

بررسی آزمایشگاهی جریان کفزا در شیب‌شکن ورتکس

سیدرضا هاشمی نژاد^{۱*}، عاطفه مقبلی^۲، سعیده حبیبی^۳، محمدجواد خانجانی^۴

۱- پژوهشگر پسا دکتري، بخش مهندسی هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ژجیانگ، هانگژو،

۲- کارشناس ارشد سازدهای آبی، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

۳- کارشناس ارشد مهندسی آب، بخش مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی کرمان

۴- استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

*srhn61@gmail.com

تاریخ دریافت ۹۷/۱۰/۰۵ تاریخ پذیرش ۹۸/۱۰/۱۰

چکیده

از شیب‌شکن ورتکس برای انتقال فاضلاب به تراز پایین‌تر در نواحی پرشیب استفاده می‌شود. این سازه معمولاً در اختلاف ترازهای بیش از پنج متر بکار برده می‌شود. از آنجا که اختلاط آب و هوا در سازه ورتکس نسبتاً زیاد است، وجود مواد شوینده کفزا در جریان فاضلاب می‌تواند موجب تشکیل کف در بخش‌هایی از این سازه شود. این پدیده می‌تواند بر بده هوای عبوری از سازه اثرگذار باشد و موجب اختلال در کارکرد هیدرولیکی آن شود، زیرا خروجی هوای سازه در اثر کف می‌تواند مسدود شود. به علاوه، کف ایجاد شده ممکن است به سطح زمین برسد و موجب ایجاد مسائل بهداشتی شود. در این پژوهش با استفاده از روش طرح آماری آزمایش‌ها تاثیر جریان کفزا بر بده هوای خروجی از سازه ورتکس، توسط مدل فیزیکی مطالعه شده است. تاثیر عدد غلظت (نسبت جرم ماده شوینده در واحد حجم آب به وزن مخصوص آب)، نوع ماده کفزا و عدد فرود بر متغیر پاسخ (نسبت دبی هوا به دبی جریان) در قالب طرح 3^3 فاکتوریل کامل و با انجام 63 آزمایش بررسی شد. برای این منظور مدل $1:20$ سازه ورتکس فاضلاب روی شرقی تهران در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید کرمان، ساخته شد عدد غلظت در سه سطح 10^{-5} ، 10^{-4} ، 10^{-3} و 10^{-2} ، سه نوع ماده شوینده کفزا به نام‌های ریکا، پرل، و اکتیو، و سه عدد فرود 0.23 ، 0.46 ، و 0.69 بررسی شدند. آنالیز نتایج نشان داد که تاثیر عوامل بررسی شده بر بده هوا از نظر آماری معنی‌دار بوده است و با افزایش عدد غلظت و عدد فرود، بده نسبی هوای خروجی کاهش یافته است. آنالیز واریانس نتایج مشخص کرد که آثار اصلی عدد غلظت و عدد فرود و همچنین آثار اندرکنشی عدد غلظت با نوع ماده کفزا و سه فاکتور با هم از نظر آماری در سطح 1% معنی‌دار بوده است. همچنین مشاهده شد که اثر نوع ماده کفزا بر نتایج بطور قابل توجهی کم بوده است. به علاوه، برای پیش‌بینی جریان هوا در ورتکس‌های مشابه تحت جریان کفزا یک مدل ریاضی بدون بعد که نشان دهنده 65% تغییرات در نتایج بود ارائه شد. مدل معرفی شده شامل سه معادله است که هریک مربوط به یک نوع ماده کفزا است. همچنین سه آزمایش در سه تکرار برای جریان

غیرکفزا به عنوان آزمایش‌های شاهد تحت اعداد فرود قبلی انجام شد. براساس نتایج بدست آمده از این آزمایش‌ها یک مدل خطی بدون بعد ارائه شد که از آن می‌توان برای پیشبینی جریان هوا در سازه‌های ورتکس مشابه تحت جریان غیرکفزا استفاده کرد. به علاوه، با مقایسه نتایج مربوط به جریان کفزا و غیرکفزا مشاهده شد که تشکیل کف در این سازه موجب افزایش دبی هوا تا ۸۲٪ و در شرایطی موجب کاهش آن تا ۶۴٪ شده است. همچنین نتایج نشان داد که جریان کفزا در اعداد غلظت کمتر از 1×10^{-5} و اعداد فرود بیشتر از ۰/۰۴۷ همواره موجب افزایش جریان هوا شده است.

واژگان کلیدی: جریان کفزا، جریان هوا، شیب‌شکن ورتکس، طرح آزمایش‌ها (DoE)، مدل فیزیکی.

۱. مقدمه

همچنین کف ممکن است از طریق مجرای تخلیه هوا به سطح

زمین رسیده و موجب مشکلات بهداشتی شود.

مواد کفزا و پایدار کننده کف مانند: آلکانول آمیدها، بتائین‌ها، آمیدها و آمیت اکسیدها که از طریق مواد شوینده خانگی وارد جریان فاضلاب می‌شوند، سبب تولید و تثبیت کف در مسیر فاضلاب می‌شوند [1]. مطالعات زیادی در مورد کف و مواد کفزا در حوزه‌های ویژگی‌های مکانیکی کف، چگونگی تشکیل کف و آثار کف در تصفیه‌خانه‌ها توسط پژوهشگران مختلفی

سازه شیب‌شکن ورتکس در سیستم جمع‌آوری و انتقال فاضلاب در محل تغییرات شدید ارتفاع بکار برده می‌شود. در بخش‌هایی از این سازه جریان آب به صورت سقوط آزاد، بسیار متلاطم، و دوفازی (آب و هوا) است. بنابراین در صورت وجود مواد کفزا در جریان عبوری احتمال تشکیل کف در این سازه بسیار زیاد است. به گاز پراکنده در یک مایع، که حاوی برخی ناخالصی‌ها است، کف گفته می‌شود. وجود کف در سیستم‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب ممکن است منجر به بروز مشکلات بهداشتی، زیست محیطی، عملیاتی و هیدرولیکی شود [1].

سازه ورتکس از سه بخش اصلی ورودی، شفت قائم و مستهلک کننده انرژی تشکیل شده است [2]. شکل ۱ مدل آزمایشگاهی این سازه را به همراه معرفی بخش‌های اصلی آن نشان می‌دهد. در بخش ورودی جریان مستقیم برای ورود به شفت قائم به صورت چرخشی در می‌آید. در شفت قائم این سازه سرعت جریان زیاد است و در نواحی از آن جریان به صورت سقوط آزاد است. در مستهلک کننده انرژی هوای وارد شده به جریان تخلیه شده، و تلاطم زیاد موجب افت انرژی جریان می‌شود. در تمامی بخش‌های این سازه شرایطی وجود دارد که موجب می‌شوند هوا به‌طور فزاینده‌ای با مایع مخلوط شود و یا از آن خارج شود [3]. از این رو در صورت وجود مواد کفزا در جریان فاضلاب شرایط برای تشکیل کف در این سازه کاملاً مهیا است. کف می‌تواند فضای داخل مستهلک کننده انرژی را اشغال کند و با مسدود کردن مجرای خروج هوا مانع از جریان هوا در سازه شود. این اختلال می‌تواند موجب بروز اشکالاتی در هیدرولیک سازه و عبور جریان آب از آن شود.

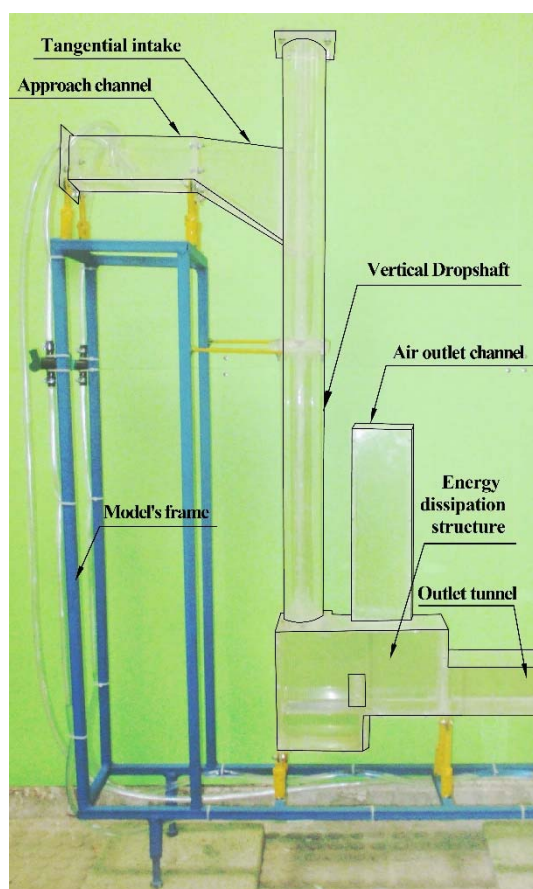


Fig. 1. Main parts of drop vortex, 1:20 model

مانند Joseph [4]، Rosso and Stenstrom [1] و Pal, et al. [5] انجام شده است.

میزان انتقال هوا به پایین دست شفت قائم بستگی به تعداد چرخش جریان در آن دارد، به طوریکه غلظت هوا در جریان خروجی از آن با افزایش تعداد چرخش کاهش می یابد [6]. بر طبق اصول طراحی همواره لازم است جریان هوا در سازه ورتکس و به ویژه در شفت قائم برقرار باشد. با افزایش بده جریان سطح مقطع هسته هوا در شفت قائم کاهش می یابد، پس برای عبور آزادانه هوا و اطمینان از کارکرد مناسب ورتکس باید نسبت سطح مقطع هسته هوا به سطح مقطع شفت (λ) به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود. براساس توصیه Yu and Lee [2] در بده طراحی λ باید بزرگتر یا مساوی ۰/۲۵ باشد. بخش زیادی از هوای وارد شده به جریان در مستهلک کننده انرژی تخلیه می گردد و مابقی به تونل خروجی وارد می شود. بده نسبی هوای ورودی به تونل خروجی با افزایش بده جریان کاهش می یابد [3]. با این وجود ورود هوا به سیستم فاضلاب پایین دست می تواند موجب مشکلات هیدرولیکی متعددی شود و باید به حداقل برسد [7]. کارکرد هیدرولیکی سازه ورتکس و جریان هوا در آن توسط پژوهشگران بسیاری مطالعه شده است، مانند: Jain [6]، Liu and Sun, Zhu, Zhao [3] و Lee و Yu [2].

بررسی مطالعات پیشین حاکی از این می باشد که تاکنون پژوهشی در خصوص تاثیر کف و مواد کفزا بر جریان هوا در سازه ورتکس انجام نشده است. از طرف دیگر اهمیت جریان هوا در این سازه و وجود مواد کفزا در جریان عبوری از آن نشان دهنده لزوم انجام پژوهشهای بیشتر در این حوزه است. پس در این پژوهش تاثیر جریان کفزا بر بده هوای خروجی از این سازه، توسط مدل فیزیکی مطالعه شده است. برای این منظور با استفاده از روش های آنالیز ابعادی و طرح آماری آزمایش ها (DoE) ۶۳ آزمایش طراحی، انجام و تحلیل شد. عوامل مورد بررسی عبارت بودند از: بده جریان (عدد فرود)، غلظت ماده کفزا (عدد غلظت) و نوع ماده کفزا، که هریک

در سه سطح بررسی شدند. نتایج بدست آمده با روش های آنالیز واریانس^۲ (ANOVA) و تحلیل رگرسیون^۳، توسط نرم افزار JMP [8] تحلیل و تاثیر هریک از عوامل مورد بررسی بر جریان هوا در شیب شکن ورتکس تعیین شد. همچنین با مقایسه جریان هوا در سازه در شرایط جریان کفزا و غیرکفزا میزان تاثیر کف بر بده هوای خروجی برآورد شد.

۲. مواد و روش ها

جریان هوا در سازه ورتکس از اهمیت ویژه ای برخوردار است و شکل کف می تواند بر آن تاثیر بگذارد. عوامل مختلفی بر تشکیل کف و نیز جریان هوا در سازه ورتکس موثر هستند. در این پژوهش تاثیر برخی از این عوامل توسط مدل فیزیکی سازه و روش های آنالیز ابعادی و طرح آزمایش ها (DoE) بررسی شده است. در ادامه در خصوص مدل آزمایشگاهی شیب شکن ورتکس، جریان هوا در سازه و آنالیز ابعادی آن، و طرح آزمایش ها مطالبی ارائه شده است.

۲-۱- مدل فیزیکی

این پژوهش در آزمایشگاه سازه های هیدرولیکی بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان و روی مدل آزمایشگاهی شیب شکن ورتکس فاضلاب روی شرقی تهران انجام شده است شکل (۱). برای بررسی تاثیر انواع متفاوت مواد کفزا و نیز غلظت های مختلف آن ها بر هیدرولیک سازه ورتکس لازم است مدل آزمایشگاهی آن دارای این ویژگی ها باشد: (۱) غلظت ماده کفزا در طول هر آزمایش ثابت باشد، (۲) پس از هر آزمایش آب بکار رفته در مدل با آب تمیز جایگزین شود، و (۳) امکان شستشوی کامل مدل بعد از انجام هر آزمایش مهیا باشد؛ پس برای حصول این شرایط مدل سازه با مقیاس ۱:۲۰ ساخته شد. همچنین به منظور ایجاد امکان مشاهده جریان آب، هوا و کف از ورق پلکسی گلاس با ضخامت ۵ میلی متر برای ساخت مدل استفاده

شکل ۲. پلان، نمای روبرو و نمای بالای مدل ۱:۲۰ سازه ورتکس به همراه ابعاد برحسب سانتیمتر. اجزاء تشکیل دهنده: (۱) کانال ورودی اولیه، (۲) ورودی مماسی، (۳) شفت قائم، (۴) چاهک، (۵) مجرای تخلیه هوا، (۶) بافل، (۷) تونل خروجی، (۸) مخزن آب، (۹) پمپ، (۱۰) لوله انتقال آب، (۱۱) اسکلت نگهدارنده، (۱۲) پایه‌های قابل تنظیم، (۱۳) شیر تنظیم جریان، (۱۴) سرعت‌سنج هوای سیم داغ، (۱۵) توری آرام‌کننده جریان و (۱۶) دریچه خروجی قابل تنظیم

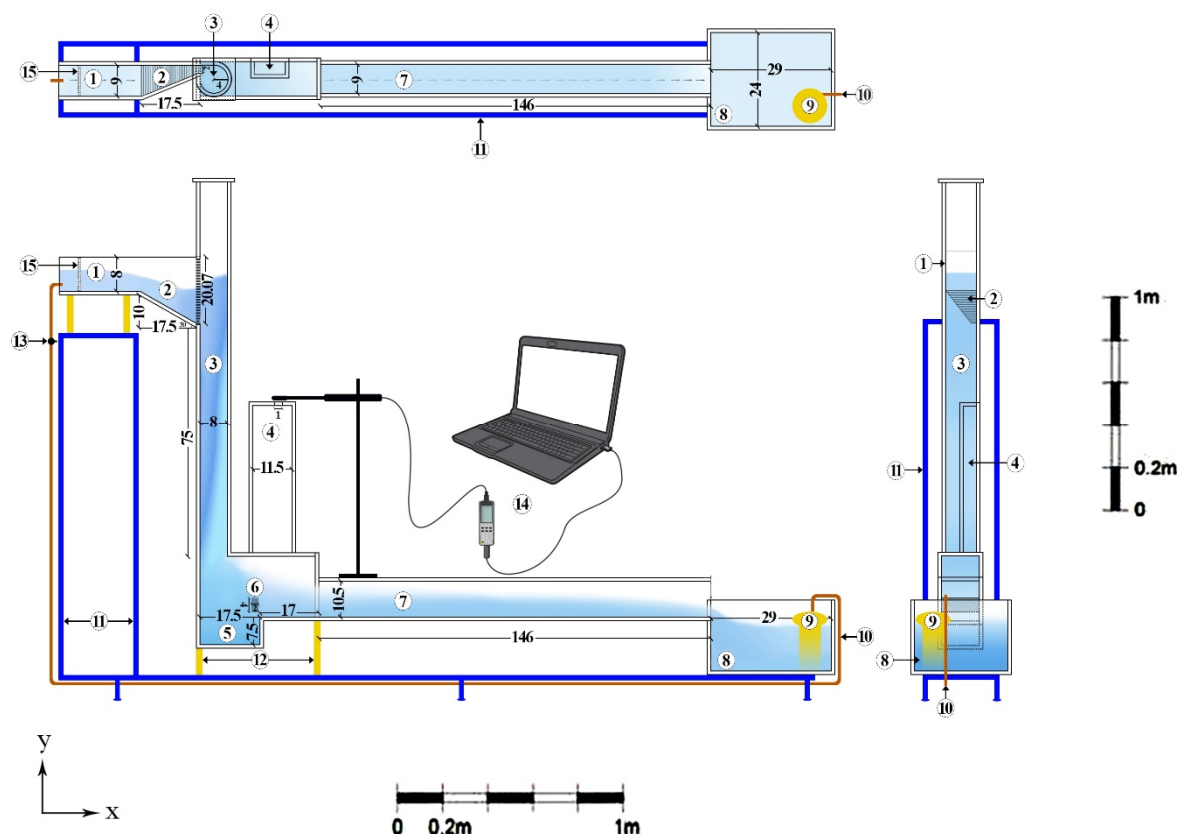


Fig. 2. Plan, front view and up view of drop vortex 1:20 model, all dimensions are in centimeter. Components: 1) Inlet Channel, 2) Tangential Inlet, 3) Vertical Shaft, 4) Air Vent, 5) Sump, 6) Baffle, 7) Outlet Tunnel, 8) Water Storage, 9) Pump, 10) Pipe, 11) Frame, 12) Adjusting Legs, 13) Valve, 14) Hot-Wire Anemometer, 15) Flowing Soothing, 16) Gate

و مارپیچی (۳) مناسب‌تر است (شکل ۳) [۲]. پس از این بخش جریان به صورت چرخشی و با الگوی حلقوی پایدار در شفت قائم پایین می‌رود. در این بخش از سازه، به علت سرعت نسبتاً زیاد جریان، هوا وارد آب می‌شود و همچنین همراه با جریان به سمت پایین و داخل مستهلک‌کننده انرژی کشیده می‌شود. در مرکز شفت قائم، هسته مرکزی هوا با فشار کمی بیشتر از فشار اتمسفر تشکیل می‌شود. برای جلوگیری از کاهش ظرفیت

شد. ابعاد و اجزاء تشکیل دهنده مدل آزمایشگاهی در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

جریان ابتدا وارد بخش ورودی شیب‌شکن ورتکس می‌شود؛ در این بخش امکان تشکیل پرش هیدرولیکی و ورود هوا به جریان وجود دارد. ورودی مدل از نوع مماسی است؛ این نوع ورودی با تنگ شدن دیواره‌های کانال ورودی اولیه و افزایش شیب آن در نزدیکی محل اتصال به شفت قائم ساخته می‌شود. این نوع ورودی نسبت به دیگر انواع ورودی (دایره‌ای ۲

داخلی ۱ سانتی متر به کانال ورودی اولیه مدل منتقل شده و پس از عبور از سازه ورتکس دوباره وارد مخزن ذخیره شد.

۲-۲- جریان هوا در سازه ورتکس

در شیب شکن ورتکس برای انتقال جریان از تراز بالاتر به تراز پایین تر لازم است ابتدا جریان توسط بخش ورودی به صورت چرخشی درآید و سپس وارد شفت قائم شود. نوع ورودی بر کاهش هوای وارد شده به سازه و نیز میزان اتلاف انرژی جریان در شفت قائم موثر است. ورودی مماسی دارای طرحی ساده است و کمترین مقدار هوا را به داخل شفت قائم منتقل می کند. در شفت قائم به دلیل تشکیل هسته هوای مرکزی، فشار تقریباً هیدرواستاتیک است و آب به صورت چسبیده به دیواره حرکت می کند؛ همزمان هوا در مرکز شفت با فشاری کمی بالاتر از فشار اتمسفر در جریان است. در این بخش از سازه جریان دو فازی است و دارای الگوی حلقوی پایدار است. نهایتاً لازم است هوای وارد شده به سازه و به جریان در بخش مستهلک کننده انرژی خارج شود؛ همچنین در این بخش جریان عمودی باید

شکل ۴. معرفی متغیرهای موثر بر بده هوای خروجی از سازه ورتکس (Q_a)

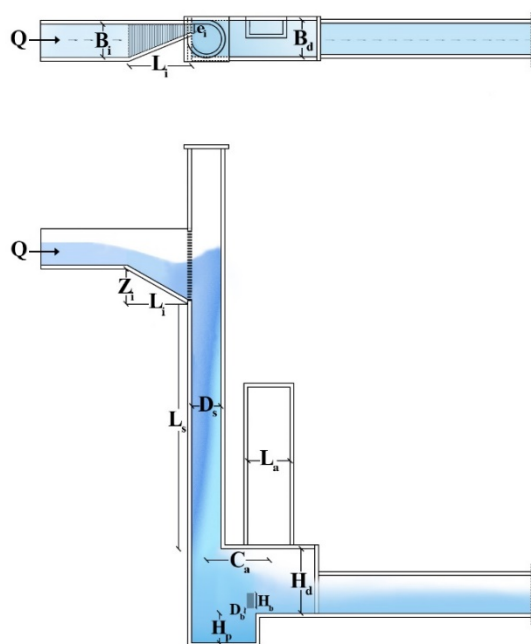


Fig. 4. Effective variables on drop vortex out flow air discharge (Q_a)

۲ STANDARD

شکل ۳. مقطع و پلان ورودی مماسی: ۱) کانال ورودی اولیه، ۲) ورودی مماسی، ۳) شفت قائم

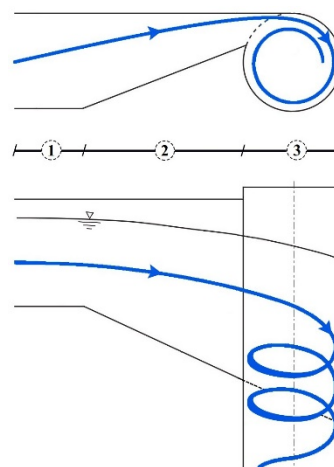


Fig. 3. Plan and section of tangential inlet: 1) Inlet Channel, 2) Tangential Inlet, 3) Vertical Shaft

تخلیه شفت لازم است پایداری هسته هوا در آن حفظ شود؛ برای این منظور باید هوا به اندازه کافی در شفت جریان داشته باشد [3]. در پایان لازم است هوای وارد شده به جریان در ورودی و شفت قائم، در مستهلک کننده انرژی و از طریق مجرای تخلیه هوا از سازه خارج شود [2].

مجرای تخلیه هوا روی مستهلک کننده انرژی قرار دارد. این مجرا در مدل اصلی تا سطح زمین ادامه یافته است و وظیفه آن انتقال هوای خارج شده از جریان به بیرون از سازه است. در مدل آزمایشگاهی، سقف مجرای خروج هوا توسط صفحه ای مسدود شد و در آن صفحه مجرای به قطر ۱ سانتی متر برای خروج هوا و اندازه گیری سرعت آن تعبیه شد. برای اندازه گیری بده هوای خروجی از سرعت سنج هوای سیم داغ (ساخت شرکت استاندارد، مدل ۳۸۸۰) استفاده شد؛ دقت این وسیله ۰/۰۰۱ متر بر ثانیه است

سیستم چرخش آب در مدل شامل مخزن ذخیره آب، سه عدد پمپ، لوله های انتقال و شیرهای تنظیم بده جریان بود (شکل ۲). آب از مخزن ذخیره توسط پمپ ها و سه لوله با قطر

۱. Hot-Wire Anemometer

$$\frac{Q}{L^2 \sqrt{gL}}, \frac{Q\sqrt{L}}{L^2 \sqrt{\sigma}}, \frac{Q_a}{Q}, \frac{L_s}{D_s}, \frac{D_s}{B_i}, \frac{e_i}{B_i}, \frac{Z_i}{L_i}, \frac{Z_i}{D_s}, \frac{C_a}{D_s} \quad (3)$$

در این رابطه، عدد بدون بعد اول از سمت چپ عدد فرود (Fr) و عدد بدون بعد دوم عدد وبر (We) است؛ در آن‌ها L بیانگر شاخص طول است. دیگر متغیرهای رابطه (۳) در رابطه (۱) و شکل ۴ معرفی شده‌اند.

در این مطالعه آنالیز ابعادی با روش ماتریسی [9] و توسط کد تهیه شده در نرم افزار متلب ۱ انجام شد. این آنالیز منجر به شناسایی ۹۷ مجموعه مستقل از اعداد بدون بعد شد و از میان آن‌ها مجموعه‌ای که دارای اعداد بدون بعد کاربردی‌تری بود انتخاب شد. با توجه به نتیجه بدست آمده از آنالیز ابعادی رابطه (۲) را می‌توان به صورت رابطه بدون بعد (۴) ارائه کرد.

$$\psi_1 \left(\frac{Z_i}{L_i}, \frac{Z_i}{D_s}, \frac{C_a}{D_s}, \frac{H_d}{B_d}, \frac{H_p}{B_d}, \frac{L_a}{B_d}, \frac{H_b}{B_d}, \frac{D_b}{B_d} \right) \quad (4)$$

در سمت چپ این رابطه، عدد بدون بعد اول عدد فرود و عدد دوم صورتی از عدد وبر بر اساس c است. عدد سوم، غلظت بدون بعد یا عدد غلظت (C) است.

۳-۱- طراحی آزمایش‌ها

از آنجا که هدف از این پژوهش بررسی تاثیر جریان کفزا بر جریان هوا در شیب‌شکن ورتکس بوده است، تنها تاثیر عدد غلظت (C)، عدد فرود (Fr) و نوع ماده شوینده کفزا (D) بر نیاز نسبی هوا (Q_a/Q) بررسی شده است. به این منظور از روش طرح آماری آزمایش‌ها برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شد. این روش شامل تکنیک‌هایی است که با اعمال تغییرات هدفمند در عوامل مورد مطالعه، تاثیر آن‌ها را بر متغیر وابسته مشخص می‌سازند [11]. هریک از عوامل مورد مطالعه در سه سطح بررسی شدند و سطوح آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. آزمایش‌ها بر اساس طرح

به جریان افقی تبدیل شود و این تغییر جهت با تلاطم بسیار و آشفته‌گی زیاد همراه است. با توجه به مطالعات انجام شده روی سازه ورتکس، بده هوای خروجی از مجرای تخلیه هوا (Q_a) را می‌توان به صورت تابعی از متغیرهای موثر بر آن، مطابق رابطه (۱) بیان نمود [2, 3].

$$Q_a = \psi_1 \left(H_p, B_b, D_b, L_a, C_a, Q, \sigma, \rho, g \right) \quad (1)$$

در این رابطه، c جرم ماده کفزا در واحد حجم آب، σ کشش سطحی سیال، ρ دانسیته سیال و g شتاب جاذبه است. دیگر متغیرها با توجه به شکل ۴ عبارتند از: B_i عرض کانال ورودی، L_i طول ورودی مماسی، Z_i تغییر ارتفاع ورودی مماسی، e_i عرض محل اتصال ورودی مماسی به شفت قائم، D_s قطر شفت قائم، L_s ارتفاع شفت قائم، B_d عرض مستهلک کننده انرژی، H_d ارتفاع مستهلک کننده انرژی، H_p عمق حوضچه، H_b ارتفاع بافل، D_b فاصله بافل از کف، L_a طول مجرای خروج هوا، C_a فاصله مرکز تا مرکز مجرای تخلیه هوا و شفت قائم، و Q بده جریان.

در آنالیز ابعادی تنها یک متغیر وابسته می‌تواند وجود داشته باشد و دیگر متغیرها باید از هم مستقل باشند [9]. با این وجود، در رابطه (۱) علاوه بر متغیر وابسته اصلی (یعنی Q_a)، دو متغیر کشش سطحی (σ) و جرم ماده کفزا در واحد حجم آب (c) نیز به هم وابسته هستند. پس تنها یکی از آن‌ها می‌تواند در آنالیز ابعادی وجود داشته باشد. از آنجا که در این پژوهش طرح آزمایش‌ها براساس جرم ماده کفزا انجام شده است، تنها جرم ماده کفزا در واحد حجم آب به آنالیز ابعادی وارد می‌شود و رابطه (۱) به صورت رابطه (۲) اصلاح می‌شود.

$$Q_a = \psi_2 \left(H_p, B_b, D_b, L_a, C_a, Q, \rho, g \right) \quad (2)$$

با توجه به پژوهش‌های انجام شده روی شیب شکن ورتکس، اعداد بدون بعد بیان شده در رابطه (۳) برای مطالعه جریان در این سازه پرکاربرد بوده‌اند [2, 3, 10].

جدول ۲. آنالیز واریانس نتایج

Source of variation	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	P-Value
Model	13	0.0533	0.0041	6.9989	<0.0001*
Error	40	0.0234	0.0006		
C. Total	53	0.0767			

* Meaningful at 1% Significant level

Table 2. Results analysis of variance

۳ فاکتوریل کامل و در دو تکرار طرح شدند (۵۴ آزمایش). همچنین سه آزمایش در سطوح مختلف عدد فرود و در سه تکرار برای جریان غیرکفزا (به عنوان آزمایش‌های شاهد) انجام شد. در مجموع ۶۳ آزمایش و به صورت کاملاً تصادفی انجام شد و در طی اجرای آن‌ها دیگر اعداد بدون بعد رابطه (۴) ثابت بودند؛ با این وجود، عدد وبر با تغییر عدد فرود و عدد غلظت تغییر می‌کرد.

۴. نتایج و بحث

مدل وارد می‌شد و با جرم معینی از مواد شوینده کفزا (مطابق با طرح آزمایش‌ها) مخلوط می‌شود. پس از شروع به کار سیستم، سرعت هوای خروجی از مجرای تخلیه هوا توسط سرعت‌سنج هوای سیم داغ به مدت ۱۰ دقیقه برداشت می‌شد و مقدار میانگین آن به عنوان نتیجه آزمایش منظور می‌شود. در چگونگی انجام آزمایش‌ها و نیز روند تشکیل و حرکت کف در سازه نشان داده شده است.

۴-۱- آنالیز واریانس

به منظور تعیین میزان تاثیر هریک از عوامل مورد بررسی، یعنی نوع ماده شوینده کفزا (D)، عدد فرود (Fr) و عدد غلظت (C)، بر متغیر وابسته (Q_a/Q) از آنالیز واریانس استفاده شد. نتایج بدست آمده از این آنالیز در جدول (۲) ارائه شده‌اند. آنالیز واریانس نشان می‌دهد که نتایج در سطح کمتر از یک درصد (۱٪) معنی دار است. بنابراین عوامل مورد بررسی به طور معنی - داری موجب تغییر متغیر پاسخ (Q_a/Q) شده‌اند. چگونگی اثر هریک از این عوامل بر جریان هوا در ادامه بطور دقیق توسط

جدول ۳. تحلیل رگرسیون نتایج

Source of variation	DoF**	Sum of Squares	F Ratio	P-Value
D	2	0.0009	0.7309	0.4878
C	1	0.0180	30.7479	<0.0001*
Fr	1	0.0158	26.9038	<0.0001*
D×C	2	0.0069	5.9063	0.0057*
D×Fr	2	0.0028	2.3705	0.1064
C×Fr	1	<0.0001	0.0018	0.9666
C×C	1	0.0008	1.4330	0.2383
Fr×Fr	1	<0.0001	0.0027	0.9590
D×C×Fr	2	0.0081	6.9405	0.0026*

* Meaningful at 1% Significant level

** Degrees of Freedom

Table 3. Regression analysis of the results

جدول ۱. سطوح مورد آزمایش عوامل مورد بررسی

Factor	Factor Levels		
	-1	0	1
D	Rika	Peril	Active
C	0.7×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.9×10^{-5}
Fr	0.023	0.046	0.069

Table 1. design factors levels

شکل ۵. مقطع و پلان ورودی مماسی: (۱) کانال ورودی اولیه، (۲) ورودی مماسی، (۳) شفت قائم



(c) Foam advancement in model after 10 minute

(ج) میزان حرکت کف در مدل بعد از ۱۰ دقیقه

(b) Foam formation

(ب) تشکیل کف در شروع آزمایش

(a) Model set-up

(الف) مدل مورد آزمایش

دقیقه

الف- تاثیر متوسط هریک از عوامل بر نیاز هوای نسبی را در سه سطح مورد بررسی نشان می‌دهد با توجه به این شکل، تاثیر عدد فرود (Fr) و عدد غلظت (C) بر نتایج قابل توجه است و با افزایش آن‌ها نسبت Q_d/Q متوسط، به شدت کاهش یافته است. با این وجود، تاثیر نوع ماده شوینده کفزا (D) به طور قابل توجهی کم هست. در شرایطی که علاوه بر آثار اصلی، اندرکنش‌ها نیز معنی‌دار است باید اثر عوامل معنی‌دار را با توجه به اندرکنش‌های معنی‌دار مطالعه نمود زیرا آثار اصلی می‌توانند گمراه کننده باشند [12].

۱- تا ۰ عدد فرود تقریباً مساوی است، اما زمانی که عدد فرود بین سطوح ۰ تا ۱+ تغییر می‌کند، تنها خط مربوط به D در سطح ۰ است که با دیگر خطوط برخورد می‌نماید. این مطلب نشانه اندرکنش کم بین D و Fr است و با آنالیز رگرسیون نتایج هماهنگی دارد. با توجه به نتایج آنالیز واریانس جدول ۳ و -الف)،

ج- می‌توان نتیجه گرفت که نوع ماده شوینده کفزا تاثیر کمی بر دبی هوا در سازه ورتکس (Q_d) داشته است.

د- تاثیر اندرکنش عدد فرود (Fr) و عدد غلظت (C) را بر نتایج نشان می‌دهد. به طور متوسط در تمام سطوح C با افزایش بده جریان (عدد فرود) نسبت Q_d/Q متوسط کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که متغیر وابسته با افزایش سطح C کاهش زیادی داشته است. اما از آنجا که هیچ یک از خطوط باهم تلاقی پیدا نکرده‌اند می‌توان نتیجه گرفت که بین عدد فرود و عدد غلظت اندرکنش معنی‌داری وجود نداشته است.

عدد فرود با خود ($Fr \times Fr$)، اندرکنش عدد غلظت با خود ($C \times C$) و اندرکنش نوع ماده کفزا با عدد غلظت و با عدد فرود ($D \times C \times Fr$). نتیجه تحلیل رگرسیون و تست آماری آثار اصلی و اندرکنشی در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر P - Value نشان می‌دهند که اثر عدد غلظت، عدد فرود، اندرکنش نوع ماده شوینده کفزا با عدد غلظت، و اندرکنش سه عامل با یکدیگر در سطح یک درصد (۱٪) معنی‌دار بوده‌اند و دیگر ترم‌ها از نظر آماری معنی‌دار نیست.

چگونگی تاثیر آثار معنی‌دار بر متغیر پاسخ (Q_d/Q) در نشان

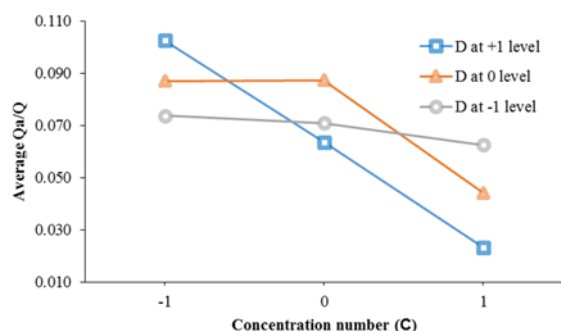
داده شده است.

شکل ۶-ب) اندرکنش متوسط نوع ماده شوینده کفزا (D) با عدد غلظت (C) را نشان می‌دهد. نوع ماده شوینده کفزا در سطح ۱+ با افزایش C موجب کاهش شدید متغیر وابسته شده است؛ درحالی که نوع ماده شوینده کفزا در سطح ۱- با افزایش C موجب کاهش ناچیز نسبت Q_d/Q متوسط شده است. نوع ماده شوینده کفزا در سطح ۰ با تغییر عدد غلظت از سطح ۱- به ۰ اثری بر متغیر وابسته نداشته ولی با تغییر C از سطح ۰ به ۱+، موجب کاهش تقریباً زیاد آن شده است. هرچند اثر اندرکنش این دو عامل، با توجه به تقاطع خطوط در سه نقطه، نسبتاً مشهود است ولی در مجموع با افزایش C بدون توجه به نوع ماده شوینده کفزا، نسبت Q_d/Q متوسط کاهش یافته است. چگونگی اثر اندرکنش نوع ماده شوینده کفزا (D) و عدد فرود (Fr) بر متغیر وابسته در ج- ارائه شده است. افزایش عدد فرود بدون توجه به نوع ماده شوینده کفزا همواره موجب کاهش متغیر وابسته شده است. شیب خطوط در بازه

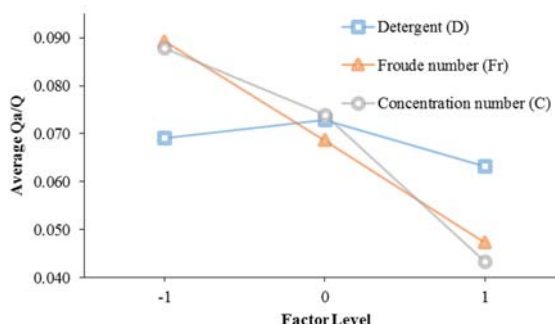
دیگر آثار معنی‌دار در نظر گرفته شده است. روابط ۵، ۶ و ۷ مدل

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل رگرسیون جدول ۳ می-

توان
رابطه



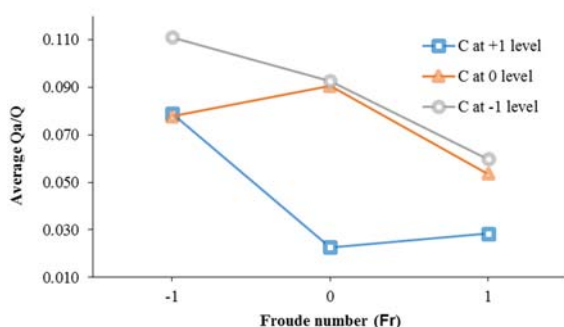
(b) Interaction effect of detergent type (D) and concentration number (C) on results



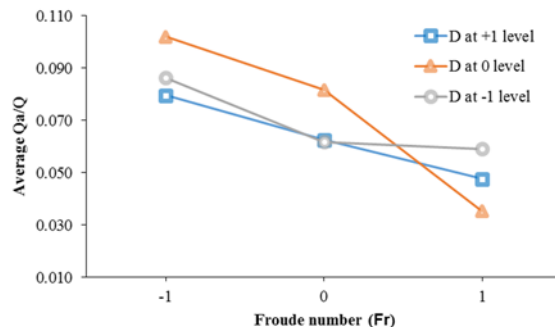
(a) Main effects of detergent type (D), Froude number (Fr) and concentration number (C) on results

(ب) تاثیر اندرکنش نوع ماده شوینده کفزا (D) و عدد غلظت (C) بر نتایج

(الف) تاثیر نوع ماده شوینده کفزا (D)، عدد فرود (Fr) و عدد غلظت (C) بر نتایج



(d) Interaction effects of Froude number (Fr) and concentration number (C) on results



(c) Interaction effects of detergent type (D) and Froude number (Fr) on results

(د) تاثیر اندرکنش عدد فرود (Fr) و عدد غلظت (C) بر نتایج

(ج) تاثیر اندرکنش نوع ماده شوینده کفزا (D) و عدد فرود (Fr) بر نتایج

Fig. 6. Meaningful main and interaction effects of design factors on response variable (Q_a/Q)

رگرسیونی نتایج را براساس آثار معنی‌دار ارائه نمود. برای این منظور، نوع ماده شوینده کفزا (D) نیز برای حفظ سلسله مراتب علاوه بر

رگرسیونی نتایج را براساس آثار معنی‌دار ارائه نمود. برای این منظور، نوع ماده شوینده کفزا (D) نیز برای حفظ سلسله مراتب علاوه بر

شکل ۶. چگونگی تاثیر عوامل معنی‌دار اصلی و اندرکنشی بر متغیر پاسخ (Q_a/Q)

$$63043.4783(C \times Fr)$$

(۷)

D در سطح ۱:-

$$185507.2464(C \times Fr)$$

(۵)

D در سطح ۰:

$$122463.7681(C \times Fr)$$

(۶)

D در سطح ۱+:

مدل رگرسیونی ارائه شده برای اعداد فرود در بازه $[0.069, 0.23]$ ، اعداد غلظت در بازه $[10^{-5} \times 1/9, 10^{-5} \times 7/0]$ و مواد شوینده کفزا بررسی شده معتبر می‌باشد. از این مدل می-توان برای محاسبه بده هوای خروجی از سازه ورتکس اصلی

از آزمایش‌ها، به همراه حدود اطمینان نود و پنج درصد در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

عدد وبر (We) به‌طور هم‌زمان شامل غلظت و بده جریان می‌باشد. لذا تاثیر عدد فرود (Fr) و عدد غلظت (C) بر متغیر وابسته (Q_a/Q) را می‌توان توسط این عدد بیان کرد. به این ترتیب امکان ارائه مدل نهایی و نتایج در قالب یک نمودار دو بعدی ممکن است (شکل ۷). لذا بجای استفاده از روابط (۵)، (۶) و (۷) می‌توان مقدار متغیر وابسته را با توجه به این شکل محاسبه کرد.

۴-۱-۱- مقایسه جریان کفزا و غیرکفزا

بررسی جریان غیرکفزا (آزمایش‌های شاهد) نشان داد که رابطه دبی هوای نسبی با عدد فرود به صورت خطی و مطابق رابطه (۸) می‌باشد.

$$\frac{Q_a}{Q} = 0.128 - 1.22(Fr) \quad (8)$$

تاثیر مواد کفزا بر دبی هوای خروجی از سازه ورتکس را می‌توان با مقایسه نتایج حاصل از مدل جریان کفزا (روابط (۵)، (۶) و (۷)) و مدل جریان غیرکفزا (رابطه (۸)) بررسی نمود. تاثیر این دو نوع جریان بر نسبت Q_a/Q در **Error! Reference source not found.** برای انواع مختلف ماده شوینده کفزا نشان داده شده است.

شکل ۸. نتایج آزمایش‌ها نسبت به نتایج مدل رگرسیونی. نقاط نشان دهنده داده‌های متناظر می‌باشند؛ رگرسیونی خطی نقاط با خط ممند و حدود اطمینان نود و پنج درصد توسط خط‌چین نشان داده شده‌اند

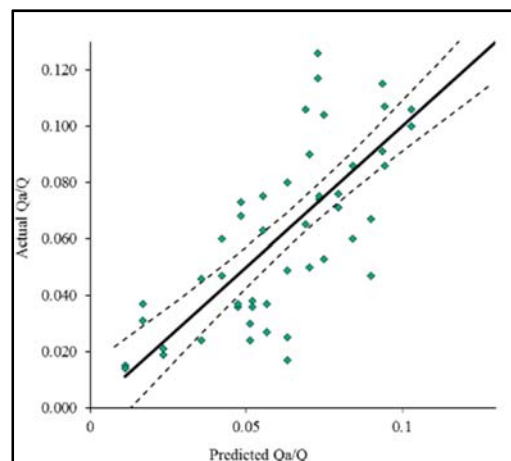


Fig. 7. Actual versus predicted result. Dots represent corresponding results, solid-line is linear regression and dashed-lines are 95% confident interval.

و همچنین تمامی ورتکس‌هایی که اعداد بدون بعد آن‌ها (اعداد ارائه شده در سمت راست رابطه (۴)) نسبتاً با مدل مورد بررسی یکسان باشند استفاده کرد. ضریب تعیین مدل ۱ برابر ۰/۶۵ و ضریب تعیین تعدیل شده ۲ آن برابر ۰/۵۸ است. به‌علاوه، ضریب تعیین پیش‌بینی ۳ آن برابر ۰/۵۱ می‌باشد. مقادیر محاسبه شده توسط مدل نهایی و مقادیر بدست آمده

شکل ۷. نتایج آزمایش‌ها (نقاط) و مدل‌های رگرسیونی (خطوط) نسبت به حاصل ضرب عدد وبر (We) در ریشه چهارم عدد فرود ($Fr^{1/4}$)

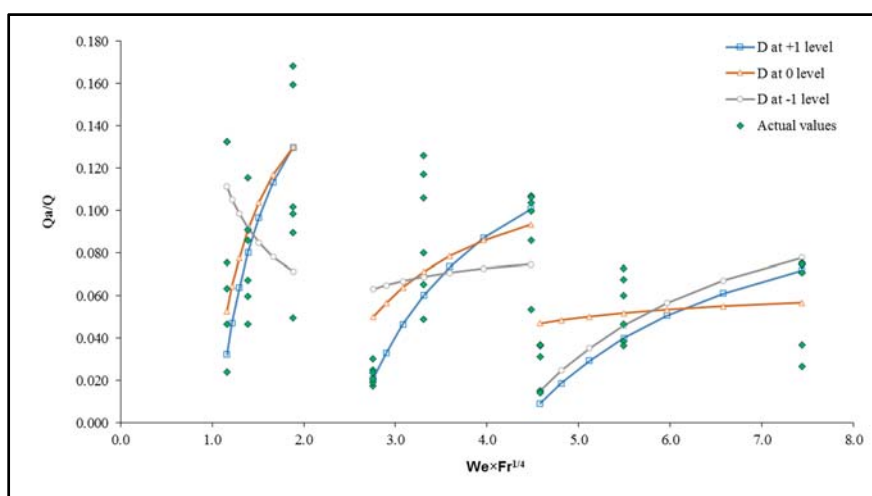


Fig. 8. Results (dots) and regression models (lines) versus $We \times Fr^{1/4}$

۳. Prediction R-Squared

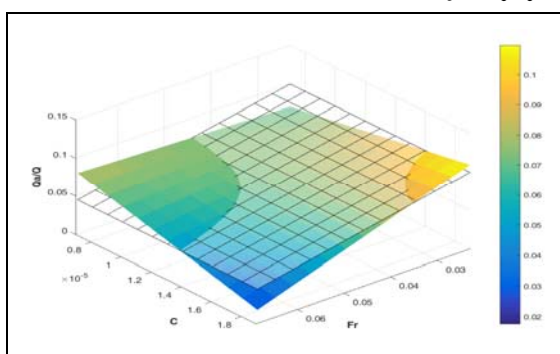
۱. R-Squared

۲. Adjusted R-Squared

۵. نتیجه گیری

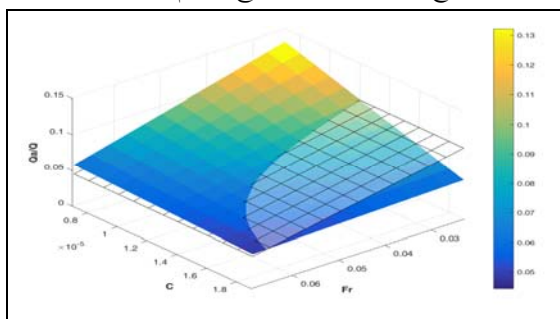
شیب شکن و رتکس را می توان در محل تغییرات شدید ارتفاع در سیستم های انتقال فاضلاب شهری بکار برد. این سازه دارای سه بخش اصلی ورودی، شفت قائم، و مستهلک کننده انرژی می باشد. هوا در ورودی و شفت قائم به جریان و سازه و رتکس وارد می شود. این هوای وارد شده باید در مستهلک کننده انرژی از جریان خارج

شکل ۹. مقایسه تاثیر جریان کفزا و غیرکفزا بر نسبت Q_d/Q . صفحه پیوسته مربوط به جریان کفزا، صفحه مش بندی شده مربوط به جریان غیرکفزا و کتور نشان دهنده مقدار نسبت Q_d/Q است



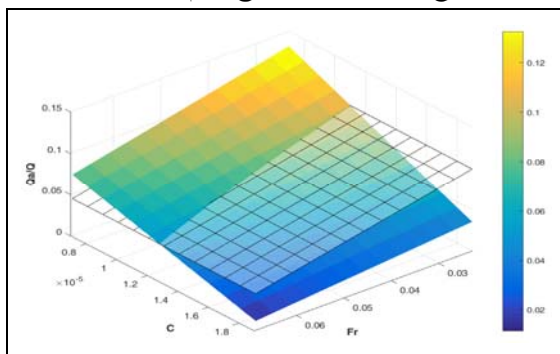
(a) Detergent type in level -1 (Rika)

(الف) نوع ماده شوینده کفزا در سطح ۱- (نام تجاری ریکا)



(b) Detergent type in level 0 (Peril)

(ب) نوع ماده شوینده کفزا در سطح ۰ (نام تجاری پرل)



(c) Detergent type in level 1 (Active)

(ج) نوع ماده شوینده کفزا در سطح ۱ (نام تجاری اکتیو)

Fig. 9. Comparison between effect of water and foam producing flow on Q_d/Q . solid plane represent foam producing flow, mesh plane show water flow and spectra 1 line show Q_d/Q values

این شکل نشان می دهد که همواره بیشترین مقدار Q_d/Q در عدد فرود حداقل (۰/۲۳) و کمترین مقدار آن در عدد فرود و غلظت حداکثر (به ترتیب ۰/۰۶۹ و $1/9 \times 10^{-5}$) روی داده است. مقایسه صفحات مربوط به جریان کفزا و غیرکفزا در این شکل مشخص می کند که استفاده از مواد شوینده کفزا در برخی نواحی موجب افزایش متغیر وابسته (Q_d/Q) و در محل های موجب کاهش آن شده است. همچنین مشاهده می شود که بیشترین افزایش متغیر وابسته در اثر نوع ماده شوینده کفزا در سطح ۱- (نام تجاری ریکا) روی داده است (Error! Reference source not found. الف)؛ بیشترین کاهش متغیر وابسته در اثر نوع ماده شوینده کفزا در سطح ۱ (نام تجاری اکتیو) اتفاق افتاده است (Error! Reference source not found. ج). بیشترین افزایش متغیر وابسته به میزان ۸۲٪ است که در عدد فرود برابر ۰/۰۶۹ و عدد غلظت برابر 0.7×10^{-5} مشاهده شده است؛ همچنین بیشترین کاهش آن در عدد فرود برابر ۰/۲۳ و عدد غلظت برابر $1/9 \times 10^{-5}$ و به میزان ۶۴٪ بوده است. مشاهده این تفاوت زیاد در نسبت Q_d/Q بین جریان کفزا و غیرکفزا نشان دهنده اهمیت و شدت تاثیر این مواد بر جریان هوا در سازه و رتکس می باشد.

وجود مواد شوینده کفزا در جریان عبوری از سازه و رتکس موجب شد که متغیر وابسته در نواحی ای از صفحه Fr و C افزایش و در نواحی ای کاهش یابد. برای مشخص کردن این مناطق می توان از تصویر دو بعدی فصل مشترک صفحات مربوط به جریان های کفزا و جریان غیرکفزا استفاده کرد (Error! Reference source not found. فصل مشترک این صفحات در Error! Reference source not found. ارائه شده است. نواحی هاشور خورده محل هایی را نشان می دهند که نسبت Q_d/Q در جریان کفزا بیشتر از جریان غیرکفزا بوده است؛ در ناحیه هاشور نخورده این نسبت در جریان غیرکفزا بیشتر بوده است. همانطور که این شکل نشان می دهد در اعداد غلظت کمتر از $1/1 \times 10^{-5}$ و اعداد فرود بیش از ۰/۴۷ برای تمام مواد شوینده کفزا مورد بررسی، همواره دبی هوای خروجی از سازه و رتکس در اثر مواد کفزا افزایش یافته است.

محمد محمودی‌راد که در ساخت مدل همکاری داشتند تشکر می‌نمایم.

۷. منابع

- [1] Rosso, D., & Stenstrom, M.K. 2006 Surfactant effects on α -factors in aeration systems. *Water research*, 40 (7), 1397-1404.
- [2] Yu, D., & Lee, J.H. 2009 Hydraulics of tangential vortex intake for urban drainage. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(3), 164-174.
- [3] Zhao, C.H., Zhu, D.Z., Sun, S.K., & Liu, Z.P. 2006 Experimental study of flow in a vortex drop shaft. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(1), 61-68.
- [4] Joseph, D. 1997 Understanding foams & foaming. *International Journal of Cosmetics Science University of Minnesota, USA*.
- [5] Pal, P., Khairnar, K., & Paunikar, W. 2014 Causes and remedies for filamentous foaming in activated sludge treatment plant. *Global Nest Journal*, 16(4), 762-772.
- [6] Jain, S.C. 1988 Air transport in vortex-flow drop shafts. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(12), 1485-1497.
- [7] Ramezani, L., Karney, B., & Malekpour, A. 2016 Encouraging effective air management in water pipelines: A critical review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(12), 04016055.
- [8] Inc., S.I. 2017 Jmp 13.1 online documentation. *JMP Statistical Discovery from SAS*.
- [9] Szirtes, T. 2007 Applied dimensional analysis and modeling. *Elsevier: Amsterdam*.
- [10] Padulano, R., & Del Giudice, G. 2016 Transitional and weir flow in a vented drop shaft with a sharp-edged intake. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(5), 06016002.
- [11] Sangsefidi, Y., Mehraein, M., Ghodsian, M., & Motalebizadeh, M.R. 2017 Evaluation and analysis of flow over arced weirs using traditional and response surface methodologies. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(11), 040170481-0401704811.
- [12] Montgomery, D.C. 2013 Design and analysis of experiments. *John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey*.

شود و توسط مجرای تخلیه هوا از سازه تخلیه گردد. در مستهلک کننده انرژی شرایط برای تشکیل کف مهیا است و کف می‌تواند فضای داخل این بخش را اشغال و مانع جریان هوا در سازه گردد؛ در صورت بروز اختلال در جریان هوا، جریان آب در سازه تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در این پژوهش از یک مدل فیزیکی برای مطالعه جریان هوا در سازه ورتکس تحت جریان کفزا استفاده شد. تاثیر عدد فرود (Fr)، عدد غلظت (C) و نوع ماده شوینده کفزا (D) بر نیاز نسبی هوا در سازه (نسبت دبی هوا به دبی جریان، Q_a/Q) بررسی گردید. برای طراحی آزمایش‌ها و تحلیل نتایج از آنالیز ابعادی ماتریسی و روش طرح آزمایش‌ها (DoE) استفاده شد و در مجموع ۶۳ آزمایش در قالب طرح 3^3 فاکتوریل کامل طراحی و بطور کاملاً تصادفی انجام گردید.

آنالیز نتایج نشان داد که اثر عدد فرود (Fr)، عدد غلظت (C)، اندرکنش نوع ماده شوینده کفزا و عدد غلظت ($D \times C$)، و اندرکنش نوع ماده شوینده کفزا با عدد غلظت و با عدد فرود ($D \times C \times Fr$) معنی‌دار بوده‌اند؛ و با افزایش عدد فرود و عدد غلظت، نیاز نسبی هوا کاهش می‌یابد. ارتباط عوامل معنی‌دار با نسبت Q_a/Q توسط مدل رگرسیونی ساده‌ای، با ضریب تعیین ۰/۶۵، ارائه گردید؛ همچنین، مدل به‌صورت گراف دو بعدی برحسب عدد وبر و فرود ارائه شد. در حدود مورد بررسی می‌توان از مدل معرفی شده برای پیش‌بینی بده هوای خروجی از تمامی ورتکس‌هایی که نسبتاً با مدل مورد آزمایش متشابه هستند استفاده کرد. همچنین مقایسه تاثیر جریان کفزا و غیرکفزا بر دبی هوای خروجی از ورتکس نشان داد که تشکیل کف در سازه می‌تواند در شرایطی تا ۸۲٪ موجب افزایش دبی هوای خروجی از سازه و در شرایطی موجب کاهش آن تا ۶۴٪ گردد.

۶. تقدیر و تشکر

این پژوهش در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی بخش مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان و با حمایت مالی شرکت فاضلاب تهران انجام شد. لازم است از آن دانشگاه و شرکت محترم به‌خاطر حمایت‌هایشان قدردانی شود. همچنین از آقای

Experimental Investigation of Foam Producing Flow in Drop Vortex

S. Hasheminejad^{1*}, A. Moghbeli², S. Habibi³, M.J. Khanjani⁴

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

2- M.Sc. of Water Structures, Department of Agriculture, Faculty of Agriculture, University of Shahid Bahonar Kerman, Iran.

3- M.Sc. of Water Engineering, Department of Civil Engineering, Institution of Higher Education Kerman, Kerman, Iran.

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

*srhn61@gmail.com

Abstract

Drop vortex is utilized to convey sewage across elevation change in steep catchments. This structure is generally used when the elevation difference is more than 5 m. Drop vortex is composed of three main parts, namely inlet structure, dropshaft, and energy dissipation structure. Water flow is prepared for circulating in dropshaft by inlet structure. In this part, a hydraulic jump might take place. Flow velocity in dropshaft rapidly increases and adjacent air enters the water flow. At the energy dissipation structure entrained air to the water flow is evacuated and the flow's excessive energy is dissipated. Since the air and water flow are extensively combined in drop vortex and the sewage flow might contain detergent and foam producing materials, foam could produce in some parts of the drop vortex. This phenomenon could affect vortex airflow and reduce drop vortex hydraulic performance since the foam could blockage the air outflow path. Additionally, the produced foam might rich to the ground surface and cause sanitary issues. In this investigation, the effects of Foam Producing Flow (FPF) on vortex air discharge were studied by a scaled model and statistical Design of Experiment (DoE) methodology. Effects of Concentration Number (the ratio of detergent mass in the unit volume of water to water specific weight), detergent type, and Froude Number on the dependent variable, air discharge to water discharge ratio, were studied by 3^3 full-factorial design and 63 runs. In this regard, a 1:20 scaled model of Tehran eastern sewer drop vortex was built at the Hydraulic Structures Laboratory of Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran; and three Concentration Numbers as 0.7×10^{-5} , 1.3×10^{-5} , and 1.9×10^{-5} , three detergent brands, namely Rika, Peril, and Active, and three Froude Numbers as 0.023, 0.046, and 0.069 were tested. Analysis of the results revealed that design factors had meaningful effects on vortex air discharge and it decreases by the increase of Concentration and Froude Numbers. Analysis of variance (ANOVA) shown that the main effects of Concentration Number and Froude Numbers, as well as the interaction effects of Concentration Number with detergent type and all three factors, were statistically meaningful at 1% significant level. It was noticed that the effect of detergent type on the result was considerably low. Also, a dimensionless numerical model that represents 65% of the variability in the result was presented, which could be utilized to predict drop vortex airflow in a similar drop vortex with FPF. This model includes three equations which each one is for one detergent type. Moreover, three experiments under former Froude Numbers in three iterations with clean water were performed as reference experiments. According to them, a dimensionless linear numerical model was presented. This relationship could be applied to predict air discharge in a similar drop vortex without foam producing flow. Furthermore, by drowning an analogy between the results of FPF and clean water experiments it was illuminated that foam formation could boost air discharge by 82% and in some conditions could reduce it more than 64%. The result showed that FPF always resulted in airflow discharge increases for all studied detergent types if Concentration Number was lower than 1.1×10^{-5} and Froude Number was greater than 0.047.

Keywords: foam producing flow (FPF), air discharge, drop vortex, design of experiments (DoE), experimental model.