌های عامل‌های طراحی (آزمایش‌ها) تحت

<sup>1</sup> OFAT

نه دبی جریان متفاوت (۹ آزمون) بررسی شده‌اند. انتخاب متغیر پاسخ مناسب برای ارزیابی تاثیر عامل‌های طراحی بر استهلاک انرژی در چاهک ریزشی دارای اهمیت فراوان است. انحراف معیار هد انرژی باقی‌مانده‌ی آزمون‌های انجام شده در هر آزمایش از  $1 (SD1(E_d/E_o))$ ، برابر رابطه (۳)، به‌عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شدند.

$$SD1\left(\frac{E_d}{E_o}\right) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{E_d}{E_o}\right)_i - 1\right]^2}{n-1}} \quad (3)$$

در این رابطه  $i$  شماره آزمون در آزمایش مورد نظر است و  $n$  شمار کل آزمون‌های انجام شده در هر آزمایش می‌باشد (در این پژوهش  $n$  برابر ۹ است). این متغیر پاسخ معیار کلیدی کارکرد بهینه چاهک ریزشی از نظر استهلاک انرژی می‌باشد؛ و هرچه مقدار آن به صفر نزدیکتر باشد نشان دهنده کارکرد هیدرولیکی بهتر سازه در دبی‌های متفاوت است. صورت‌های مشابه این متغیر توسط محققان دیگر نیز بررسی و ارزیابی شده است، پژوهشگرانی مانند: (2004) Chanson, Camino et al. (2011), (2011, 2014, 2016) Granata et al. و (2018) Zheng et al.

### ۲-۲-۲- طرح ۲<sup>۵</sup> فاکتوریل به همراه نقطه مرکزی

روش‌هایی که بر مبنای طرح فاکتوریل می‌باشند به‌عنوان کاراترین و معمول‌ترین روش انجام آزمایش‌های چند عاملی شناخته می‌شوند. این روش‌ها در مشخص کردن عامل‌های تاثیرگذار بسیار خوب عمل می‌نمایند و امکان بررسی شمار زیادی عامل را در شمار کمی آزمایش مهیا می‌کنند. در طرح فاکتوریل دو-سطحی با  $k$  عامل، برای بررسی همه‌ی ترکیب سطوح عامل‌ها (طرح فاکتوریل کامل) نیاز به انجام دست‌کم  $2^k$  آزمایش است. در طرح فاکتوریل کامل امکان محاسبه تاثیر همه عامل‌های طراحی (اثرهای اصلی) و نیز تاثیر تمام اندرکنش‌های درجه اول آن‌ها بر متغیر پاسخ، بدون تشکیل گروه‌های هم‌اثر<sup>۱</sup>، وجود دارد (Montgomery, 2013; Hawkins et al., 2006).

از آنجا که این پژوهش هنوز در مرحله‌های ابتدایی و تعیین عامل‌های اثرگذار است و همچنین شمار عامل‌های طراحی

آن به نسبت زیاد است، از طرح فاکتوریل دو-سطحی بدون تکرار استفاده شده است. افزون بر این، از آنجا که شمار عامل‌های موجود در اندرکنش‌های معنی‌دار مشخص نیست، طرح فاکتوریل کامل، برای جلوگیری از تشکیل گروه‌های هم اثر، به کار برده شده است. همچنین از آنجا که آزمایش‌ها تنها در یک تکرار انجام می‌شوند، برای برآورد مستقل خطا و آگاهی از میزان اثرگذاری ترم‌های درجه دوم بر پاسخ، چهار تکرار در سطح مرکزی عامل‌های طراحی (نقطه مرکزی) به طرح آزمایش‌ها اضافه شده است.

بنابراین آزمایش‌ها بر مبنای طرح ۲<sup>۵</sup> فاکتوریل کامل به همراه چهار تکرار در نقطه مرکزی طرح شدند؛ طرح آزمایش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. این طرح شامل ۳۲ آزمایش در نقطه‌های فاکتوریل و چهار آزمایش در نقطه مرکزی می‌باشد. در این جدول نام آزمایش‌های فاکتوریل نشان دهنده عامل‌های است که در آن آزمایش در سطح بالا (+۱) قرار دارند. برای مشاهده بهتر اثرگذاری صفحه شکست جت، سه آزمایش شاهد (بدون صفحه شکست جت) در سه سطح پرشدگی لوله ورودی (عامل A) نیز انجام شد. همچنین لازم به یادآوری است که همه آزمایش‌ها شامل ۹ آزمون مشابه بودند که هر یک مربوط به یک دبی (و یا یک عدد برخورد) می‌باشد. همچنین دبی‌ها طوری انتخاب شده‌اند که هر آزمایش شامل همه رژیم‌های جریان در چاهک ریزشی (یعنی R1، R2، و R3) باشد.

### ۲-۳- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی، بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شدند. مدل مورد بررسی یک چاهک ریزشی از جنس پلی‌اتیلن بود که به سامانه توزیع و اندازه‌گیری آزمایشگاه متصل شده بود. قطر داخلی چاهک ریزشی ( $D_M$ ) برابر ۱ متر و ارتفاع ریزش ( $s$ ) آن ۱/۶ متر بود. همچنین، قطر داخلی لوله ورودی و خروجی ( $D_{in}$  و  $D_{out}$ ) از آن ۰/۱۸ متر و شیب آن‌ها ( $\delta$ ) صفر درجه بود. لوله خروجی در پایین دست به صورت آزاد تخلیه می‌شد و با لوله ورودی زاویه ۱۸۰ درجه می‌ساخت ( $\varphi = 180^\circ$ ). برای نگه‌داشتن صفحه شکست جت و نیز

<sup>1</sup> Alias



بازشدگی ۰/۴۰، ۰/۶۰، و ۰/۸۰ بود که هریک با اتصال فلنجی در مسیر لوله ورودی نصب می‌شدند؛ و عمق جریان ورودی به چاهک ریزشی ( $h_n$ ) در پایین‌دست آن اندازه گرفته می‌شد. همچنین عمق جریان در پایین‌دست چاهک ریزشی ( $h_d$ ) بر مبنای پیشنهاد (Granata et al. (2011, 2014)) در فاصله ۳/۴ متری از خروجی چاهک ریزشی، جایی که جریان متغیر تدریجی بود و هوای وارد شده به جریان تخلیه شده بود، توسط پیژومتر اندازه‌گیری می‌شد.

جدول ۲ آزمایش‌های طرح شده بر مبنای طرح ۲<sup>۵</sup> فاکتوریل کامل به همراه ۴ تکرار در نقطه مرکزی

Table 2 2<sup>5</sup> full-factorial design with 4 iterations at center point

| Experiment Number | Experiment Label | Coded design Factors |    |    |    |    |
|-------------------|------------------|----------------------|----|----|----|----|
|                   |                  | A                    | B  | C  | D  | E  |
| 1                 | (1)              | -1                   | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 2                 | a                | 1                    | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 3                 | b                | -1                   | 1  | -1 | -1 | -1 |
| 4                 | ab               | 1                    | 1  | -1 | -1 | -1 |
| 5                 | c                | -1                   | -1 | 1  | -1 | -1 |
| 6                 | ac               | 1                    | -1 | 1  | -1 | -1 |
| 7                 | bc               | -1                   | 1  | 1  | -1 | -1 |
| 8                 | abc              | 1                    | 1  | 1  | -1 | -1 |
| 9                 | d                | -1                   | -1 | -1 | 1  | -1 |
| 10                | ad               | 1                    | -1 | -1 | 1  | -1 |
| 11                | bd               | -1                   | 1  | -1 | 1  | -1 |
| 12                | abd              | 1                    | 1  | -1 | 1  | -1 |
| 13                | cd               | -1                   | -1 | 1  | 1  | -1 |
| 14                | acd              | 1                    | -1 | 1  | 1  | -1 |
| 15                | bcd              | -1                   | 1  | 1  | 1  | -1 |
| 16                | abcd             | 1                    | 1  | 1  | 1  | -1 |
| 17                | e                | -1                   | -1 | -1 | -1 | 1  |
| 18                | ae               | 1                    | -1 | -1 | -1 | 1  |
| 19                | be               | -1                   | 1  | -1 | -1 | 1  |
| 20                | abe              | 1                    | 1  | -1 | -1 | 1  |
| 21                | ce               | -1                   | -1 | 1  | -1 | 1  |
| 22                | ace              | 1                    | -1 | 1  | -1 | 1  |
| 23                | bce              | -1                   | 1  | 1  | -1 | 1  |
| 24                | abce             | 1                    | 1  | 1  | -1 | 1  |
| 25                | de               | -1                   | -1 | -1 | 1  | 1  |
| 26                | ade              | 1                    | -1 | -1 | 1  | 1  |
| 27                | bde              | -1                   | 1  | -1 | 1  | 1  |
| 28                | abde             | 1                    | 1  | -1 | 1  | 1  |
| 29                | cde              | -1                   | -1 | 1  | 1  | 1  |
| 30                | acde             | 1                    | -1 | 1  | 1  | 1  |
| 31                | bcde             | -1                   | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 32                | abcde            | 1                    | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 33                | Rep.* 1          | 0                    | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 34                | Rep. 2           | 0                    | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 35                | Rep. 3           | 0                    | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 36                | Rep. 4           | 0                    | 0  | 0  | 0  | 0  |

\*Repetition

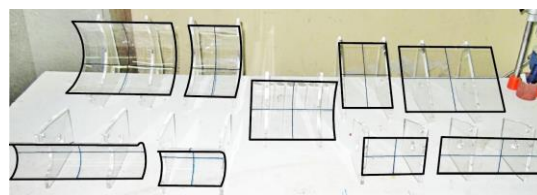


Fig 2 Tested jet-breakers

شکل ۲ صفحه‌های شکست جت مورد آزمایش



Fig 3 Inlet jet impact on jet-breaker at "bce" test under 10.35 l/s ( $l = 0.8$ )

شکل ۳ برخورد جت ورودی با صفحه شکست جت در آزمایش "bce" تحت دبی ۱۰/۳۵ l/s ( $l = 0.8$ )

تنظیم دقیق محل آن و زاویه‌اش با راستای قائم از یک چهارچوب فلزی که در چاهک ریزشی نصب شده بود استفاده شد. با توجه به پیشنهاد (Granata et al. (2014)) همه‌ی صفحه‌های شکست جت طوری در چاهک ریزشی نصب می‌شدند که فاصله مرکز آن‌ها با کف لوله ورودی ( $C_j$ ) برابر ۰/۴ s/ (یعنی ۰/۴ متر) باشد. برابر با طرح آزمایش‌ها، ۹ صفحه شکست جت نشان داده شده در شکل ۲ از جنس پلکسی گلاس ساخته و ۸ عدد از آن‌ها در دو زاویه مورد آزمایش قرار گرفتند. در هر آزمایش صفحه مربوطه در مرکز سطح چاهک ریزشی و عمود بر مسیر لوله ورودی نصب و پس از تنظیم زاویه آن آزمایش می‌شد.

برای تنظیم نسبت پرشدگی لوله ورودی از جت باکس<sup>۱</sup> استفاده شد. این وسیله در بالادست چاهک ریزشی قرار می‌گرفت و عمق جریان ورودی به چاهک را مستقل از دبی جریان تنظیم می‌کرد (Gargano et al., 2002). جت باکس به کار رفته شامل صفحه‌های پلکسی گلاس با نسبت‌های

<sup>1</sup>Jet-Box

نیز در این تحقیق در نظر گرفته شده‌اند. در بخش پیش‌رو اثرهای اصلی و اندرکنشی عامل‌های طراحی به کمک تجزیه و تحلیل آماری مشخص شده‌اند.

### ۳-۱- تحلیل واریانس

از آماره  $(SD1 (E_d/E_o))$  که توسط رابطه (۳) تعریف شد برای ارزیابی تاثیر عامل‌های طراحی بر استهلاک انرژی استفاده شده است. اثرهای معنی‌دار توسط تحلیل واریانس مدل کامل (یعنی مدلی که شامل همه‌ی اثرهای اصلی و اندرکنشی درجه اول است) مشخص شدند. نتایج این تحلیل نشان داد که تاثیر میزان پرشدگی لوله ورودی (عامل A) در سطح ۱٪ ( $\alpha = 0.01$ ) و اثر اندرکنش‌های AD و AE در سطح ۵٪ معنی‌دار بوده‌اند. شکل ۵ نمودار احتمال نیمه‌نرمال اثرها را نشان می‌دهد. استفاده از این نمودار برای تشخیص اثرها معنی‌دار در طرح  $2^k$  فاکتوریل روشی استاندارد است و نقطه‌هایی که به‌طور روشن از خط مستقیم عبور کرده از بیشتر نقطه‌ها فاصله داشته باشند مربوط به اثرهای معنی‌دار می‌باشند (Montgomery, 2013). شکل ۵ نشان می‌دهد که اثرهای معنی‌دار با نتایج به‌دست آمده از تحلیل واریانس مدل کامل یکسان می‌باشند.

نتایج تحلیل واریانس و نمودار نیمه-نرمال اثرها نشان می‌دهد که نسبت طول صفحه شکست جت، نسبت عرض آن و دیگر اندرکنش‌ها تاثیر معنی‌داری بر متغیر پاسخ نداشته‌اند. با این وجود نسبت انحناء صفحه شکست و زاویه آن توسط اندرکنش‌های AD و AE بر نتایج اثرگذار بوده‌اند. هنگامی که تاثیرهای اندرکنشی معنی‌دار شوند لازم است که تاثیر اثرهای اصلی با توجه به اثرهای اندرکنشی تحلیل شوند (Montgomery, 2013). در بخش پیش‌رو اثرهای معنی‌دار به‌طور دقیق بررسی شده‌اند.

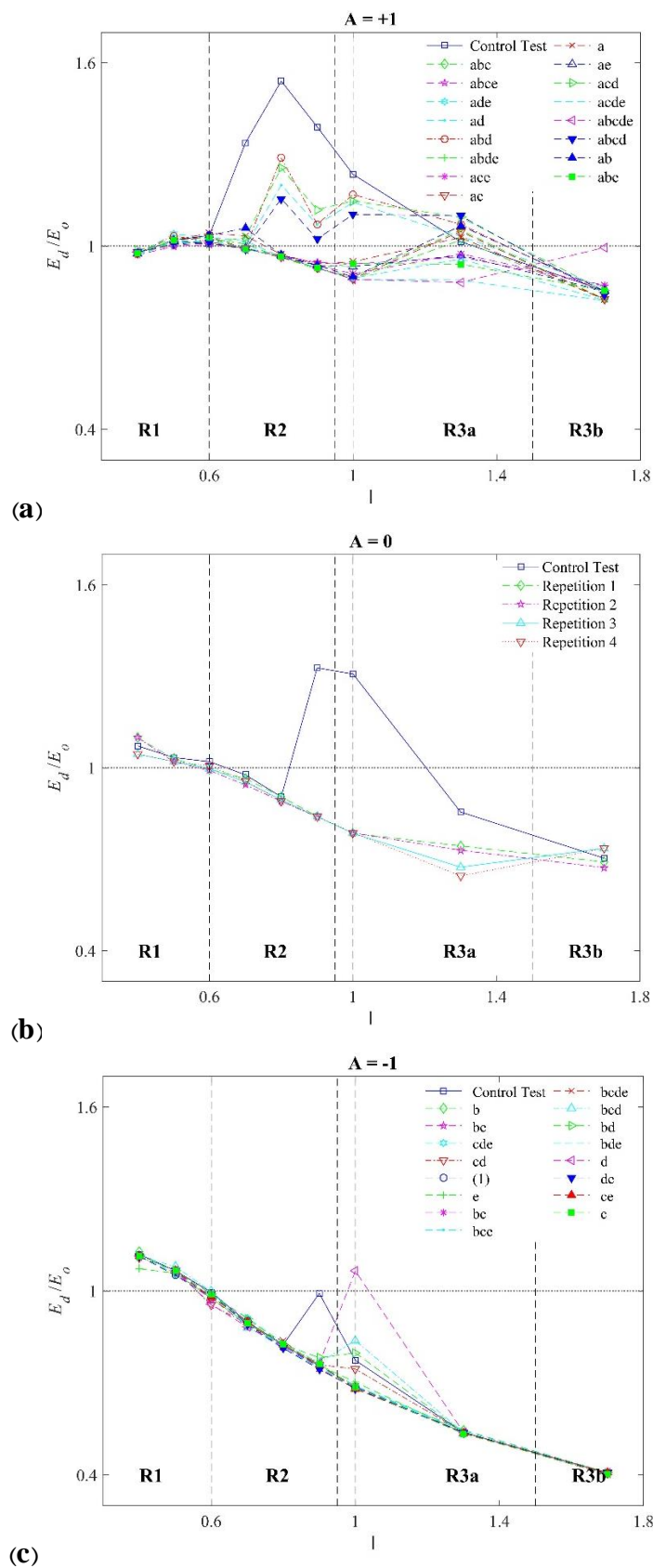
### ۳-۲- تاثیر عامل‌های طراحی بر استهلاک انرژی

تاثیر اثرهای معنی‌دار بر متغیر پاسخ در شکل ۶ نشان داده شده است. سطح بهینه عامل‌های طراحی را می‌توان با توجه به این شکل تعیین کرد. نظر به این که هرچه  $(E_d/E_o)$  (SD1) به صفر نزدیکتر باشد کارکرد هیدرولیکی چاهک ریزشی بهتر است سطح بالای (سطح +۱) عامل A (نسبت

دبی جریان ( $Q$ ) توسط یک دبی‌سنج الکترومغناطیس با دقت  $\pm 1/s$  پیش از ورود جریان به چاهک ریزشی اندازه گرفته می‌شد. در این پژوهش دبی جریان بین  $5/2$  تا  $48/5$  لیتر بر ثانیه تغییر و موجب تغییر عدد فرود ورودی ( $F_o = (Q/(gDh_o^4))^{1/2}$ ) بین  $0.67$  تا  $4/42$  و عدد برخورد ( $I$ ) بین  $0.4$  تا  $1/7$  می‌شد. در کل حدود ۳۵۰ آزمون انجام شد و شکل ۳ آزمایش "bce" را در دبی  $10/35$  لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. همچنین با توجه به طبقه‌بندی انجام شده توسط Ma et al. (2017)، در همه آزمایش‌ها چاهک ریزشی تحت یکی از دو رژیم I یا II کار می‌کرد.

### ۳- نتایج و بحث

استهلاک انرژی در چاهک ریزشی به میزان زیادی تحت تاثیر رژیم جریان عبوری از آن است (Ma et al., 2017). تغییرپذیری‌های بار انرژی باقی‌مانده  $(E_d/E_o)$  نسبت به عدد برخورد ( $I$ ) برای سه نسبت پرشدگی لوله ورودی (عامل A) به همراه نتایج آزمایش‌های شاهد در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. در این شکل، نتایج آزمایش‌های شاهد نقص کارکرد هیدرولیکی چاهک ریزشی تحت رژیم R2 را به خوبی نشان می‌دهند؛ فاصله قابل توجه بار انرژی باقی‌مانده از خط ۱ تحت رژیم R2 گویای نبود کارکرد بهینه سازه تحت این رژیم جریان است. بعضی از صفحه‌های شکست جت، تحت رژیم‌های مختلف جریان، موجب قرار گرفتن مقادیر  $E_d/E_o$  در حدود خط بهینه شده‌اند. همچنین افزایش نسبت پرشدگی از  $0.40$  به  $0.80$  به‌طور آشکار موجب بهبود کارکرد هیدرولیکی چاهک ریزشی در بحث استهلاک انرژی شده است. با این وجود، این یافته‌ها کیفی‌اند و تصویری جامع و کمی از تاثیر عامل‌های طراحی بر متغیر پاسخ ارائه نمی‌دهند. همچنین، مقدار میانگین متغیر پاسخ  $((SD1 (E_d/E_o)))$  (رابطه ۳) در نقطه‌های فاکتوریل  $(\bar{y}_F)$  برابر  $0.196$  و در نقاط مرکزی  $(\bar{y}_C)$  برابر  $0.183$  است. از آنجا که این دو مقدار به هم نزدیک می‌باشند، لذا اثرهای درجه دوم تاثیر چندانی بر نتایج نداشته‌اند (Montgomery, 2013). افزون بر این، در آزمایش‌های abcde و bcde صفحه مورد بررسی مشابه صفحه پیشنهادی و بررسی شده توسط (2014) Granata et al. می‌باشد و به این ترتیب نتایج پژوهش آنان



**Fig 4** Residual energy head ( $E_d/E_o$ ) versus impact number ( $l$ ) for inlet pipe filling ratio (factor  $A$ ) at: (a)  $A = +1$ , (b)  $A = 0$ , and (c)  $A = -1$

شکل ۴ بار انرژی باقی مانده نسبت به عدد برخورد ( $l$ ) برای نسبت پرشدگی لوله ورودی (عامل  $A$ ) در سطح‌های: (a)  $A = +1$ ، (b)  $A = 0$  و (c)  $A = -1$

شدند. دو عامل D و E به منظور حفظ سلسله مراتب در نظر گرفته شدند. نتایج این تحلیل در جدول ۳ ارائه شده است. برابر این جدول همه اثرهای در نظر گرفته شده در سطح ۱٪ معنی‌دار می‌باشند، به جز اثر عامل E که در سطح ۵٪ معنی‌دار است. معنی‌دار بودن اثرها با استفاده از شاخص آماری p-value تعیین شده‌اند؛ هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد تاثیر عامل مربوطه بیشتر است (Ryan, 2007). با توجه به جدول تحلیل واریانس نشانه‌ای بر معنی‌دار بودن اثرهای درجه دوم بر پاسخ در سطح ۱٪ وجود ندارد. همچنین نقص برازش، که به عنوان انحراف داده‌ها از مدل در نظر گرفته شده تعریف می‌شود، معنی‌دار نمی‌باشد. بنابراین تابع رگرسیون خطی به خوبی با داده‌ها همخوانی داشته است (Myers et al., 2009).

مقادیر ستون برآورد در جدول ۳ در واقع نشان دهنده ضریب‌های مدل رگرسیون می‌باشند. رابطه (۴) مدل رگرسیون برای متغیر پاسخ را نشان می‌دهد.

$$SDI \left( \frac{E_d}{E_o} \right) = 0.195 - 0.113x_1 + 0.005x_4 - 0.005x_5 + 0.008x_1x_4 - 0.008x_1x_5 \quad (4)$$

در این رابطه  $x_1$ ،  $x_4$  و  $x_5$  به ترتیب مقادیر کد شده عامل‌های طراحی A، D، و E می‌باشند که پیشتر در جدول ۱ تعریف شده‌اند. لازم به یادآوری است که مدل به دست آمده تنها برای عامل‌های طراحی در بازه مورد بررسی معتبر است. این مدل ۹۹/۲۴٪ تغییرها در متغیر پاسخ را پوشش می‌دهد، بنابراین مقدار ضریب تعیین مدل ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۹۲ می‌باشد. همچنین ضریب تعیین تعدیل شده آن ( $R^2_{Adj}$ ) ۰/۹۹۱ است. نزدیکی این دو ضریب نشانه انتخاب مناسب ترم‌های مدل می‌باشد. همچنین ضریب تعیین

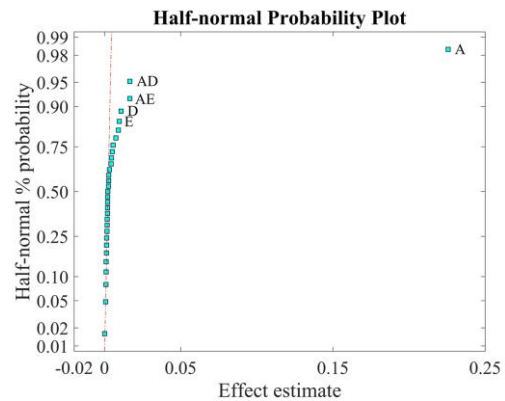


Fig 5 Half-normal probability plot of design factors effects on energy dissipation in drop manhole

شکل ۵ نمودار احتمال نیمه-نرمال اثر عامل‌های طراحی بر استهلاك انرژی در چاهک ریزشی

پرشدهگی لوله ورودی) به‌طور روشنی موجب بهبود کارکرد سازه در اثر اصلی (شکل ۶a) و در اندرکنش‌ها (شکل‌های ۶b و ۶c) شده است. همچنین هنگامی عامل A در سطح +۱ است، نسبت انحناء صفحه شکست جت (عامل D) در سطح -۱ باعث کاهش پاسخ در اندرکنش AD گردیده است (شکل ۶b). با این وجود، عامل E (زاویه صفحه شکست جت) در سطح +۱ موجب پاسخ کمتر شده است (شکل ۶c). نمودار اندرکنش‌ها نشان می‌دهد که تاثیر عامل‌های D و E کم بوده است و در سطح‌های بالا و پایین عامل A برعکس عمل کرده‌اند. نحوه اثر این عامل‌ها بر متغیر پاسخ را می‌توان توسط مدل رگرسیونی و رویه پاسخ بیشتر بررسی کرد.

### ۳-۳- مدل رگرسیونی و رویه پاسخ

اثرهای معنی‌دار به دست آمده از تحلیل واریانس مدل کامل (یعنی اثرهای A، AD، و AE) به همراه عامل‌های D و E برای انجام تحلیل واریانس مدل کاهش یافته به کار برده

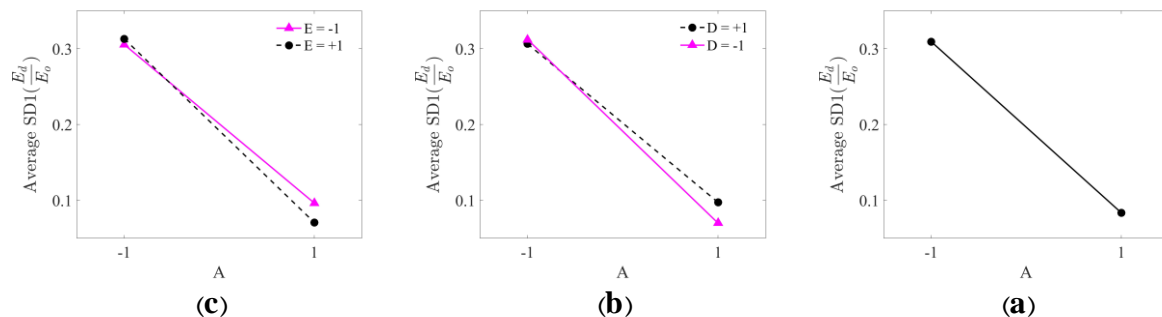


Fig 6 Meaningful main and interaction effects on energy dissipation, (a) A, (b) AD, and (c) AE

شکل ۶ تاثیر اثرهای اصلی و اندرکنشی معنی‌دار بر استهلاك انرژی، (a) اثر عامل A، (b) اثر اندرکنش AD، و (c) اثر اندرکنش AE

جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس مدل کاهش یافته برای استهلاک انرژی در چاهک ریزشی

Table 3 Analysis of variance results of reduced model for energy dissipation in drop manhole

| Source of Variation | Estimate | Sum of Squares | Degrees of Freedom | F <sub>0</sub> | P-Value  |
|---------------------|----------|----------------|--------------------|----------------|----------|
| Intercept           | 0.1949   | -              | -                  | -              | -        |
| Model               | -        | 0.4134         | 5                  | 915.1788       | < 0.0001 |
| A                   | -0.1128  | 0.4074         | 1                  | 4509.3960      | < 0.0001 |
| D                   | 0.0054   | 0.0009         | 1                  | 10.4060        | 0.0031   |
| E                   | -0.0045  | 0.0007         | 1                  | 7.2448         | 0.0117   |
| AD                  | 0.0083   | 0.0022         | 1                  | 24.4280        | < 0.0001 |
| AE                  | -0.0083  | 0.0022         | 1                  | 24.4191        | < 0.0001 |
| Curvature           | -        | 0.0006         | 1                  | 6.8263         | 0.0141   |
| LOF*                | -        | 0.0026         | 26                 | 4.7761         | 0.1110   |
| PE**                | -        | 0.0001         | 3                  | -              | -        |
| Total               | -        | 0.4166         | 35                 | -              | -        |
| Residual            | -        | 0.0026         | 29                 | -              | -        |

\*Lack of Fit

\*\* Pure Error

فاضلاب و جمع‌آوری روان آب سطحی کاربرد فراوانی دارند. این سازه‌ها اغلب برای ایجاد استهلاک انرژی و نیز مهار سرعت جریان به کار برده می‌شوند. اما استهلاک ناچیز انرژی و ورود زیاد هوا به مجرای خروجی آن‌ها در رژیم جریان R2 می‌تواند موجب بروز مشکلات هیدرولیکی در سامانه پایین- دست‌شان شود. از این رو صفحه شکست جت مسطح توسط Granata et al. (2014) برای بهبود کارکرد هیدرولیکی چاهک‌های ریزشی توصیه شد.

در این پژوهش تاثیر ویژگی‌های هندسی صفحه شکست جت و نسبت پرشدگی لوله ورودی بر استهلاک انرژی در چاهک ریزشی بررسی شد. آزمایش‌ها بر مبنای طرح ۲<sup>۵</sup> فاکتوریل کامل به همراه ۴ تکرار در نقطه مرکزی با استفاده از روش‌های تحلیل ابعادی و طرح آماری آزمایش‌ها، طرح شدند. تجزیه و تحلیل آماری نتایج نشان داد که تاثیر نسبت پرشدگی لوله ورودی (عامل A)، نسبت انحناء صفحه شکست جت (عامل D)، و زاویه صفحه (عامل E) بر متغیر پاسخ معنی‌دار بوده است. کارکرد هیدرولیکی چاهک ریزشی در سطح‌های بالای عامل‌های A و E بهبود یافت، یعنی نسبت پرشدگی لوله ورودی برابر ۸۰٪ و زاویه صفحه با راستای قائم به میزان ۷۰°. همچنین، سطح -۱ عامل D، یعنی انحناء صفحه برابر صفر، موجب بهبود کارکرد این سازه شده است. تاثیرهای اصلی و اندرکنشی نسبت طول و نسبت عرض صفحه شکست جت در حدود مورد بررسی بر متغیر پاسخ معنی‌دار نبودند. با این وجود، با توجه به تحقیق انجام شده توسط Granata et al. (2014) و نیز ملاحظه‌های

پیش‌بینی مدل (R<sup>2</sup><sub>Pred</sub>) که معیاری برای ارزیابی قابلیت پیش‌بینی آن است، برابر ۰/۹۸۹ است. از آنجا که کارکرد چاهک ریزشی در بحث استهلاک انرژی در سطح بالای (سطح +۱) عامل A به‌طور آشکارا بهبود یافته است می‌توان رویه پاسخ و خطوط کنتور را برحسب عامل‌های D و E با توجه به رابطه (۴)، هنگامی x<sub>1</sub> برابر ۱ است، رسم کرد (شکل ۷). با توجه به این شکل نسبت انحناء صفحه شکست در سطح -۱ و زاویه صفحه شکست در سطح +۱ موجب بهبود شاخص استهلاک انرژی در چاهک ریزشی شده‌اند.

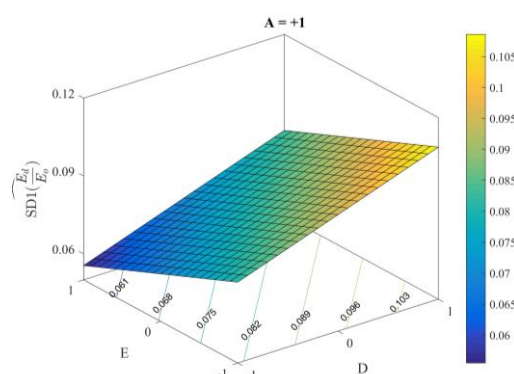


Fig 7 Response surface and contour line for inlet pipe filling ratio at 80% (factor A at level +1)

شکل ۷ منحنی پاسخ و خطوط کنتور هنگامی نسبت پرشدگی لوله ورودی ۸۰٪ می‌باشد (عامل A در سطح +۱)

#### ۴- نتیجه‌گیری

در ناحیه‌های پرشیب شهری چاهک‌های ریزشی در سامانه‌های

|           |  |  |
|-----------|--|--|
| $\rho$    | دانسیته سیال ( $\text{kg m}^{-3}$ )                  | اجرای، طول صفحه شکست جت برابر با قطر چاهک  |
| $\sigma$  | کشش سطحی ( $\text{kg s}^{-2}$ )                      | ریزشی و عرض آن $1/4$ برابر قطر لوله ورودی پیشنهاد می‌شود.  |
| $\varphi$ | زاویه بین لوله ورودی و خروجی چاهک ریزشی ( $^\circ$ ) | عامل‌های طراحی را می‌توان با روش‌های بهینه‌سازی، مانند سطح پاسخ (RSM)، مورد بررسی بیشتری قرار داد و مقدار دقیق‌تر آن‌ها را مشخص کرد. همچنین برای انجام آزمایش‌های تکمیلی تنها می‌توان تاثیر عامل‌های معنی‌دار را بررسی کرد. افزون بر این، از آنجا که نتایج این پژوهش نشان داد تنها اثر اندرکنش دو عامل معنی‌دار بوده است، می‌توان در تحقیقات آتی از طرح‌های فاکتوریل جزئی با روشنی IV استفاده کرد. |
|           | <b>زیر نویس‌ها:</b>                                  |  |
| d         | پایین دست  |  |
| o         | جریان ورودی  |  |
| M         | چاهک ریزشی   |  |
| in        | ورودی  |  |
| out       | خروجی  |  |

## ۶- سپاسگزاری

نویسندگان از شرکت فاضلاب تهران که منابع مالی انجام این پژوهش را طی قرارداد شماره ۹۵/۱۰۰/۵۸۵/ص تامین کرده است و از آقایان محمد محمودی‌راد و سجاد حیدری که در ساخت مدل و انجام آزمایش‌ها همکاری داشته‌اند قدردانی می‌کنند.

## ۷- منابع‌ها

- Camino, G.A., Zhu, D.Z. and Rajaratnam, N. (2011). Hydraulics of Stacked Drop Manholes. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 137, 537–52.
- Camino, G.A., Zhu, D.Z., Rajaratnam, N. and Manas, S. (2009). Use of a Stacked Drop Manhole for Energy Dissipation: A Case Study in Edmonton, Alberta. *Can. J. Civ. Eng.*, 36, 1037–50.
- Carvalho, R.F. (2012). Hydraulic Characteristics of a Drop Square Manhole with a Downstream Control Gate. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 138, 569–76.
- Chanson, H. (2004). Hydraulics of Rectangular Dropshafts. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 130, 523–29.
- Christodoulou, G.C. (1991). Drop Manholes in Supercritical Pipelines. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 117, 37–47.
- Gargano, R. and Hager, W.H. (2002). Supercritical Flow across Sewer Manholes. *J. Hydraul. Eng.*, 128, 1014–17.
- Granata, F., Marinis, G.de., Gargano, R. and Hager, W.H. (2011). Hydraulics of Circular Drop Manholes. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 137, 102–11.

## ۵- فهرست نشانه‌ها

|          |   |
|----------|---|
| $C_j$    | فاصله بین مرکز صفحه شکست جت و کف لوله ورودی (m) |
| $D$      | قطر (m)   |
| $E$      | بار انرژی مخصوص (m)                             |
| $F$      | عدد فرود  |
| $g$      | شتاب جاذبه ( $\text{m s}^{-2}$ )                |
| $h$      | عمق جریان (m)                                   |
| $l$      | عدد برخورد                                      |
| $l$      | طول صفحه شکست جت (m)                            |
| $P$      | عمق حوضچه چاهک ریزشی (m)                        |
| $Q$      | دبی جریان ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )        |
| $s$      | ارتفاع ریزش چاهک ریزشی (m)                      |
| $sa$     | انحناء صفحه شکست جت (m)                         |
| $V$      | سرعت میانگین جریان ( $\text{m s}^{-1}$ )        |
| $w$      | عرض صفحه شکست جت (m)                            |
|          | <b>نشانه‌های یونانی:</b>                        |
| $\alpha$ | ضریب انرژی جنبشی                                |
| $\delta$ | شیب لوله ( $^\circ$ )                           |
| $\theta$ | زاویه صفحه شکست جت با راستای قائم ( $^\circ$ )  |
| $\nu$    | لزجت سینماتیک ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )    |

Granata, F. (2016). Dropshaft Cascades in Urban Drainage Systems. *Water Sci. Technol.*, 73, 2052–2059.

Granata, F., Marinis, G.de. and Gargano, R. (2014). Flow-Improving Element in Circular Drop Manholes. *Journal of Hydraulic Research*, 52, 347–55.

Hawkins, D. and Lye, L.M. (2006). Use of Doe Methodology for Investigating Conditions That Influence the Tension in Marine Risers for Fpso Ships. the First International Structural Specialty Conference, Calgary, Alberta, Canada.

Islam, M.F. and Lye, L.M. (2009). Combined Use of Dimensional Analysis and Modern Experimental Design Methodologies in Hydrodynamics Experiments. *Ocean Eng.*, 36, 237–47.

Ma, Y., Zhu, D.Z., Rajaratnam, N. and Duin, B. (2017). Energy Dissipation in Circular Drop Manholes. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 143, 040170471–0401704710.

Montgomery D.C. (2013). Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons Inc.

Myers R.H., Montgomery, D.C. and Anderson–Cook, C.M. (2009). Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. John Wiley & Sons.

Ryan T.P. (2007). Modern Experimental Design. John Wiley & Sons.

Sangsefidi, Y., Mehraein, M., Ghodsian, M. and Motalebizadeh, M.R. (2017). Evaluation and Analysis of Flow over Arced Weirs Using Traditional and Response Surface Methodologies. *J. Hydraul. Eng.*, 143, 040170481–0401704811.

Szirtes, T. (2006). Applied Dimensional Analysis and Modeling. Elsevier.

Zheng, F., Li, Y., Zhao, J. and An, J. (2017). Energy Dissipation in Circular Drop Manholes under Different Outflow Conditions. *Water*, 9(10), 752.