

بررسی فشارهای دینامیکی وارد بر دیواره جانبی، ناشی از جت خروجی از پرتابه جامی شکل در حوضچه مستغرق

حسن حسینی^{۱*}، منوچهر فتحی مقدم^۲، زهرا اولین چهارسوقی^۳ و صادق دهدار بهبهانی^۴

^{۱*} - نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ - استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

^۳ - دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

^۴ - دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۹

تاریخ دریافت: ۹۰/۴/۵

چکیده

در بررسی پرتابه‌های جامی شکل به وضوح مشخص است که محل برخورد جت با کف و دیواره پایین دست بالاترین امکان فرسایش را نسبت به سایر نقاط دارد. تعیین مشخصات فشارهای دینامیکی محل برخورد در شرایط مختلف این امکان را می‌دهد که در صورت وقوع چنین شرایطی در سازه‌های اجرایی احتمال وقوع آبشستگی و میزان دقیق آن را مشخص نمود. در این مطالعه با فراهم آوردن شرایط اندازه گیری فشارهای دینامیکی ایجاد شده بر کف در اثر برخورد جت خروجی از پرتابه جامی شکل سعی در استخراج داده‌هایی در شرایط مختلف برخورد از نظر دبی جت خروجی و عمق پایاب شده است. در انتها با بررسی داده‌ها سعی در ارائه نتایجی مناسب و کارآمد برای تحلیل هر چه بیشتر مشخصات فشارهای دینامیکی حاصل از برخورد جت در شرایط گوناگون پایین دست گردید. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که حوضچه‌های استغراق پایین دست پرتابه‌های جامی شکل زمانی مؤثر خواهند بود که نسبت عمق آب حوضچه به ضخامت جت در حال برخورد (y/B_j) بزرگتر از ۴ باشد. همچنین بررسی‌ها بر روی فشارهای دینامیکی نشان داد که حداکثر نوسانات فشار کف در برخورد مستقیم (بدون بالشتک آب)، اتفاق نمی‌افتد و زمانی اتفاق می‌افتد که یک لایه نازک از بالشتک آب وجود داشته باشد. در واقع این لایه نازک فرصت توسعه و پیشرفت جریانات آشفته و متلاطم را فراهم خواهد کرد.

کلید واژه‌ها: پرتابه جامی، فشار دینامیکی، ترانسیدوسر، مدل فیزیکی.

مقدمه

خروجی از سرریزهای این سدها دارای انرژی تخریبی بسیار قابل توجهی برای ایجاد فرسایش و تخریب پی و تکیه گاه‌های سد می‌باشد. بنابراین انرژی اضافی باید مستهلک و جریان آب بدون فرسایش به پایین برخورد کند، لذا انتخاب و طراحی بهینه سازه‌های تخلیه کننده جریان و مستهلک کننده انرژی به منظور اطمینان از ایمنی و پایداری سدهای بزرگ دارای اهمیت زیادی می‌باشند (۹). یکی از سازه‌های مستهلک کننده انرژی در پایین دست سدها، حوضچه‌های استغراق می‌باشند. استفاده از حوضچه‌های استغراق یکی از روش‌های مورد توجه طراحان سدهای بزرگ می‌باشد که در صورت فراهم بودن شرایط توپوگرافی، با ایجاد یک حوضچه طبیعی یا مصنوعی در پایین دست سد، امکان سقوط جریان خروجی از سد به صورت جت به داخل حوضچه فراهم می‌گردد. پس از برخورد جت با سطح آب و نفوذ در آن، جریان اصلی جت در امتداد محور مرکزی و در

بسیاری از سدهای بزرگ دنیا همانند سدهای کریستال^۱ و ساسکودا^۲ در آمریکا و اسپانیا در مواقع سرریز شدن سیلاب به نحوی عمل می‌کنند که جریان خروجی از روی سرریز آن‌ها به صورت جت به پایین دست و به داخل یک حوضچه استغراق سقوط می‌کند (۷). سدهای شهید رجایی و کارون ۳ در ایران که در سال‌های اخیر ساخته شده و مورد بهره برداری قرار گرفته‌اند نیز بدین شکل عمل می‌کنند. از مسائلی که در اثر جت ریزشی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی ایجاد می‌شود، استهلاک انرژی و فرسایش می‌باشد. مکانیزم استهلاک انرژی جت آب در پایین دست سدهای بزرگ از پیچیدگی خاصی برخوردار می‌باشد. به خصوص در جاهایی که به علت شرایط توپوگرافی دره‌های مرتفع و کم عرضی در پایین دست این سدها وجود دارد (۱۰). جریان

1-Crystal

2-Susqueda

تعیین فشارهای نوسانی در این سازه‌ها مانع از مطالعه دقیق تحلیلی این گونه جریان‌ها می‌باشد. در این موارد استفاده از مدل هیدرولیکی یکی از اساسی‌ترین روش‌ها برای بررسی و مطالعه متغیرهای هیدرولیکی از جمله فشار هیدرودینامیکی در این سازه‌ها می‌باشد (۷). بررسی کارهای انجام شده برای حوضچه‌های استغراق و ارزیابی فشارهای دینامیکی نشان می‌دهد که قسمت کمتر این تحقیقات با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری فشار دینامیکی می‌باشد. اما از آنجا که ارزیابی نوسانات فشارهای هیدرودینامیکی در به دست آوردن عمق آب شستگی در حوضچه و همچنین طراحی دال کف حوضچه مؤثر می‌باشد، لذا برداشت‌های دینامیکی از اهمیت خاصی برخوردار می‌گردد. بررسی مکانیزم استهلاک انرژی و ارزیابی فشار دینامیکی در حوضچه‌های استغراق توسط محققین بسیاری در دهه اخیر مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است (۴، ۵، ۶، ۷ و ۸). اما تاکنون مطالعات محدودی در زمینه تأثیر شیب دیواره‌ها بر نحوه توزیع فشار دینامیکی در کف و دیواره‌های جانبی حوضچه (به ویژه در دره‌های باریک) صورت گرفته است. بدین ترتیب در این تحقیق با استفاده از حسگرهای فشار با قابلیت ثبت و ذخیره فشارهای نوسانی و مدل آزمایشگاهی، به بررسی و تعیین نحوه توزیع فشارهای دینامیکی و مقادیر متوسط C_p ، C_p^+ ، C_p^- و RMS نوسانات فشار وارد بر دیواره‌ها ناشی از برخورد جت‌های پرتابه جامی در حوضچه استغراق تحت اثر عواملی چون دبی، زاویه‌ی صفحه جانبی و عمق آب در حوضچه پرداخته شده است.

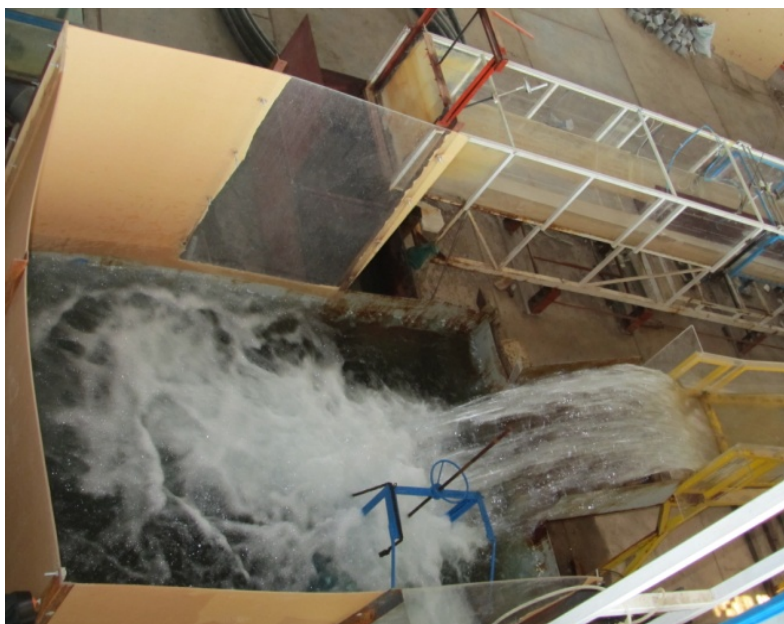
مواد و روش‌ها

جهت انجام آزمایش‌ها از پرتابه جامی شکل مدل دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شده بود استفاده شده است. مدل سرریز بالارود دارای فلومی به عرض ۵۰ سانتی‌متر، طول ۹ متر و ارتفاع ۲ متر است. سیستم تغذیه و گردش آب نیز به تبع همان سیستم فلوم مذکور می‌باشد که شامل ایستگاه پمپاژ، سرریز مستطیلی برای اندازه‌گیری دبی، مخزن آرام کننده با قابلیت تنظیم هد جریان، محل سقوط پرتابه آب، کانال بازگشت آب به مخزن و تاسیسات وابسته می‌باشد. محل سقوط جت آب خروجی از پرتابه جامی شکل ضمن در برگیری دبی‌های کم، دبی‌های بالا را هم تحت پوشش قرار می‌دهد. برای طراحی وسیله‌ای که پرتابه جامی شکل به آن برخورد می‌کند از یک صفحه پلکسی گلاس مربعی به ابعاد $۰/۵ \times ۰/۵$ متر استفاده گردید و ۳۷ منفذ به قطر ۲ میلی‌متر برای اتصال لوله‌های پیزومتری جهت اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی در محل برخورد جت با صفحه درون آن تعبیه شد. برای اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی از ترانسیدوسر فشار استفاده شده است. صفحه مورد نظر روی یک سیستم فلزی به گونه‌ای نصب شده است که از جابه‌جایی صفحه در راستای برخورد جت خودداری می‌کند همچنین قادر به جابه‌جایی صفحه در محور عمودی (به جهت ایجاد عمق آب در

مجاورت بستر دچار انحراف قابل توجهی شده و سرعت آن سریعاً کاهش یافته، که به دنبال آن فشار وارده به کف به شدت افزایش می‌یابد. در فاصله اندکی از نقطه برخورد، گردان فشار بر روی کف حوضچه و شدت جت شعاعی (دیواره‌ای) کاهش یافته و تقریباً ناچیز می‌شود (۱۱). در این روند جریان‌های چرخشی و گردابی بسیار آشفته به همراه لایه‌های برشی ایجاد شده، باعث پدیدار شدن فشارهای دینامیکی قابل توجهی در کف و دیواره حوضچه می‌شوند. به علاوه میزان پخش شدگی جت قبل از برخورد با حوضچه، همچنین میزان هواگیری جت دو عامل مهم در نحوه شکل‌گیری نوسانات فشار دینامیکی می‌باشند (۱). ورود جت به داخل حوضچه، باعث مستهلک شدن مقدار قابل توجهی از انرژی جت آب در اثر عواملی چون اصطکاک هوا و هواگیری جت در اتمسفر، برخورد به سطح آب حوضچه و نفوذ و پخش در آب و متعاقباً ایجاد تلاطم در حوضچه و نوسانات سطح آب می‌باشد. این فعل و انفعالات همراه با تشدید آشفتگی جریان و نوسانات شدید فشار می‌باشد که از نقطه نظر طراحی سازه‌ای و فرسایش بستر و دیواره‌های حوضچه باید مد نظر قرار گیرد. مطالعات وسیع انجام گرفته در طی چند دهه اخیر نشان داده که تشدید نوسانات فشار در سازه‌های هیدرولیکی منشأ صدمات سازه‌ای قابل توجهی می‌گردد (۹). حوضچه‌های استغراق یا به طور طبیعی در بستر رودخانه در نظر گرفته می‌شوند و یا به طور مصنوعی توسط سنگ یا بتن ساخته می‌شوند. عوامل مختلفی در تعیین فشار بر روی کف و دیواره حوضچه تأثیر دارند. برای مثال افزایش عمق آب در داخل حوضچه‌های استغراق باعث تأثیر کمتر اثر هیدرودینامیک جت بر کف و دیواره‌ها و در نتیجه بی‌نیازی از تثبیت و پایداری آن می‌گردد اما نیاز به عمق بیشتر حوضچه دارد که معمولاً هزینه مضاعفی در بر خواهد داشت. از طرف دیگر با کاهش عمق آب حوضچه، اثر جت بر دیواره‌ها قابل توجه بوده و لذا تمهیدات لازم در تحکیم و پوشش نمودن دیواره‌ها با ضخامت مناسب باید مد نظر قرار گیرد. همچنین شرایط هندسی و هیدرولیکی جت ورودی به داخل حوضچه تأثیر مستقیم بر شدت توزیع بارگذاری کف و دیواره‌های حوضچه دارد (۷). به طور کلی طراحی حوضچه‌های استغراق طبیعی بر مبنای تعیین آب‌شستگی با استفاده از متغیرهای دبی، عمق پایاب، اختلاف ارتفاع سطح آب مخزن تا پایاب، اندازه مصالح بستر پایین دست، زاویه پرتاب و برخورد جت به حوضچه می‌باشد. در بعضی شرایط به دلیل اقتصادی و ایمنی، طراحی حوضچه با استفاده از عمق آب‌شستگی مناسب نمی‌باشد که در این صورت از حوضچه‌های پوشش داده یا مصنوعی استفاده می‌شود و طراحی بر اساس تعیین توزیع فشار وارد به کف و دیواره‌ها و حدود نوسانات آن‌ها تحت تأثیر متغیرهای مؤثر شامل دبی، سرعت، ارتفاع ریزش، عدد فرود، عمق آب در حوضچه‌ها و ابعاد آن انجام می‌شود. ویژگی‌هایی چون غیر همگنی، ناهمسانی و تغییرات سه بعدی خصوصیات جریان‌های متلاطم در سازه‌های مستهلک کننده انرژی و همچنین عدم وجود راه حل مشخص و معین برای



شکل ۱- صفحه و سیستم تکیه‌گاهی تغییر زاویه دیواره درون مخزن سقوط جت



شکل ۲- نمایی از پرتابه جامی در برخورد به صفحه پلکسی

نتایج و بحث

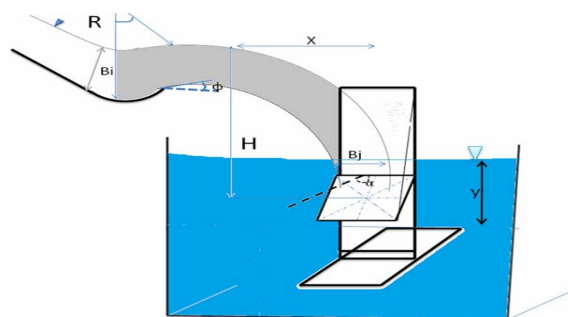
توزیع فشار وارد بر صفحه

شکل (۴) نمونه‌ای از تغییرات حداکثر، میانگین و حداقل فشارهای وارد بر صفحه نسبت به فاصله از مرکز جت را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌گردد که بیشترین، میانگین و مینیمم مقدار فشار و نوسانات آن مربوط به محل برخورد مرکز جت می‌باشد و در فاصله کمی از این نقطه، فشارها شدیداً کاهش می‌یابد که دلیل این رخداد تجزیه جت پرتابه جامی پس از برخورد به صفحه در راستای عرض جت می‌باشد.

محل برخورد جت) و همچنین چرخش حول محور افقی (به جهت ایجاد زاویه برخورد ۹۰ درجه جت با صفحه) می‌باشد. با توجه به محدوده تغییرات متغیرهای آزمایش شامل دبی، عمق آب در حوضچه و زاویه قرارگیری صفحه پلکسی جمعاً ۶۴ آزمایش انجام شد که در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین صفحه در راستای عمود بر جهت جریان به گونه‌ای جا به جا شده است که بتوان فشارهای وارده از پرتابه را در جهت عرضی جت اندازه‌گیری نمود. برای این کار صفحه مماس بر جهت جریان قرار داده شده است.

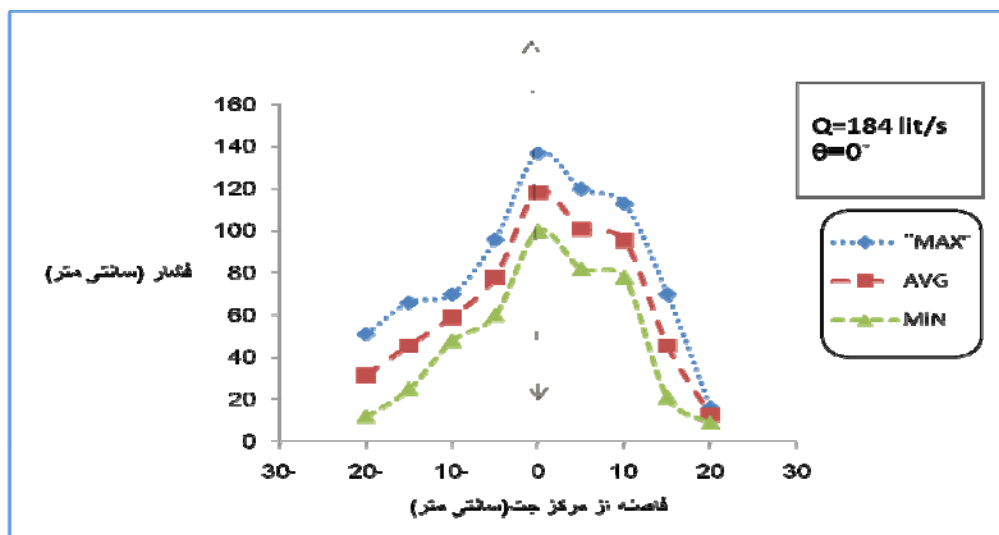
در حالتی که جت در زاویه ۹۰ درجه قرار داده می‌شود می‌توان فشارهای وارده به کف را به دست آورد.



شکل ۳- نمایش برخورد جت پرتابه جامی شکل به کف حوضچه

جدول ۱ - متغیرهای آزمایش و تعداد آزمایش‌ها

تعداد آزمایش‌ها	دبی (lit/s)	عمق آب روی صفحه (cm)	زاویه قرار گیری صفحه بر حسب درجه
۱۶	۶۷	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۹۰،۶۰،۳۰،۰
۱۶	۸۶	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۹۰،۶۰،۳۰،۰
۱۶	۱۶۱	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۹۰،۶۰،۳۰،۰
۱۶	۱۸۴	۴۵،۳۰،۱۵،۰	۹۰،۶۰،۳۰،۰



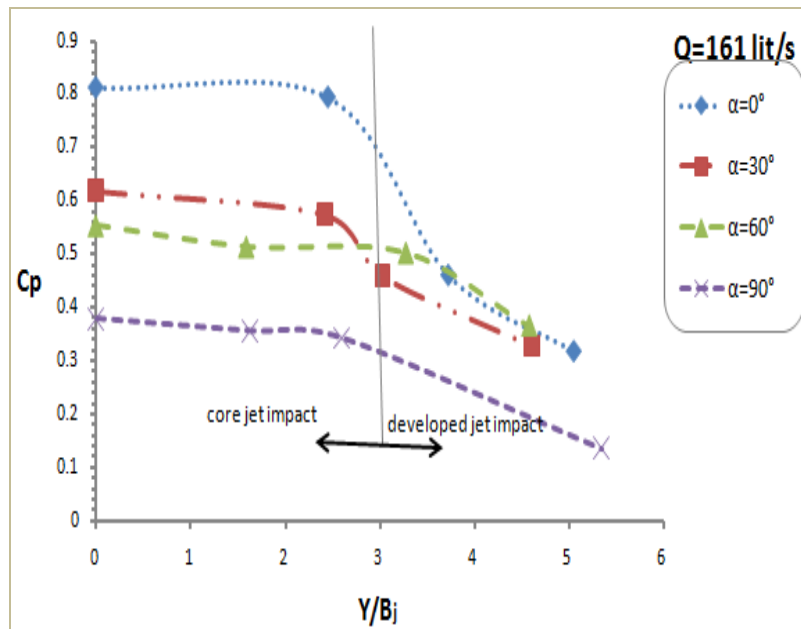
شکل ۴- تغییرات حداکثر، حداقل و میانگین فشار با فاصله از مرکز

کف پرداخته می‌شود. میانگین فشار دینامیکی با ضریب بدون بعد C_p نشان داده می‌شود و از رابطه زیر به دست می‌آید (۲):

$$C_p = \frac{H_m - Y}{\frac{U_j^2}{2g}} \quad (1)$$

ضریب میانگین فشارهای دینامیکی

در کف حوضچه استغراق، در محل برخورد جت و در محدوده پخش جت، فشار دینامیکی قابل توجهی ایجاد می‌گردد که حداکثر مقدار آن غالباً در امتداد محور مرکزی جت ایجاد می‌گردد. در حقیقت در طراحی حوضچه‌های استغراق، فشارهای دینامیکی در کف از مهمترین پارامترها بوده که مد نظر طراحان می‌باشد. بنابراین در این قسمت به بررسی و شناخت دقیق فشارهای وارد به



شکل ۵- نمودار تغییرات (C_p) با Y/B_j

شکل زمانی مؤثر خواهد بود که $Y/B_j > 2-4$ باشد. به این حالت از برخورد، جت توسعه یافته اطلاق می‌شود و حوضچه استغراق مؤثر خواهد

بود. همچنین با افزایش دبی، میانگین فشار دینامیکی نیز افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار C_p برابر با $0/۸۲$ به دست آمده است.

RMS نوسانات فشار

اهمیت نوسانات فشار حول مقدار متوسط توسط ضریب RMS (C'_p) تحلیل می‌شود. این ضریب، مقدار RMS نوسانات فشار دینامیکی را به عنوان تابعی از انرژی جنبشی ورودی جت بیان می‌کند. به طور کلی مقدار RMS نوسانات فشار در حوضچه‌های استغراق به طور شدید تحت تأثیر آشفتگی اولیه T_{II} و درجه شکست جت قرار دارد. ضریب C'_p از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C'_p = \frac{RMS}{U_j^2/2g} \quad (۳)$$

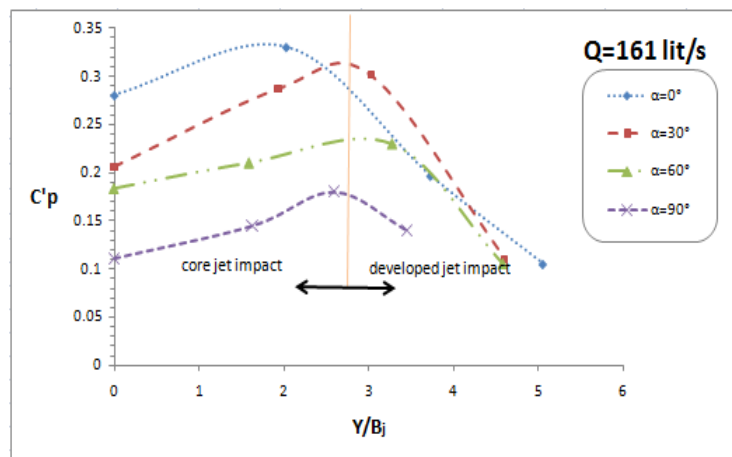
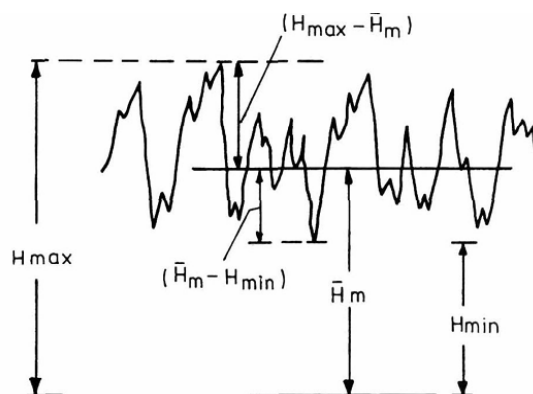
این متغیرها، آشفتگی بسیار شدید در حوضچه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۲). شکل (۶) تغییرات ضریب میانگین نوسانات فشار را نسبت به عمق آب به ضخامت جت در لحظه برخورد نشان می‌دهد.

$$U_j = \sqrt{U_0^2 + (2gH)} \quad (۲)$$

که در این روابط H_{im} میانگین فشارهای دینامیکی (بر حسب متر)، Y عمق آب در حوضچه (متر)، U_j سرعت جت در لحظه برخورد به سطح آب (متر بر ثانیه)، U_0 سرعت اولیه تشکیل جت (متر بر ثانیه) و H ارتفاع سقوط (متر) می‌باشد. در شکل (۵) نمودار تغییرات میانگین فشار دینامیکی (C_p) در برابر نسبت عمق آب به ضخامت

جت $\left(\frac{y}{B_j}\right)$ رسم شده است.

با توجه به شکل (۵) و مقایسه اثر زاویه بر روی C_p مشخص می‌شود که با افزایش زاویه دیواره نسبت به افق ضریب C_p کاهش پیدا می‌کند که این کاهش در حالت بدون عمق آب در هر چهار دبی وجود دارد که دلیل آن در نحوه برخورد هسته جت به دیواره می‌باشد که با افزایش زاویه دیواره، هسته جت به طور کامل به دیواره برخورد نمی‌کند و قسمتی از جت بر روی صفحه مماس شده و در مقایسه با زوایای کوچکتر ضربه کمتری وارد می‌کند. همچنین با توجه به نمودار افزایش عمق آب بر روی صفحه و تبدیل جت با هسته به جت توسعه یافته باعث کاهش فشار دینامیکی بر روی صفحه می‌گردد اما با افزایش عمق آب روی صفحه و تشکیل جت توسعه یافته تأثیر زاویه دیواره خیلی کم می‌شود در شکل (۵)، حد فاصل دو ناحیه برخورد جت با هسته و توسعه یافته، بانسبت $Y/B_j = 2-4$ مشخص شده است. بنابراین حوضچه های استغراق پایین دست پرتابه‌های جامی

شکل ۶- نمودار تغییرات RMS نوسانات فشار نسبت به Y/B_j 

شکل ۷- شماتیک مقادیر حداکثر و حداقل فشار دینامیکی

نازک از بالشتک آب وجود داشته باشد. با توجه به شکل (۶) و مقایسه زاویه‌های مختلف صفحه در هنگام برخورد می‌توان به این نتیجه رسید زمانی که برخورد جت به صورت مستقیم با صفحه باشد (بدون بالشتک آب) با افزایش زاویه برخورد ضریب C'_p کاهش پیدا می‌کند که این روند در تمامی دبی‌ها مشخص می‌باشد ولی پس از تشکیل بالشتک مؤثر آب بر روی صفحه این روند قطع شده و ضریب C'_p برای زوایای ۰، ۳۰ و ۶۰ درجه مقادیر بسیار نزدیک به هم می‌شوند که دلیل آن در تشکیل بالشتک مؤثر آب می‌باشد. به این معنی که پس از ایجاد عمق مؤثر استغراق بر روی صفحه نوسانات میانگین فشارهای وارده به صفحه شروع به روند کاهشی نموده به گونه ای که تاثیر زاویه در کاهش میانگین نوسانات کم رنگ شده و به مقدار مشخصی میل می‌کند.

نوسانات حداقل و حداکثر فشار

نوسانات حداقل و حداکثر فشار به ترتیب با C_p^- و C_p^+ نشان داده شده و طبق روابط زیر بدست می‌آیند (بلین و فیوروتو، ۱۹۹۵):

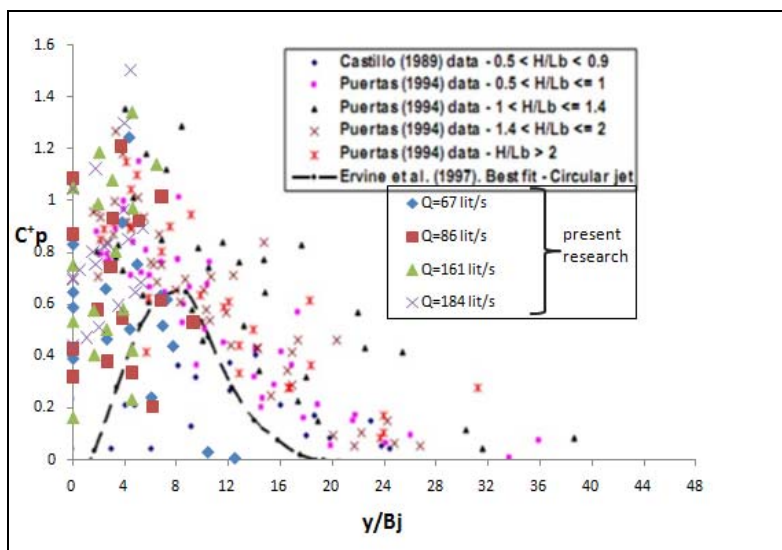
با توجه به شکل (۶) مشخص می‌شود که تغییرات ضریب نوسانات فشار دینامیکی (C'_p) با نسبت $\frac{Y}{B_j}$ روندی کاملاً صعودی و یا کاملاً نزولی ندارد بلکه برای نسبت‌های $2 < \frac{Y}{B_j} < 4$ ، یعنی وقتی که هنوز جت به صورت متمرکز است روند صعودی دارد ولی با ایجاد عمق بالشتک مفید آب یعنی نسبت $2 < \frac{Y}{B_j}$ ، این روند کاهش پیدا می‌کند. چنانچه مشاهده می‌شود ضریب C'_p در نسبت $\frac{Y}{B_j}$ خاصی بیشترین مقدار خود را به دست می‌آورد که این امر حاکی از نیاز به عمق مشخص به منظور تشکیل جریان‌های گردابی و چرخشی با آشفتگی زیاد، حاوی فرکانس‌های کوتاه و انرژی زیاد که قادر به ایجاد حداکثر نوسانات می‌باشند است. با توجه به این که اندازه‌گیری‌ها در اعماق مختلف آب بر روی صفحه انجام گرفته است و نوسانات فشار دینامیکی در این شرایط مورد مقایسه قرار گرفته‌اند می‌توان گفت که بیشترین نوسانات فشار در برخورد مستقیم جت (بدون عمق آب) اتفاق نمی‌افتد و زمانی اتفاق می‌افتد که یک لایه

در شکل‌های (۸) و (۹) نمودار تغییرات C_p^+ و C_p^- نسبت به $\frac{Y}{B_j}$ به صورت یکجا برای دبی‌های مختلف رسم و با نمودارهای سایر محققین مقایسه شده است. با توجه به شکل‌های (۸) و (۹) بیشترین مقادیر حدی مثبت و منفی و همچنین نسبت $\frac{Y}{B_j}$ آن قابل مشاهده است. برای جت‌های پرتابه جامی شکل، حداکثر مقدار ضریب C_p^+ در $\frac{Y}{B_j} = 5$ برابر با $1/45$ و

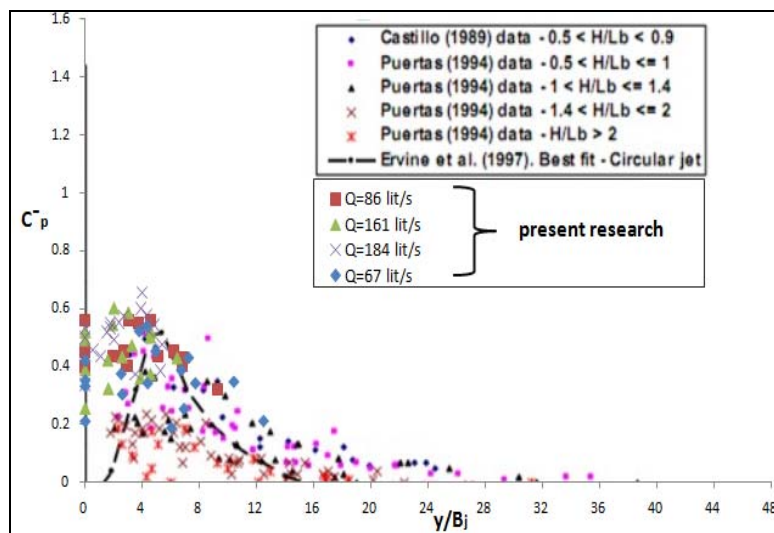
$$C_p^+ = \frac{H_m - H_{\min}}{U_j^2 / 2g} \quad (۴)$$

$$C_p^- = \frac{H_{\max} - H_m}{U_j^2 / 2g} \quad (۵)$$

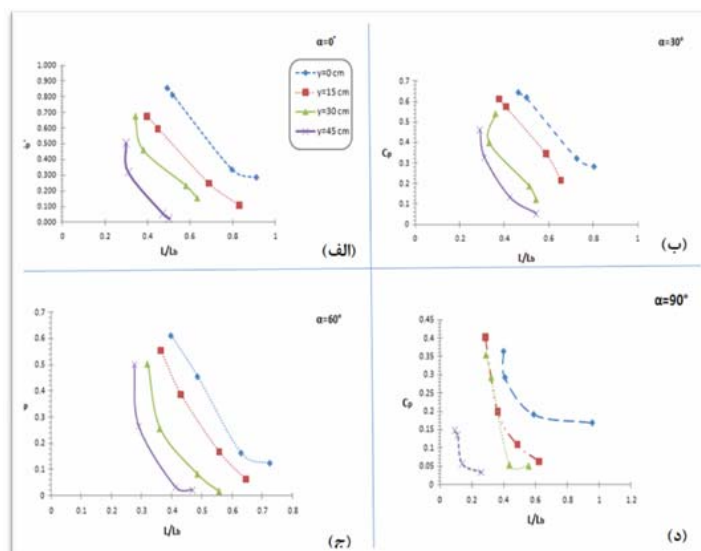
که در این روابط H_{\min} و H_{\max} به ترتیب بیشترین و کمترین فشار ثبت شده می‌باشند (شکل ۷).



شکل ۸- ضریب مقادیر حدی مثبت C_p^+ در مقابل $\frac{Y}{B_j}$



شکل ۹- ضریب مقادیر حدی منفی C_p^- در مقابل $\frac{Y}{B_j}$



شکل ۱۰- تغییرات ضریب C_p بر اساس تغییر نسبت L/L_b

که B_i ، F_i و T_u به ترتیب ضخامت، عدد فرود و شدت آشفتگی اولیه جت در لبه پرتابه جامی شکل هستند. در شکل (۱۰) نمودار ضریب میانگین فشار دینامیکی C_p در مقابل نسبت طول شکست L/L_b (به طول سقوط جت L)، ارائه شده است. با توجه به شکل

(۱۰) مشخص می‌شود که با افزایش نسبت L/L_b ، مقادیر ضریب

میانگین فشارهای دینامیکی (C_p) کاهش پیدا می‌کند که دلیل آن افزایش طولی است که جت در هوا طی می‌کند و در نتیجه ورود هوا درون جت و فروپاشی جت باعث کاهش C_p می‌شود. این روند برای زوایای مختلف دیواره یکسان است. این الگوی کاهشی در حالت بدون عمق آب و عمق آب کم تقریباً روند خطی دارد ولی با افزایش عمق آب این روند کاهش، شکل نمایی به خود می‌گیرد. در زمانی که عمق آب وجود ندارد و یا کم است، کاهش طول شکست و هوادهی جریان جت در حال سقوط تنها عواملی هستند که در افزایش میزان استهلاك انرژی جت مؤثر می‌باشند. هوادهی جریان جت و افزایش نسبت L/L_b سبب کاهش ضریب C_p خواهند شد اما با افزایش عمق حوضچه استغراق، روند کاهش بیشتر متأثر از شکل‌گیری جریان‌های گردابه‌ای و چرخنده است و شکل نمایی به خود می‌گیرد.

رابطه ریاضی بین پارامترها

با توجه به نتایج به دست آمده برای کلیه آزمایش‌ها، مشخص گردید که رابطه معنی‌دار بین ضریب میانگین فشارهای دینامیکی و پارامترهای وابسته به آزمایش وجود دارد. برای مشخص کردن رابطه‌های فوق اقدام به تجزیه تحلیل آماری گردید. در این خصوص با استفاده از نرم افزار آماری SPSS مدل‌های مختلف آماری مورد آزمون قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده مدل آماری رگرسیون

حداکثر مقدار ضریب C_p^- در $4 = \frac{Y}{B_j}$ برابر با 0.165 است. با توجه

به نمودارهای به دست آمده از نتایج کار سایر دانشمندان مقادیر بیشتر از ۱ برای C_p^+ دور از انتظار نمی‌باشد. با مقایسه شکل‌های (۸) و (۹) با سایر محققین، می‌توان مشاهده کرد که مقادیر محاسبه شده نزدیکی مناسبی با نتایج حاصل از جت‌های مستطیلی و تیغه‌ای که توسط محققین دیگر انجام گرفته است دارند. همچنین مقادیر به دست آمده برای ضرایب C_p^+ و C_p^- حاکی از کوچک بودن نسبت $\frac{Y}{B_j}$ در مقایسه با نتایج دیگر محققین دارد که دلیل اصلی آن اندازه کم سرعت و ضخامت بالشتک آب مورد استفاده در این آزمایش‌ها می‌باشد.

اثر طول شکست جت بر ضریب C_p

کشش سطحی و تأثیر آشفتگی که اعداد و بر $(W_e = \frac{\rho U_j^2 D_j}{\sigma})$ و رینولدز $(R_e = \frac{U_j D_j}{\nu})$ این تأثیر را توصیف می‌کنند، تعیین کننده طول L_b هستند که در آن تجزیه جت رخ می‌دهد و باعث خواهد شد که جت با انرژی کمتری به پایین دست برخورد کند. به خاطر اینکه جت تا نقطه تجزیه به صورت پیوسته است، پخشیدگی جت به دلیل آشفتگی در نازل و نازک شدگی جت به دلیل شتاب جاذبه، اندازه قطر جت را تعیین می‌کند. برای محاسبه طول شکست جت (L_b) از رابطه (۶) که برای جت‌های مستطیلی و جریان‌های تیغه‌ای پیشنهاد شده است، استفاده شد (۷).

$$\frac{L_b}{B_i F_i^2} = \frac{0.85}{(1.07 T_u F_i^2)^{0.82}} \quad (۶)$$

مؤثر خواهند بود که $4 - 2 \frac{Y}{B_j}$ باشد.

با افزایش دبی جریان، تغییرات ضریب C_p روند صعودی داشت که این به دلیل افزایش طول سقوط و افزایش سرعت جریان جت در هنگام برخورد به کف می‌باشد بنابراین در کارهای اجرایی باید از دبی طرح استفاده کرد.

بیشترین مقدار برای ضریب میانگین فشار C_p برابر با 0.88 می‌باشد. بیشترین فشار در محل برخورد مرکز جت به صفحه اتفاق می‌افتد و با فاصله گرفتن از مرکز جت فشار کاهش می‌یابد.

در حالت بدون عمق آب و عمق آب کم، با افزایش نسبت $\frac{L}{L_b}$ مقادیر ضریب C_p دارای سیر نزولی بود، این الگوی کاهش تقریباً روند خطی داشت ولی با افزایش عمق آب، شکل نمایی به خود گرفت. در زمانی که عمق آب وجود ندارد و یا کم است، کاهش طول شکست و هوادهی جریان جت در حال سقوط تنها عواملی هستند که در افزایش میزان استهلاک انرژی جت مؤثر می‌باشند.

روند تغییرات ضریب C_p بر حسب تغییرات عمق آب در حوضچه، کاملاً صعودی و یا نزولی نبود و در عمق خاصی بیشترین می‌گردد که این امر حاکی از نیاز به عمق مشخصی به منظور تشکیل جریان‌های گردابی و چرخشی با آشفستگی زیاد، حاوی فرکانس‌های کوتاه و انرژی زیاد است.

حداکثر نوسانات فشار کف در برخورد مستقیم (بدون بالشتک آب)، اتفاق نمی‌افتد و زمانی اتفاق می‌افتد که یک لایه نازک از بالشتک آب وجود داشته باشد. در واقع این لایه نازک فرصت توسعه و پیشرفت جریان‌های آشفته و متلاطم را فراهم می‌کند.

قدردانی

بدینوسیله از مدیریت محترم دانشکده مهندسی علوم آب و گروه سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز جهت تامین امکانات این تحقیق تشکر و قدردانی می‌نماییم.

منابع

- 1- Annandale, G.W. (1995). "Erodibility," J. Hydr. Res., 33(4): 471-494.
- 2- Bellin, A. and Fiorotto, V. (1995). "Direct Dynamic Force Measurement on Slabs in Spillway Stilling Basins," ASCE, J. Hydr. Engrg., 121(10): 686-693.
- 3- Beltaos, S. and Rajaratnam, N. (1973). "Plane Turbulent Impinging Jets," J. Hydr. Res., 1(1): 29-59.
- 4- Bollaert, E. and A. Schleiss. 2003a. Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets. Part 2, J. Hydr. Res., IAHR, 41(5): 465-480.

خطی چندگانه^۱ ارتباط معنی‌داری بین پارامترهای مؤثر بر C_p پدیدار نشد و مشخص گردید که بین پارامترها رابطه خطی وجود ندارد. از این رو روش رگرسیون غیر خطی^۲ مورد آزمون قرار گرفت. در این خصوص باید مدل‌های مختلف به صورت دستی به نرم افزار معرفی گردد تا تحلیل‌های مربوطه صورت پذیرد. این عمل صورت پذیرفت و با توجه به این که این مدل‌ها از قبل مشخص نبودند، به صورت آزمون و خطاهای بسیار، مدل‌های متفاوتی مورد آزمون قرار گرفتند. از بین همه این مدل‌ها در نهایت روابط زیر به عنوان روابط معنی‌دار استخراج شد:

$$C_p = 0.203 \left(\frac{L}{L_b} \right)^{-1.48} - 0.128 \sin(\alpha) \quad (7)$$

رابطه بالا برای حالتی است که عمق آب بر روی صفحه وجود ندارد و برخورد به صورت آزاد می‌باشد که ضریب رگرسیونی که بین پارامترهای فوق به دست آمد در حد قابل قبول ($R^2 = 0.87$) بود.

(۸)

$$C_p = -1.25 \left(\frac{y}{B_j} \right)^{0.125} + 1.35 \left(\frac{L}{L_b} \right)^{-0.39} - 0.054 \sin(\alpha)$$

رابطه‌ی (۸) برای حالتی است که بالشتک آب بر روی دیواره تشکیل شده است و ضریب رگرسیونی که بین پارامترهای این رابطه به دست آمد ($R^2 = 0.84$) می‌باشد که در حد قابل قبولی است.

نتیجه‌گیری

در حوضچه‌های استغراق پایین دست پرتابه‌های جامی شکل حد فاصل دو ناحیه برخورد جت با هسته و توسعه یافته، با نسبت $\frac{Y}{B_j} = 2 - 4$ مشخص می‌شود. بنابراین این حوضچه‌ها زمانی

1- Multiplier linear regression
2- Non-linear regression

- 5- Bollaert, E. and A. Schleiss. 2003b. Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets. Part 1, J.Hydr. Res., IAHR, 41(5): 451-464.
- 6- Bollaert, E., Manso, P. and A. Schleiss. 2004. Dynamic pressure fluctuations at real-life plung pool bottoms. HDRS International Conference, Tehran, Iran, pp. 117-124.
- 7- Castillo, L. G. 2006. Aerated jets and pressure fluctuation in plunge pools. 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006), September 10-13, Philadelphia, USA.
- 8- Ervine, D. A., Falvey, H. T. and W. Withers. 1997. Pressure fluctuation on plunge pool floors. Journal of Hydraulic Research ,IAHR, 35(2): 257-279.
- 9- Fahlbusch, F. E. 1994. Scour in rock riverbeds downstream of large dams. The International Journal on Hydropower and Dams, IHA, 1(4): 30-32.
- 10- Launder, B. E., Reece, G. J. and W. Rodi. 1975. Progress in the development of a Reynolds stress turbulence closure. J. Fluid Mech., 68: 537-566.
- 11- Mason, P.J. (1989). "Effects of Air Entrainment on Plunge Pool Scour," J. Hydr. Engrg., ASCE, 115(3): 385-399.
- 12- Puertas, J. and Dolz, J. (1994). Criterios Hidraulicos para el diseno de cuencos de disipacion de energia en presas boveda con vertido libre por coronacion, PhD Thesis summary, University of Catalunya, Barcelona, Spain.