



بررسی تاثیر مشخصات هندسی صفحه شکست جت بر جریان هوا در منهول ریزشی

سیدرضا هاشمی نژاد^{۱*}، محمدجواد خانجانی^۲، غلامعباس بارانی^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵

مقاله برگرفته از رساله دکتری

چکیده

منهول‌های ریزشی در شبکه‌های فاضلاب و جمع‌آوری روان‌آب سطحی واقع در منطقه‌های شیب‌دار شهری از سرعت زیاد سیال جلوگیری می‌کنند و موجب استهلاک انرژی می‌شوند. عملکرد ضعیف هیدرولیکی آن‌ها در رژیم جریان R2 توسط صفحه شکست جت بهبود داده شده است. با این وجود هنوز لازم است مشخصات هندسی صفحه شکست جت به‌طور دقیق تعیین شوند. در این تحقیق تاثیر طول، عرض، انحناء، و زاویه صفحه و همچنین نسبت پرشدگی لوله ورودی، بر کارایی هیدرولیکی منهول ریزشی به‌طور آزمایشگاهی مطالعه شده است. آزمایش‌ها با استفاده از روش‌های آنالیز ابعادی و طرح فاکتوریل دو-سطحی طرح شدند و جریان هوا در منهول مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل آماری نتایج نشان داد که پرشدگی لوله ورودی برابر ۰/۸۰، انحناء صفحه شکست جت برابر صفر و زاویه آن با راستای قائم به میزان 70° موجب کاهش میانگین نیاز نسبی هوا و بهبود عملکرد هیدرولیکی منهول می‌شوند. همچنین نتایج گویای این بودند که طول و عرض صفحه شکست جت اثر معنی‌داری بر جریان هوا در این سازه نداشتند.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، جریان هوا، صفحه شکست جت، طرح آماری آزمایش‌ها، طرح فاکتوریل، منهول ریزشی.

^{۱*} محقق پسا دکتری، بخش مهندسی هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه زجیانگ، هانگژو، زجیانگ، چین،
srhn61@gmail.com

^۲ استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، mkhanjani@uk.ac.ir

^۳ استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، gab@uk.ac.ir

مقدمه

منهول‌های ریزشی به‌طور گسترده در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب و روان آب سطحی در منطقه‌های مسکونی پرشیب به‌کار برده می‌شوند. استفاده از آن‌ها موجب کاهش شیب خطوط انتقال می‌شود و در نتیجه سرعت زیاد جریان کاهش می‌یابد و در محدوده سرعت مجاز قرار می‌گیرد (چانسون^۱ (۲۰۰۴)، گراناتا^۲ (۲۰۱۶)). کارایی هیدرولیکی این سازه‌ها ممکن است تحت تاثیر برخی عوامل کاهش یابد، عواملی مانند: استهلاک کم انرژی، ارتفاع زیاد سطح آب در حوضچه منهول، ورود زیاد هوا به مجرای خروجی، و بروز خفگی در خروجی سازه.

کارکرد هیدرولیکی منهول تحت تاثیر مستقیم رژیم جریان در آن می‌باشد. انواع رژیم جریان در این سازه با توجه به محل برخورد جت ورودی در آن تعریف می‌شوند. بر این اساس، جریان در منهول ریزشی به سه رژیم اصلی R1، R2، و R3 و پنج زیر-رژیم R2a، R2b، R2c، R3a، و R3b طبقه‌بندی شده است. در رژیم جریان R1 جت ورودی با حوضچه منهول برخورد می‌کند؛ این در حالی است که در رژیم جریان R2 جت ورودی به صورت کامل یا جزئی به مجرای خروجی منهول وارد می‌شود؛ رژیم جریان R3 زمانی روی می‌دهد که جت ورودی به منهول با دیواره مقابل آن برخورد نماید. ویژگی‌های هریک از این رژیم‌ها توسط گراناتا و همکاران (۲۰۱۱) به‌طور مفصل شرح داده شده است. آنان همچنین پارامتر بدون بعد عدد برخورد (Impact parameter) (I) را برای تعیین حدود هر رژیم معرفی کرده‌اند. بر این اساس، 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 R3a به R3b در ۱ برابر ۱/۵ اتفاق می‌افتد. پارامترهای مرتبط با کارکرد

هیدرولیکی منهول ریزشی مانند: استهلاک انرژی، جریان هوا، و ارتفاع سطح آزاد آب در حوضچه، توسط محققان زیادی مطالعه شده‌اند، مانند: چریستودولو^۳ (۱۹۹۱)، چانسون (۲۰۰۴)، گراناتا و همکاران (۲۰۱۱)، و ژنگ^۵ و همکاران (۲۰۱۶)، ما^۴ و همکاران (۲۰۱۶)، در رژیم R2 جت ورودی به‌طور مستقیم به خروجی منهول برخورد می‌کند و باعث کاهش استهلاک انرژی، افزایش ورود هوا به سیستم پایین دست، و نیز افزایش آشفته‌گی جریان در خروجی می‌شود (چانسون (۲۰۰۴)، گراناتا و همکاران (۲۰۱۱)). برای جلوگیری از این برخورد مستقیم گراناتا و همکاران (۲۰۱۶a) استفاده از صفحه شکست جت را توصیه کردند؛ صفحه شکست جت معرفی شده یک صفحه مسطح بود که در مرکز سطح منهول، عمود بر مسیر جریان ورودی، و در ارتفاع مناسب نصب می‌شد و در رژیم R2 مسیر جت ورودی را قطع می‌کرد. نتایج مطالعه آنان نشان داد که اگر مشخصات هندسی صفحه شکست جت به‌طور مناسب انتخاب شوند، کارکرد هیدرولیکی منهول ریزشی به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد.

در این پژوهش تاثیر مشخصات هندسی صفحه شکست جت بر جریان هوا در منهول ریزشی با روش مدل‌سازی آزمایشگاهی بررسی شده است. طول، عرض، انحناء، و زاویه صفحه شکست جت و نیز میزان پرشدگی لوله ورودی به منهول به‌عنوان فاکتورهای طراحی مطالعه شده‌اند؛ و ورود هوا به لوله خروجی سازه به‌عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شده است. تاثیرات اصلی و اندرکنشی فاکتورهای طراحی بر متغیر پاسخ توسط ترکیب دو روش آنالیز ابعادی و طرح آماری آزمایش‌ها (DoE)^۶ محاسبه شده‌اند. اساساً DoE روشی برای وارد کردن ساختارمند آمار و احتمالات به آزمایش‌ها است. این روش طرح و تحلیل آزمایش‌ها در اوایل ۱۹۲۰ توسط

^۴ Ma

^۵ Zheng

^۶ Design of Experiments

^۱ Chanson

^۲ Granata

^۳ Christodoulou



ماتریس‌های C و D توان هریک از متغیرها را در عددهای بدون بعد نشان می‌دهند. ماتریس D باید طوری انتخاب شود که معکوس‌پذیر باشد و عددهای بدون بعد مورد نظر را به آنالیز ابعادی وارد کند. اگر هدف استخراج مجموعه‌های بدون بعد باشد ماتریس C توسط رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$C = -D.(A^{-1}.B)^T \quad (1)$$

پیش از انجام آنالیز ابعادی لازم است پدیده مورد بررسی به خوبی شناخته شود. یکی از ویژگی‌های بارز منهول‌های ریزشی، اندرکنش زیاد جریان آب و هوا در آن‌ها است (گراناتا و همکاران (۲۰۱۴b)). تنها بخشی از هوای وارد شده به منهول وارد مجرای خروجی می‌شود و این بخش نشان دهنده هوای مورد نیاز سازه از محیط خارج است. نیاز واقعی هوا در منهول ریزشی بستگی به رژیم جریان عبوری دارد. در رژیم $R1$ نیاز نسبی هوا (یعنی نسبت دبی هوا به دبی آب، Qa/Q یا β) معمولاً ناچیز است. از سوی دیگر، نیاز نسبی هوا در رژیم $R2$ زیاد می‌باشد؛ زیرا در این رژیم جت ورودی به‌طور مستقیم به خروجی منهول برخورد کرده و مقدار زیادی هوا توسط آن وارد خروجی می‌شود. مطالعه‌های انجام شده نشان می‌دهند که بیشترین مقدار β در رژیم $R2b$ اتفاق می‌افتد. معمولاً در رژیم $R3a$ یک اوج محلی مشاهده می‌شود و پس از آن با افزایش دبی جریان و مسدود شدن خروجی منهول توسط آب، β شروع به کاهش کرده و با روندی ثابت رژیم $R3b$ را طی می‌کند (گراناتا و همکاران (۲۰۱۴b)).

ورود زیاد هوا به شبکه پایین‌دست منهول می‌تواند موجب بروز مشکلات هیدرولیکی مختلفی شود، مانند: کاهش ظرفیت عبوردهی مجاری، خفگی جریان،

رونالد ا. فیشر^۱ معرفی شد، با این حال استفاده از آن در هیدرولیک هنوز در مرحله‌های اولیه است (سنگ سفیدی^۲ و همکاران (۲۰۱۷)). در این مطالعه هریک از ابعاد صفحه شکست جت در سه سطح و تحت سه نسبت پرشدگی لوله ورودی، بر مبنای طرح ۲۵ فاکتوریل کامل با چهار نقطه مرکزی، مورد آزمایش قرار گرفتند. هفده صفحه شکست جت متفاوت تحت نه عدد برخورد مختلف آزمایش شدند و در مجموع بیش از ۳۵۰ آزمون انجام شد. با انجام تجزیه و تحلیل آماری نتایج، میزان اثرهای اصلی و اندرکنشی فاکتورهای طراحی مشخص شد. سپس با توجه به اثرهای معنی‌دار و رویه پاسخ به-دست آمده از مدل رگرسیونی، ابعاد مناسب صفحه شکست جت تعیین شد به‌طوری‌که استفاده از آن موجب کاهش حداکثری ورود هوا به خروجی منهول ریزشی می‌شد.

مواد و روشها

آنالیز ابعادی و جریان هوا در منهول

آنالیز ابعادی روشی شناخته شده در علوم مختلف و به ویژه در مکانیک سیالات و هیدرولیک می‌باشد. روش‌های متعددی برای انجام این آنالیز وجود دارد که در این میان روش‌های رایلی، پی بکینگهام، سنتز^۳، و ماتریسی پرکاربردتر می‌باشند (اسلام و لی^۴ (۲۰۰۹)). در این پژوهش روش ماتریسی برای انجام آنالیز ابعادی به کار برده شده است. این روش دارای برتری‌های کاربردی زیادی است و مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: (۱) عددهای بدون بعد دلخواه را می‌توان به آسانی وارد مجموعه بدون بعد نهایی کرد؛ و (۲) همهٔ مجموعه‌های بدون بعد مستقل به‌دست می‌آیند (زیریتس^۵ (۲۰۰۶)). در این روش از چهار ماتریس A ، B ، C و D برای محاسبه عددهای بدون بعد استفاده می‌شود. ماتریس‌های A و B بیان‌گر توان‌های ابعاد هر یک از متغیرها می‌باشند و

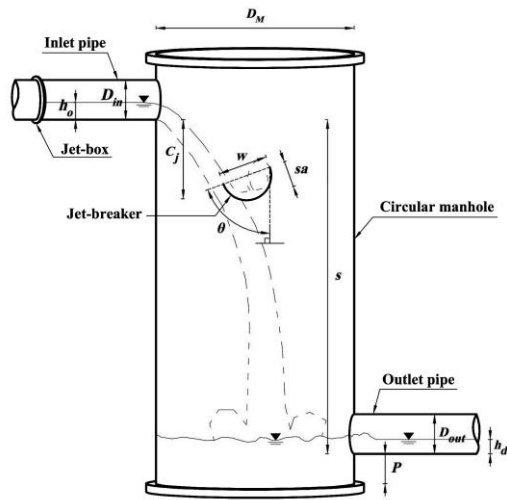
^۴ Islam and Lye

^۵ Szirtes

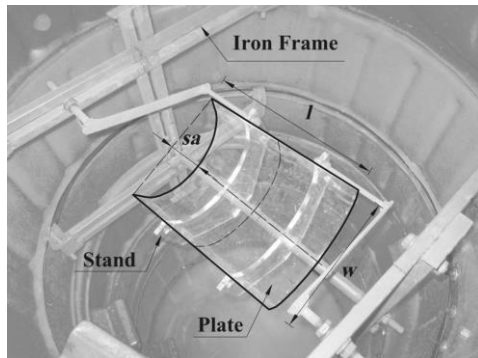
^۱ Ronald A. Fisher

^۲ Sangsefidi

^۳ Synthesis Method



شکل (۱): مشخصات هندسی منهول ریزشی



شکل (۲): مشخصات هندسی صفحه شکست جت

برای انجام آنالیز ابعادی کدی در محیط نرم افزار MATLAB 2016b نوشته شد و آنالیز ابعادی برای متغیرهای مستقل رابطه ۲ که داری بعد هستند و زاویه نمی باشند انجام شد. ۵۴ مجموعه بدون بعد مستقل به دست آمد و مجموعه ای که دارای عددهای بدون بعد کاربردی تری بود انتخاب شد. با توجه به نتایج این آنالیز رابطه ۲ را می توان به صورت رابطه بدون بعد ۳ نوشت.

ناپایداری جریان و امواج، و کاهش بازده پمپاژ (هگر^۱ (۲۰۱۰)). در رژیم جریان R2 صفحه شکست جت به صورت مانعی در مسیر جت ورودی عمل می کند و از برخورد مستقیم آن به خروجی منهول جلوگیری می نماید. از این طریق صفحه شکست جت موجب کاهش ورود هوا به خروجی منهول می شود (گراناتا و همکاران (۲۰۱۴a)).

نیاز نسبی هوا در منهول ریزشی که دارای صفحه شکست جت است و خروجی آن آزاد می باشد، در حالتی که هوا به میزان کافی و آزادانه به آن وارد می شود و کف آن نیز مسطح است، را می توان به صورت رابطه ۲ بر مبنای متغیرهای مستقل موثر بیان کرد.

$$\frac{Q_a}{Q} = \Gamma_1 (V_o, h_o, s, D_M, D_{in}, \delta_{in}, P, \varphi) \quad (2)$$

$$D_{out}, \delta_{out}, C_j, l, w, sa, \theta, g, \rho, \sigma)$$

در این رابطه، Q_a دبی هوا در لوله خروجی، Q دبی جریان، V_o سرعت متوسط جریان در بالادست، h_o عمق جریان در بالادست، s ارتفاع ریزش منهول، D_M قطر داخلی منهول، D_{in} قطر داخلی لوله ورودی، δ_{in} شیب لوله ورودی، P عمق حوضچه منهول، φ زاویه بین لوله ورودی و خروجی، D_{out} قطر داخلی لوله خروجی، δ_{out} شیب لوله خروجی، C_j فاصله بین مرکز صفحه شکست جت تا کف لوله ورودی، l طول صفحه شکست جت، w عرض صفحه، sa میزان انحناء صفحه، θ زاویه صفحه با راستای قائم، g شتاب جاذبه، ρ دانسیته آب، و σ کشش سطحی آب می باشند (شکل ۱ و ۲).

^۱ Hager



مقدارهای (سطح‌های) مورد نظر هر یک از آن‌ها مشخص شود، و در نهایت آزمایش‌ها که در واقع ترکیب‌های مشخصی از سطح‌های مختلف فاکتورهای می‌باشند تعریف شوند. در ادامه هر یک از این مرحله‌ها به‌طور کامل توضیح داده شده است.

انتخاب فاکتورهای طراحی و متغیر پاسخ

پیش از طراحی آزمایش‌ها لازم است که فاکتورهای طراحی و متغیر پاسخ مشخص شوند؛ همچنین لازم است سطح‌های مورد بررسی هر فاکتور با در نظر گرفتن همه جوانب مشخص گردند. در این تحقیق میزان پرشدگی لوله ورودی و مشخصات هندسی صفحه شکست جت، به عنوان فاکتورهای طراحی، بررسی شده‌اند. این فاکتورها به همراه سطح‌های مورد بررسی آن‌ها، بر مبنای طرح فاکتوریل دو-سطحی همراه با نقطه مرکزی، در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. در این طرح همه فاکتورهای طراحی دارای سه سطح می‌باشند و از ترکیب سطح‌های بالا و پایین آن‌ها (سطح‌های ۱- و ۰+) برای انجام آزمایش‌های اصلی استفاده می‌شود؛ سطح مرکزی فاکتورها (سطح ۰) برای انجام آزمایش مرکزی و برآورد خطا به کار می‌رود (توضیحات بیشتر در بخش بعد). آزمایش‌ها برای

جدول (۱): فاکتورهای طراحی و سطح‌های مورد بررسی
به صورت مقادیر واقعی و کد شده

فاکتورهای طراحی	سطح فاکتورها			
	رابطه	بالا (+۱)	مرکز (۰)	پایین (-۱)
A: نسبت پرشدگی لوله ورودی	h_o/D_{in}	۰/۸	۰/۶	۰/۴
B: نسبت طول صفحه شکست جت	l/D_{in}	۲	۱/۵	۱
C: نسبت عرض صفحه شکست جت	w/D_{in}	۱/۴	۱	۰/۶
D: نسبت انحناء صفحه شکست جت	sa/w	۰/۵	۰/۲۵	۰
E: زاویه صفحه شکست جت	θ	۷۰°	۳۵°	۰°

$$\frac{Q_a}{Q} = \Gamma_2 \left(\frac{V_o}{D_M} \sqrt{\frac{s}{g}}, \frac{\rho V_o^2 D_M}{\sigma}, \right. \quad (3)$$

$$\left. \frac{h_o}{D_{in}}, \frac{s}{D_M}, \frac{P}{D_{out}}, \frac{s^2}{D_M D_{out}}, \right.$$

$$\left. \frac{l}{D_{in}}, \frac{w}{D_{in}}, \frac{sa}{w}, \frac{C_j}{s}, \theta, h_o \sqrt{\frac{\rho g}{\sigma}}, \right.$$

$$\left. \delta_{in}, \varphi, \delta_{out} \right)$$

در این رابطه، متغیر بدون بعد اول در سمت راست شکل دیگری از عدد برخورد است و در محاسبات پیش‌رو از عدد برخورد، $l = V_o/D_M (2s/g)^{1/2}$ ، بجای آن استفاده شده است. متغیر بدون بعد دوم عدد وبر و متغیر بدون بعد سوم نسبت پرشدگی لوله ورودی می‌باشند. از این رابطه بدون بعد می‌توان برای ایجاد تشابه دینامیکی و بسط نتایج نیز استفاده کرد.

طرح آماری آزمایش‌ها

طرح آماری آزمایش‌ها (DoE) در اوایل ۱۹۲۰ معرفی شد، ولی هنوز کاربرد آن در هیدرولیک محدود و در مرحله‌های اولیه می‌باشد (سنگ سفیدی و همکاران (۲۰۱۷)). DoE شامل روش‌هایی برای تشخیص اثرهای معنی‌دار است که در نهایت برای ایجاد یک مدل ریاضی به کار برده می‌شوند؛ مدل ریاضی به دست آمده از آن قادر به پیش‌بینی پاسخ سیستم با توجه به فاکتورهای ورودی است. در مقایسه با روش‌های قدیمی، این روش قادر به معرفی مدل ریاضی قوی‌تر و دقیق‌تری با شمار آزمایش کمتر می‌باشد (هاوکینز و لی^۱ (۲۰۰۶)). از این روش می‌توان تقریباً در همه زمینه‌های علمی و برای انجام آزمایش‌های متفاوت استفاده کرد. در این پژوهش نیز از این روش برای بررسی اثر مشخصات هندسی صفحه شکست جت بر جریان هوا در منهول ریزشی استفاده شده است. برای این منظور لازم است ابتدا فاکتورهای اثرگذار بر متغیر پاسخ به دقت تعیین شوند. پس از آن

^۱ Hawkins and Lye

آنجا که شمار فاکتورهای موجود در اندرکنش‌های معنی-دار مشخص نمی‌باشد، از طرح فاکتوریل کامل استفاده شده است. برای برآورد مستقل خطا و نیز آگاهی از میزان تاثیر جمله‌های درجه دوم بر پاسخ، چهار تکرار در سطح مرکزی فاکتورهای طراحی (نقطه مرکزی) به طرح آزمایش‌ها اضافه شده است. بنابراین آزمایش‌ها بر مبنای طرح ۲^۵ فاکتوریل کامل به همراه ۴ تکرار در نقطه مرکزی طرح شده‌اند (جدول ۲). در این طرح هر یک از فاکتورهای طراحی دارای سه سطح می‌باشند که از دو سطح حدی آن‌ها (سطح‌های -۱ و +۱) برای طرح آزمایش‌های فاکتوریل و از سطح مرکزی آن‌ها برای طرح آزمایش مرکزی استفاده می‌شود. جدول ۲ آزمایش‌های طرح شده را نشان می‌دهد که شامل ۳۲ آزمایش در نقطه‌های فاکتوریل و ۴ تکرار در نقطه مرکزی می‌باشد. نام هر آزمایش در این جدول معرف فاکتورهایی است که در آن آزمایش در سطح +۱ می‌باشند.

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شدند. از یک منهول پلی‌اتیلین در اندازه کامل (اسکیل نشده) برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. قطر داخلی منهول مورد بررسی (D_M) برابر ۱ متر و ارتفاع ریزش (s) آن ۱/۶ متر بود. همچنین، قطر داخلی لوله ورودی و خروجی به آن (D_{out} و D_{in}) ۰/۱۸ متر و شیب آن‌ها (δ) صفر درجه بود. لوله خروجی در پایین دست به صورت آزاد تخلیه می‌شد و با لوله ورودی زاویه ۱۸۰ درجه ($\varphi = 180^\circ$) می‌ساخت. با توجه به پیشنهاد گراناتا و همکاران (۲۰۱۴a) همه صفحه‌های شکست جت طوری در منهول نصب می‌شدند که فاصله مرکز آن‌ها با کف لوله ورودی (C_j) برابر $s/4$ (یعنی ۰/۴ متر) باشد. در مجموع ۹ صفحه شکست جت

ترکیب‌های مشخصی از سطح‌های فاکتورهای طراحی انجام شدند. هر آزمایش شامل ۹ آزمون^۱ بود که هر یک مربوط به یک دبی (و یا یک عدد برخورد) بودند. دیگر عددهای بدون بعد رابطه ۳، بجز عدد برخورد، در روند آزمایش‌ها ثابت بودند. همچنین از اثر کشش سطحی صرف نظر شد.

برای ارزیابی تاثیر فاکتورهای طراحی بر جریان هوا در منهول ریزشی از میانگین نیاز نسبی هوا در هر آزمایش به عنوان متغیر پاسخ استفاده شد (رابطه ۴).

$$\bar{\beta} = \left(\frac{Q_a}{Q} \right) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_a}{Q} \right)_i}{n} \quad (4)$$

در این رابطه i شماره آزمون در آزمایش مورد نظر و n شمار کل آزمون‌ها می‌باشد که در این مطالعه برابر ۹ بود. هرچه مقدار $\bar{\beta}$ به صفر نزدیکتر باشد عملکرد هیدرولیکی منهول بهتر است.

طرح ۲^۵ فاکتوریل به همراه نقطه مرکزی

اثرهای اصلی و اندرکنشی فاکتورهای طراحی با استفاده از طرح‌های فاکتوریل قابل محاسبه می‌باشند. همچنین می‌توان فاکتورهایی که بر متغیر پاسخ اثر معنی‌دار داشته‌اند را مشخص کرد. در طرح فاکتوریل کامل همه اثرهای اصلی و اندرکنشی، بدون تشکیل گروه‌های هم اثر^۲، قابل محاسبه هستند (هاوکینگ و لی ۲۰۰۶)، مونتگمری^۳ (۲۰۱۳).

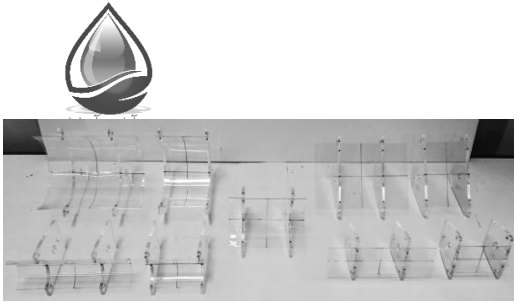
در این پژوهش از طرح فاکتوریل دو-سطحی بدون تکرار استفاده شده است، زیرا تحقیق هنوز در مرحله‌های ابتدایی و تعیین فاکتورهای اثرگذار^۴ می‌باشد و نیز شمار فاکتورهای طرحی به نسبت زیاد است. افزون بر این، از

^۱ Montgomery

^۲ Factor Screening

^۱ Run

^۲ Alias



شکل (۳): صفحه‌های شکست جت مورد آزمایش

از جنس پلکسی گلاس ساخته و مورد بررسی قرار گرفته شد؛ این صفحه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

فشار جریان برحسب ارتفاع آب در مجرای ورودی به منهول (h_o) و در پایین دست جت باکس اندازه گرفته می‌شد؛ همچنین، فشار جریان برحسب ارتفاع آب در پایین دست منهول (h_d) بر مبنای پیشنهاد گراناتا و همکاران (۲۰۱۱ و ۲۰۱۴a) در فاصله ۳/۴ متری از خروجی منهول، جایی که جریان متغیر تدریجی و هوای وارد شده به جریان تخلیه شده بود، توسط پیزومتر برداشت می‌شد. افزون بر این، از یک جریان سنج سیم داغ^۱ برای اندازه‌گیری سرعت هوا در مجرای خروجی استفاده شد. سنسور دستگاه ۱ سانتیمتر زیر سطح بالایی لوله خروجی و در فاصله ۴/۷ متری از خروجی منهول نصب شده بود.

پیش از ورود جریان به منهول دبی آن توسط یک دبی‌سنج الکترومغناطیس با دقت $1/s \pm 0.1$ اندازه‌گیری می‌شد. دبی جریان بین ۵/۲ تا ۴۸/۵ لیتر بر ثانیه در آزمایش‌های انجام شده تغییر می‌کرد و موجب تغییر عدد بر خورد (l) بین ۰/۴ تا ۱/۷ می‌شد.

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها ارائه شده است. پس از آن اثرهای فاکتورهای محاسبه و با استفاده از آنالیز واریانس^۲ اثرهای معنی‌دار مشخص شده‌اند. در نهایت نحوه اثر آن‌ها بر جریان هوا توسط نمودارهای دو بعدی، مدل رگرسیون و رویه پاسخ بررسی شده است.

جدول (۲): آزمایش‌های طرح شده بر مبنای طرح ۲^۵ فاکتوریل کامل به همراه ۴ تکرار در نقطه مرکزی. سطح‌های فاکتورهای طراحی در جدول ۱ تعریف شده‌اند

شماره آزمایش	نام آزمایش	فاکتورهای طراحی کد شده				
		E	D	C	B	A
۱	(۱)	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱
۲	a	-۱	-۱	-۱	-۱	+۱
۳	b	-۱	-۱	-۱	+۱	-۱
۴	ab	-۱	-۱	-۱	+۱	+۱
۵	c	-۱	-۱	+۱	-۱	-۱
۶	ac	-۱	-۱	+۱	-۱	+۱
۷	bc	-۱	-۱	+۱	+۱	-۱
۸	abc	-۱	-۱	+۱	+۱	+۱
۹	d	-۱	+۱	-۱	-۱	-۱
۱۰	ad	-۱	+۱	-۱	-۱	+۱
۱۱	bd	-۱	+۱	-۱	+۱	-۱
۱۲	abd	-۱	+۱	-۱	+۱	+۱
۱۳	cd	-۱	+۱	+۱	-۱	-۱
۱۴	acd	-۱	+۱	+۱	-۱	+۱
۱۵	bcd	-۱	+۱	+۱	+۱	-۱
۱۶	abcd	-۱	+۱	+۱	+۱	+۱
۱۷	e	+۱	-۱	-۱	-۱	-۱
۱۸	ae	+۱	-۱	-۱	-۱	+۱
۱۹	be	+۱	-۱	-۱	+۱	-۱
۲۰	abe	+۱	-۱	-۱	+۱	+۱
۲۱	ce	+۱	-۱	+۱	-۱	-۱
۲۲	ace	+۱	-۱	+۱	-۱	+۱
۲۳	bce	+۱	-۱	+۱	+۱	-۱
۲۴	abce	+۱	-۱	+۱	+۱	+۱
۲۵	de	+۱	+۱	-۱	-۱	-۱
۲۶	ade	+۱	+۱	-۱	-۱	+۱
۲۷	bde	+۱	+۱	-۱	+۱	-۱
۲۸	abde	+۱	+۱	-۱	+۱	+۱
۲۹	cde	+۱	+۱	+۱	-۱	-۱
۳۰	acde	+۱	+۱	+۱	-۱	+۱
۳۱	bcde	+۱	+۱	+۱	+۱	-۱
۳۲	abcde	+۱	+۱	+۱	+۱	+۱
۳۳	Rep. 1	.	.	.	.	.
۳۴	Rep. 2	.	.	.	.	.
۳۵	Rep. 3	.	.	.	.	.
۳۶	Rep. 4	.	.	.	.	.

^۲ Analysis of Variance (ANOVA)^۱ Hot-wire Anemometer



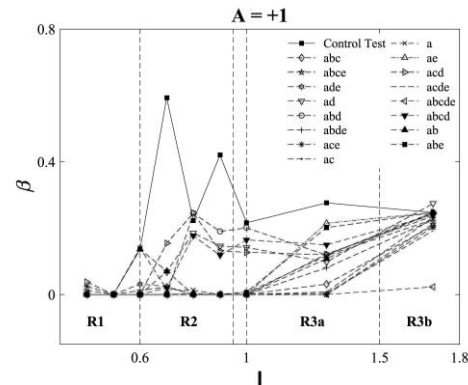
های پرشدگی ۰.۶٪ و ۰.۸٪ مربوط به آزمایش شاهد می-باشد. در این دو نسبت پرشدگی صفحه‌های شکست جت نیاز نسبی هوا را به‌طور موثری کاهش داده‌اند. روند تغییرات β در آزمایش شاهد مربوط به نسبت پرشدگی ۰.۸٪ همخوانی مناسبی با روند بیان شده توسط گراناتا و همکاران (۲۰۱۴b) دارد. در این آزمایش، مقدار Q_d/Q در رژیم R1 ناچیز می‌باشد و سپس مقدار حداکثر آن در رژیم R2 روی می‌دهد، همچنین یک اوج محلی ثانویه نیز در رژیم R3a مشاهده می‌شود.

آنالیز واریانس

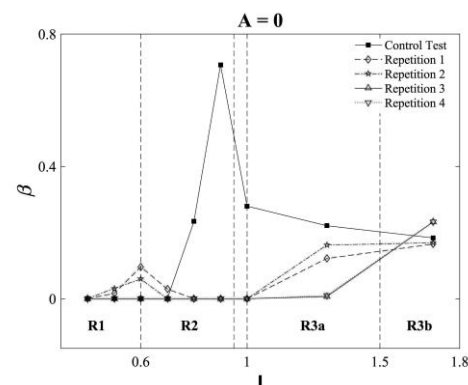
برای تعیین اثرهای اصلی و اندرکنشی فاکتورهای طراحی که به‌صورت معنی‌داری بر جریان هوا موثر بوده-اند از مقدارهای میانگین نیاز نسبی هوا در هر آزمایش (متغیر پاسخ) (رابطه ۴) استفاده شد. اثرهای معنی‌دار توسط آنالیز واریانس مدل کامل (یعنی مدلی که شامل همه اثرهای اصلی و اندرکنشی درجه اول است) مشخص شدند. بر این اساس، اثر نسبت انحنا صفحه شکست جت (فاکتور D)، اثر زاویه صفحه (فاکتور E)، و اندرکنش DE در سطح معنی‌داری ۰.۰۱، و همچنین اثر نسبت پرشدگی لوله ورودی (فاکتور A) و اندرکنش ADE در سطح ۰.۰۵ معنی‌دار بودند. در ادامه اثرهای معنی‌دار به-طور دقیق بررسی شده‌اند.

تاثیر فاکتورهای طراحی بر جریان هوا

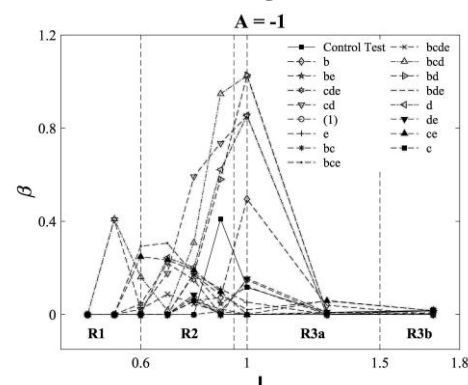
اثرهای اصلی معنی‌دار (فاکتورهای A، D، E) و نیز اثر اندرکنش معنی‌دار دو-فاکتوری (اندرکنش DE) در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل ۵-الف، فاکتور A در سطح +۱ موجب پاسخ کمتری شده است، بنابراین سطح بالای آن موجب بهبود کارکرد هیدرولیکی منهول ریزشی شده است. همچنین نسبت انحنا صفحه شکست جت (فاکتور D) و زاویه آن (فاکتور E) به ترتیب در سطح‌های -۱ و +۱ موجب کاهش نیاز نسبی هوا



الف) نسبت پرشدگی لوله ورودی برابر ۰.۸٪



ب) نسبت پرشدگی لوله ورودی برابر ۰.۶٪



ج) نسبت پرشدگی لوله ورودی برابر ۰.۴٪

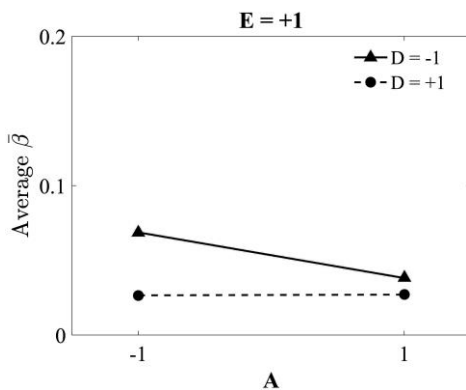
شکل (۴): نیاز نسبی هوا (β) نسبت به عدد برخورد (I)

برای الف) ($A = +1$)، ب) ($A = 0$)، ج) ($A = -1$)

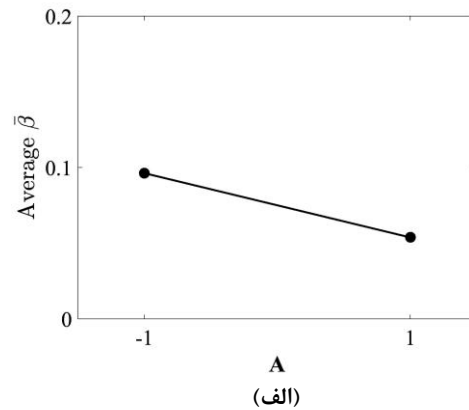
شکل ۴ تغییرات β نسبت به عدد برخورد در هر نسبت پرشدگی را برای آزمایش‌های طراحی شده و نیز آزمایش‌های شاهد (آزمایش‌های بدون صفحه شکست جت) نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، بیشترین مقدار β در رژیم R2 مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش نسبت پرشدگی لوله ورودی (فاکتور A) مقدار β حداکثر کاهش یافته است و مقدار حداکثر آن در نسبت-

شده‌اند. از آنجا که اثر اندرکنش DE معنی‌دار است، ممکن است نمودارهای اثرهای اصلی D و E (شکل‌های ۵-ب و ۵-ج) گمراه کننده باشند. در این شرایط سطح مناسب فاکتورها باید با توجه به نمودار اندرکنش انتخاب شود (شکل ۵-د) (Montgomery, 2013). همانند اثر اصلی فاکتور E، سطح بالای این فاکتور در نمودار اندرکنش نیز باعث کاهش نیاز نسبی هوا شده است. با این وجود، برخلاف نمودار اثر اصلی فاکتور D، سطح بالای این فاکتور در نمودار DE موجب کاهش پاسخ شده است. با این وجود نمودار اندرکنش نشان می‌دهد که در سطح +۱ فاکتور E تاثیر فاکتور D بر پاسخ ناچیز است.

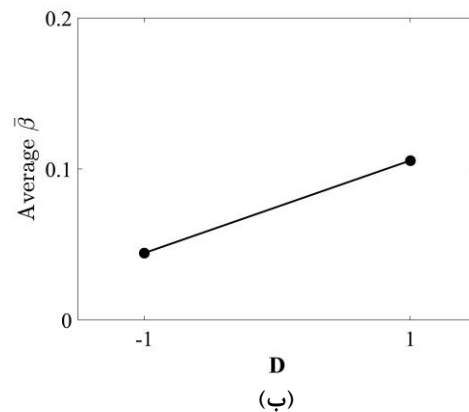
فاکتور E در هر دو نمودار اثر اصلی آن و اندرکنش DE در سطح +۱ موجب کاهش متغیر پاسخ شده است، لذا اثر اندرکنش معنی‌دار سه-فاکتور (اندرکنش ADE) در سطح بالای این فاکتور بررسی و در شکل ۶ نشان داده شده است. در مقایسه با نمودار دیگر اثرها، تاثیر ADE بر متغیر پاسخ کم می‌باشد. همانند نتایج حاصل از نمودارهای پیشین، در این نمودار نیز سطح بالای فاکتور A و D موجب کاهش میانگین نیاز نسبی هوا می‌شوند. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که اگر فاکتور A در سطح +۱ باشد فاکتور D اثر زیادی بر متغیر پاسخ ندارد.



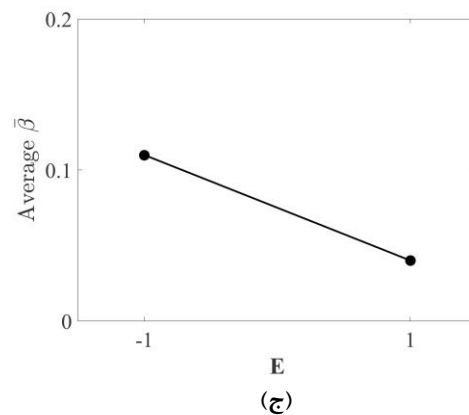
شکل (۶): اثر اندرکنش ADE روی میانگین نیاز نسبی هوا هنگامی فاکتور E در سطح +۱ است



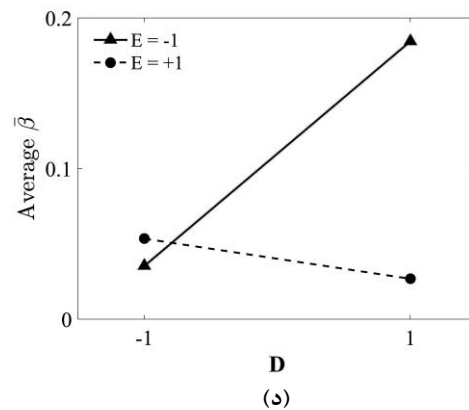
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۵): تاثیر اثرهای معنی‌دار اصلی و اندرکنشی بر میانگین نیاز نسبی هوا، اثر فاکتور A، (ب) اثر فاکتور D، (ج) اثر فاکتور E، و (د) اثر اندرکنش DE

جدول (۳): نتایج آنالیز واریانس مدل کاهش یافته برای جریان هوا در منهول ریزشی مجهز به صفحه شکست جت

P-Value	F ₀	درجه آزادی	مجموع مربعات	برآورد	منبع تغییرات
-	-	-	-	۰/۰۷۰۸	عرض از مبدا
۰/۰۰۰۱ >	۲۹/۷۷۶۸	۷	۰/۱۸۱۱	-	مدل
۰/۰۰۰۴	۱۶/۵۷۲۳	۱	۰/۰۱۴۴	-۰/۰۲۱۲	A
۰/۰۰۰۱ >	۳۴/۴۷۵۲	۱	۰/۰۳۰۰	۰/۰۳۰۶	D
۰/۰۰۰۱ >	۴۴/۸۴۶۴	۱	۰/۰۳۹۰	-۰/۰۳۴۹	E
۰/۰۰۲۶	۱۱/۲۴۳۶	۱	۰/۰۰۹۸	-۰/۰۱۷۵	AD
۰/۰۱۴۱	۶/۸۹۸۸	۱	۰/۰۰۶۰	۰/۰۱۳۷	AE
۰/۰۰۰۱ >	۷۰/۹۶۶۵	۱	۰/۰۶۱۷	-۰/۰۴۳۹	DE
۰/۰۰۰۱ >	۲۳/۴۳۴۵	۱	۰/۰۲۰۴	۰/۰۲۵۲	ADE
۰/۰۲۲۱	۵/۹۱۱۰	۱	۰/۰۰۵۱	-	Curvature
۰/۰۶۹۷	۶/۷۸۳۸	۲۴	۰/۰۲۳۰	-	LOF*
-	-	۳	۰/۰۰۰۴	-	PE**
-	-	۳۵	۰/۲۰۹۷	-	مجموع
-	-	۲۷	۰/۰۲۳۵	-	Residual

* Lack of Fit، نقص برازش

** Pure Error، خطای خالص

مدل رگرسیونی و رویه پاسخ

داده‌ها از مدل است، معنی‌دار نیست. این موارد نشان می‌دهند که تابع رگرسیون خطی با داده‌ها به خوبی همخوانی دارد (میرز^۳ و همکاران (۲۰۰۹)).

رابطه ۵ مدل رگرسیونی میانگین نیاز نسبی هوا را در حدود مورد بررسی فاکتورهای طراحی نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} \hat{b} = & 0.071 - 0.021x_1 + 0.031x_4 - \quad (5) \\ & 0.035x_5 - 0.017x_1x_4 + \\ & 0.014x_1x_5 - 0.044x_4x_5 + \\ & 0.025x_1x_4x_5 \end{aligned}$$

در این رابطه x_1 ، x_4 و x_5 به ترتیب بیانگر مقادیر کد شده فاکتورهای A، D، و E می‌باشند و بین -۱ و +۱ تغییر می‌کنند. این مدل ۸۶/۳۶٪ تغییرها در متغیر پاسخ را نمایندگی می‌کند و بنابراین ضریب تعیین آن (R^2) برابر ۰/۸۶۴ است. همچنین ضریب تعیین تعدیل شده مدل (R^2_{adj}) ۰/۸۳۳ است. تفاوت جزئی این دو ضریب

اثرهای معنی‌دار حاصل از آنالیز واریانس مدل کامل (یعنی اثرهای A، D، E، DE و ADE) به علاوه اندرکنش‌های AD و AE برای انجام آنالیز واریانس مدل کاهش یافته به کار برده شدند؛ دو اندرکنش اخیر برای حفظ سلسله مراتب به این آنالیز اضافه شده‌اند. نتایج آنالیز واریانس مدل کاهش یافته در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به این جدول، اثرهای اصلی و اندرکنشی در نظر گرفته شده در سطح ۱٪ معنی‌دار هستند، بجز اثر اندرکنش AE که در سطح ۵٪ معنی‌دار است. معنی‌دار بودن اثرها با استفاده از شاخص آماری p-value برآورد می‌شود. هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد تاثیر فاکتور مربوطه بیشتر است (رایان^۱ (۲۰۰۷)).

نتایج آنالیز واریانس نشان می‌دهند که تاثیر اثرهای درجه دوم^۲ بر متغیر پاسخ در سطح ۱٪ معنی‌دار نمی‌باشند. همچنین نقص برازش (LOF)، که بیانگر انحراف

^۳ Myers

^۱ Ryan

^۲ Curvature

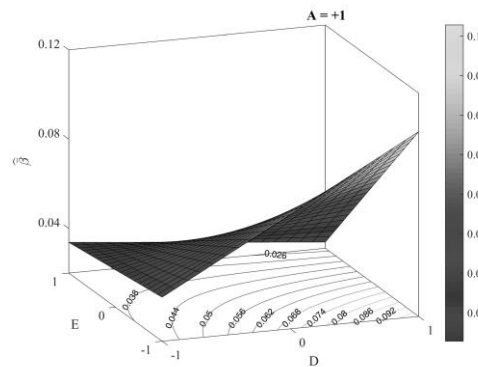


همکاران (۲۰۱۴a) برای بهبود کارکرد هیدرولیکی منپول‌های ریزشی توصیه شد.

در این پژوهش تاثیر مشخصات هندسی صفحه شکست جت و نسبت پرشدهگی لوله ورودی، بر ورود هوا به مجرای خروجی منپول ریزشی، بررسی شده است. آزمایش‌ها با استفاده از روش‌های آنالیز ابعادی و طرح آماری آزمایش‌ها (DoE)، بر مبنای طرح ۲^۵ فاکتوریل کامل به همراه ۴ تکرار در نقطه مرکزی طرح شدند. تجزیه و تحلیل آماری نتایج نشان داد که نسبت پرشدهگی لوله ورودی (فاکتور A)، نسبت انحناء صفحه شکست جت (فاکتور D)، و زاویه صفحه نسبت به راستای قائم (فاکتور E) بر متغیر پاسخ (میانگین نیاز نسبی هوا) اثر معنی‌دار داشته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که کارکرد هیدرولیکی منپول در سطح‌های بالای فاکتورهای A و E یعنی ۸۰٪ و ۷۰° بهبود یافته است. همچنین، سطح +۱ فاکتور D موجب بهبود کارکرد سازه می‌شد، اما در سطح +۱ فاکتورهای A و E اثر فاکتور D قابل توجه نمی‌باشد. بنابراین با توجه به ملاحظه‌های اجرایی سطح پایین فاکتور D، یعنی نسبت انحناء برابر صفر، توصیه می‌شود. همچنین نتایج نشان دادند که اثرهای اصلی و اندرکنشی نسبت طول و نسبت عرض صفحه شکست جت بر متغیر پاسخ، معنی‌دار نبودند. با این وجود، با توجه به بررسی‌های پیشین و ملاحظه‌های اجرایی، طول صفحه شکست جت برابر با قطر منپول توصیه می‌شود. افزون بر این، عرض آن با توجه به تحقیق انجام شده توسط گراناتا و همکاران (۲۰۱۴a) که در آن مقدار حداکثر عرض بررسی شده را برای صفحه شکست جت توصیه کردند، ۱/۴ برابر قطر لوله ورودی، پیشنهاد می‌شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از شرکت فاضلاب تهران که منابع مالی انجام این پژوهش را طی قرارداد پژوهشی شماره ۹۵/۱۰۰/۵۸۵ص تامین کرده است قدردانی می‌نمایند. همچنین لازم است از آقایان محمد محمودی‌راد و سجاد



شکل (۷) رویه پاسخ و خطوط کنتور (رابطه ۵) هنگامی فاکتور A در سطح +۱ است

احتمالاً بعلت در نظر گرفتن جمله‌های غیرمعنی‌دار برای حفظ سلسله مراتب می‌باشد.

شکل ۷ رویه پاسخ و خطوط کنتور را برای متغیر پاسخ ($\bar{\beta}$) نشان می‌دهد. در این شکل تغییرات میانگین نیاز نسبی هوا برحسب فاکتورهای D و E، در حالی که فاکتور A در سطح بهینه (سطح +۱) است، نشان داده شده است. به علت وجود جمله‌های اندرکنشی در مدل رگرسیونی، رویه پاسخ و خطوط کنتور دارای انحناء هستند. با توجه به این شکل، فاکتورهای D و E در سطح +۱ موجب کاهش متغیر پاسخ و بهبود کارکرد هیدرولیکی منپول ریزشی شده‌اند. هرچند که تاثیر نسبت انحناء صفحه شکست جت (فاکتور D) بر نتایج در سطح +۱ زاویه صفحه (فاکتور E) منفی و ناچیز است، ولی هنگامی فاکتور E در سطح -۱ است اثر آن مثبت و زیاد می‌باشد.

نتیجه گیری

منپول‌های ریزشی به‌طور گسترده در ناحیه‌های پرشیب شهری جهت استفاده در سیستم‌های فاضلاب و جمع‌آوری روان‌آب سطحی کاربرد دارند. این سازه‌ها اغلب به‌منظور ایجاد استهلاک انرژی و نیز مهار سرعت جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند. ورود زیاد هوا به مجرای خروجی آن‌ها در رژیم جریان R2 می‌تواند موجب بروز مشکلات هیدرولیکی در سیستم پایین دست شود. از این‌رو صفحه شکست جت مسطح توسط گراناتا و



حیدری که در ساخت مدل و انجام آزمایش‌ها مشارکت داشتند تشکر شود.

منابع

- Camino, G. Adriana, David Z. Zhu, and Nallamuthu Rajaratnam. 2011. 'Hydraulics of Stacked Drop Manholes', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137: 537–52.
- Camino, G. Adriana, David Z. Zhu, Nallamuthu Rajaratnam, and Manas Shome. 2009. 'Use of a Stacked Drop Manhole for Energy Dissipation: a Case Study in Edmonton, Alberta', *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36: 1037-50.
- Carvalho, Rita F. 2012. 'Hydraulic Characteristics of a Drop Square Manhole with a Downstream Control Gate', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138: 569–76.
- Chanson, H. 2004. 'Hydraulics of Rectangular Dropshafts', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130: 523-29.
- Christodoulou, George C. 1991. 'Drop Manholes in Supercritical Pipelines', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117: 37-47.
- Gargano, Rudy, and Willi H. Hager. 2002. 'Supercritical Flow across Sewer Manholes', *Journal of Hydraulic Engineering*, 128: 1014-17.
- Granata, F., G. de Marinis, R. Gargano, and W. H. Hager. 2011. 'Hydraulics of Circular Drop Manholes', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 137: 102-11.
- Granata, Francesco. 2016. 'Dropshaft Cascades in Urban Drainage Systems', *Water Science & Technology*, 73: 2052-59.
- Granata, Francesco, Giovanni de Marinis, and Rudy Gargano. 2014b. 'Air-water flows in circular drop manholes', *Urban Water Journal*, 12: 477-87.
- Granata, Francesco, Giovanni de Marinis, and Rudy Gargano. 2014a. 'Flow-Improving Element in Circular Drop Manholes', *Journal of Hydraulic Research*, 52: 347-355.
- Hager, Willi H. 2010. *Wastewater Hydraulics: Theory and Practice* (Springer).
- Hawkins, D., and Leonard M. Lye. 2006. "Use of DOE methodology for Investigating Conditions that Influence the Tension in Marine Risers for FPSO Ships." In *First International Structural Specialty Conference*. Calgary, Alberta, Canada.
- Islam, Mohammed F., and L.M. Lye. 2009. 'Combined Use of Dimensional Analysis and Modern Experimental Design Methodologies in Hydrodynamics Experiments', *Ocean Engineering*, 36: 237–47.



Ma ,Yiyi, David Z. Zhu, Nallamuthu Rajaratnam, and Bert van Duin. 2017. 'Energy Dissipation in Circular Drop Manholes', Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 143: 040170471-0401704710.

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

Myers, Raymond H., Douglas C. Montgomery, and Christine M. Anderson-Cook. 2009. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments (John Wiley & Sons).

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

Sangsefidi, Yousef, Mojtaba Mehraein, Masoud Ghodsian, and Mohammad Reza Motalebizadeh. 2017. 'Evaluation and Analysis of Flow over Arced Weirs Using Traditional and Response Surface Methodologies', Journal of Hydraulic Engineering, 143: 040170481-0401704811.

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

Zheng, Feidong, Yun Li, Jianjun Zhao, and Jianfeng An. 2017. 'Energy Dissipation in Circular Drop Manholes under Different Outflow Conditions', water, 9.



Study of jet-breaker geometric characteristic effects on drop manhole air demand

Seyedreza Hasheminejad^{*}, Mohammad-Javad Khanjani[†], Gholam-Abbas Barani[‡]

Abstract

Drop manholes prevent excessive flow velocity and provide energy dissipation in steep urban sewer and drainage systems. Poor hydraulic performance of them under Regime R2 was improved by jet-breakers. However, they should be still properly sized to efficiently enhance drop manhole operation. In this study, effects of jet-breaker length, width, sagitta, and angel, as well as inlet pipe filling ratio on drop manhole performance, were investigated experimentally. Dimensional analysis and two-level factorial design were utilized to design experiments and analyze drop manhole air demand. Statistical analysis of the results revealed both significant design factors and regression models. Analysis of result determined the proper levels of significant design factors as 80% filling ratio of the inlet pipe, the jet-breaker angel of 70°, and the jet-breaker sagitta equal to zero. Nevertheless, neither length nor width of jet-breaker had significant effects.

Keywords: Air demand, drop manhole, energy dissipation, factorial design, jet-breaker, statistical design of experiments.

[‡] Ph.D., Postdoctoral Fellow, Department of Hydraulic Engineering, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China, srhn61@gmail.com

[†] Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, mkhanjani@uk.ac.ir

^{*} Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, gab@mail.uk.ac.ir