



ISSN 2251-7480

نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال ششم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۶

بررسی فشارهای ناشی از برخورد جت‌های ریزشی به بستر حوضچه استغراق

منوچهر فتحی مقدم^{۱*}، سجاد کیانی^۲ و بابک لشکرآرا^۳

*^۱ استاد؛ گروه سازه‌های آبی؛ دانشکده مهندسی علوم آب؛ دانشگاه شهید چمران اهواز؛ اهواز؛ ایران

^۲ نویسنده مسئول مکاتبات: fathi49@gmail.com

^۳ دانشجوی دکتری؛ گروه سازه‌های آبی؛ دانشکده مهندسی علوم آب؛ دانشگاه شهید چمران اهواز؛ اهواز؛ ایران

^۴ استادیار؛ گروه مهندسی عمران؛ دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول؛ دزفول؛ ایران

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۰۱

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۴/۱۲

چکیده

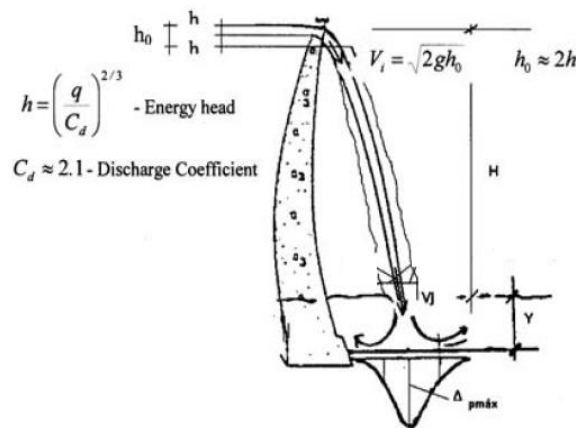
حوضچه‌های استغراق به منظور استهلاک انرژی اضافی در پایین دست سرریزهای ریزشی سدها ساخته می‌شود. سرعت جریان در اثر برخورد جت آب به بستر حوضچه به فشار دینامیکی تبدیل می‌شود. هدف تحقیق حاضر، بررسی فشار ناشی از برخورد یک جت قائم به بستر حوضچه استغراق می‌باشد. از این رو، آزمایش‌ها برای چهار دبی مختلف (متناسب با قطر نازل بین ۶ تا ۲۷/۵ لیتر بر ثانیه متغیر بوده) در سه قطر نازل متفاوت ۴/۳، ۵/۲ و ۸/۲ سانتی‌متر برای چهار ارتفاع ریزش ۳۷، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر انجام شده است. همچنین آزمایش‌ها برای سطوح صاف و زبر در شرایط هیدرولیکی یکسان انجام و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. مقادیر فشار دینامیکی توسط یک ترانس‌دیوسر فشار اندازه‌گیری شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش قطر نازل جت موجب کاهش ضریب فشار دینامیکی می‌شود. همچنین نتایج نشان‌دهنده یک افزایش در مقدار فشار دینامیکی به دلیل وجود زبری در صفحه برخورد است. بعلاوه، تغییرات عدد فرود جت جریان و ارتفاع ریزش تأثیر بسزایی بر روی فشار دینامیکی دارد. مقدار بیشینه فشار دینامیکی در مرکز صفحه تماس بوده و با دور شده از مرکز صفحه، مقدار آن به تدریج کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: جت ریزشی؛ حوضچه استغراق؛ سرریز سد؛ سطح زبر؛ عدد فرود

مقدمه

در سال‌های اخیر نیاز به کاهنده‌های انرژی به منظور استهلاک انرژی جت آب ناشی از سیلاب‌ها که از روی سد عبور می‌کند مورد توجه است. به منظور تخلیه آب از کنار و یا از روی سدها معمولاً از سرریزهای آزاد آبشاری مستقر در تراز نزدیک به تاج سد و یا سرریزهای پرش اسکی و پرتاب‌کننده‌ی جامی شکل استفاده می‌شود که در

شکل ۱ خروج آب به صورت جت آزاد به هوا نشان داده شده است. اما مسئله اصلی آن است که جریان سیلاب به نحوی خارج گردد که انرژی بالای جت آب منجر به آبستنگی پایین دست و نهایتاً تخریب سد نگردد. مطالعات محققان گویای این مطلب است که تنها بخش کوچکی از انرژی جت در اثر سقوط و اختلاط با هوا مستهلاک می‌گردد.



شکل ۱. تصویر شماتیک پرتابه آب از سرریز سد (Castillo, ۲۰۰۷)

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 جت جریان ریزشی در حوضچه‌های استغراق و بررسی مقادیر مختلف فشارهای دینامیکی مورد توجه محققین بسیاری در طی دو دهه اخیر قرار گرفته است. Hartung و Häusler (۱۹۷۳) آزمایش‌هایی در زمینه‌ی جت‌های عمودی ریزش‌کننده 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 و Falavey (۱۹۸۷) و Ervine و همکاران (۱۹۹۷) به بررسی نوسانات فشار دینامیکی با توجه به شدت توزیع آشفتگی (T_{II}) جت آزاد پرداخته و نتایج جت‌های دایره‌ای را با جت‌های مستطیلی مقایسه کردند، به علاوه درجه شکست جت نیز قبل از ورود به حوضچه و اثرات ورود هوا به آن نیز توسط این محققین مورد بررسی قرار گرفت. Castillo و همکاران (۱۹۹۹) با به‌کارگیری مدل فیزیکی، مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین فشارهای نوسانی وارد بر کف حوضچه را

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، 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، درنهایت آن را به بستر رودخانه در پایین‌دست هدایت می‌کنند.

به‌طور کلی طراحی حوضچه‌های استغراق بر مبنای تعیین عمق آبستگي با استفاده از پارامترهای دبی، عمق پایاب، اختلاف ارتفاع سطح آب مخزن تا پایاب و اندازه مصالح بستر پایین‌دست می‌باشد. در بعضی شرایط به دلایل مختلفی از جمله ضرورت‌های اقتصادی و ایمنی، طراحی حوضچه با استفاده از عمق آبستگي مناسب نمی‌باشد. در این صورت از حوضچه‌های پوشش داده شده استفاده می‌شود و طراحی آن بر اساس تعیین توزیع فشارهای وارد به کف و دیواره‌های حوضچه آن انجام می‌شود. ویژگی‌هایی چون غیر همگنی و تغییرات سه بعدی 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.

¹ Turbulence intensity

و قطر جت بر فشار دینامیکی وارده به سطوح زبر و صاف، کمتر مورد توجه محققین پیشین قرار نگرفته است. لذا در این تحقیق، تأثیر قطر نازل و ارتفاع ریزش جت قائم (بحرانی‌ترین زاویه) بر فشار دینامیکی به وجود آمده مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین در پژوهش حاضر، مقدار و نحوه توزیع فشارهای دینامیکی ناشی از برخورد جت‌های ریزشی به سطوح زبر و صاف در شرایط یکسان بررسی و مقایسه می‌شود.

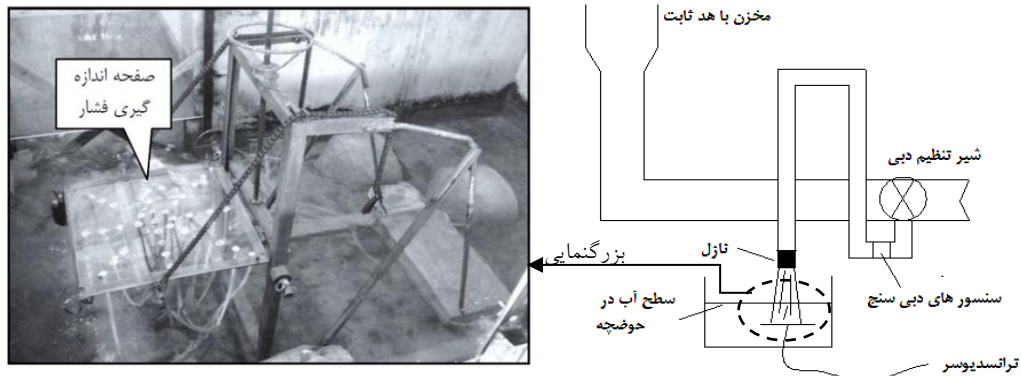
مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

این پژوهش در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام پذیرفت. برای ایجاد جت عمودی از لوله‌ای با جنس پولیکا به قطر ۴ اینچ که از خط لوله اصلی آزمایشگاه منشعب شده استفاده شده است. خط لوله اصلی نیز به یک مخزن تأمین آب که در ارتفاع ۶ متری از کف آزمایشگاه قرار داشته متصل بوده و موجب تولید بار آبی ثابت در طول آزمایش می‌شود. به منظور بررسی تأثیر ابعاد دهانه نازل بر ضریب فشار دینامیکی، دهانه خروجی لوله ۴ اینچی توسط نازل‌هایی از جنس پلاستیک فشرده تنگ‌تر می‌شود به طوری که توسط بستنی به لوله پولیکا متصل می‌شوند. جت خروجی از نازل‌ها بر صفحه‌ی پلکسی‌گلاسی به ابعاد ۵۰×۵۰ سانتی‌متر سوار بر یک پایه که قابلیت تغییر ارتفاع را داشته فرود می‌آید. این صفحه برخورد داخل یک حوضچه استغراق به ابعاد ۲/۵ × ۱/۵ متری قرار گرفته است. برای تنظیم و کنترل ارتفاع استغراق روی صفحه پلکسی‌گلاس، یک دریچه کشویی در انتهای حوضچه استغراق تعبیه شده است به طوری که مازاد جریان از زیر دریچه کشویی و با مجرای مستطیلی شکل به استخر جمع‌آوری آب هدایت شده و توسط سیستم پمپاژ به مخزن یادشده بازگردانده می‌شود.

به دست آورند. 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 و همکاران (۱۹۹۷) 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. Kerman Nejad و همکاران (۲۰۱۱)، مطالعاتی بر روی نوسانات فشار دینامیکی ناشی از برخورد جت‌های ریزشی حاصل از پرتابه‌های جامی شکل در شیب‌های مختلف بستر حوضچه انجام دادند. آن‌ها بیان نمودند که کاهش زاویه برخورد موجب سر خوردن جت جریان روی سطح صفحه می‌شود. بنابراین در زاویه برخورد ۹۰ درجه، به دلیل افزایش مؤلفه عمودی فشار وارد بر صفحه، بیش‌ترین ضریب متوسط فشارهای دینامیکی ایجاد می‌شود. در ادامه این مطالعات می‌توان به تلاش‌های Castillo (۲۰۰۷)، Luis و Castillo (۲۰۰۶)، Castillo و همکاران (۲۰۰۴)، Bollaert و Schleiss (۲۰۰۳a) و Ghaneezad و همکاران (۲۰۱۵) 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.

با توجه به مطالب بیان شده می‌توان نتیجه گرفت که تحقیقات متعددی در مورد ارتفاع استغراق حوضچه و میزان تأثیر آن بر کاهش فشار دینامیکی وارده به کف حوضچه انجام گرفته است اما تأثیر تغییرات ارتفاع ریزش



شکل ۲. نمای کلی از مدل آزمایشگاهی - صفحه پلکسی گلاس و پایه آن

گرفته شد. تصویری شماتیک از تجهیزات آزمایشگاهی این پژوهش در شکل ۲ مشاهده می شود.

روش انجام آزمایش

مراحل انجام آزمایش برای جت ریزشی آزاد بدین گونه است که ابتدا ارتفاع ریزش مورد نظر تعیین شده و نازل مورد نظر بر روی قسمت خروجی جت نصب گردیده 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 تراנסدویسر فشار انجام می پذیرد. پس از اتمام برداشت فشارها در دبی های مورد نظر، نازل خروجی تغییر کرده و تمامی آزمایش ها با نازل جدید انجام می گیرد. در نهایت ارتفاع ریزش تغییر کرده و مراحل فوق مجدداً تکرار می گردد. تمامی این مراحل عیناً برای صفحه صاف نیز انجام پذیرفته و داده های آن برداشت می شود. شایان ذکر است که عمق استغراق در تمامی آزمایش ها، مقداری ثابت و برابر ۲۵ سانتی متر بوده است. در این مطالعه، آزمایش ها برای همه نازل ها در چهار ارتفاع ریزش با چهار دبی متفاوت انجام شده است به طوری که مجموع حالات در این پژوهش برابر ۹۶ مورد است که ۴۸ مورد آن ها مربوط به صفحه زبر و ۴۸ مورد دیگر مربوط به صفحه صاف است. جدول ۱ متغیرهای مختلف آزمایش را نشان می دهد.

در این مطالعه، آزمایش ها با چهار دبی مختلف، چهار ارتفاع ریزش ۳۷، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی متر و سه نازل خروجی متفاوت به قطرهای ۴/۳، ۵/۲ و ۸/۲ سانتی متر انجام پذیرفت.

جهت اندازه گیری فشار وارده به صفحه، تعداد ۱۳ روزنه با چینش بر دو مسیر متعام بر روی صفحه ایجاد شده است به طوری که فاصله روزنه ها از یکدیگر برابر ۳ سانتی متر بوده است. هر روزنه از زیر به یک پیرومتر متصل شده که جهت اندازه گیری فشار در نقاط مختلف صفحه از آن استفاده می شود. نوسانات فشار توسط تراנסدویسر مدل WIKA S-11 اندازه گیری و ثبت شده است. این تراנסدویسر ها قابلیت اندازه گیری فشارهایی در محدوده ۲/۵-۰ بار را دارد. نرخ نمونه برداری و مدت زمان داده برداری برای هر روزنه، به ترتیب ۵۰ هرتز و ۴۰ ثانیه تنظیم شده است. از آنجا که یکی از اهداف این تحقیق بررسی تأثیر وجود زبری در کف حوضچه استغراق بر نوسانات فشار در کف است در نتیجه یکی از صفحات با دانه های شن با ضخامت تقریبی ۰/۸ تا ۱ سانتی متر مضرس شده است. جهت اندازه گیری دبی نیز از یک دبی سنج التراسونیک با دقت اندازه گیری ۱٪ استفاده گردید. همچنین برای اندازه گیری سطح آب در حوضچه استغراق، شاخص مدرج با دقت ۰/۱ میلی متر در نظر

جدول ۱. مقادیر متغیرهای آزمایشگاهی مورد بررسی

ارتفاع ریزش (سانتی‌متر) برای جت ریزشی آزاد	دبی (لیتر بر ثانیه)	قطر نازل (سانتی‌متر)
۱۲۰، ۹۰، ۶۰، ۳۷	۲۷/۵، ۲۳/۵، ۲۰/۵، ۱۶/۵	۸/۲
۱۲۰، ۹۰، ۶۰، ۳۷	۱۳، ۱۱، ۸، ۶	۵/۲
۱۲۰، ۹۰، ۶۰، ۳۷	۱۲/۵، ۱۱، ۹، ۷	۴/۳

تحلیل ابعادی

مقدار فشار دینامیکی به وجود آمده از برخورد جت جریان به صفحه مستغرق تابعی از خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر، خصوصیات هندسی جت جریان و شرایط هیدرولیکی جریان می‌باشد. بنابراین پارامترهای تأثیرگذار در این پژوهش را می‌توان در حالت کلی، به صورت رابطه (۱) بیان نمود:

$$f(H, V, g, \rho_w, \mu, D, D_{50}, L, Y) = 0 \quad (1)$$

H : ارتفاع نظیر فشار دینامیکی، V : سرعت جت، g : شتاب ثقل، ρ_w : جرم مخصوص آب، μ : لزجت دینامیکی آب، D : قطر نازل، D_{50} : اندازه زبری ذرات در حوضچه استغراق، L : ارتفاع ریزش (فاصله دهانه نازل تا سطح آب حوضچه استغراق) و Y : عمق استغراق، که در پدیده هیدرولیکی جت دخالت دارند. با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه (۱) را می‌توان به صورت رابطه بی‌بعدی زیر نوشت:

$$f\left(\frac{Y}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{H}{D}, \frac{L}{D}, R_e, F_r\right) = 0 \quad (2)$$

در رابطه (۲)، R_e عدد بدون بعد رینولدز می‌باشد. از عدد رینولدز به دلیل آشفتگی کامل جت جریان می‌توان صرف نظر کرد. همچنین، عبارت‌های بدون بعد D_{50}/D و Y/D را به دلیل استفاده از یک نوع زبری و یک عمق استغراق در این تحقیق می‌توان حذف نمود. پس خواهیم داشت:

$$f\left(\frac{H}{D}, \frac{L}{D}, F_r\right) = 0 \quad (3)$$

با ادغام دو عبارت بدون بعد H/D و V^2/gD ، رابطه (۳) به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{H}{V^2/2g} = f\left(\frac{L}{D}, F_r\right) \quad (4)$$

مطابق با نظریه Ervine و Falavey (۱۹۸۷)، میانگین فشارهای دینامیکی در محل برخورد توسط ضریب بی‌بعد (C_p) محاسبه می‌شود:

$$C_p = \frac{H_m - Y}{V^2/2g} \quad (5)$$

که در آن H_m ، میانگین فشار دینامیکی می‌باشد. ضریب فشار دینامیکی (C_p) نشان‌دهنده میانگین نوسانات فشار دینامیکی روی کف حوضچه می‌باشد. بنابراین

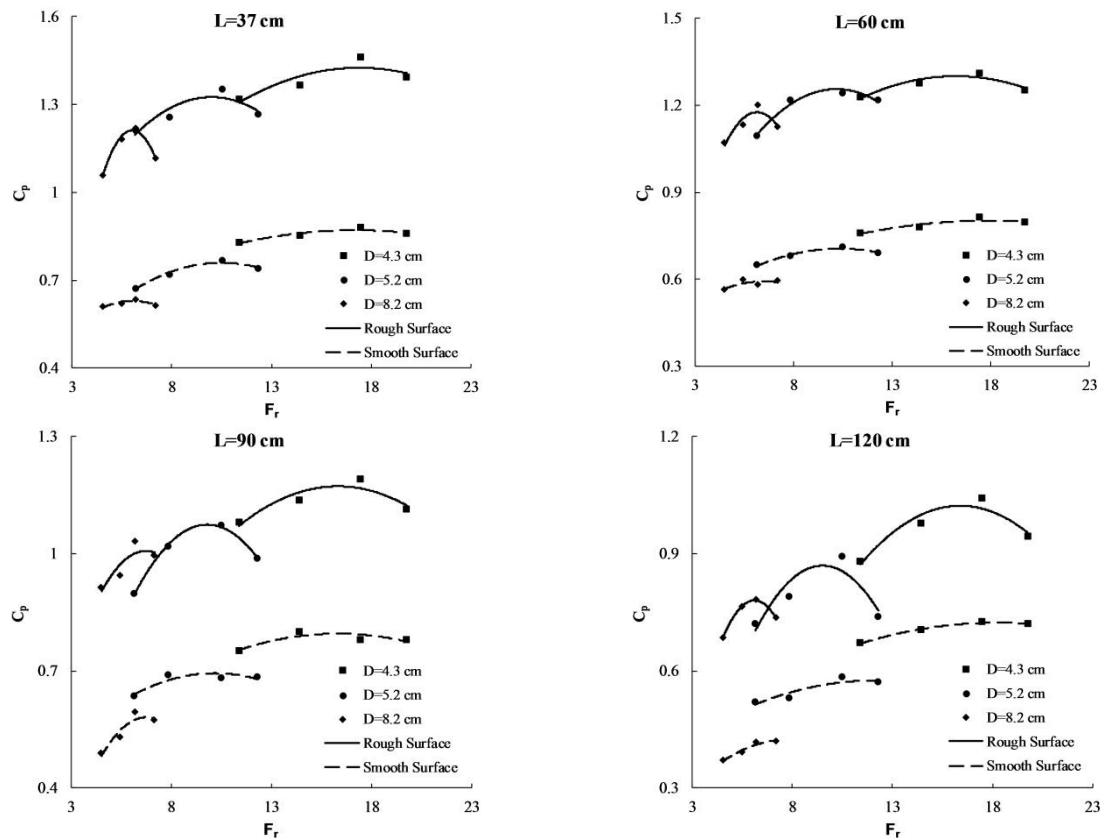
$$C_p = f\left(\frac{L}{D}, F_r\right) \quad (6)$$

نتایج و بحث

تأثیر افزایش عدد فرود جریان بر ضریب میانگین فشارهای دینامیکی C_p

نمودارهای شکل ۳، تغییرات ضریب میانگین فشارهای دینامیکی را نسبت به عدد فرود جریان (F_r) در سه نازل مختلف نشان می‌دهد.

مطابق با شکل ۳، 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 شدت آشفتگی (نسبت ریشه میانگین مربعات نوسانات سرعت به سرعت متوسط جت آب) شده است (شکل ۴).



شکل ۳. اثر عدد فرود جریان بر تغییرات ضریب میانگین فشار دینامیکی

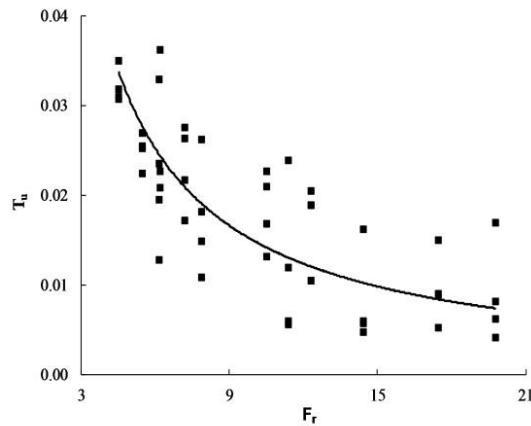
فشار اندازه‌گیری شده به کمک ترانسدیوسر تأثیر چندانی نگذاشته و اجازه دهد که فشار اندازه‌گیری شده به نسبت فشار محاسبه شده افزایش یابد. اما پس از نقطه حداکثر نمودار، مقدار فشار دینامیکی اندازه‌گیری شده به علت افزایش افت‌ها، نسبت به فشار محاسبه شده از رابطه تئوری (مخرج کسر) افزایش کم‌تری داشته و در نتیجه 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.

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 مقدار قابل توجهی افزایش دهد. دلیل این پدیده را به این شکل می‌توان توجیه کرد که

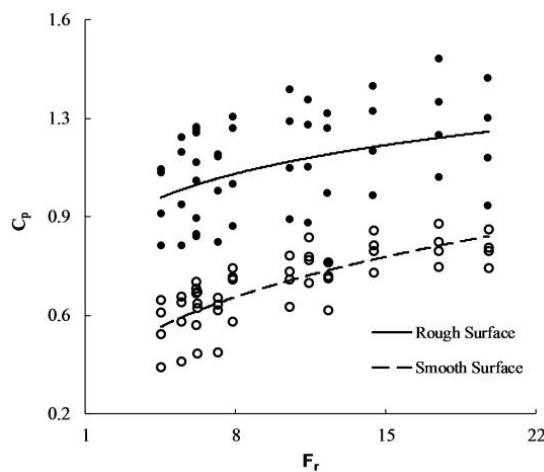
کاهش ضریب توزیع آشفتگی (T_{II}) باعث مقاومت بیش‌تر جت آب در مقابل ورود هوا به درون خود و افزایش طول شکست می‌شود. در نتیجه مقادیر ضریب فشار دینامیکی در تمامی ارتفاع‌های ریزش افزایش می‌یابد. همچنین نمودارهای شکل ۳ نشان می‌دهد ضریب میانگین فشارهای دینامیکی با افزایش عدد فرود جریان، ابتدا روندی افزایشی و سپس کاهشی دارد. علت این پدیده را می‌توان این‌گونه بیان نمود که افزایش سرعت جت موجب بالا رفتن عدد فرود و در نتیجه افزایش 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

به انرژی فشاری می‌شود. در شکل ۵، مقایسه‌ای کلی بین ضریب متوسط فشارهای دینامیکی در سطح زیر و سطح صاف انجام شده است.

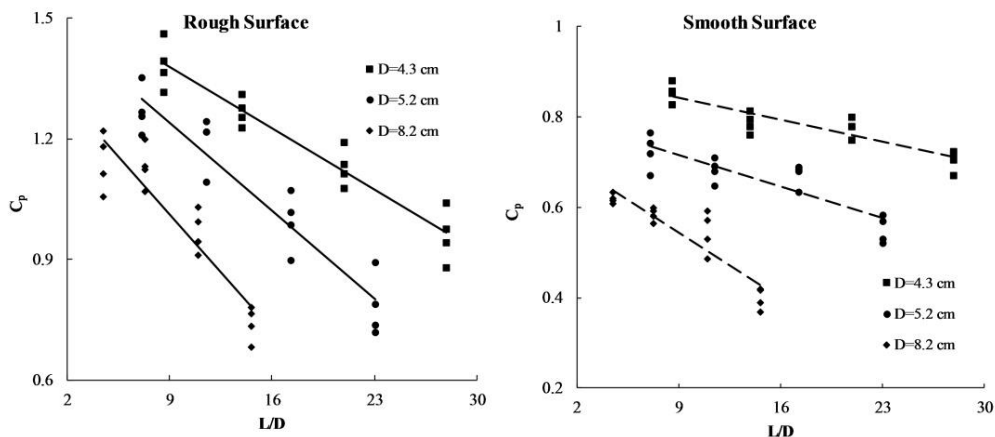
زبری به صورت یک مانع در برابر پخشیدگی جت جریان در لحظه برخورد عمل کرده و از تشکیل مؤلفه‌ی مماسی و تنش کششی روی سطح صفحه برخورد جلوگیری می‌کند در نتیجه بخش بیش‌تری از انرژی جنبشی تبدیل



شکل ۴. اثر عدد فرود جت جریان بر ضریب شدت آشفتگی در صفحه صاف



شکل ۵. اثر زبری بر مقدار ضریب فشار دینامیکی



شکل ۶. تغییرات ضریب متوسط فشار دینامیکی نسبت به ارتفاع بی‌بعد جت

(r/Y) ۰/۲ و ۰/۴ از روزنه مرکزی برای صفحه زبر به ترتیب برابر ۰/۸ و ۰/۴۵ است درحالی‌که در سطوح صاف، همین مقادیر برابر ۰/۶۷ و ۰/۳۱ می‌باشد. بنابراین خطر شکست پوشش کف حوضچه در فواصل دورتر از محل برخورد جت برای سطوح زبر وجود دارد. با توجه به شکل ۷، توزیع ضریب فشار دینامیکی در حوضچه استغراق از یک تابع نمایی پیروی می‌کند. در شکل ۸، خطوط هم‌فشار بر روی صفحات اندازه‌گیری به صورت گرافیکی نمایش داده شده است.

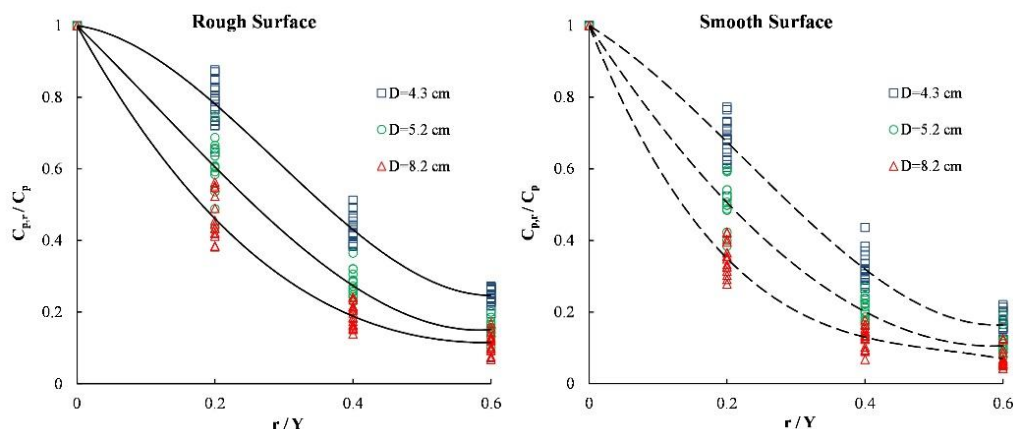
نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که بیشینه مقدار میانگین نوسانات فشار دینامیکی در کوچک‌ترین قطر رخ داده است. همچنین افزایش ارتفاع ریزش جت، ضریب میانگین فشار را به دلیل افزایش آشفتگی جریان ریزشی و ورود هوا به داخل جت جریان کاهش می‌دهد. بنابراین بیشینه مقدار به دست آمده برای ضریب C_p در ارتفاع ریزش ۳۷ سانتی‌متر و برای قطر ۴/۳ سانتی‌متر اتفاق افتاده است. افزایش عدد فرود موجب متراکم‌تر شدن جت آب و کاهش شدت آشفتگی شده است به طوری‌که با کاهش ضریب توزیع آشفتگی، مقاومت جت آب در مقابل ورود هوا بیش‌تر می‌شود.

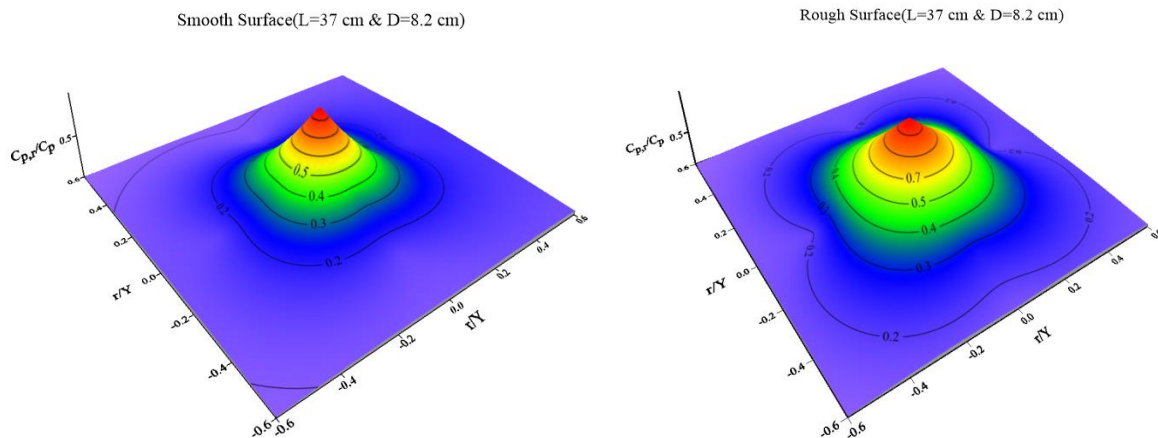
اثر تغییرات L/D بر ضریب میانگین فشارهای دینامیکی C_p در شکل ۶، روند تغییرات ضریب C_p نسبت به عدد بی‌بعد L/D برای دبی‌های مختلف ارائه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش ارتفاع ریزش، ضریب فشارهای دینامیکی کاهش می‌یابد. دلیل کاهش را می‌توان این‌گونه بیان نمود که افزایش ارتفاع ریزش، دامنه نوسانات و آشفتگی جت جریان و همچنین ورود هوا به جت آب 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.

توزیع شعاعی میانگین نوسانات فشار دینامیکی

در نمودارهای شکل ۷، تغییرات شعاعی ضریب میانگین فشار دینامیکی ($C_{p,r}$) نسبت به ضریب میانگین فشار دینامیکی روزنه مرکزی (C_p) در صفحات زبر و صاف نشان می‌دهد. از نمودارهای ذیل این‌گونه می‌توان استنباط کرد که با فاصله گرفتن از مرکز صفحه فشار (r)، ضریب میانگین فشار کاهش می‌یابد به طوری‌که این روند کاهش فشار در صفحه زبر کم‌تر از صفحه صاف می‌باشد بدین‌صورت که در نازل ۴/۳ سانتی‌متر، مقدار $C_{p,r}/C_p$ در فواصل نسبی



شکل ۷. توزیع شعاعی ضریب میانگین نوسانات فشار



شکل ۸. توزیع شعاعی فشار دینامیکی بر روی صفحات صاف و زبر

برخورد جت بیشینه بوده و به تدریج با فاصله گرفتن از محل برخورد کاهش می‌یابد. لذا در کارهای اجرایی باید از زبر شدن کف حوضچه استغراق خصوصاً در مرکز برخورد جت پرهیز شود.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که وجود زبری در کف حوضچه استغراق، تأثیر بسزایی در افزایش ضریب فشار دینامیکی دارد به طوری که بازه تغییرات ضریب فشار دینامیکی در صفحه زیر $0.46-1/74$ و در صفحه صاف $0.37-0.88$ می‌باشد. همچنین توزیع فشار در محل

فهرست منابع

- Bollaert, E. and Schleiss, A. 2003a. 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: 451-464.
- Bollaert, E. and Schleiss, A. 2003b. 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-dimensional closed end rock joints. *Journal of Hydraulic Research*, 41: 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: 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: 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, July 2007, 2: 645-655.
- Ervine, D. A. and Falvey, H. T. 1987. Behavior of turbulent jets in atmosphere and in plunge pools. *Proceeding of the Institution of the Civil Engineering*, 83: 295-314.
- Ervine, D. A., Falvey, H. T. and Withers, W. 1997. Pressure fluctuation on plunge pool floors. *Journal of Hydraulic Research*, 35: 491-513.
- Ghaneezad S.M., Atkinson J.F. and Bennett S.J. 2015. Effect of flow confinement on the hydrodynamics of circular impinging jets: implications for erosion assessment. *Journal of Environ Fluid Mechanics*, 15: 1-25.
- 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, June 1973.
- Kerman Nejad, J., Fathi-Moghadam, M., Lashkarara, B. and Haghhighipour, S. 2011. Dynamic pressure of filip bucket jet. *World Applied Sciences Journal*, 12: 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, New Delhi,

February 1997.

Peter, J. R. 1994. Force and pressure measurements in spillway plunge pools. The National Conference of Hydraulic Engineering, ASCE, New York, August 1994.



Impact pressures of falling jets on the plunging pool bed

Manochehr Fathi-Moghadam^{1*}, Sajad Kiani² and Babak Lashkar-Ara³

^{1*}) Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khosestan, Iran

*Corresponding author Email: fathi49@gmail.com

²) Ph.D. Student, Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khosestan, Iran

³) Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

Received: 02-07-2016

Accepted: 22-10-2016

Abstract

Plunging pools are constructed at the downstream of dam spillways to dissipate the excess energy. The turbulent flow velocity converts to the dynamic pressure due to impact of flow with the pool's bed. The aim of this research is to determine impact pressure of a vertical jet on plunging pool bed. Hence, the experiments were carried out in four different discharges (ranging from 6 to 27.5 lit/s according to the nozzle diameters), three jet diameters including 4.3, 5.2 and 8.2 cm and four falling heights of 37, 60, 90 and 120 cm. Also the experiments are conducted in similar flow conditions for smooth and rough surfaces, and results are compared. Dynamic pressures were measured with a pressure transducer. The analysis of data showed that increase of jet diameter causes decrement in the dynamic pressure coefficient. Results revealed an increase in dynamic pressures due to roughness of contacting surface. Moreover, variations of jet Froude number and fall length have significant effects on the dynamic pressure coefficient. The impact pressure was the highest in the surface center and was gradually reduced in outer zones.

Keywords: dam spillway, falling jet, Froude number, plunging pool, rough surface