

بررسی فشارهای دینامیکی ناشی از برخورد جت‌های قائم دایره‌ای آزاد به سطح زبر در زوایای مختلف

منوچهر فتحی مقدم^{۱*}، سجاد کیانی^۲، بابک لشکرآرا^۳، ماهر عبیدادی^۴

۱. استاد، گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۳. استادیار، گروه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

۴. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۲/۱۲)

چکیده

امنیت و پایداری سد بایستی به ازای سیل عبوری از سرریز سدها تأمین گردد. بنابراین انرژی جنبشی جریان عبوری از روی سرریزها باید مستهلک گردد. یکی از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در پایین‌دست سدها، حوضچه‌های استغراق می‌باشند. هدف از این تحقیق، بررسی فشارهای دینامیکی به وجود آمده از برخورد جت دایره‌ای غیرمستغرق به یک صفحه زبر با اندازه زبری ۰/۸ سانتی‌متر در زوایای برخورد ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه است. بنابراین، در این تحقیق از حسگرهای سنجش لحظه‌ای فشار با قابلیت ثبت و ذخیره فشارهای نوسانی استفاده گردید. نتایج حاصله نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع ریزش، ضریب میانگین فشارهای دینامیکی کاهش و ضرایب حدی فشارهای دینامیکی افزایش می‌یابند. همچنین با کاهش زاویه‌ی برخورد جت با سطح برخورد، فشارهای دینامیکی کاهش می‌یابند و زبری نیز باعث افزایش فشارهای دینامیکی تا حدود ۷۰٪ در محدوده‌ی برداشت‌های آزمایشگاهی گردید.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع ریزش، حوضچه استغراق، عدد فرود، فشارهای دینامیکی حدی

مقدمه

تخلیه‌ی سیلاب ورودی به سدهای مرتفع همواره یکی از مهم‌ترین مسائلی است که مهندسان طراح با آن مواجه بوده‌اند. این جریان‌ها به واسطه ارتفاع زیاد سد دارای انرژی پتانسیل زیاد می‌باشند. گاه تخلیه این جریان‌ها توسط روزنه‌هایی در بدنه سد یا سرریزهایی صورت می‌گیرد که در نهایت با پدیده جت ریزشی مواجه خواهند شد. هنگام سقوط جریان سیلابی به پایین‌دست سد، انرژی بالقوه‌ی آن ناشی از ارتفاع زیاد، بالفعل می‌گردد و نیروی زیادی ایجاد خواهد شد. چنانچه این نیروی زیاد به طریقی مستهلک نشود، پس از برخورد جت به بستر پایین‌دست، ذرات بستر از جای خود کنده شده و همراه با جریان به پایین‌دست منتقل می‌شوند. پیامد این عمل فرسایشی، ایجاد حفره‌های کوچک و بزرگ در پای سازه هیدرولیکی است که خطر ناپایداری آن را به دنبال خواهد داشت؛ بنابراین انرژی اضافی جریان بایستی مستهلک شود و جریان با انرژی ایمن و بدون فرسایش به سمت پایین‌دست حرکت کند. انتخاب و طراحی بهینه‌ی سازه‌های تخلیه‌کننده جریان و مستهلک

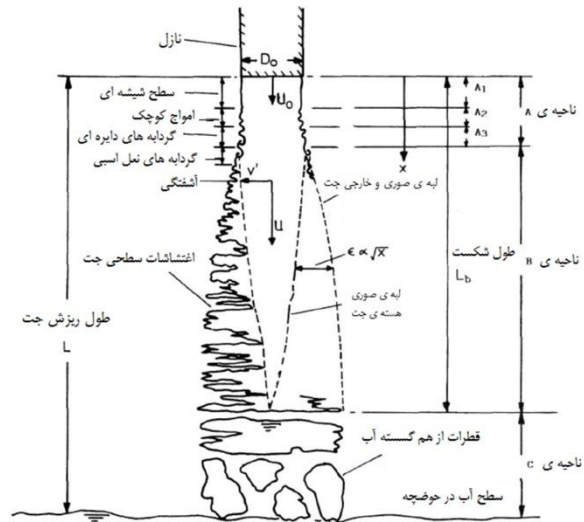
کننده‌ی انرژی به منظور اطمینان، ایمنی و پایداری سدهای بزرگ دارای اهمیت زیادی است.

مطالعات محققان گویای این مطلب است که تنها بخش کوچکی از انرژی جت در اثر سقوط و اختلاط با هوا زایل می‌گردد. میزان کاهش انرژی در این مورد طبق مطالعات انجام گرفته در حدود ۱۲ درصد است (Peter, 1994). در نتیجه نیاز است تا سازه‌ای برای کاهش بیشتر انرژی احداث گردد. در پایین‌دست جریان‌های فورانی - آبشاری مانند سرریزهای پرش اسکی، پرتاب‌کننده‌ی جامی شکل و جت‌های ریزشی آزاد، استفاده از حوضچه‌های استغراق برای استهلاک انرژی مازاد انتخاب شایسته‌ای است به طوری که بخش زیادی از انرژی جت در حوضچه، کاسته می‌شود و این حوضچه‌ها با آرام کردن جریان جت ریزشی، در نهایت آن را به بستر رودخانه در پایین‌دست هدایت می‌کنند.

عامل مهم در طراحی حوضچه‌های استغراق، میزان نوسانات فشار و دامنه‌ی آنهاست؛ چگونگی ایجاد این نوسانات را می‌توان این‌گونه توضیح داد که جریان جت ریزشی، جریانی کاملاً آشفته است و بی‌گمان در هر جریان آشفته‌ای نوسانات سرعت وجود دارد، این نوسانات سرعت پس از برخورد به کف حوضچه استغراق، نوسانات فشار را در پی خواهند داشت. گستره

بررسی مقادیر مختلف فشارهای دینامیکی مورد توجه محققین بسیاری در طی دو دهه اخیر قرار گرفته است. Hartung and Häusler (1973) آزمایش‌هایی در زمینه‌ی جت‌های عمودی ریزش کننده به حوضچه استغراق انجام دادند و فشار ناشی از برخورد جت به یک صفحه افقی را به وسیله مانومتر اندازه‌گیری کردند. ایشان نتایج آزمایش‌های خود را به صورت معادلاتی تجربی جهت تعیین فشار دینامیکی وارد به صفحه و در امتداد محور مرکزی جت ارائه دادند. پس از آن Ervine and Falavey (1987) و Ervine et al. (1997) به بررسی نوسانات فشار دینامیکی با توجه به شدت توزیع آشفتگی جت آزاد پرداخته و نتایج جت‌های دایره‌ای را با جت‌های مستطیلی مقایسه کردند، به‌علاوه درجه شکست جت نیز قبل از ورود به حوضچه و اثرات ورود هوا به آن نیز توسط این محققین مورد بررسی قرار گرفت. Castillo et al. (1999) با به‌کارگیری مدل فیزیکی، مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین فشارهای نوسانی وارد بر کف حوضچه را به دست آوردند. آنها بر اساس متغیرهای ارتفاع ریزش، دبی و عمق آب در حوضچه استغراق آزمایش‌های خود را انجام دادند و به این نکته اشاره کردند که حداکثر نوسانات فشار در محل برخورد جت به کف حوضچه و در امتداد محور مرکزی، در حالت خالی بودن حوضچه اتفاق نمی‌افتد بلکه برای مقادیر کم عمق آب ایجاد می‌شود. Liu et al. (1997) در مورد طراحی حوضچه‌های استغراق و استهلاک انرژی در آنها آزمایش‌هایی انجام دادند. همچنین نواحی تحت تأثیر جریان جت در حوضچه‌های استغراق را به سه بخش ناحیه آزاد جت، ناحیه برخورد و ناحیه جت دیواره‌ای تقسیم‌بندی کردند و ویژگی‌های هر یک از نواحی را تشریح نمودند. در ادامه این مطالعات می‌توان به تلاش‌های Kerman Nejad et al. (2011)، Castillo (2007)، Castillo and Luis (2006)، Castillo et al. (2004) و Bollaert and Schleiss (2003(a) and 2003(b)) در زمینه فشارهای دینامیکی ناشی از جت آب در حوضچه‌های استغراق با توجه به متغیرهایی همچون عدد فرود جت و عمق آب درون حوضچه اشاره کرد. Salemnia et al. (2014) آزمایش‌هایی برای اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی ناشی از جت دایره‌ای غیر مستغرق بر روی یک صفحه صاف انجام دادند و دریافتند که با افزایش دبی جریان و یا کاهش قطر نازل، مقدار ضریب فشار دینامیکی وارد به کف حوضچه افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. همچنین آنها آزمایش‌ها را در پنج ارتفاع ریزش مختلف تکرار کردند و بیان نمودند که حداکثر مقدار ضریب فشار دینامیکی در کمترین ارتفاع ریزش حاصل و مقدار آن برابر ۰/۹۸۹ است.

و میزان نوسانات فشار در کف حوضچه‌های استغراق به عواملی از قبیل سرعت جت، قطر جت، ضریب پخش جت، زاویه برخورد، طول ریزش، میزان هواگیری، طول شکست (L/L_b) و غیره بستگی دارد (Ervine et al., 1997). اهمیت این عوامل در گسترش فشار در کف حوضچه، نیاز به شناخت مشخصات جت را ضروری می‌سازد. در شکل (۱) ساختمان (نواحی A, B, C) یک جت ریزشی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- تصویر نمادین ساختمان یک جت ریزشی

ساختمان یک جت عمودی را می‌توان به سه رژیم عمده جریان تقسیم نمود. ناحیه‌ی A با موج‌هایی ابتدایی و گرداب‌های کوچک یا به معنی دیگر کم توسعه‌یافته مشخص شده است و کشش سطحی مانعی در مقابل رشد و گسترش آن‌هاست. ناحیه‌ی B مرز میان گردابه‌ها و جریان کاملاً متلاطم است و ناحیه C منطقه‌ای است که در آن نوسانات سطح آشفته آنقدر بزرگ هستند که هوا بتواند به هسته جت جریان نفوذ کرده و آن را از بین ببرد. در منطقه C، جریان به صورت توده‌ای کاملاً پیوسته نیست و متشکل از توده‌های منحصر به فرد آب است.

ویژگی‌هایی چون غیر همگنی و تغییرات سه‌بعدی خصوصیات جریان‌های متلاطم در سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی و همچنین عدم وجود روش کلی مشخص و معینی برای تعیین فشارهای دینامیکی در این سازه‌ها، مانع از مطالعه تحلیلی این‌گونه جریان‌ها می‌شود. به همین دلیل استفاده از مدل فیزیکی یکی از بهترین روش‌ها برای بررسی و مطالعه پارامترهای هیدرولیکی از جمله فشار دینامیکی در این سازه‌ها می‌باشد. مکانیسم چگونگی اتلاف انرژی در حوضچه‌های استغراق و

اهواز انجام پذیرفت. برای ایجاد جت عمودی از لوله‌ای با جنس پولیکا (P.V.C) به قطر ۴ اینچ که از خط لوله اصلی آزمایشگاه منشعب شده استفاده شده است. دهانه لوله PVC توسط نازل‌هایی از جنس پلاستیک فشرده تنگ‌تر شده به طوری که قطر داخلی نازل‌ها به ترتیب برابر ۳/۷، ۴/۴، ۵/۲ و ۷/۹ سانتی‌متر می‌باشد. در محل اتصال لوله PVC به خط لوله اصلی آزمایشگاه، شیری قرار گرفته است تا به وسیله آن دبی عبوری از نازل‌ها تنظیم شود. خط لوله اصلی نیز به یک مخزن تأمین آب که در ارتفاع ۶ متری از کف آزمایشگاه قرار داشت متصل بوده و موجب تولید تراز ثابت در طول آزمایش می‌شود. آب استفاده شده توسط مجرای به استخر جمع‌آوری آب هدایت شده و توسط سیستم پمپاژ به منبع یادشده بازگردانده می‌شود. جت خروجی از نازل‌ها بر صفحه‌ی پلکسی‌گلاسی به ابعاد ۵۰×۵۰ سانتی‌متر سوار بر یک پایه که قابلیت تغییر ارتفاع و زاویه نسبت به جت جریان را داشته فرود می‌آید. از آنجا که از اهداف این تحقیق بررسی نوسانات فشار در کف یک حوضچه استغراق طبیعی است در نتیجه صفحه‌ی پلکسی‌گلاس مورد نظر با دانه‌های شن با ضخامت تقریبی ۰/۸ سانتی‌متر مضرس شده است. جهت اندازه‌گیری فشار وارده به صفحه، تعداد ۱۳ روزنه با چینش بر دو مسیر متعامد بر روی صفحه ایجاد شده است به طوری که فاصله روزنه‌ها از یکدیگر برابر ۳ سانتی‌متر بوده است. به هر یک از روزنه‌های موجود در صفحه، یک لوله پیزومتر متصل شده است که این لوله‌های پیزومتری به یک ترانسدیوسر برای ثبت نوسانات فشار متصل می‌گردد. جهت اندازه‌گیری دبی نیز از یک دبی سنج التراسونیک با دقت اندازه‌گیری ۱٪ استفاده گردید. تصاویری از مدل و تجهیزات آزمایشگاهی این پژوهش در شکل‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌شود.

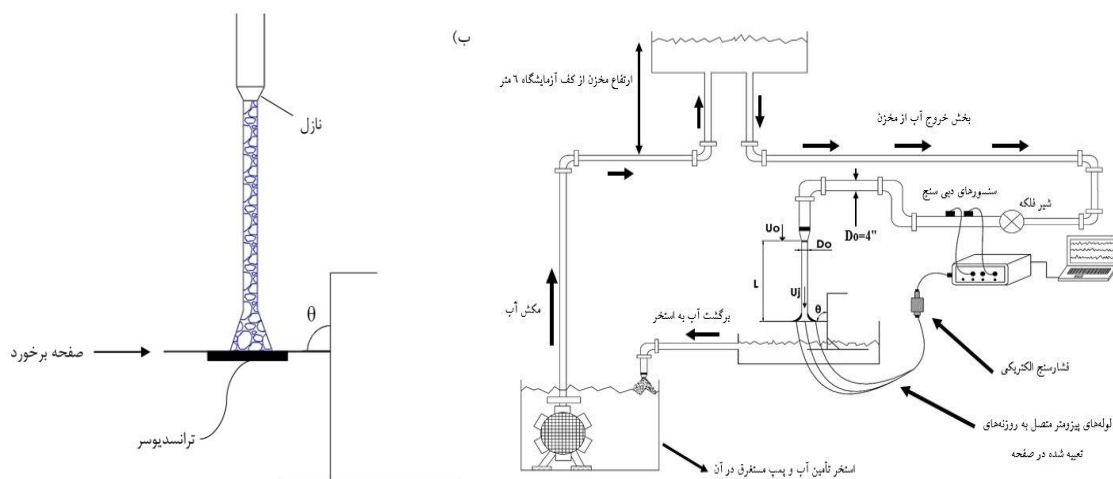
تحقیقاتی که تاکنون انجام گرفته است همگی در حضور عمق استغراق در داخل حوضچه بوده است اما تحت شرایطی ممکن است جریان خروجی از سرریز سد در داخل حوضچه‌ی استغراق فرود نیاید. به طور مثال سدهایی که در دره‌های تنگ و عمیق و پیچ‌دار احداث می‌شوند به علت شرایط توپوگرافی منطقه، امکان احداث حوضچه با ابعاد بزرگ فراهم نباشد لذا احتمال این وجود دارد که جت جریان به حوضچه برخورد نکرده و با دیواره صخره‌ای مقابل تحت زاویه‌های مختلف اصابت نماید در نتیجه فشار وارد شده می‌تواند باعث ایجاد ترک و در نهایت شکست صخره شود. همچنین زمانی که حوضچه‌ی استغراق به صورت طبیعی باشد به بیان دیگر حوضچه در بخشی از یک رودخانه احداث شده باشد و این رودخانه به دلایل شیب منطقه یا فصلی بودن رودخانه، در مواقعی از سال خشک باشد یا به علت رسوب‌گیری در دریاچه سرریز، دریاچه نتواند به میزان کافی باز شود که جریان در داخل حوضچه فرود آید.

در این تحقیق به بررسی فشارهای دینامیکی برای این گونه موارد احتمالی پرداخته شده و از حوضچه بدون بالشتک آبی استفاده شده است. لذا هدف این تحقیق، بررسی فشارهای دینامیکی ناشی از برخورد جت‌های آزاد قائم دایره‌ای به سطوح زبر می‌باشد به طوری که در این پژوهش، تأثیر تغییرات عدد فرود به همراه ارتفاع ریزش بر روی فشار دینامیکی ایجاد شده بر روی یک سطح زبر مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی- هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران



شکل ۲- طرح شماتیک از مدل آزمایشگاهی (الف) و برخورد جت به صفحه زبر (ب)

$$\frac{H}{V_j^2/2g} = f(F_r, \frac{L}{D_0}, \theta) \quad (\text{رابطه ۴})$$

مطابق با نظریه Ervine and Falavey (1987) میانگین فشارهای دینامیکی در محل برخورد توسط ضریب بی بعد (C_p) محاسبه می شود:

$$C_p = \frac{H_m}{V_j^2/2g} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$V_j = \sqrt{V_0^2 + 2gL} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن H_m ، میانگین فشار دینامیکی و V_0 : سرعت خروجی از نازل می باشد. ضریب فشار دینامیکی (C_p) نشان دهنده میانگین نوسانات فشار دینامیکی روی کف حوضچه می باشد. همچنین آنها روابط (۷) و (۸) را برای محاسبه حداکثر و حداقل نوسانات فشار پیشنهاد نمودند تا به کمک این روابط، پایداری حوضچه در برابر فشار بالا بر یا تشکیل حفره آبشستگی در اتصالات سنگ بررسی شود:

$$C_p^+ = \frac{H_{\max} - H_m}{V_j^2/2g} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$C_p^- = \frac{H_m - H_{\min}}{V_j^2/2g} \quad (\text{رابطه ۸})$$

به طوری که H_{\max} بیشینه فشار و H_{\min} کمینه فشار اندازه گیری شده را نشان می دهند.

روش انجام آزمایش

مراحل انجام آزمایش بدین گونه است که ابتدا ارتفاع ریزش مورد نظر تعیین شده و نازل مورد نظر بر روی قسمت خروجی جت نصب می شود. صفحه زبر را در زاویه ۹۰ درجه نسبت به جت آب قرار داده و دبی مورد نظر به کمک شیر ورودی و دبی سنج التراسونیک تنظیم می گردد. سپس برداشت فشارهای دینامیکی به وسیله ترانسیدویسر فشار انجام می پذیرد. مدت زمان داده برداری برای هر روزنه در هر حالت، ۴۰ ثانیه تنظیم شده است به طوری که دستگاه در هر ثانیه ۳۰ داده جمع آوری می کند. پس از اتمام برداشت فشارها در دبی های مورد نظر، نازل خروجی تغییر کرده و تمامی آزمایش ها با نازل جدید انجام می گیرد. بعد از برداشت فشار برای تمامی نازل ها، در گام بعدی زاویه برخورد را تغییر داده و تمامی آزمایش های فوق برای زوایای مختلف تکرار می شود. در نهایت ارتفاع ریزش تغییر کرده و مراحل فوق مجدداً تکرار می گردد. در این مطالعه، آزمایش ها برای همه نازل ها در چهار ارتفاع ریزش و چهار دبی مختلف با سه زاویه برخورد انجام گرفت به طوری که مجموع حالات در این پژوهش برابر ۱۹۲ مورد است. جدول (۱) متغیرهای مختلف آزمایش را نشان می دهد.



شکل ۳- نمایی از مدل جت خروجی از نازل و صفحه برخورد

تحلیل ابعادی

روابط حاکم بر بسیاری از پدیده های هیدرولیکی را نمی توان مستقیماً از قوانین حاکم بر حرکت سیالات و تئوری های موجود نظیر قوانین بقای جرم، انرژی و مومنتم به دست آورد. در چنین مواردی سعی می شود تا برای استخراج رابطه ریاضی حاکم بر چنین پدیده هایی ابتدا کلیه متغیرهای لازم که در به وجود آوردن آن پدیده نقش دارند مشخص گردند، آنگاه با ترکیب متغیرهای فوق، پارامترهای بدون بعد استخراج شوند، این اقدام با کمک روش Π باکینگهام صورت می گیرد. سپس می توان با انجام آزمایش های لازم روی مدلی در آزمایشگاه، نحوه تأثیر تغییر هر یک از پارامترها را به دست آورد. پارامترهای تأثیرگذار در این پژوهش را می توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$f(H, V_j, g, \rho_w, \mu, D_0, D_{50}, L, \theta) = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

H : ارتفاع نظیر فشار دینامیکی، V_j : سرعت جت در لحظه برخورد به کف حوضچه، g : شتاب ثقل، ρ_w : جرم مخصوص آب، μ : لزجت دینامیکی آب، D_0 : قطر نازل، D_{50} : اندازه زبری، L : ارتفاع ریزش و θ : زاویه برخورد جت با صفحه زبر که در پدیده هیدرولیکی جت دخالت دارند. با به کارگیری تئوری Π باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه (۱) را می توان به صورت رابطه بی بعدی زیر نوشت:

$$f\left(\frac{H}{V_j^2/2g}, Re, \frac{D_{50}}{D_0}, Fr, \frac{L}{D_0}, \theta\right) = 0 \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه ۲، Re عدد بدون بعد رینولدز و Fr عدد فرود جریان می باشد. از عدد رینولدز (Re) به دلیل آشفتگی کامل جت جریان می توان صرف نظر کرد. همچنین، عبارت بدون بعد D_{50}/D_0 را به دلیل استفاده از یک نوع زبری در این تحقیق می توان حذف نمود. پس خواهیم داشت:

$$f\left(\frac{H}{V_j^2/2g}, Fr, \frac{L}{D_0}, \theta\right) = 0 \quad (\text{رابطه ۳})$$

رابطه (۳) را می توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

جدول ۱- مقادیر متغیرهای آزمایشگاهی مورد بررسی

تعداد آزمایش‌ها	قطر نازل (سانتی‌متر)	دبی جریان (لیتر بر ثانیه)	ارتفاع ریزش (سانتی‌متر)	زاویه برخورد جت (θ)
۴۸	۷/۹	۲۷/۵، ۲۳/۵، ۲۰/۵، ۱۶/۵	۱۲۰، ۹۰، ۶۰، ۳۰	۹۰، ۶۰، ۳۰
۴۸	۵/۲	۱۳، ۱۱، ۸، ۶	۱۲۰، ۹۰، ۶۰، ۳۰	۹۰، ۶۰، ۳۰
۴۸	۴/۴	۱۲/۵، ۱۱، ۹، ۷	۱۲۰، ۹۰، ۶۰، ۳۰	۹۰، ۶۰، ۳۰
۴۸	۳/۷	۸/۵، ۷/۵، ۶، ۴/۵	۱۲۰، ۹۰، ۶۰، ۳۰	۹۰، ۶۰، ۳۰

یافته‌ها و بحث

پس از انجام آزمایش‌های متعدد، تحلیل و بررسی بر روی نتایج انجام شده است که در ذیل ارائه گردیده است.

تأثیر افزایش عدد فرود جریان بر ضریب میانگین فشارهای دینامیکی C_p

نمودارهای شکل (۴) اثر تغییرات عدد فرود جریان (F_r) را در چهار نازل نسبت به ضریب میانگین فشارهای دینامیکی نشان می‌دهد.

مطابق با شکل ۴، با کوچک‌تر شدن قطر نازل و به تبع آن افزایش عدد فرود خروجی از نازل، ضریب میانگین فشار دینامیکی افزایش یافته است. افزایش عدد فرود موجب متراکم‌تر شدن جت آب و کاهش ضریب توزیع آشفتگی (نسبت ریشه میانگین اختلاف مربعات نوسانات سرعت به سرعت متوسط جت آب) شده است. همچنین، کاهش ضریب توزیع آشفتگی باعث مقاومت بیشتر جت آب در مقابل ورود هوا به درون خود و افزایش طول شکست می‌شود. در نتیجه مقادیر ضریب فشار دینامیکی در تمامی ارتفاع‌های ریزش افزایش می‌یابد.

همچنین نمودارهای شکل (۴) نشان می‌دهد ضریب میانگین فشارهای دینامیکی با افزایش عدد فرود جریان، ابتدا روندی افزایشی و سپس کاهشی دارد. علت این پدیده را می‌توان اینگونه بیان نمود که افزایش عدد فرود جریان موجب افزایش سرعت محاسبه شده از روابط تئوری و فشار دینامیکی به دست آمده به صورت عملی در آزمایشگاه می‌شود از طرفی با افزایش سرعت، افت ناشی از تنگ‌شدگی نازل و مقدار افت ناشی از مقاومت هوا در برابر جت آب نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه این روند صعودی ضریب فشار دینامیکی تا زمانی ادامه می‌یابد که افت ناشی از مقاومت هوا و تنگ‌شدگی نازل بر مقدار فشار اندازه‌گیری شده به کمک ترانسیدوسر تأثیر چندانی نگذاشته و اجازه دهد که فشار اندازه‌گیری شده به نسبت فشار محاسبه شده افزایش یابد؛ اما پس از نقطه حداکثر نمودار، مقدار فشار دینامیکی اندازه‌گیری شده به علت افزایش افت‌ها، نسبت به

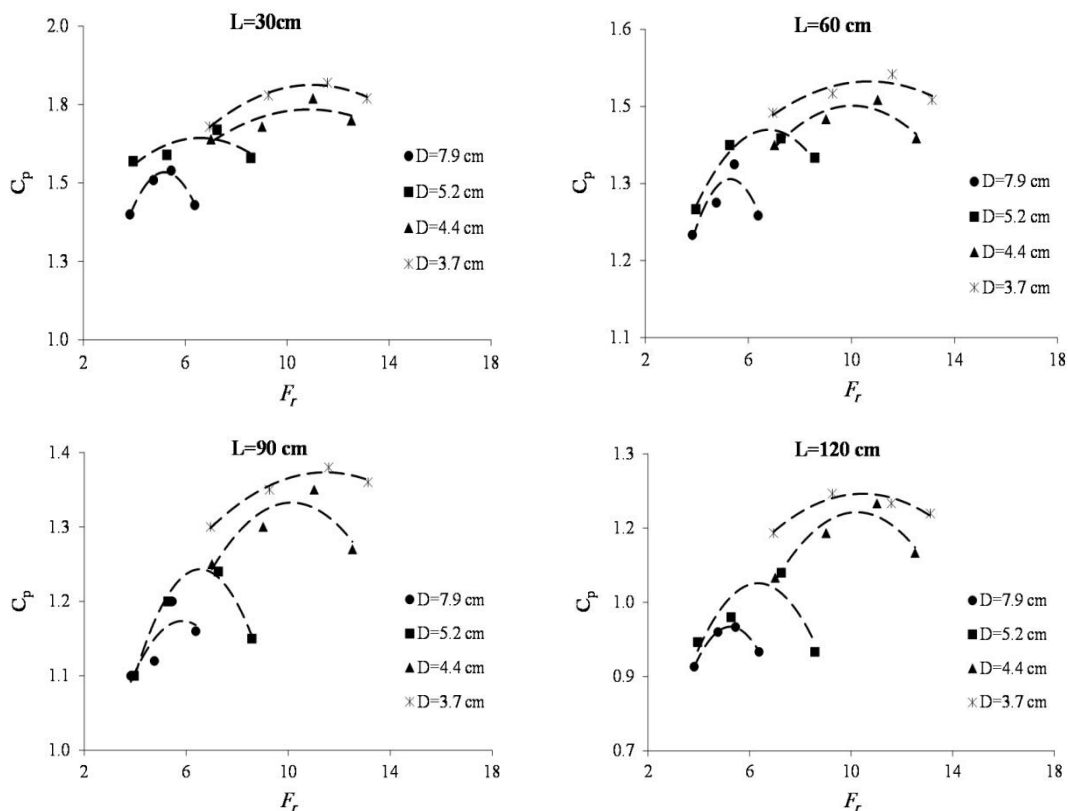
فشار محاسبه شده از رابطه تئوری افزایش کمتری داشته و در نتیجه کسر حاصله کاهش می‌یابد. به این نکته باید توجه شود که همواره مقدار فشار دینامیکی با افزایش دبی افزایش می‌یابد، اما ضریب فشار دینامیکی می‌تواند روند کاهشی و یا افزایشی پیدا کند. نتایج تحقیقات Kerman Nejad *et al.* (2011) نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود و دبی جریان در پرتابه جامی شکل، مقدار ضریب فشار دینامیکی ناشی از برخورد جت‌های ریزشی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که با نتایج این پژوهش مطابقت خوبی دارد.

تأثیر افزایش عدد فرود جریان بر حداکثر و حداقل مقادیر نوسانات فشارهای دینامیکی

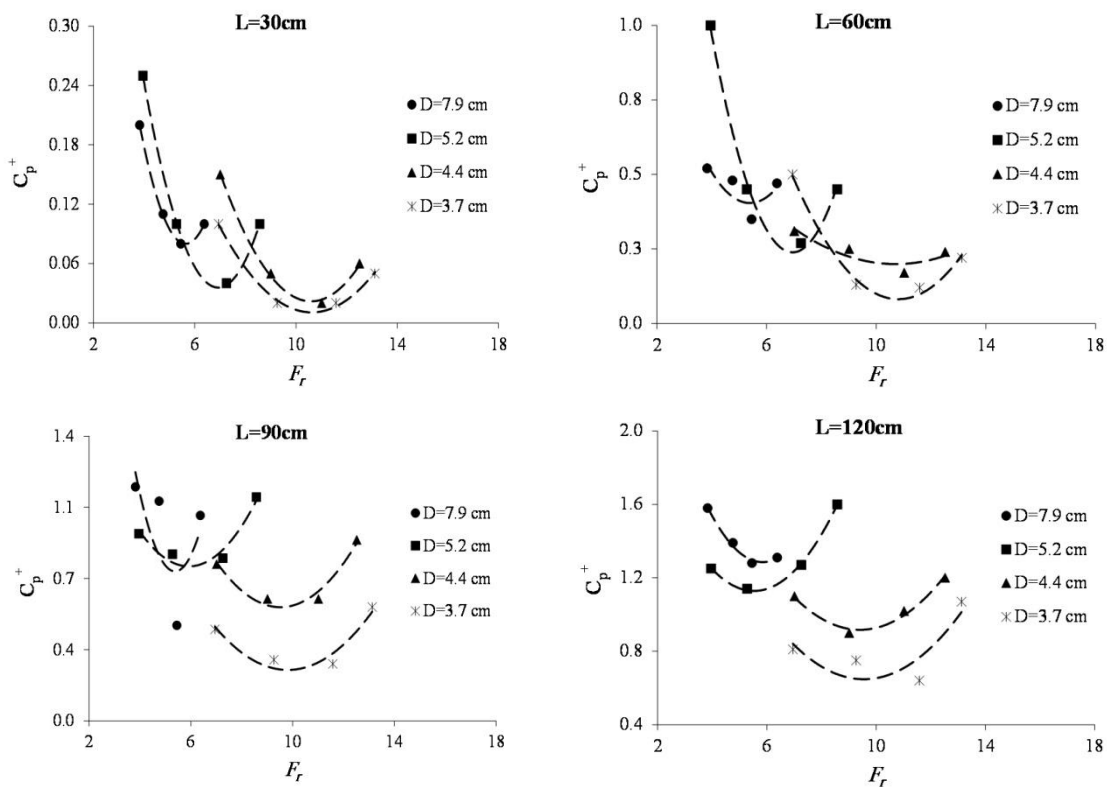
شکل ۵ و ۶، مقادیر C_p^+ و C_p^- را به ازای عدد فرود در ۴ قطر نازل و در ارتفاع ریزش‌های مختلف نشان داده است.

نمودارهای شکل (۵) نشان می‌دهد که نوسانات حدی بیشینه ابتدا روندی نزولی را دنبال می‌کنند و پس از رسیدن به نقطه کمینه، ضریب حداکثر نوسانات فشار افزایش می‌یابد. با مقایسه بین نمودار نوسانات حدی بیشینه فشار و نمودار ضریب متوسط فشار دینامیکی که در شکل (۴) آورده شده است می‌توان دریافت که در نقطه‌ای که در لحظه وقوع بیشینه ضریب متوسط فشار دینامیکی، نوسانات حداکثر فشار کمینه است. به بیان دیگر، افزایش عدد فرود موجب متراکم‌تر شدن جت آب و کاهش توزیع آشفتگی شده است؛ بنابراین مقدار نوسانات فشار ناشی از آشفتگی جت کاهش می‌یابد.

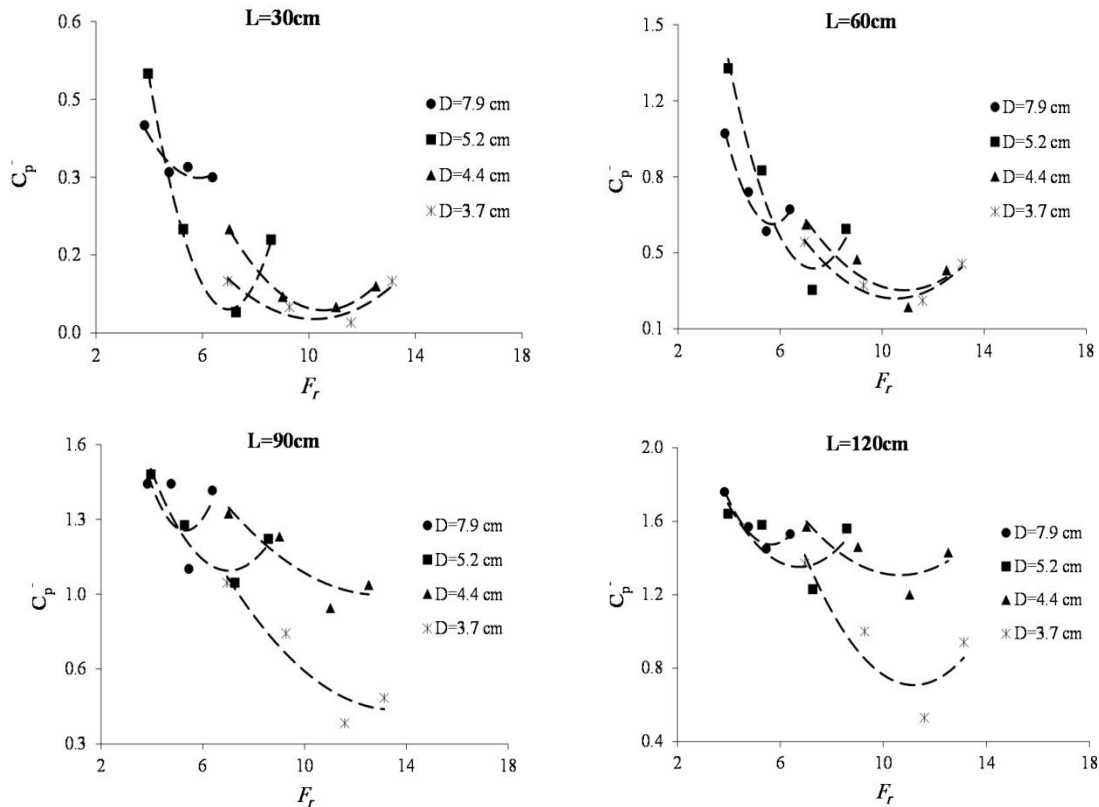
همچنین مقادیر ضریب C_p^- در شکل (۶) نشان می‌دهد که در اعداد فرود مختلف و ارتفاع ریزش‌های متفاوت، روندی مشابه با ضریب C_p^+ را داشته و پس از رسیدن به یک نقطه کمینه، حالت صعودی به خود می‌گیرد. علاوه بر این، با مقایسه میان مقادیر نوسانات حدی بیشینه فشار می‌توان دریافت که با افزایش ارتفاع ریزش، این مقادیر نیز افزایش می‌یابد به طوری که بررسی نتایج آزمایشگاهی Salemnia *et al.* (2014) نشان می‌دهد که آنها نیز نتایج مشابهی با این تحقیق بدست آورده‌اند.



شکل ۴- اثر عدد فرود جریان بر تغییرات ضریب میانگین فشار دینامیکی به ازای قطرهای مختلف نازل در ارتفاع ریزش‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر



شکل ۵- اثر عدد فرود جریان بر حداکثر نوسانات فشار دینامیکی به ازای قطرهای مختلف نازل در ارتفاع ریزش‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر



شکل ۶- اثر عدد فرود جریان بر حداقل نوسانات فشار دینامیکی به ازای قطرهای مختلف نازل در ارتفاع ریزش‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر

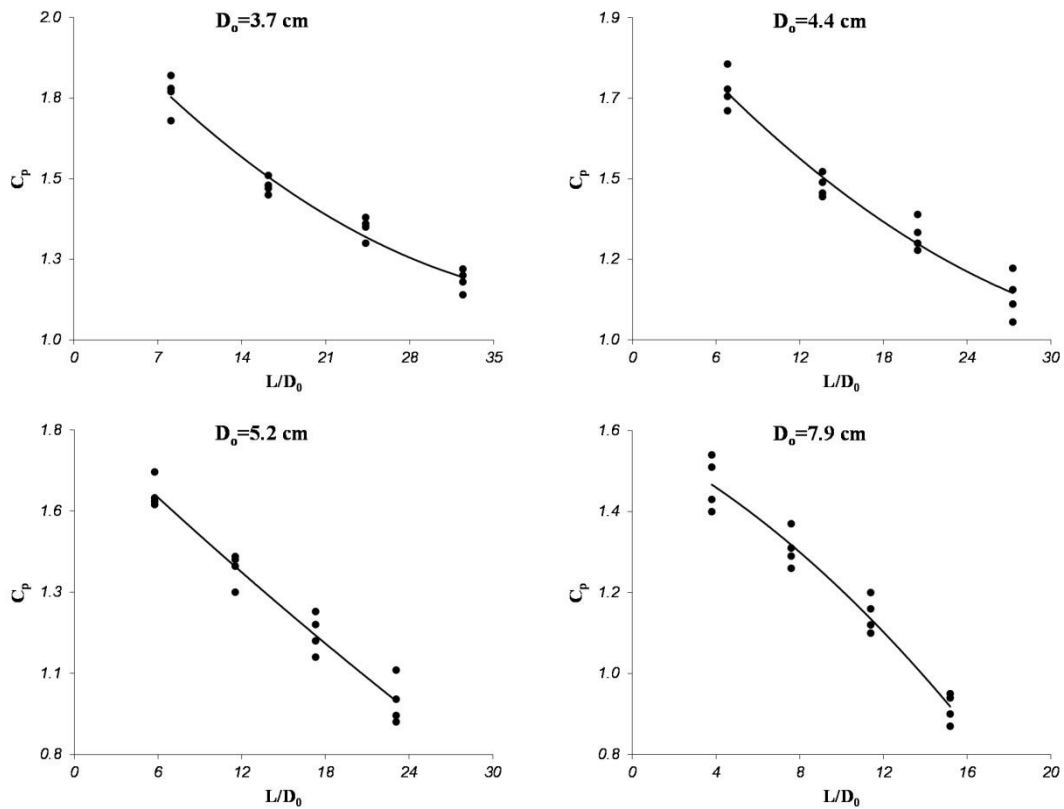
است به طوری که مقدار متوسط ضریب فشار دینامیکی با افزایش ارتفاع ریزش، روند کاهشی دارد.

اثر زاویه‌ی برخورد جت بر ضریب میانگین فشارهای دینامیکی در بررسی فشارهای دینامیکی، زاویه برخورد جت از اهمیت بسزایی برخوردار است زیرا جت جریان همواره با زاویه‌ی قائم به حوضچه و خصوصاً به دیواره حوضچه استغراق برخورد نمی‌کند. نمودارهای شکل (۸)، تغییرات ضریب میانگین فشار دینامیکی را در سه زاویه مختلف برای یک ارتفاع ریزش (۶۰ سانتی‌متر) نشان می‌دهد.

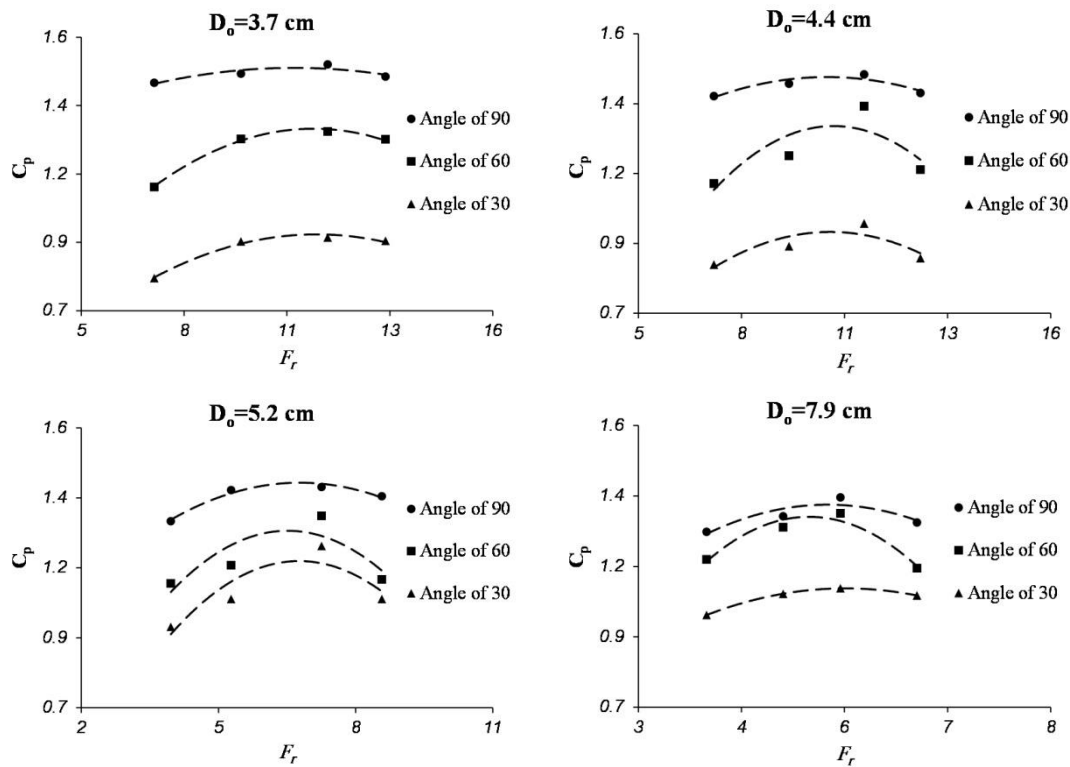
همان‌طور که از شکل (۸) برداشت می‌شود با کاهش زاویه ی برخورد، ضریب میانگین فشارهای دینامیکی کاهش می‌یابد. علت امر را می‌توان این‌گونه بیان نمود که کاهش زاویه برخورد موجب پدیدار شدن مؤلفه‌ی افقی (سُر خوردن جت جریان روی سطح) و ایجاد نوعی تنش کششی روی سطح صفحه شده است؛ بنابراین در زاویه برخورد ۳۰ درجه بیشترین کاهش فشار دینامیکی رخ می‌دهد. با افزایش زاویه برخورد به مقدار ۹۰ درجه، به دلیل افزایش مؤلفه عمودی فشار وارد بر صفحه، ضریب متوسط فشارهای دینامیکی بیشتر می‌شود.

اثر تغییرات L/D_0 بر ضریب میانگین فشارهای دینامیکی C_p در شکل (۷)، روند تغییرات ضریب C_p نسبت به عدد بی‌بعد L/D_0 جت جریان برای هر چهار نازل در دبی‌های مختلف (جدول ۱) ارائه شده است.

با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌گردد که با افزایش ارتفاع ریزش، ضریب فشارهای دینامیکی کاهش می‌یابد. با در نظر داشتن نتایج شکل‌های (۵) و (۶)، دلیل کاهش را می‌توان این‌گونه بیان نمود که افزایش ارتفاع ریزش، دامنه نوسانات و آشفتگی جت جریان را در لحظه برخورد افزایش می‌دهد، در نتیجه ضخامت هسته جت جریان در لحظه برخورد کوچک شده و سبب کاهش ضریب متوسط فشار دینامیکی می‌شود. از طرفی هرچه ارتفاع سقوط جت آب بیشتر گردد شدت توزیع آشفتگی جت جریان و همچنین ورود هوا به جت آب افزایش یافته و این افزایش ورود حباب‌های هوا به جت آب، ضرایب حداکثر و حداقل نوسانات فشار دینامیکی را افزایش می‌دهد که با نتایج Ervine and Falavey (1987) و Ervine *et al.* (1997) همخوانی دارد. آنها دریافتند که افزایش ارتفاع ریزش (درجه شکست) تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نوسانات حدی فشار داشته



شکل ۷- تغییرات ضریب متوسط فشار دینامیکی نسبت به L/D_0 در نازل‌ها



شکل ۸- تغییرات ضریب میانگین فشارهای دینامیکی با زاویه‌ی برخورد جت

استفاده شده است. لازم به ذکر است که تحقیقات این محققین، در شرایط صفحه صاف و در چهار قطر نازل ۴/۱، ۴/۳، ۵/۱ و ۷/۹ سانتی‌متر انجام شده است. همچنین ارتفاع ریزش در این

اثر زبری بر فشارهای دینامیکی
برای مقایسه تأثیر زبری بر مقدار ضریب متوسط فشارهای دینامیکی، از داده‌های آزمایشگاهی (2014) Salemnia et al.

حوضچه استغراق از دبی طرح استفاده کرد تا حوضچه استغراق برای بیشترین ضریب میانگین فشار ساخته شود. همچنین با بررسی تغییرات قطر نازل خروجی بر روی ضریب فشار دینامیکی مشخص گردید که حداکثر مقدار ضریب میانگین فشار در کوچکترین قطر نازل ایجاد می‌گردد.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که وجود زبری در کف حوضچه استغراق، تأثیر بسزایی در افزایش ضریب فشار دینامیکی دارد. همچنین نتایج بدست آمده بیانگر این مطلب است که با کاهش زاویه یی برخورد، ضریب میانگین فشارهای دینامیکی کاهش می‌یابد.

با افزایش ارتفاع ریزش جت، ضریب میانگین فشار به دلیل افزایش آشفتگی جریان ریزشی و ورود هوا به داخل جت جریان، روند نزولی و نوسانات حدی بیشینه و کمینه فشار دینامیکی روند صعودی می‌یابد. همچنین در لحظه‌ای که بیشینه ضریب فشار دینامیکی رخ می‌دهد، مقادیر حدی نوسانات بیشینه و کمینه فشار در حالت کمینه می‌باشند.

نمادها

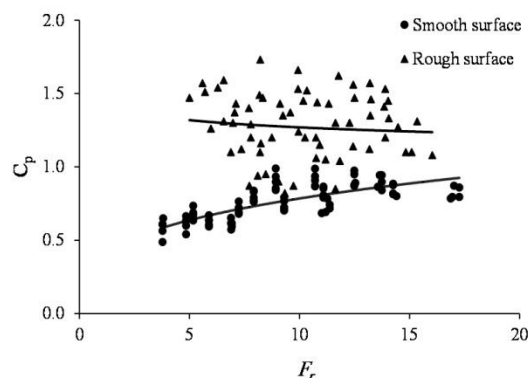
ضریب میانگین فشارهای دینامیکی	C_p
ضریب فشار دینامیکی حداکثر	C_p^+
ضریب فشار دینامیکی حداقل	C_p^-
قطر نازل	D_0
اندازه زبری	D_{50}
عدد فرود	F_r
شتاب ثقل	g
ارتفاع نظیر فشار دینامیکی	H
ارتفاع ریزش	L
عدد رینولدز	Re
سرعت خروجی جت از نازل	V_0
سرعت جت در لحظه برخورد به کف حوضچه	V_j
زاویه برخورد جت با صفحه	θ
لزجت دینامیکی آب	μ
جرم مخصوص آب	ρ_w

REFERENCES

Bollaert, E. and Schleiss, A. (2003(a)). Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets, Part I: A state-of-the-art review. *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), 451-464.

Bollaert, E. and Schleiss, A. (2003(b)). Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets, Part II: Experimental results of dynamic pressures at pool bottoms and in one-and two-

پژوهش برابر با ۸، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ سانتی‌متر می‌باشد به طوری که قطر نازل‌ها و ارتفاع ریزش جت در آزمایش‌ها Salemnia et al. (2014) کوچکتر از قطر نازل‌ها و ارتفاع ریزش جت در این پژوهش (صفحه زبر) می‌باشد. در شکل (۹)، مقایسه‌ای کلی بین ضریب متوسط فشارهای دینامیکی در سطح زبر و سطح صاف انجام شده است.



شکل ۹-مقایسه‌ی ضریب میانگین فشارهای دینامیکی میان سطح صاف و زبر برای زاویه برخورد ۹۰ درجه

با توجه به کوچک بودن قطر و ارتفاع ریزش در صفحه صاف، انتظار می‌رفت که مقدار فشار دینامیکی در صفحه صاف بیشتر از صفحه زبر باشد اما در شکل (۹) مشاهده می‌شود که در سطح زبر، مقدار ضریب میانگین فشارهای دینامیکی بیشتر از صفحه صاف بوده است به طوری که سطح زبر می‌تواند مقدار ضریب فشارهای دینامیکی را تا ۷۰ درصد افزایش دهد. دلیل این پدیده را به این شکل می‌توان توجیه کرد که زبری به صورت یک مانع در برابر پخشیدگی جت جریان در لحظه برخورد عمل کرده و از تشکیل مؤلفه‌ی مماسی و تنش کششی روی سطح صفحه برخورد جلوگیری می‌کند در نتیجه بخش بیشتری از انرژی جنبشی تبدیل به انرژی فشاری می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج آزمایشگاهی در این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش دبی، مقدار ضریب میانگین فشارهای دینامیکی افزایش می‌یابد لذا پیشنهاد می‌شود که در کارهای اجرایی برای طراحی

dimensional closed end rock joints. *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), 465-480.

Castillo, L., Puertas, J., and Dolz, J. (1999). Discussion: Pressure fluctuations on plunge pool floors (Ervine, D. A., Falvey, H. T. and Withers, W.). *Journal of Hydraulic Research*, 37(2), 272-277.

Castillo, L., Puertas, J. and Dolz, J. (2004). Discussion:

- Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets, Part I: A state-of-the art review. (Bollaert, E. and Schleiss, A.). *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), 451-464.
- Castillo, L. and Luis, G. (2006). Aerated jets and pressure fluctuation in plunge pools. *Proceeding the 7th International Conference on Hydro Science and Engineering (ICHE)*, 10-13 Sep, Drexel University, Philadelphia, USA.
- Castillo, L. (2007). Pressure characterization of undeveloped and developed jets in shallow and deep pool. *Proceeding 32nd Congress of IAHR, the International Association of Hydraulic Engineering and Research*, Venice, Italy, 2, 645-655.
- Ervine, D. A. and Falavey, H. T. (1987). Behavior of turbulent jets in atmosphere and in plunge pools. *Proceeding of the Institution of the Civil Engineering*, 83(1), 295-314.
- Ervine, D. A., Falavey, H. T. and Withers, W. (1997). Pressure fluctuation on plunge pool floors. *Journal of Hydraulic Research*, 35(2), 491-513.
- Hartung, F. and Häusler, E. (1973). Scours, stilling basins and downstream protection under free overfall jets at dams. *Proceedings of the 11th Congress on Large Dams*, Madrid, pp. 39-56.
- Kerman Nejad, J., Fathi-Moghadam, M., Lashkarara, B. and Haghighipour, S. (2011). Dynamic pressure of Filip bucket jet. *World Applied Sciences Journal*, 12(8), 1165-1171.
- Liu, P., Gao, J., Li, Z. and Li, Y. (1997). Mechanism of energy dissipation and hydraulic design for plunge pools downstream of large dams. *The 27th Congress Energy and Water Sustainable Research, ASCE*, pp. 417-422.
- Peter, J. R. (1994). Force and pressure measurements in spillway plunge pools. *The National Conference of Hydraulic Engineering, ASCE*, pp. 553-557.
- Salemnia, A., Fathi-Moghadam, M. and Haghighipour, S. (2014). Effect of nozzle diameter and falling height on the dynamic pressure coefficient of vertical free water jets. *Journal of Water and Soil Science*, 24(4), 185-195. (In Farsi)