



بررسی نوسانات فشار در طول پرش هیدرولیکی در حوضچه واگرای ناگهانی

مهناز کریمی^۱، سید حبیب موسوی جهرمی^{۲*}، محمود شفاعی بجنستان

دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۶ فروردین ۱۳۹۳
بازنگری: ۲۰ مهر ۱۳۹۳
پذیرش: ۱۳ دی ۱۳۹۳
ارائه آنلاین: ۱۱ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

نوسانات فشار
پرش هیدرولیکی نوع S
واگرای ناگهانی
حوضچه آرامش

چکیده: پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش، از دیدگاه ماکروسکوپی، یک جریان ماندگار و متغیر ناگهانی است که با سطح جریان منقطع دوفازی و گرداب‌های قوی همراه است. پرش هیدرولیکی به‌عنوان مستهلک‌کننده انرژی در پایین‌دست سرریزها، دریچه‌ها و تندآب‌ها استفاده می‌شود. اثر فشارهای نوسانی ناشی از تلاطم در پرش می‌تواند قابل توجه باشد و باید در طراحی سازه مورد توجه قرار گیرد. همچنین این نوسانات می‌توانند با ایجاد حفره، فرسایش و لرزش موجب آسیب قابل توجهی در حوضچه آرامش شود. در این مقاله به مشخصات نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی نوع S در مقاطع واگرای ناگهانی پرداخته شده است. تاثیر نسبت واگرایی مقطع و شرایط ورودی جریان در پارامتر بدون بعد انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار (C_p) و فشارهای حدی (C_p^+ , C_p^-) بررسی شده است. برای این منظور آزمایش‌ها در یک کانال نسبتاً بزرگ به عرض ۰/۸ و طول ۱۲ متر در حوضچه آرامش با نسبت‌های واگرایی ۰/۳۳، ۰/۵، ۰/۶۷ و ۱ در محدوده اعداد فرود بین ۲/۵ تا ۹/۵ انجام شد. داده‌های فشار با استفاده از مبدل فشار با فرکانس نمونه‌برداری ۴۰ هرتز برداشت شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که انحراف معیار نوسانات فشار و فشارهای حدی ناشی از پرش هیدرولیکی وابسته به عدد فرود جریان ورودی و موقعیت نقطه مورد نظر نسبت به پنجه پرش است. به طوری که حداکثر ضرایب نوسانات فشار در فاصله ۱۰ تا ۳۰ برابر عمق اولیه پرش نسبت به پنجه پرش رخ می‌دهد. واگرایی در مقطع پرش سبب کاهش ضرایب نوسانات فشار است. به طوری که در نسبت‌های واگرایی ۰/۳۳، ۰/۵ و ۰/۶۷ انحراف معیار نوسانات فشار به ترتیب برابر با ۰/۴۳، ۰/۲۸ و ۰/۱۹ در مقایسه با پرش کلاسیک کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه و هدف

نوسانات فشار نیز مورد توجه قرار گیرد. به عنوان مثال نوسانات فشار ممکن است که در سطح بستر و در سطح درزها سبب ایجاد ترک و انتشار آن در ساختمان دال شود و با ادامه نوسانات ممکن است که بلوک‌های دال به طور کامل از توده اطرافش جدا شده و اگر نیروی زیرفشار، دارای شدت و مدت زمان کافی باشد، می‌تواند بلوک‌های دال را از جایگاه اصلی آن خارج نماید. همچنین هنگامی که فشار در یک نقطه از سطح حوضچه منفی می‌شود، ممکن است با توجه به نیروهای زیرفشار به طور موضعی موجب ناپایداری خطرناکی در زیر دال بتنی شود. احتمال اینکه نوسانات فشار از طریق سیستم زهکشی به زیر دال‌های کف حوضچه آرامش منتقل شوند در مطالعاتی توسط باورس و توسو (۱۹۶۹) و باورس و توسو (۱۹۸۸، ۱۹۹۰) دیده شده است.

خصوصیات متوسط جریان پرشهیدرولیکی در سطح گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است، در حالی که در زمینه خصوصیات متلاطم پرش مطالعات نسبتاً محدودی انجام شده است. مساله نوسانات فشار^۲ در سازه‌های هیدرولیکی پس از حادثه تخریب‌های ایجاد شده در حوضچه‌های آرامش سدهای کارنافولی در بنگلادش و مالپاسه در مکزیک به شکل بارزی مشهود گردید. نوسانات فشار در این حوضچه‌ها به زیر دال‌های بتنی منتقل شده و موجب ایجاد نوسانات در نیروی

استهلاک انرژی و تلاطم جریان در حوضچه‌های استهلاک انرژی با نوسانات شدید فشار همراه است. این نوسانات شدید به سه صورت، حوضچه استهلاک انرژی را تحت تاثیر قرار می‌دهند یکی از این اثرات، ایجاد نیروی برخاست^۱ قابل توجهی در زیر سازه سد است که باعث برخاستن و کنده شدن دال‌های کف حوضچه استهلاک می‌شود. اثر دیگر نوسانات، ایجاد خستگی در مصالح^۲ و اعمال فشارهای دینامیکی زیاد ناشی از بارگذاری و باربرداری متناوب است که سبب کاهش مقاومت سازه و در نتیجه تخریب آن می‌شود. وقوع پدیده حفره‌زایی نیز یکی دیگر از اثرات نوسانات فشار است که باعث جدایش جریان از سازه و تخریب موضعی آن می‌شود.

نوسانات فشار در پرشهیدرولیکی در نتیجه تلاطم‌های شدید بزرگ مقیاس است و اثر فشارهای نوسانی ناشی از تلاطم می‌تواند بسیار قابل توجه باشد. به همین دلیل در طراحی حوضچه آرامش برای رسیدن به بالاترین بهره‌وری هیدرولیکی علاوه بر جنبه‌های ساختاری حوضچه آرامش باید اثرات

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات dr_hmusavi@yahoo.com

¹ Uplift force

² Fatigue

³ Pressure fluctuation

همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که حداکثر ضریب نوسانات فشار تقریباً نزدیک به محل پنجه پرش و در حدود ۰/۰۸۵ می‌باشد. لوپاردو و سولاری (۱۹۸۰) نوسانات فشار را برای پرشهیدرولیکی در پایبندست یک دریچه برای اعداد فرود بین ۲/۵ تا ۷/۵ اندازهگیری کردند و بیشترین مقدار ضریب نوسانات فشار را برابر با ۰/۰۸۴ بدست آوردند که در عدد فرود ۴/۵ و تقریباً در فاصله ۳۰ درصد طول پرش هیدرولیکی واقع شده است.

لوپاردو و همکاران (۱۹۸۲)، پدیده حفره‌زایی را با اندازهگیری نوسانات فشار مورد مطالعه قرار دادند و اشاره نمودند که حفرات اولیه می‌تواند در اثر نوسانات فشار بالا باشد. لوپاردو و هنینگ (۱۹۸۶) تاثیر شرایط ورودی پرشهیدرولیکی به حوضچه را مورد بررسی قرار دادند و به این ترتیب برای جریان ورودی یک بار دریچه و یک بار سرریز به کار بردند. آنها دریافتند که بیشترین مقدار ضریب نوسانات فشار، در پایبندست دریچه در عدد فرود نزدیک به ۴/۵ و در پایبندست سرریز در عدد فرود در حدود ۶/۵ می‌باشد که این اختلاف به دلیل ساختار متفاوت تشکیل پرش در پایبندست دریچه و سرریز است. فیوریتو و رینالدو (۱۹۹۲) با انجام یک مدل آزمایشگاهی از پرشهیدرولیکی در محدوده اعداد فرود بین ۷ تا ۹/۵، ساختار آماری نوسانات فشار را در حوضچه آرامش بررسی کردند که نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که توزیع طولی نوسانات فشار، همگن نیست و بستگی به موقعیت X دارد در حالی که توزیع عرضی نوسانات فشار، دارای همبستگی بوده و همگن می‌باشد. آنها به تجزیه و تحلیل نوسانات فشار به منظور تعیین حداکثر زیرفشار در زیر دال کف حوضچه‌های آرامش پرشهیدرولیکی پرداختند. مارکز و همکاران (۲۰۰۴)، با استفاده از اطلاعات به دست آمده توسط محققان مختلف، روند تغییرات حداکثر نوسانات فشار و موقعیت نسبی حداکثر نوسانات فشار در پرشهیدرولیکی آزاد را به عنوان تابعی از عدد فرود، تنظیم و ارائه نمودند. فرهودی و همکاران (۲۰۱۰) نوسانات فشار در اطراف بلوک‌های حوضچه نوع SAF را مدلسازی و اندازهگیری نمودند.

در بیشتر مطالعات به بررسی اثر نوسانات فشار در پرشهیدرولیکی کلاسیک پرداخته شده است. با توجه به اینکه واگرایی در مقطع سبب ایجاد افت انرژی بیشتر و افزایش راندمان پرش می‌شود، در این مطالعه پرش در مقاطع واگرایی ناگهانی مدنظر است.

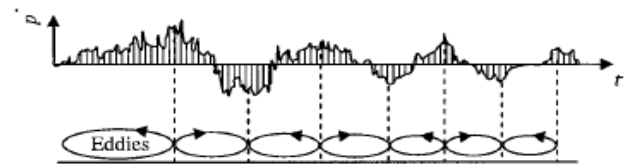
هنگامی که یک جریان فوقبحرانی به طور ناگهانی از یک مقطع منشوری به یک مقطع عریضتر با جریان زیربحرانی وارد شود، به طوری که عرض کانال پایبندست در مقایسه با عرض جریان فوقبحرانی بیشتر باشد سبب می‌شود تا پرشهیدرولیکی به صورت غیر منشوری رخ دهد (شکل ۲-الف).

از مهمترین خصوصیات پرش در حوضچه‌های آرامش واگرایی ناگهانی، نیاز به عمق پایاب کمتر است. اگر به هر دلیلی تامین عمق مورد نیاز برای وقوع پرش کلاسیک میسر نباشد و یا هزینه‌های حفاری به منظور پایین آوردن کف حوضچه مقرون به صرفه نباشد، یکی از راه‌های حصول اطمینان از تشکیل پرش در حوضچه استفاده از واگرایی مقطع می‌باشد.

همچنین زمانی که کانال ورودی توسط تعدادی دریچه کنترل می‌شود،

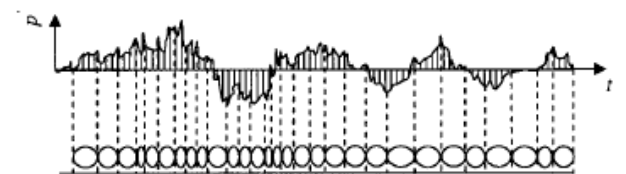
برکنش می‌شود به طوری که در نهایت خرابی‌های عظیمی در سرریز و حوضچه‌های آرامش آن‌ها بوجود می‌آید. بحث‌های گسترده‌ای از این موضوع توسط کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ^۱ (۱۹۸۷)، توسو و باورز (۱۹۸۸) و ویشر و هاگر (۱۹۹۵) ارائه شده است. با توجه به اهمیت شناخت نیروهای ناشی از نوسانات فشار، مطالعات متعددی از دیرباز توسط محققین انجام شده است که در ادامه به خلاص‌های از آن‌ها اشاره خواهد شد.

باخامتف (۱۹۶۲) یک رابطه ریاضی ساده را برای تخمین مقدار نوسانات فشار در یک حوضچه آرامش یا کانال روباز به کار برد و شدت نسبی تلاطم را به صورت σ/V تعریف نمود. او در مطالعه خود نشان داد که شدت نسبی تلاطم می‌تواند مقداری بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ باشد. الدر (۱۹۶۱) اطلاعاتی در مورد ارتباط مدل و نمونه اصلی، کفایت قانون تشابه فرودی به عنوان پای‌های برای مقیاسگذاری در محدوده فرکانس پایین در پرشهیدرولیکی ارائه نمود. همچنین نشان داد که تلاطم با فرکانس کم اغلب در نتیجه گرداب‌های بزرگ مقیاس و اختلال‌های سطحی پرش ناشی از غلبه نیروهای ثقل و نیروهای اینرسی هستند، در حالی که نوسانات با فرکانس بالا در نتیجه بخشی از تلاطمی است که در اثر نیروی لزوجت می‌باشد (شکل ۱-الف و ب).



شکل ۱-الف: گرداب‌ها در مقیاس بزرگ و فرکانس کم

Fig.1.(a) Large- scale eddies corresponding to low frequency fluctuations



شکل ۱-ب: گردابها در مقیاس کوچک و فرکانس بالا

Fig.1.(b) small- scale eddies corresponding to high frequency fluctuations

عبدالقادر و النگو (۱۹۷۴)، لوپاردو و سولاری (۱۹۸۰) و اکبری و همکاران (۱۹۸۲) ضریب نوسانات فشار (C_p) را به عنوان تابعی از انرژی جنبشی ورودی به صورت زیر تعریف نموده‌اند:

$$C_p = \sigma_x / (V^2 / 2g) \quad (1)$$

که در آن σ_x انحراف استاندارد نوسانات فشار و V سرعت اولیه پرش است. عبدالقادر و النگو (۱۹۷۴) توزیع ضریب نوسانات فشار را در طول پرشهیدرولیکی برای اعداد فرود مختلف بین ۴/۷ تا ۶/۶ ارائه نمودند.

^۱ ICOLD

و همچنین بررسی خطر جریان نامتقارن، ضروری است که این نوع جریان بررسی و ارزیابی شود.

از طرف دیگر در این نوع پرش با تشکیل گرداب‌های جانبی بخشی از انرژی جنبشی مستهلک شده و از تاثیر نیروهای هیدرودینامیکی در کف حوضچه آرامش کاسته می‌شود.

تراز سطح آب پاییندست تاثیر بسزایی در تشکیل الگوی جریان پرشهیدرولیکی در یک مقطع واگرایی ناگهانی دارد. به این ترتیب در یک مقطع واگرایی ناگهانی سه نوع پرش تشکیل می‌شود:

اگر فقط تعداد کمتری از درپچه‌ها باز شوند در این حالت عرض کانال ورودی کمتر از کانال پاییندست خواهد بود و شکل پرش هیدرولیکی غیر منشوری خواهد بود (شکل ۲-ب).

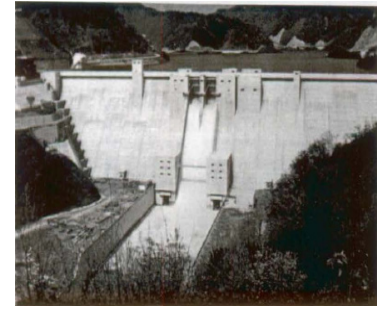
از دیگر موارد کاربرد این نوع جریان می‌توان به خروجی‌زیرین^۱ اشاره کرد. همانطور که در شکل ۲ قسمت ج مشاهده می‌شود، عرض رودخانه پاییندست چندین برابر بزرگتر از عرض خروجی‌زیرین می‌باشد، بنابراین به منظور پیشبینی شرایط جریان و دستیابی به یک مدل محاسباتی مناسب



(ج)



(ب)

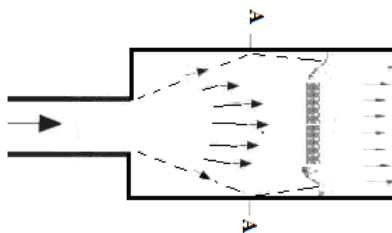


(الف)

شکل ۲: (الف) سد Hitokura در ژاپن، (ب) درپچه های سد Kotmale در سریلانکا، (ج) خروجی‌تحتانی سد Gebidem در سوئیس

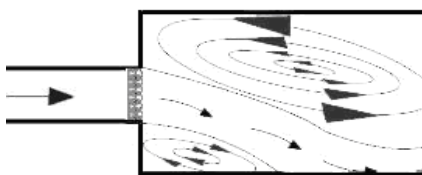
Fig.2. Hitokura Dam in Japan, spillway gates of Kotmale dam (Sri Lanka), outlet of Gebidem dam (Switzerland)

این ترتیب طول جریان برگشتی کناره‌ها و میزان عدم تقارن در پرش کاهش می‌یابد. غلطاب‌های سطحی کوچکی توسط گرداب‌های جانبی در کانال ورودی تشکیل می‌شود. با افزایش بیشتر تراز سطح آب پاییندست، پنجه پرش به سمت بالادست حرکت کرده، طول جریان برگشتی همچنان کاهش یافته و غلطاب‌های سطحی توسعه می‌یابد. در نهایت با افزایش بیشتر سطح آب پاییندست، جریان به شرایط استغراق نزدیک می‌شود و کل پرش در بالادست محل واگرایی رخ می‌دهد به طوری که جریان، در محل ورود به مقطع عریضتر، به صورت زیر بحرانی می‌باشد (شکل ۳ قسمت ج).



شکل ۳: (الف) پرش نوع R

Fig.3.(a) Typical R-jump



شکل ۳: (ب) پرش نوع S

Fig.3.(b) Typical S-jump

۱- پرش نوع R^2

اگر پنجه پرش در پاییندست اولین نقطه بازتاب امواج عرضی واقع گردد در این شرایط پرش را نوع R می‌نامند. در این نوع پرش مطابق شکل ۳ قسمت الف پنجه پرش در پاییندست نقطه A واقع شده و با کمی فاصله از مقطع واگرا خواهد بود. پرش R به کمترین عمق پایاب نیاز دارد.

۲- پرش نوع S^3

هنگامی که عمق آب در محل گرداب‌های جانبی افزایش می‌یابد، جریان فوقبحرانی قادر به تخلیه جریان در منطقه گرداب‌های جانبی نخواهد بود و به این ترتیب شرایط نامتقارن در جریان ایجاد می‌شود. در این حالت پرش به طور عمده به صورت یک جت نامتقارن بدون غلطاب‌های سطحی تشکیل می‌شود. در این جریان به طور مداوم دو گرداب جانبی وجود دارد. جبهه پرش V شکل و موقعیت پنجه پرش حدودا در محل واگرایی می‌باشد. جریان در پرش نوع S غیر یکنواخت با سرعت بالا و متمرکز به سمت یکی از دیوارهای جانبی و جریان برگشتی در سمت مقابل آن می‌باشد (شکل ۳ قسمت ب).

۳- پرش نوع T^4

اگر تراز آب پاییندست بیشتر از تراز مورد نیاز برای تشکیل پرش S شود در این صورت شرایط پرش از نظر تقارن و گسترش طولی بهبود می‌یابد و پنجه پرش به سرعت به سمت بالادست مقطع واگرایی حرکت می‌کند. به

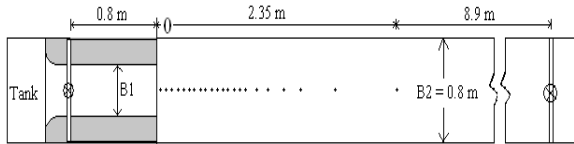
¹ Bottom outlet

² Repelled hydraulic jump

³ Spatial hydraulic jump

⁴ Transitional hydraulic jump

به منظور تشکیل پرش و کنترل عمق اولیه پرش و سرعت جریان از یک دریچه در ابتدای کانال استفاده شده است. به منظور جلوگیری از انقباض خطوط جریان خروجی از دریچه و همچنین تحقق این فرض که عمق اولیه پرش با ارتفاع بازشدگی دریچه برابر باشد، شکل بالادست دریچه به صورت نیم دایره ساخته شده است. در پاییندست کانال نیز به منظور تثبیت موقعیت تشکیل پرش از دریچه کنسویی دیگری استفاده شده است. ارتفاع بازشدگی دریچه برابر با ۳، ۴، ۵ و ۶ سانتیمتر تنظیم شده است. داده‌های فشار برای اعداد فرود در محدوده ۳ تا ۹ و نسبت واگرایی ($\beta = B_1 / B_2$) برابر با ۰/۳۳، ۰/۵، ۰/۶۷ و ۱ ثبت شده است. (شکل ۴).



شکل ۴: پلان کانال آزمایشگاه

Fig.4. plan of experimental setup

در کلیه آزمایش‌ها دریچه پاییندست به گونه‌ای کنترل شده است که پنجه پرش در مقطع واگرایی (مقطع ۰-۰ در شکل ۴) تشکیل گردد. به منظور تشکیل مقطع واگرا نیز از جعبه‌هایی از جنس پلکسی گلاس در طرفین عرض کانال استفاده شده است. نمونه‌های از آزمایش‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. جدول ۱ محدوده تغییرات سرعت و عدد فرود را برای نسبت‌های مختلف واگرایی در مقطع نشان می‌دهد.

جدول ۱: خلاصه ای از شرایط آزمایش

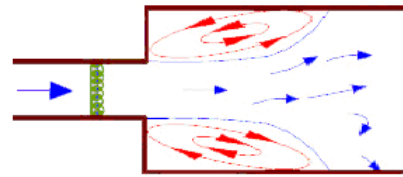
Table 1. Test cases of pressure fluctuations

نسبت واگرایی $\beta = B_1 / B_2$	سرعت ورودی V_1	فرود اولیه Fr_1
۱/۰	۳/۶ - ۱/۴	۶/۶ - ۲/۶
۰/۶۷	۳/۷ - ۱/۷	۶/۸ - ۲/۲
۰/۵۰	۳/۹ - ۱/۶	۶/۴ - ۲/۳
۰/۳۳	۵/۰ - ۱/۹	۹/۲ - ۳/۲



شکل ۵: نمایی از شرایط آزمایشگاهی

Fig.5. View the laboratory conditions



شکل ۳: (ج): پرش نوع T

Fig.3.(c) Typical T-jump

با توجه به اهمیت شناخت این نوع پرش‌ها، مطالعات متعددی از دیرباز توسط محققان انجام شده است که از جمله می‌توان به مطالعات هربراند (۱۹۷۳) اشاره کرد. او در مطالعه خود پرش نوع S را بر روی بستر صاف مورد بررسی قرار داد و معادلاتی را برای پیشبینی اعماق مزدوج ارائه نمود. متین و همکاران (۱۹۷۷) معادله بلانژ را برای مقطع واگرایی ناگهانی با بستر صاف برای تمام انواع پرش‌های واگرا با نسبت‌های مختلف واگرایی ارائه کردند. همچنین برمن و هاگر (۱۹۹۳)، الحمید (۲۰۰۴) و عبدالمتین و همکاران (۲۰۰۸) به مطالعه پرش واگرایی ناگهانی پرداخته‌اند. در این تحقیقات بیشتر به بررسی مشخصات هیدرولیکی پرش پرداخته شده است و تاکنون مشخصات هیدرودینامیکی پرش در مقاطع واگرایی ناگهانی مورد توجه قرار نگرفته است. در این مطالعه به تجزیه و تحلیل اثرات واگرایی بر فشارهای هیدرودینامیک در پرش هیدرولیکی نوع S پرداخته شده و نتایج آن با پرش کلاسیک مقایسه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش آزمایش

روش تحقیق، استفاده از یک مدل فیزیکی است. آزمایش‌ها در آزمایشگاه مهندسی هیدرولیک شهید چمران اهواز، در کانالی به طول ۱۲، عرض ۰/۸ و ارتفاع ۰/۷ متر انجام شد. در کف کانال از پوشش پلکسی گلاس استفاده شده و دیواره‌های کانال از جنس شیشه می‌باشد.

به منظور اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی ۲۲ نازل در خط مرکزی کانال و در طول ۲/۳۵ متر نصب گردید. فاصله نازل‌ها در ابتدای حوضچه (در طول ۰/۸۵ متر) برابر با ۵ سانتی‌متر و در انتهای حوضچه از ۱۰ تا ۲۵ سانتیمتر افزایش یافته است. نازل‌ها توسط شلنگ‌هایی به طول حداکثر ۱/۸ متر به دستگاه ترانسدیوسر (مبدل فشار) متصل هستند.

همچنین از آنجا که ثابت شده است که فرکانس غالب نوسانات فشار در «مدل» پرش هیدرولیکی کمتر از ۲۵ هرتز می‌باشد (توسو و باورس (۱۹۸۸) و اکبری و همکاران (۱۹۸۲))، از دستگاهی با نرخ نمونه‌برداری ۴۰ هرتز در این مطالعه استفاده شده است. به این ترتیب نوسانات فشار در هر ۹۰ ثانیه توسط ترانسدیوسر (مدل DM5۰۱۰S) اندازه‌گیری شده و با استفاده از نرم‌افزار داده‌ها ثبت می‌شوند. سپس مقادیر ضرایب نوسان‌های فشار شامل C_p^+ ، C_p^- و C_p محاسبه شده و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

۲-۳- تحلیل ابعادی نوسانات فشار

با توجه به اینکه تحلیل ابعادی یک روش موثر برای کاهش تعداد و پیچیدگی متغیرهای موثر بر یک پدیده می‌باشد، در این قسمت با تشریح پارامترهای مختلف موثر بر ضرایب فشارهای هیدرودینامیکی در حوضچه آرامش در یک مقطع واگرایی ناگهانی و استفاده از تئوری باکینگهام معادلات کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج می‌شوند. پارامترهای موثر بر ضرایب فشارهای هیدرودینامیکی در کف حوضچه آرامش به شرح ذیل می‌باشند:

$$C_p' = f(Y_1, Y_2, V_1, X, B_1, B_2, \rho_w, g) \quad (9)$$

که در آن Y_1 عمق اولیه پرش است، Y_2 عمق مزدوج پرش که با توجه به عمق اولیه و عدد فرود جریان بدست می‌آید، V_1 سرعت جریان ورودی، X فاصله موقعیت نقطه مورد نظر نسبت به محل شروع پرش هیدرولیکی و B_1 و B_2 به ترتیب عرض کانال قبل و بعد از مقطع واگرایی می‌باشد. مقدار B_2 ثابت و برابر با 0.8 متر می‌باشد. ρ_w وزن مخصوص آب و g شتاب ثقل می‌باشد. با استفاده از تئوری باکینگهام نتیجه آنالیز ابعادی به صورت زیر می‌باشد:

$$C_p' = \frac{\sqrt{p'}}{V_1^2 / 2g} = f\left(\frac{1}{F_1}, \frac{Y_2}{Y_1}, \frac{X}{Y_1}, \frac{B_1}{B_2}\right) \quad (10)$$

اولین پارامتر بدون بعد عدد فرود است که برای جریان با سطح آزاد برقرار است. پارامتر Y_2 / Y_1 رابطه بین عمق جریان در ابتدا و انتهای پرش است که این پارامتر تابعی از عدد فرود می‌باشد. پارامتر X / Y_1 مربوط به تغییرات رفتار فشار در نتیجه تغییر در موقعیت جریان می‌باشد و آخرین پارامتر $\beta = B_1 / B_2$ برابر با نسبت واگرایی حوضچه است که مقدار آن در این مطالعه برابر با 0.33 ، 0.5 ، 0.67 و 1 است.

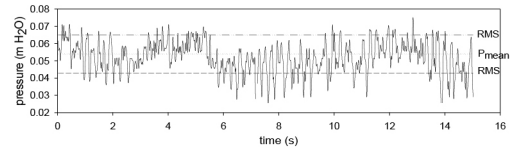
۳- نتایج

۳-۱- بررسی ضریب انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار (C_p')

در شکل ۷ قسمت الف تا د برای نسبت‌های مختلف واگرایی در حوضچه آرامش، ضریب انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار (C_p')، بر اساس رابطه ۵ محاسبه و ترسیم شده است. در این شکل‌ها محور X نشان دهنده موقعیت نسبی محل اندازه‌گیری فشار از پنجه پرش هیدرولیکی و محور Y بیانگر مقدار ضریب بدون بعد C_p' است. مشاهده می‌شود که شدت نوسانات در زیر پرش هیدرولیکی وابسته به فاصله از پنجه پرش می‌باشد، به طوری که در ابتدای پرش شدت نوسانات افزایش یافته تا به یک مقدار بیشینه می‌رسد. سپس سیر نزولی داشته تا اینکه در انتهای پرش مقدار آن تقریباً ثابت می‌شود.

۲-۲-۲- تحلیل آماری نوسانات فشار

با توجه به اینکه فشار در کف حوضچه آرامش کاملاً دارای نوسانات تصادفی می‌باشد، تجزیه و تحلیل آن اغلب با استفاده از روش‌های آماری می‌باشد. بررسی مختصری از پارامترهای موثر در این پدیده در ادامه ارائه شده است. شکل ۶ یک نمونه از نتایج ثبت شده توسط دستگاه ترانسدیوسر را نشان می‌دهد. در این شکل خواهیم داشت:



شکل ۶: برداشت داده‌های فشار توسط ترانسدیوسر

Fig.6. Typical Time series record of pressure fluctuations

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (2)$$

$$p' = p - \bar{p} \quad (3)$$

$$RMS = \sqrt{(p')^2} = \frac{1}{T} \int_0^T (p')^2 dt \quad (4)$$

در این رابطه P فشار کل در یک لحظه، \bar{P} میانگین زمانی فشار و RMS همان انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار می‌باشد و در برخی مراجع توسط σ نیز نشان داده می‌شود. به این ترتیب سه ضریب برای نوسانات فشار قابل تعریف است:

۱- بر اساس انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار:

$$C_p' = \frac{\sqrt{(p')^2}}{V_1^2 / 2g} \quad (5)$$

۲- بر اساس انحراف فشارهای بیشینه و کمینه از فشار میانگین:

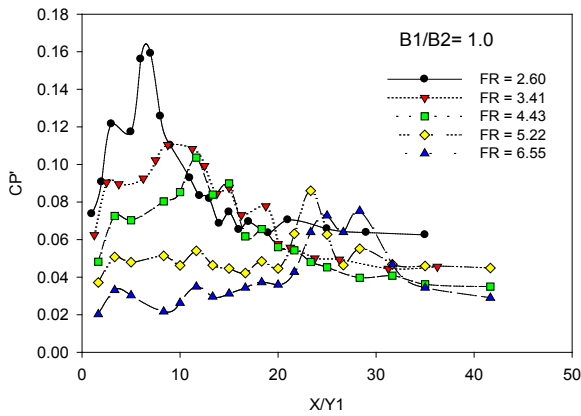
$$C_p^+ = \frac{\Delta p^+}{V_1^2 / 2g} \quad (6)$$

$$C_p^- = \frac{\Delta p^-}{V_1^2 / 2g} \quad (7)$$

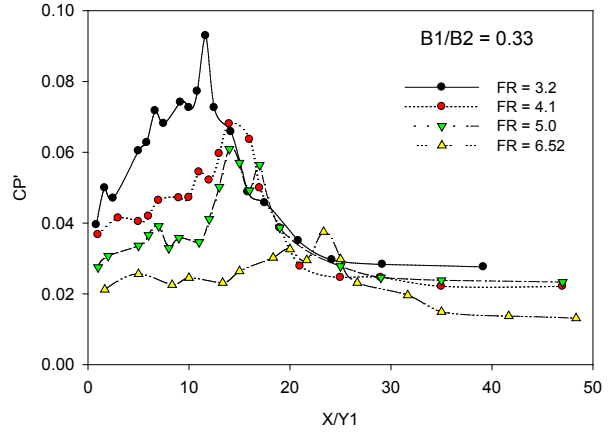
۳- ضریب فشار بر اساس فشار میانگین:

$$\bar{C}_p = \frac{\bar{p}}{V_1^2 / 2g} \quad (8)$$

در این روابط فشار بر اساس ارتفاع ستون آب می‌باشد. V_1 سرعت ورودی (m/s)، $\Delta p^+ = p_{max} - \bar{p}$ حداکثر اختلاف فشار مثبت و $\Delta p^- = p_{min} - \bar{p}$ حداکثر اختلاف فشار منفی از فشار میانگین می‌باشد. به این ترتیب C_p' ضریب بدون بعد نوسانات فشار می‌باشد که مقدار بالای آن نشان می‌دهد که تغییرات شدیدی در فشار وجود دارد.



شکل ۷: (د) تغییرات ضریب $C'p$ در نسبت واگرایی ۱۰٪
Fig.7. (d) Variation of $C'p$ for $\beta=1$



شکل ۷: (الف) تغییرات ضریب $C'p$ در نسبت واگرایی ۳۳٪
Fig.7.(a) Variation of $C'p$ for $\beta=0.33$

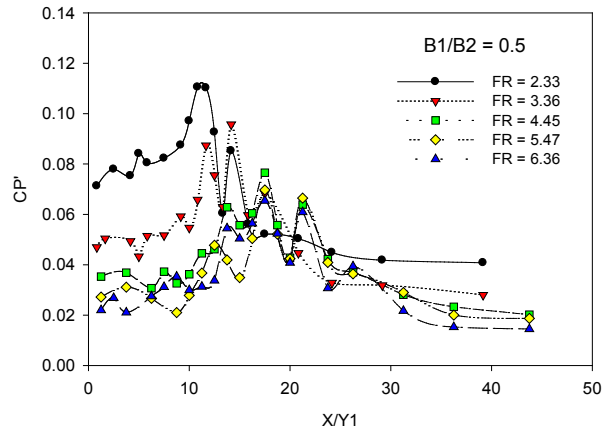
همچنین خلاص‌های از نتایج به دست آمده در خصوص تغییرات ضریب $C'p_{max}$ برای نسبت‌های مختلف واگرایی در جدول ۲ آورده شده است. این نتایج می‌تواند در طراحی ضخامت دال کف حوضچه آرامش مورد مفید باشد.

جدول ۲: محدوده تغییرات ضریب $C'p_{max}$
Table 2. Variation of $C'p_{max}$

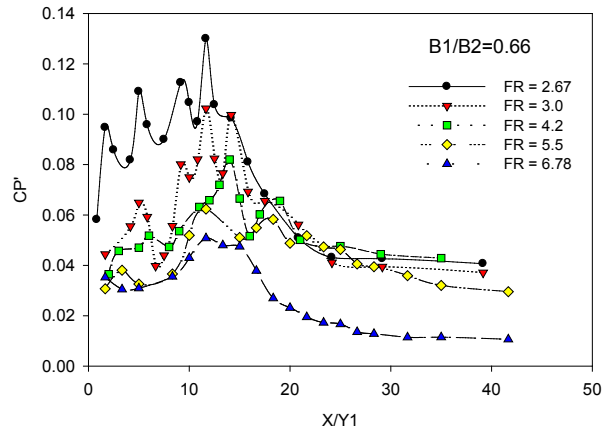
$\beta = B_1 / B_2$	FR ₁	$C'p_{max}$
۰/۳۳	۳/۲ - ۶/۵	۰/۰۴ - ۰/۰۹
۰/۵۰	۲/۳ - ۶/۴	۰/۰۶ - ۰/۱۱
۰/۶۷	۲/۷ - ۶/۸	۰/۰۷ - ۰/۱۳
۱/۰	۲/۶ - ۶/۶	۰/۰۸ - ۰/۱۶

در روش‌های سنتی طراحی ضخامت دال کف معمولاً با توجه به جنس مصالح دال کف، سعی می‌شود تعادل نیروهای هیدرواستاتیک و وزن دال فراهم گردد. در این روش فشارهای هیدرودینامیکی ناچیز فرض می‌شود. در حالی که محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی فشار نشان می‌دهد که این نیروها می‌توانند قابل توجه باشند و باید در طراحی ضخامت دال کف حوضچه لحاظ شوند.

با توجه به اینکه در طراحی حوضچه آرامش حداکثر ضریب انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار ($C'p_{max}$) مورد توجه می‌باشد، لازم است تغییرات آن نسبت به عدد فرود مورد بررسی قرار گیرد. این ضریب نشانگر میزان اثرات فشاری جریان بر دال کف می‌باشد که می‌تواند باعث صدمه به سازه گردد. به این ترتیب در شکل ۸ ضریب $C'p_{max}$ نسبت به عدد فرود اولیه برای نسبت‌های واگرایی ۰/۳۳، ۰/۵، ۰/۶۷ و ۱ ترسیم شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود همواره با افزایش

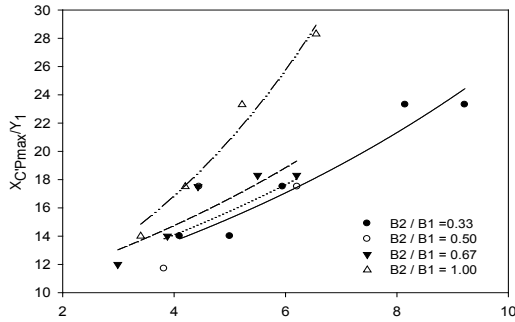


شکل ۷: (ب) تغییرات ضریب $C'p$ در نسبت واگرایی ۵۰٪
Fig.7. (b) Variation of $C'p$ for $\beta=0.5$



شکل ۷: (ج) تغییرات ضریب $C'p$ در نسبت واگرایی ۶۷٪
Fig.7. (c) Variation of $C'p$ for $\beta=0.67$

انرژی جنبشی ($V_1^2 / 2g$) بیشتر از رشد شدت نوسانات فشار می‌باشد. همچنین شکل ۹ موقعیت نسبی وقوع حداکثر نوسانات فشار را در طول پرش نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که محل وقوع حداکثر نوسانات فشار، وابسته به عدد فرود جریان ورودی می‌باشد. به طوری که با افزایش عدد فرود اولیه پرش مقدار پارامتر $X_{C'p_{max}} / Y_1$ نیز افزایش

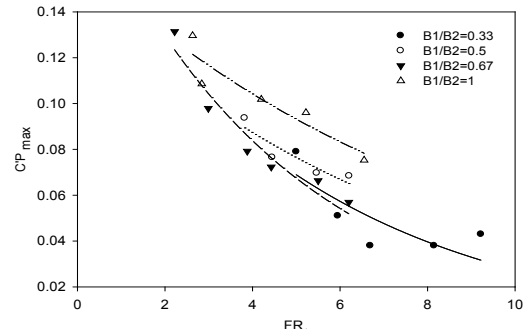


شکل ۹: تغییرات $X_{C'p_{max}}/Y_1$ نسبت به عدد فرود

Fig.9. Variation of $X_{C'p_{max}}/Y_1$ with entering Froude number

مهم در تعیین میزان تمایل به ایجاد پدیده حفره‌زایی ناشی از نوسانات فشار است، همچنین این ضریب در ارزیابی اثرات نیروهای برکنش در زیر دال نیز بسیار مورد توجه است. طبق نظر فیوریتو و رینالدو (۱۹۹۲) نیرویی که از زیر دال به دال وارد می‌شود مستقل از نوسانات فشار در روی دال بوده و فشارهای نوسانی می‌تواند از طریق درزها و ترک‌های موجود در بدنه دال با نیروهای زیر فشار همسو شده و سبب افزایش نیروهای زیر فشار گردد.

عدد فرود اولیه ضریب $C'p_{max}$ کاهش می‌یابد. این نتیجه توسط محققین مختلف تایید شده است. این امر به این معنا نیست که با افزایش عدد فرود اولیه پرش از شدت نوسانات فشار (RMS) کاسته می‌شود، بلکه به این دلیل است که با افزایش عدد فرود، رشد

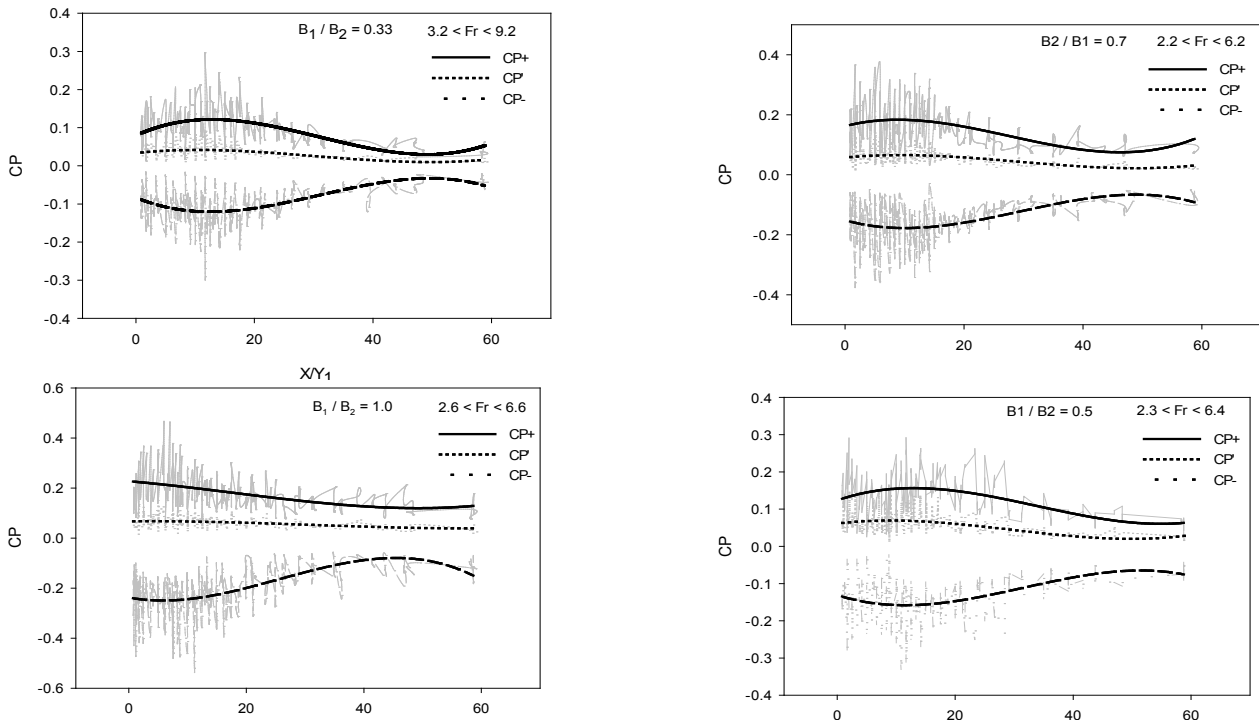


شکل ۸: تغییرات $C'p_{max}$ نسبت به عدد فرود

Fig.8. Variation of $C'p_{max}$ with entering Froude number

۲-۳ مقادیر حدی نوسانات فشار

در شکل ۱۰ انحراف فشارهای بیشینه و کمینه از فشار میانگین (C_p^+ و C_p^-) و انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار (C'_p) برای نسبت‌های مختلف واگرایی برای محدوده وسیعی از اعداد فرود ترسیم شده است. ضریب C_p^- با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شده و بیان کننده اختلاف فشارهای منفی نسبت به فشار متوسط است. این ضریب یکی از پارامترهای

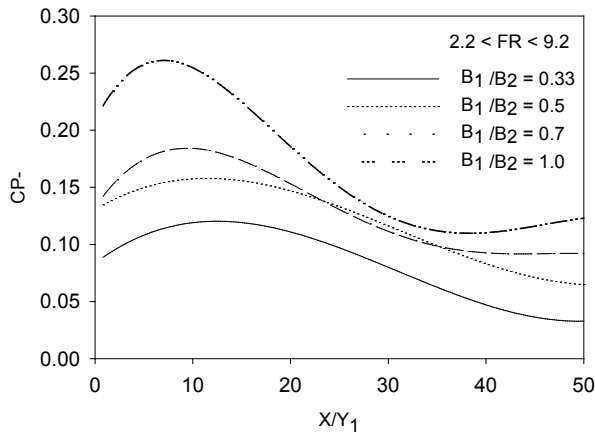


شکل ۱۰: حداکثر انحراف مثبت و منفی فشار از فشار میانگین (C_p^+ , C_p^-) و انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار (C'_p)

Fig.10. Peak Positive and Negative Pressure Fluctuations (C_p^+ , C_p^-) and standard deviation of pressure fluctuations (C'_p)

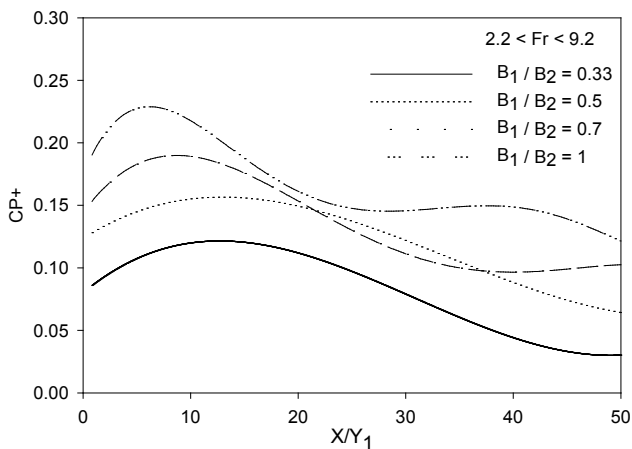
۳۸٪ و ۳۱٪ نسبت به پرش کلاسیک کاهش یافته است.

همانطور که در قسمت‌های قبل بررسی شد، هنگامی که پرش نوع S در یک مقطع واگرایی ناگهانی رخ می‌دهد، به طور مداوم دو گرداب جانبی تشکیل می‌شود و جریان تحت تاثیر گرداب‌های جانبی قرار می‌گیرد. پرش در این نوع جریان غیر یکنواخت و متمایل به سمت یکی از دیواره‌های جانبی و جریان برگشتی در سمت مقابل آن شکل می‌گیرد. کاهش نسبت واگرایی (B_1 / B_2) سبب می‌شود گرداب‌های جانبی گسترش بیشتری داشته و در نتیجهی تشکیل گرداب‌های جانبی بزرگتر، بخشی از شدت تلاطم پرش با افت انرژی کاسته می‌شود.



شکل ۱۱ (الف) ضریب انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار

Fig.11.(a) standard deviation of pressure fluctuations



شکل ۱۱ (ب): ضریب حداکثر انحراف فشار مثبت از فشار میانگین

Fig.11.(b) Maximum positive pressure deviations from mean

می‌یابد. همچنین حداکثر ضریب نوسانات فشار ($C'_{p_{max}}$) تقریباً نزدیک به محل پنجه پرش و در محدوده $30 \leq X / Y_1 \leq 10$ رخ می‌دهد.

ضریب C_p^+ نیز بیان کننده اختلاف فشارهای حداکثر از فشار متوسط و بیان کننده میزان اثرات کوبش ناشی از نوسانات فشار بر کف حوضچه آرامش می‌باشد. این ضریب مطابق رابطه ۶ محاسبه شده و برای نسبت‌های مختلف واگرایی در شکل ۱۰ ترسیم شده است.

همچنین برای نمایش بهتر نتایج، یک منحنی پلینومیال بر داده‌ها برازش شده است. همانگونه که مشخص است ضریب C_p^+ و C_p^- نیز وابسته به فاصله از پنجه پرش است و از ابتدای پرش شروع به افزایش نموده تا به یک مقدار بیشینه می‌رسد سپس سیر نزولی داشته تا در نهایت در انتهای پرش ثابت می‌شود.

مقادیر حداکثر ضرایب C_p^+ و $|C_p^-|$ به منظور تعیین ضخامت دال کف حوضچه آرامش و تعیین دقیقتر نیروهای وارد بر دال ضروری می‌باشد. به همین دلیل در جدول ۳ خلاصه مقادیر حداکثر ضرایب حدی نوسانات فشار ارائه شده است.

جدول ۳: مقادیر حداکثر ضرایب حدی نوسانات فشار

Table3. Maximum extreme pressure fluctuations

$\beta = B_1 / B_2$	FR_1	C_p^+	$ C_p^- $
۰/۳۳	۳/۲ - ۹/۲	۰/۲۷	۰/۲۷
۰/۵۰	۲/۳ - ۶/۴	۰/۲۹	۰/۳۳
۰/۶۷	۲/۲ - ۶/۸	۰/۳۷	۰/۳۷
۱/۰	۲/۶ - ۶/۶	۰/۴۷	۰/۵۳

همچنین قابل توجه است که در محدوده حداکثر نوسانات فشار، ضرایب C_p^+ و $|C_p^-|$ تقریباً ۲ الی ۱۰ برابر انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار می‌باشد.

۳-۳ اثرات واگرایی مقطع در نوسانات فشار

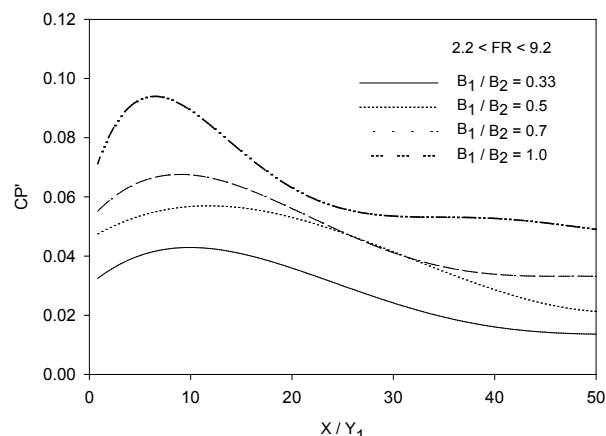
شکل ۱۱ قسمت الف تا ج مقدار تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی نوسانات فشار (C_p^+ ، $|C_p^-|$ و C_p') را برای نسبت‌های مختلف واگرایی نشان می‌دهد. همانطور که در هر سه شکل مشخص است ایجاد واگرایی در مقطع حوضچه سبب کاهش ضرایب هیدرودینامیکی ناشی از نوسانات فشار می‌شود. به طوری که حداکثر ضریب انحراف معیار استاندارد در نسبت‌های واگرایی ۰/۳۳، ۰/۵، ۰/۶۷ و به ترتیب برابر با ۰/۴۳، ۰/۳۸ و ۱۹ درصد در مقایسه با پرش کلاسیک کاهش یافته است.

در شکل ۱۱ قسمت ب ضریب C_p^+ در نسبت‌های واگرایی ۰/۳۳، ۰/۵ و ۰/۶۷ به ترتیب به میزان ۰/۴۳، ۰/۳۸ و ۲۱ درصد در مقایسه با پرش کلاسیک کاهش داشته است.

همچنین ضریب $|C_p^-|$ نیز در شکل ۱۱ قسمت ج ترسیم شده و این ضریب در نسبت‌های واگرایی ۰/۳۳، ۰/۵ و ۰/۶۷ به ترتیب به میزان ۰/۴۹،

مراجع

- [1] Bowers, C. E. and F. Y. Tsai (1969). "Fluctuating pressures in spillway stilling basins." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 95: 2071-2079.
- [2] Bowers, C. E. and J. W. Toso (1985). "Karnafuli hydroelectric project, hydraulic model studies of spillway damage." *Proc, Specialty Conf. Hydr. And Hydral*, ASCE: 2071-2079.
- [3] Bowers, C. E. and J. W. Toso (1988). "Karnafuli hydroelectric project, hydraulic model studies of spillway damage." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 114(5): 469-483.
- [4] Elder, R. A. (1961). "Model-prototype turbulence scaling." *iX iAHR Congress Dubrovnik*: 24-31.
- [5] Abdul Khader, M. H. and K. Elengo (1974). "Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump." *Journal of Hydraulic Research* 12(4): 469-489.
- [6] Lopardo, R. A. and H. G. Solari (1980). "Pressure fluctuations beneath free hydraulic jump." *Proc. 9th Latin American Hydraulics Congress*: 69-78.
- [7] Akbari, M. E., et al. (1982). "Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps." *Int. Conf. Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures*: 87-96.
- [8] Lopardo, R. A., et al. (1982). "Physical modelling on cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump." *Int. Conf. on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures*: 109-121.
- [9] Lopardo, R. A. and R. E. Henning (1985). "Experimental advances on pressure fluctuations beneath hydraulic jumps." *21st IAHR Congress 3*: 633-638.
- [10] Fiorotto, V. and A. Rinaldo (1992). "Fluctuating Uplift and Lining Design In Spillway Stilling Basins." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 118(4): 578-596.
- [11] Fiorotto, V. and A. Rinaldo (1990). "Discussion of Karnafuli project, model; studies on spillway damage." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 116(6): 850-852.
- [12] Pirouz, B. and M. R. Kavianpour (2002). "Spectral analysis of pressure fluctuations under hydraulic jumps." *13th IAHR-APD Conf*: 115-120.
- [13] Zhen-xiang, W. and L. Guo-chong (1993). "A study of wave characteristics after hydraulic jump." *Journal of Hydrodynamics* 5(1): 58-62.
- [14] Bremen, R. and H. T. Hagerw (1993). "Jump in abruptly expanding channel." *Journal of Hydraulic Research* 31(1): 61-78.
- [15] Fiorotto, V. and A. Rinaldo (1992). "Turbulent pressure



شکل ۱۱(ج): قدر مطلق ضریب حداکثر انحراف فشار منفی از فشار میانگین
Fig.11.(c) The absolute of maximum negative pressure deviations from mean

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق پرش هیدرولیکی نوع S در چهار نسبت واگرایی ۱، ۰/۶۷، ۰/۵ و ۰/۳۳ مدلسازی و نوسانات فشار در کف حوضچه آرامش مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱- ضریب انحراف معیار استاندارد (C_p^-) و ضرایب حدی (C_p^+ و C_p^-) نوسانات فشار در پرشهیدرولیکی وابسته به فاصله از پنجه پرش می‌باشند، بهطوری که در ابتدای پرش دارای سیر صعودی می‌باشند تا اینکه به یک مقدار بیشینه می‌رسند. سپس با سیر نزولی مقدار آنها کاهش یافته و در انتهای پرش تقریباً ثابت می‌شوند.

۲- ایجاد واگرایی در مقطع حوضچه آرامش سبب تشکیل گرداب‌های جانبی در طرفین پرشهیدرولیکی و در نتیجه سبب کاهش شدت نوسانات فشار در زیر پرشهیدرولیکی می‌شود.

۳- حداکثر ضریب انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار ($C_{p_{max}}^-$)، با افزایش عدد فرود اولیه، کاهش می‌یابد و تقریباً نزدیک به محل پنجه پرش و در محدوده ۱۰ تا ۳۰ برابر عمق اولیه پرش رخ می‌دهد.

۴- واگرایی در مقطع پرشهیدرولیکی، ضرایب حدی نوسانات فشار (C_p^+ و C_p^-) را کاهش می‌دهد. به طوری که ضریب C_p^+ در نسبت‌های واگرایی ۰/۶۷، ۰/۵ و ۰/۳۳ به ترتیب به میزان ۰/۴۳٪، ۰/۳۸٪ و ۰/۳۱ درصد در مقایسه با پرش کلاسیک کاهش یافته است. همچنین ضریب C_p^- نیز در نسبت‌های واگرایی مذکور به ترتیب ۰/۴۹٪، ۰/۳۸٪ و ۰/۳۱٪ نسبت به پرش کلاسیک کاهش یافته است.

- [21] Armenio, V., et al. (2000). "On the Effect of a Negative Step in Pressure Fluctuations at the Bottom of a Hydraulic Jump." *Journal of Hydraulic Research* 38(5): 610-619.
- [22]
- [23] Bellin, A. and V. Firoto (1995). "Direct Dynamic Force Measurement on Slabs in Spillway Stilling Basins." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE 121: 686-693.
- [24] Farhoudi, J. and R. Narayanan (1991). "Force on Slab Beneath Hydraulic Jump." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE 117: 469-483.
- [25] Farhoudi, J. and R. E. Volker (1995). "Drag Force Acting on Baffle Blocks in the Stilling Basin." *iran journal water resources engineering* 1(3): 47- 67.
- [26] Rouse, H. (1985). "Turbulence Characteristics of Hydraulic Jump." *Journal of the Hydraulic. Division*, ASCE 84: 1-30.
- fluctuations under hydraulic jumps." *Journal of Hydraulic Research* 30(4): 499-520.
- [16] Toso, J. W. and C. E. Bowers (1988). "Extreme pressures in hydraulic jump stilling basins." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 114(8): 829-843.
- [17] Vasiliev, O. F. and V. I. Bukreyev (1967). "Statistical characteristic of pressure fluctuations in the region of hydraulic jump." in Proceedings of the 12th IAHR Congress 2: 1-8.
- [18] Zhang, S. M. (1992). "Similarity law of fluctuating pressure within hydraulic jump area." *Journal of Hydrodynamics*: 46-51.
- [19] Pirooz, B. and M. R. Kavianpour (2000). "Experimental Investigation of Pressure Fluctuations Beneath Hydraulic Jumps." 29th IAHR Congress.
- [20] Mohammady, B. (2001). "Experimental Investigation of Pressure Fluctuations Beneath Hydraulic Jumps in stilling basins with negative slopes." *29th IAHR Congress*.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Karimi, S.H. Musavi Jahromi, M. Shafai-Bajestan, "Pressure Fluctuations in Hydraulic Jump Investigation of Stilling Basin at Sudden Expansion". *Amirkabir J. Civil Engineering.*, 49(2) (2017) 263-272.

DOI:10.22060/ceej.2016.678

