



مطالعه آزمایشگاهی برهم‌کنش پرش‌های هیدرولیکی ناشی از یک جت مایل و یک جت عمودی

علی براتی ماژان^۱، سید مجید ملک جعفریان^{۲*}^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران^۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴

چکیده

در کار حاضر، اثر برهم‌کنش پرش‌های هیدرولیکی یک نازل مایل و یک نازل عمودی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. سیال مورد آزمایش آب است و جریان سیال در محدوده آرام قرار دارد. ابتدا نتایج دستگاه تجربی مورد استفاده در کار حاضر با نتایج یک نازل مایل و نتایج دو جت عمودی، اعتبار سنجی شده است. مطالعات محققان قبل نشان می‌دهد که در برخورد پرش‌های دو نازل عمودی، مرزبندی‌هایی (ناحیه خیلی دور، دور و مجاور) وجود دارد که این مرزبندی‌ها با افزایش و کاهش دبی و فاصله بین دو نازل تغییر می‌کند. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که در برخورد پرش‌های هیدرولیکی دو نازل مایل و عمودی، مرز بین ناحیه خیلی دور و دور با افزایش زاویه تمایل به صورت خطی حدوداً ۲۰ درصد افزایش می‌یابد؛ همچنین با ثابت نگهداشتن فاصله بین دو نازل با افزایش زاویه تمایل، نسبت شعاع پرش نازل عمودی در زاویه ۰ درجه به شعاع در زاویه ۱۸۰ درجه ($R_{1\pi}/R_{10}$) افزایش یافته است، ولی این نسبت برای پرش نازل مایل ($R_{2\pi}/R_{20}$)، نزولی است. این نسبت‌ها با زیاد شدن مقدار دبی به صورت خطی افزایش می‌یابند؛ همچنین در دبی ثابت، با زیاد شدن زاویه تمایل، نسبت $R_{1\pi}/R_{10}$ روند نزولی داشته و با دور شدن نازل‌ها از یکدیگر، این نسبت به عدد ۱ نزدیک می‌شود. این موضوع برای نازل مایل برعکس است.

کلمات کلیدی: برهم‌کنش پرش‌های هیدرولیکی؛ زاویه تمایل جت؛ جت مایل؛ جت عمودی؛ پردازش تصویر

Experimental study of the interaction of hydraulic jumps caused by an inclined jet and a vertical jet

Ali Barati Majan¹, Seyed Majid Malek-Jafarian^{2,*}¹ PhD Candidate, Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran² Assoc. Prof., Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

In the present work, investigates the effect of hydraulic jump interaction between an inclined nozzle and a vertical nozzle experimentally. Water is used as the test fluid, and the flow is in the laminar range. First, the results of the experimental setup used in this study were validated with the results of an inclined nozzle and two vertical jets. Previous studies have shown that there are boundaries (far, distance, and near regions) in the interaction of two vertical jets, which change with an increase or decrease in flow rate and distance between the nozzles. The results of this study show that in the interaction of hydraulic jumps from an inclined and a vertical nozzle, the boundary between the far and distance regions increases linearly by about 20% with an increase in inclination angle. Additionally, with a fix distance between the nozzles, the ratio of the jump radius of the vertical jet at 0 degree to 180 degree ($R_{1\pi}/R_{10}$) increases with an increase in inclination angle, but this ratio decreases for the inclined nozzle ($R_{2\pi}/R_{20}$). These ratios increase linearly with an increase in flow rate. Moreover, at a constant flow rate, the ratio $R_{1\pi}/R_{10}$ decreases with an increase in inclination angle, and this ratio approaches 1, as the nozzles move away from each other. This trend is vice versa for the inclined nozzle.

Keywords: Hydraulic jump interaction; jet inclination angle; inclined jet; vertical jet; image processing.

۱- مقدمه

زمانی که یک جت عمودی سیال، به یک صفحه افقی برخورد می‌کند، سیال به صورت شعاعی در همه‌ی جهات صفحه پخش می‌شود. شعاع پرش یک فاصله‌ی خاص از محل برخورد جت با صفحه افقی، نامیده می‌شود که در این فاصله، جریان از حالت فوق بحرانی به حالت زیر بحرانی تبدیل شده و ناگهان ضخامت سیال افزایش می‌یابد. پیش‌بینی شعاع و ساختار ایجاد پرش هیدرولیکی اهمیت بالایی دارد و محققان بسیاری در این زمینه تلاش نموده‌اند. پرش هیدرولیکی ناشی از برخورد جت سیال به یک صفحه تخت، کاربردهای فراوانی در صنعت دارد که از مهمترین آنها می‌توان به اختلاط مواد شیمیایی، پوشش‌دهی، خنک‌کاری و تمیزکاری، ساخت شیشه، آینه‌های لیزری و ... اشاره کرد. با افزایش شعاع پرش هیدرولیکی، سطح انتقال حرارت بیشتر شده و با کاهش آن میزان انتقال حرارت نیز کاهش می‌یابد. سرعت بالای سیال در منطقه برخورد، نرخ انتقال حرارت بالایی ایجاد می‌کند؛ اما میزان آن سریعاً با دور شدن از این ناحیه کاهش می‌یابد؛ بنابراین توزیع شار حرارت خالص در اطراف منطقه برخورد غیر یکنواخت خواهد بود. برای غلبه بر این نقص، در بسیاری از کاربردهای صنعتی از جت‌های (نازل‌ها) چندگانه استفاده می‌شود. هنگام استفاده از چند نازل به دلیل نزدیک شدن نواحی پرش، منطقه پرش وسیع‌تر می‌گردد. به دلیل اهمیت موضوع بررسی نازل‌های چندگانه در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران بوده است.

می‌توان تحقیقات مرتبط با موضوع پرش‌های هیدرولیکی را به جنبه‌های مختلف مرتبط با پدیده شناسی و تئوری، نازل‌ها، صفحه برخورد و نوع سیال بکار رفته، تقسیم بندی کرد. لازم به ذکر است، از آنجایی که پژوهش حال حاضر مرتبط با نازل‌ها است، لذا تحقیقات مرتبط با این موضوع در ادامه عنوان خواهد شد.

برای اولین بار ریلی^۱ [۱] در سال ۱۹۱۴ در آزمایشات خود پرش هیدرولیکی را مشاهده نمود و به صورت کیفی تحلیل‌های خود را در این زمینه ارائه داد. دو عامل کشش سطحی و دبی جریان از عوامل مهم این پدیده معرفی شدند. غالب مطالعات در مورد پدیده شناسی پرش هیدرولیکی پس

از رایلی مربوط به بیرخوف^۲ و زارانتونلو^۳ [۲]، واتسون^۴ [۳]، بور^۵ [۴]، هیگوئرا^۶ [۵] و ... است. عمده تحقیقات انجام شده، ناشی از برخورد یک جت عمودی به صفحه هدف بوده است؛ اما در سال‌های اخیر پرش‌های ناشی از جت‌های مایل و جت-های چندگانه مورد تحقیق پژوهشگران بوده که در ادامه مهمترین آنها بیان خواهند شد. کیت و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۷ به توصیف هندسی و هیدرودینامیکی پرش ناشی از برخورد یک جت مورب با سطح افق به صورت آزمایشگاهی پرداختند. در سال ۲۰۰۷ کیت^۷ و همکارانش [۷] کشف کردند که پرش‌های هیدرولیکی ناشی از جت‌های دایره‌ای مایل تحت شرایط خاصی از برخورد، یک سری الگوی جریان جالب از جمله جهش با گوشه‌ها را به وجود می‌آورند. این الگوها به طور قابل توجهی از شکل‌های پرش بیضوی که معمولاً در زوایای بالاتر شیب جت مشاهده می‌شوند، متفاوت است. همچنین آنها یک تئوری برای تحلیل چنین پرش‌هایی ارائه دادند. بیشتر تحقیقات در مورد جت‌های دوتائی در مورد سیالات تراکم پذیر مانند هوا (در هواپیماهای عمود پرواز) بوده است. در مورد سیالات تراکم ناپذیر خصوصاً آب، کیت و همکاران [۶-۱۱] بیشترین پژوهش در این زمینه را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۲۰۰۷ کیت و همکاران [۸] برای اولین بار به بررسی تجربی برهمکنش پرش‌های هیدرولیکی تشکیل شده توسط برخورد دو جت مایع دایروی عمودی با قدرت‌های برابر و نابرابر به یک سطح افقی پرداختند. به طور کلی، آنها سه ناحیه خیلی دور، دور و مجاور تعریف نمودند. به بیان آنها ناحیه "خیلی دور" مکانی است که فاصله بین دو جت بیشتر از فاصله بحرانی (Sc) به ازای دبی معینی از مایع باشد. ناحیه "دور" فاصله بین دو جت کمتر از فاصله بحرانی ولی بیشتر از R (میانگین شعاع‌های پرش ایجاد شده توسط هر کدام از نازل‌ها در حالت مستقل) است. ناحیه "مجاور" فاصله بین نازل‌ها کمتر از میانگین شعاع پرش‌های هیدرولیکی دایره‌ای شکل گرفته در اثر جت‌های مستقل منفرد می‌باشد. آزمایشات آنها نشان داد که شکل پرش‌های هیدرولیکی تشکیل شده به دلیل دو جت برخورد کننده

² Birkhoff

³ Zarantonello

⁴ Watson

⁵ Bohr

⁶ Higuera

⁷ Kate

¹ Rayleigh

گروه اعداد بی بعد رینولدز و فرود است. کیت و گوردی^۴ [۱۱] در سال ۲۰۱۶ به مطالعه پرش‌های هیدرولیکی ناشی از تعامل چندین جت عمودی برخورد کننده به سطح افقی پرداختند. آنها نشان دادند که در این حالت، پرش‌های هیدرولیکی دایره‌ای، تغییر شکل یافته و تقارن خود را از دست می‌دهند؛ همچنین مساحت کل موثر پرش‌های هیدرولیکی دایروی با تغییر شکل پرش‌ها به دلیل اندرکنش آنها کاهش می‌یابد.

سینک^۵ و داس^۶ [۱۴] در سال ۲۰۱۸ برای درک بهتر الگوی جریان بدست آمده ناشی از برخورد پرش‌های دو جت عمودی و همچنین یک جت مورب به صفحه افقی، به شبیه‌سازی عددی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در صورت برخورد پرش‌های هیدرولیکی ناشی از دو جت عمودی با قدرت برابر، برآمدگی عمودی ایجاد شده از آنها در راستای خط سکون و در فاصله برابر از نقطه برخورد ایجاد می‌شود. آنها دریافتند با کاهش زاویه یک جت مایل، عدم تقارن در پرش شکل گرفته بر روی سطح بیشتر می‌شود؛ همچنین آنها نشان دادند که در صورت برخورد پرش‌های هیدرولیکی دو جت عمودی با قدرت‌های متفاوت در محل برخورد پرش‌ها، یک فواره منحنی، شکل می‌گیرد که مشخصه چنین جت‌هایی شناخته می‌شود. اسدی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۰ به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر دورانی یک جت سیال چرخان، روی پرش هیدرولیکی دایروی و چند ضلعی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش سرعت زاویه‌ای جت، شعاع پرش افزایش می‌یابد؛ اما این افزایش شعاع در مقایسه با افزایش شعاع پرش به ازای افزایش دبی سیال، کمتر خواهد بود.

همانطور که در بالا بیان شد، هنگام استفاده از نازل‌های متعدد به دلیل به هم چسبیدن چند ناحیه پرش، منطقه پرش وسیع‌تر گردیده و باعث ایجاد سطح انتقال حرارت یکنواخت‌تر نسبت به پرش حاصل از جت‌های منفرد می‌شود. با این کار کارایی سرمایشی سطح بهبود می‌یابد. چرا که یکنواختی انتقال حرارت از سطح باعث محافظت سطح از قرار گرفتن تحت گرادیان شدید دمایی می‌گردد؛ لذا در بسیاری از کاربردهای صنعتی از جت‌های چندگانه استفاده

عمودی، به ازای یک دبی حجمی (Q) مشخص، عمدتاً به فاصله بین دو جت بستگی دارد [۸].

کیت و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۸ به صورت تجربی به بررسی هیدرودینامیکی پرش‌های هیدرولیکی غیر دایروی تشکیل شده از برخورد یک جت مایل دایروی به صفحه هدف افقی پرداختند. آنها به طور خاص، تأکید ویژه‌ای بر بدست آوردن مساحت پرش، ضخامت لایه سیال داخل ناحیه پرش و فشار سکون به عنوان یک تابع پارامتری از زاویه تمایل جت، داشتند. کیت و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۹ اثرات زاویه تمایل یک جت بر پرش هیدرولیکی تشکیل شده روی صفحه افقی متحرک بدون شتاب را مورد بررسی قرار دادند. آنها رابطه تئوری برای بدست آوردن موقعیت پرش جت‌های مختلف در سرعت‌های متفاوت صفحه و زوایای تمایل مختلف جت ارائه دادند. آنها نشان دادند که جریان حاصل از برخورد جت عمودی به یک صفحه افقی در حال حرکت، می‌تواند معادل با جریان حاصل از برخورد جت مایل روی یک صفحه افقی ثابت در نظر گرفته شود، به شرطی که تغییرات مناسبی در سرعت جت و زوایای تمایل ایجاد شود. جانگل^۱ [۱۲] در ۲۰۱۵ به مطالعه تجربی پرش هیدرولیکی بوجود آمده از یک جت متحرک افقی در حال حرکت در دبی‌های متفاوت پرداخت. او دو نوع متفاوت پرش هیدرولیکی، ناشی از برخورد جت‌های ثابت و متحرک با سطح افقی را مورد مطالعه قرار داد. در وضعیت جت ثابت و زاویه تمایل بالای جت، منحنی‌های صافی در شکل پرش‌ها ظاهر می‌شود، اما در زوایای خیلی کم جت، منحنی با تغییر تند در شکل پرش‌ها آشکار می‌شود. او نشان داد در جت ثابت، شعاع پرش با افزایش نرخ دبی، افزایش یافته و به علت وضعیت تمایل جت، پرش هیدرولیکی بیضوی تشکیل خواهد شد. چوو^۲ و کیم^۳ [۱۳] در سال ۲۰۱۶ به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر قطر نازل عمودی بر شعاع پرش هیدرولیکی دایروی پرداختند. بررسی آنها نشان داد که شعاع بدون بعد پرش هیدرولیکی، مستقل از قطر نازل به ازای یک قدرت جت مشخص است. در حالیکه در عدد رینولدز ثابت، شعاع بدون بعد پرش هیدرولیکی با کاهش قطر نازل، افزایش می‌یابد. آنها همچنین ثابت کردند که شعاع بدون بعد پرش، وابسته به دو

⁴ Gorde

⁵ Singh

⁶ Das

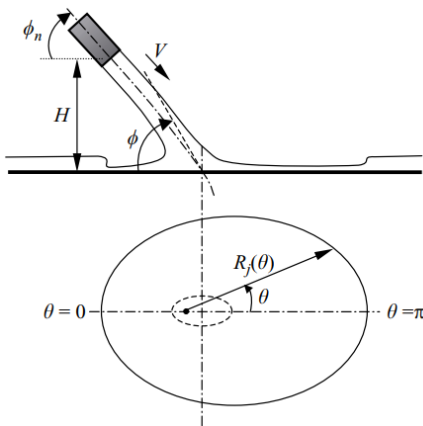
¹ Janghel

² Choo

³ Kim

مخزن اصلی (۱۶) و مکانیزم ترازبندی مخزن سرریز (۱۷) است. با این دستگاه می‌توان پرش‌های هیدرولیکی مایل و عمودی دارای یک نازل و دو نازل را ایجاد نمود. نازل‌ها توسط مکانیزمی خاص روی دستگاه طوری نصب شده‌اند که می‌توانند حرکت افقی و زاویه‌دار داشته باشند. یکی از موارد اعتبار سنجی دستگاه، مقایسه نتایج با حل تحلیلی یک نازل مایل ارائه شده توسط کیت و همکاران است. در ادامه به این حل تحلیلی و تئوری پرداخته خواهد شد.

شکل شماره ۲ شماتیک یک پرش هیدرولیکی شکل گرفته از یک نازل مایل به قطر $D = 2r_0$ بر روی سطح افقی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- شماتیک پرش هیدرولیکی شکل گرفته از یک نازل مایل بر روی صفحه افقی در پژوهش کیت و همکاران [۶]

که ϕ_n زاویه نازل با سطح افق، θ زاویه محیطی پرش هیدرولیکی، H ارتفاع نازل تا صفحه هدف، V سرعت خروج سیال از دهانه نازل، $R_f(\theta)$ شعاع پرش هیدرولیکی و ϕ زاویه برخورد جت با صفحه افقی می‌باشد. کیت و همکاران [۶] نشان دادند که به علت اثر گرانش، زاویه برخورد سیال از زاویه تمایل نازل بیشتر و از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

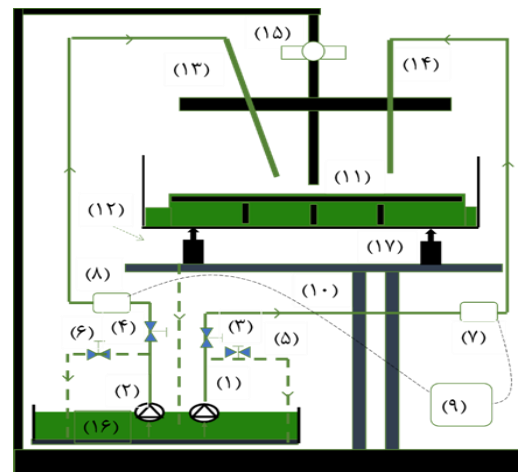
$$\phi = \tan^{-1} \frac{(V^2 \sin^2 \phi_n + 2g * H)^{\frac{1}{2}}}{V \cos \phi_n} \quad (1)$$

که g شتاب جاذبه است.

می‌شود. با توجه به آن که در صنعت، نازل‌های با زاویه مایل به دلیل جانمایی ساده‌تر، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ لذا بررسی این نوع نازل‌ها در تشکیل پرش هیدرولیکی در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. مرور بر تحقیقات انجام شده در بالا نشان می‌دهد که عمده مطالعات در مورد جت‌های مایل، منحصر به جت‌های مایل تکی بوده و تاکنون مطالعه‌ای در مورد اندرکنش پرش‌های هیدرولیکی ناشی از یک جت مایل و یک جت عمودی انجام نشده است؛ لذا در پژوهش حاضر قصد بر آن است که به صورت آزمایشگاهی به مطالعه چنین پرش‌هایی پرداخته شود.

۲- تئوری و روش تحقیق

همانطور که در قسمت قبل ذکر شد تحقیق به صورت آزمایشگاهی انجام شده است. بدین منظور یک دستگاه ایجادکننده پرش هیدرولیکی مطابق شکل شماره ۱ مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱- شماتیک دستگاه پرش هیدرولیکی با دو نازل

به طور خلاصه می‌توان گفت، دستگاه شامل دو عدد پمپ (۲ و ۱)، دو عدد شیر تنظیم دبی (۳ و ۴)، دو عدد شیر مسیر فرعی (۵ و ۶)، سنسورهای اندازه‌گیری دبی (۷ و ۸)، مدار دریافت کننده پالس‌های سنسورها (۹)، پایه نگهدارنده مخزن سرریز (۱۰)، صفحه هدف شیشه‌ای از جنس شیشه پنجره با زبری سطح بین ۰/۱ تا ۰/۵ میکرومتر (۱۱)، مخزن سرریز (۱۲)، دو عدد نازل (۱۳ و ۱۴)، دوربین عکس برداری (۱۵)،

کمترین زمان پرشدن این حجم برای بیشترین دبی در آزمایش‌ها حدود ۱۰ ثانیه است و همچنین دقت اندازه‌گیری حجم ۱ میلی‌لیتر و زمان ۰/۰۱ ثانیه است، لذا درصد عدم قطعیت اندازه‌گیری دبی بر اساس رابطه (۵) برابر با ۰/۱۱ درصد است. عدم قطعیت محاسبه شده فوق مربوط به دبی سنج اولیه دستگاه است که بر اساس تعیین دبی با محاسبه حجم پر شده مخزن، در واحد زمان است. از آنجایی که در کار حاضر از سنسور اندازه‌گیری جریان YF-401 برای محاسبه دبی نازل‌ها استفاده شده و از طرفی دبی عبوری جریان از این دبی‌سنج‌ها با دبی‌سنج اولیه دستگاه کالیبره گردیده است، لذا می‌توان درصد عدم قطعیت محاسبه شده در مورد دبی‌سنج اولیه را برای این دبی‌سنج‌ها نیز در نظر گرفت.

عدم قطعیت استاندارد در اثر تکرار آزمایش نیز براساس توزیع گوسی از رابطه ۶ بدست می‌آید.

$$u_{rep} = \frac{\delta}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

که δ انحراف از معیار است. با تکرار اندازه‌گیری دبی سیال و محاسبه از رابطه ۶، عدم قطعیت ناشی از تکرار آزمایش ۰/۰۴۶ بدست می‌آید.

در نتیجه عدم قطعیت ترکیبی با قرار دادن مقادیر بدست آمده (u_{tools} و u_{rep}) در رابطه ۳ مقدار ۰/۲ بدست می‌آید.

۴- کالیبراسیون تجهیزات

برای اندازه‌گیری شعاع پرش هیدرولیکی از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و برای اندازه‌گیری مقدار دبی سیال نیز از سنسور اثر هال مدل YF-401 با کارکرد در محدوده‌ی دبی ۱ تا ۶ لیتر بر دقیقه با خطای ۰/۱ تا ۰/۵ درصد استفاده شده است. این سنسور برای کارهای عمومی و آزمایشگاهی مناسب است. نتایج کالیبراسیون این سنسور با سنسور آلتراسونیک مدل TFM3100-F1 و همچنین با دبی‌سنج موجود در دستگاه در شرایط یکسان دبی و همان سیال و نازل‌ها، نشان از دقت خوب این آزمایش دارد. آزمایش‌ها بارها در فواصل زمانی مختلف انجام شده و نتایج یکسانی به دست آمده است.

همچنین آنها با آنالیز یک جریان خارجی غیر لزج تلفیق شده با تقریب لایه مرزی، موقعیت شعاعی پرش هیدرولیکی غیر دایروی را مطابق با رابطه ۲ پیش‌بینی کردند.

$$R_j(\phi, \theta) = C \left[\frac{r_0^2 \sin^3 \phi}{2(1 + \cos \phi \cos \theta)} V \right]^{\frac{5}{3}} \theta^{-\frac{3}{5}} g^{-\frac{1}{5}} \quad (2)$$

که θ ویسکوزیته سینماتیکی و C ثابت و برابر ۰/۷۳ است.

۳- محاسبه عدم قطعیت

با استفاده از رابطه کلین^۱ - مککلین^۲ در مورد عدم قطعیت، عدم قطعیت ترکیبی برای اندازه‌گیری دبی سیال، شامل عدم قطعیت ابزار اندازه‌گیری و عدم قطعیت تکرار آزمایش بوده که از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$u_{total} = \sqrt{u_{rep}^2 + u_{tools}^2} \quad (3)$$

u_{total} عدم قطعیت ترکیبی، u_{tools} عدم قطعیت ابزار اندازه‌گیری و u_{rep} عدم قطعیت تکرار آزمایش است. برای یک تابع که از چند کمیت تشکیل شده است، خطا براساس رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$u^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \right)^2 \quad 4$$

که $\frac{\partial f}{\partial x_n}$ مشتق جزئی تابع f نسبت به x_n و dx_n عدم قطعیت متغیر مستقل x_n است.

عدم قطعیت ابزار (u_{tools}) در کار حاضر مرتبط با محاسبه دبی جریان است. با توجه به رابطه محاسبه دبی $Q=f(V,t)=V/t$ و قرارداد در رابطه (۴) و انجام محاسبات داریم.

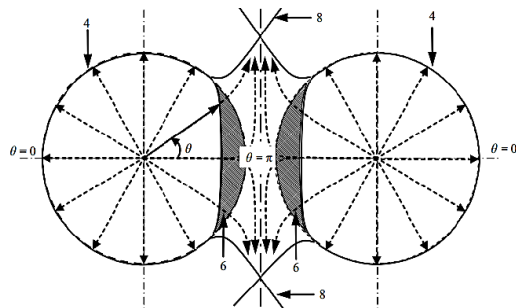
$$\left(\frac{dQ}{Q} \right)^2 = \left(\frac{\partial t}{t} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{V} \right)^2 \quad (5)$$

که ∂t عدم قطعیت زمان، ∂V عدم قطعیت حجم، t کل زمان پر شدن مخزن و V حجم کل مخزن است. با توجه به اینکه حجم مخزن دبی‌سنج اولیه دستگاه ۱۶۲۵ میلی‌لیتر و

¹ Klin

² Maclin

آنها در سیستم دو جت برخوردی سه ناحیه خیلی دور، دور و مجاور را مشاهده نمودند.

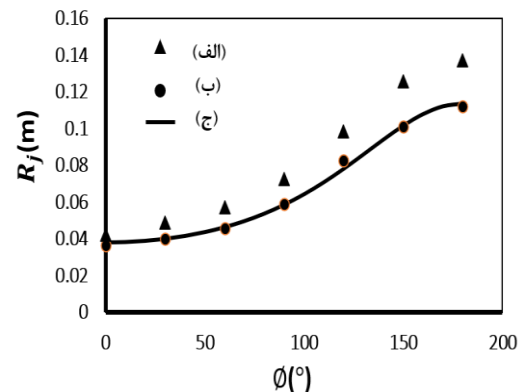


شکل ۶ - شماتیک برهمکنش پرش‌های هیدرولیکی ناشی از دو جت عمودی (کیت و همکاران [۸])

ناحیه "خیلی دور" هنگامی است که فاصله بین دو جت بیشتر از فاصله بحرانی (Sc) به ازای دبی معینی از مایع باشد. در این ناحیه حالت تقارن شعاعی پرش هیدرولیکی دایره‌ای بدون تأثیر باقی می‌ماند. در ناحیه "دور" فاصله بین دو جت کمتر از فاصله بحرانی ولی بیشتر از $R = \frac{R_{j1} + R_{j2}}{2}$ می‌باشد. شعاع پرش‌های هیدرولیکی دایره‌ای شکل گرفته توسط دو جت به طور مستقل به ازای دبی مایع معلوم می‌باشند. در این ناحیه پرش‌های هیدرولیکی توسط جت‌ها شروع به اندرکنش با یکدیگر کرده که این امر باعث ایجاد اختلال در تقارن شعاعی شکل پرش‌ها می‌شود. فاصله بحرانی تابعی از دبی جریان مایع عبوری از هر جت است. در ادامه آنها نشان دادند که در این ناحیه، پرش‌های هیدرولیکی با یکدیگر تداخل کرده و لایه ضخیمی را تشکیل می‌دهند. این برهم‌کنش‌ها نسبتاً ضعیف بوده و تأثیر چشمگیری بر تقارن شعاعی پرش‌های هیدرولیکی دایره‌ای ندارد. هنگامی که فاصله بین جت‌ها کمتر از میانگین شعاع پرش‌های هیدرولیکی دایره‌ای شکل گرفته ناشی از جت‌های مستقل منفرد $(S < R = \frac{R_{j1} + R_{j2}}{2})$ باشد، پدیده جریان متفاوتی به صورت یک ورق مایع عمودی نازک (فواره) را بوجود می‌آورد. شکل ۷ مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی کیت و همکاران [۸] به ازای دو قطر ۱۰ و ۷/۱ میلی‌متر و ارتفاع نازل $H = 70 \text{ mm}$ را نشان می‌دهد. به علت محدودیت‌های سنجش دبی در پژوهش حاضر، نتایج با سه دبی ۳/۵۵ و ۴/۸ و ۶ لیتر بر دقیقه انجام گرفته است. همانطور که دیده

۵- اعتبارسنجی حل

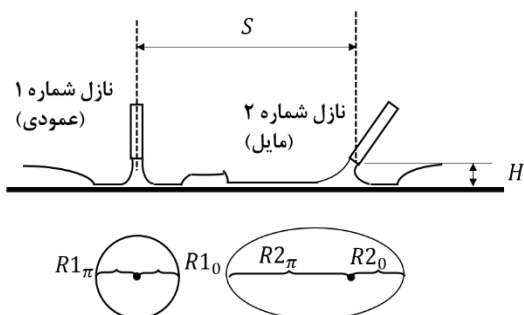
از آنجایی که در کار حاضر برخورد دو پرش هیدرولیکی ناشی از یک نازل مایل و یک نازل عمودی بر روی سطح هدف (به عنوان نوآوری) مورد مطالعه قرار می‌گیرد، برای اعتبارسنجی نتایج کار حاضر، از نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی پرش یک نازل مایل و پرش دو نازل عمودی کیت و همکاران [۶، ۸] استفاده شده است. شکل ۵ پرش هیدرولیکی ناشی از یک نازل مایل به شعاع $r_0 = 3/5 \text{ mm}$ با زاویه تمایل نازل 60° - $\phi_n = 0.000583 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ را نشان می‌دهد. ارتفاع نازل تا سطح افق $H = 56 \text{ mm}$ و آب به عنوان سیال عامل مورد استفاده قرار گرفته است. در این آزمایش از پرش‌های هیدرولیکی ایجاد شده عکس گرفته و پس از ارسال عکس به نرم افزار متلب با کمک روش پردازش تصویر، لبه‌های پرش هیدرولیکی با دقت مناسب استخراج می‌شود. سپس در هر زاویه دلخواه شعاع پرش هیدرولیکی بدست می‌آید. به علت تقارن پرش هیدرولیکی ایجاد شده، شعاع پرش از زاویه ۰ تا 180° درجه مطابق شکل ۵ رسم شده است.



شکل ۵ - شعاع پرش هیدرولیکی در زوایای مختلف محیطی: (الف). پژوهش حاضر، (ب). تحقیق کیت و همکاران [۶] و (ج). حل تحلیلی کیت و همکاران [۶]

مشاهده می‌شود که اختلاف کمی بین کار حاضر با نتایج حل تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی کیت و همکاران [۶] وجود دارد. هنگام برخورد پرش‌های ناشی از دو جت عمودی، کیت و همکاران [۸] نشان دادند که برهمکنش پرش‌های ایجاد شده، الگویی متناسب با شکل ۶ ایجاد می‌کند. به طور کلی،

قرار دارد. به جهت مشاهده بهتر شعاع پرش‌ها، به سیال رنگ خوراکی تزریق شد. در کار حاضر $\frac{H}{D} = 10$ و $(D = 2r_0)$ و همچنین دبی عبوری از نازل‌ها برابر در نظر گرفته شده است. تمامی آزمایشات به ازای زوایای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه برای نازل شماره ۲ استخراج شده است.



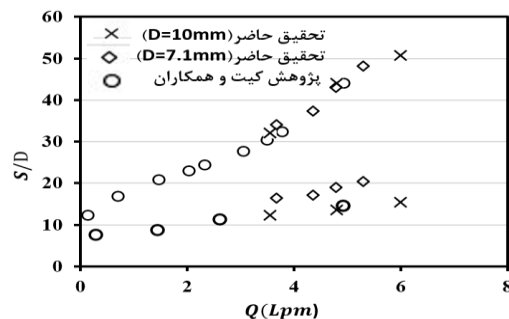
شکل ۸- شماتیک پرش‌های هیدرولیکی ناشی از دو جت برخوردی مایل و عمودی بر روی سطح

نتایج در سه بخش ارائه خواهد شد. ابتدا تاثیر زاویه تمایل جت بر روی نواحی خیلی دور، دور و مجاور بررسی خواهد شد. در ادامه اثر این پارامتر بر روی شعاع‌های تشکیل شده دو نازل در دبی و $\frac{S}{D}$ ثابت مورد بحث قرار می‌گیرد. در شکل ۹ عکس از نمای روبرو از نازل‌ها و فضای آزمایشگاهی نشان داده شده است.



شکل ۹- تصویر برخورد پرش‌های هیدرولیکی ناشی از دو جت برخوردی مایل و عمودی بر روی سطح از نمای روبرو

می‌شود نتایج بدست آمده هم‌پوشانی خوبی با نتایج پژوهش کیت و همکاران [۸] نشان می‌دهد.

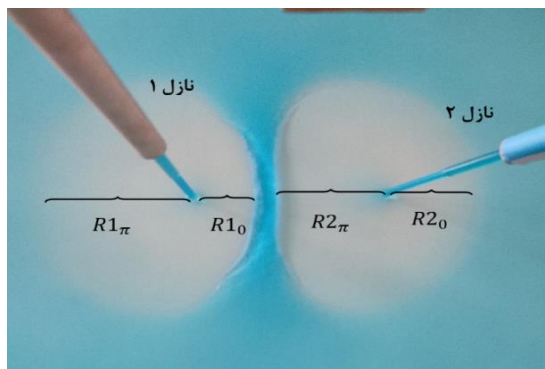


شکل ۷- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با پژوهش کیت و همکاران [۸] در تعیین نواحی تشکیل شده برای پرش تشکیل شده ناشی از دو نازل عمودی

۶- نتایج

شکل ۸ شماتیک برخورد پرش‌های هیدرولیکی دو نازل مایل و عمودی را نشان می‌دهد. این شکل در حالتی ترسیم شده که پرش‌های هیدرولیکی اثری روی هم نداشته‌اند. حالت‌های دیگری از جمله برخورد پرش‌های هیدرولیکی در ناحیه دور و مجاور نیز می‌تواند رخ دهد. نازل شماره ۲ نسبت به محور عمودی قابلیت تغییر زاویه دارد. همچنین می‌تواند نسبت به نازل شماره ۱ جابه‌جایی طولی نیز داشته باشد. هنگامی که سیال به سطح برخورد می‌کند، پرش‌های هیدرولیکی ایجاد شده توسط دو نازل می‌تواند روی هم اثر گذاشته و به همین منظور، شعاع پرش در دو زاویه ۰ و ۱۸۰ درجه از فاکتورهای مهم اندازه‌گیری شده محسوب می‌شود. S و H به ترتیب فاصله دهانه نازل‌ها از یکدیگر و ارتفاع نازل‌ها از صفحه هدف، $R1_0, R1_\pi, R2_0, R2_\pi$ به ترتیب شعاع پرش‌های ایجاد شده در زاویه ۰ و ۱۸۰ درجه برای نازل‌های ۱ و ۲ است. آب مورد استفاده در آزمایش، آب تصفیه شده با سختی حدود ۵۰ ppm به حجم ۷۰ لیتر است؛ لذا خواص ترموفیزیکی آب تصفیه با دقت خوبی مانند آب مقطر و با خواص ذکر شده در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد با مشخصات $\rho = 998 \frac{kg}{m^3}$ ، $\sigma = 0.073 \frac{N}{m}$ و $\nu = 0.0103 \frac{kg}{ms}$ در کار حاضر حدود ۶ لیتر بر دقیقه بوده که عدد رینولدز معادل آن (با احتساب شعاع داخلی نازل‌ها) تقریباً ۲۰۰۰ است. لذا تمام آزمایشات انجام گرفته در محدوده جریان آرام

ازای زاویه تمایل ۳۰ درجه نازل شماره ۲ در $\frac{S}{D} = 20$ و دبی $Q = 5/3 \text{ Lpm}$ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ناحیه بین دو نازل، برخورد پرش‌ها باعث تشکیل برآمدگی جریان شده و هندسه پرش‌ها متأثر از این برخورد شده و اعوجاج یافته است.

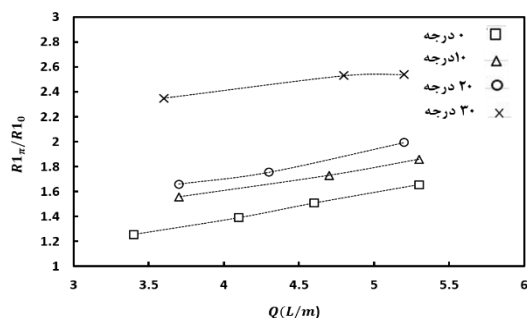


شکل ۱۱- نمای بالا از برهم‌کنش پرش‌های ناشی از دو نازل

به ازای زاویه ۳۰ درجه نازل شماره ۲

$$Q = 5/3 \text{ Lpm} \text{ و } \frac{S}{D} = 20$$

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب تغییرات $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ و $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ نسبت به دبی به ازای $\frac{S}{D} = 20$ در زوایای مختلف نازل شماره ۲ به تصویر کشیده شده است. به دلیل اینکه مرز ناحیه مجاور و دور در محدوده $\frac{S}{D} = 20$ بوده و در این ناحیه پرش‌ها روی هم اثر می‌گذارند، لذا این نسبت برای تحلیل انتخاب شده است.



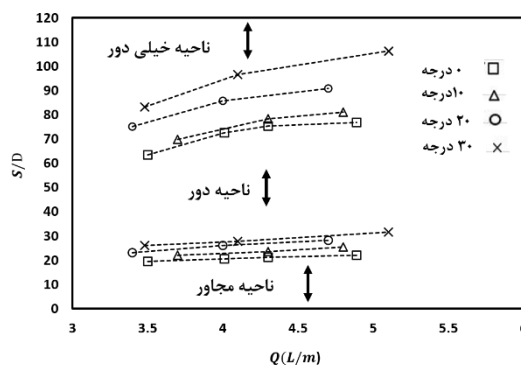
شکل ۱۲- تغییرات $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ نسبت به دبی به ازای زاویه‌های

مختلف نازل شماره ۲ ($\frac{S}{D} = 20$)

۶-۱- اثر زاویه تمایل بر نواحی ایجاد شده از برهم‌کنش

پرش‌ها

در برخورد پرش‌های ناشی از دو نازل عمودی، کیت و همکارانش [۸] نشان دادند که با توجه به فاصله بین جت‌ها و دبی عبوری از آنها، سه ناحیه خیلی دور، دور و مجاور تشکیل می‌شود. در این پژوهش با توجه به اینکه یکی از نازل‌ها مایل است، انتظار می‌رود که زاویه نازل بر روی اندازه سه ناحیه تشکیل شده اثر بگذارد. این بحث در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد. مرز ناحیه خیلی دور و دور آستانه حالتی است که پرش‌های هیدرولیکی روی هم اثر گذاشته و تغییر شکل می‌دهند. همانطور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود با افزایش زاویه تمایل، $\frac{S}{D}$ بزرگتر می‌شود. هنگامی که در برخورد دو پرش، فواره بوجود آید، تشکیل این فواره مرز بین ناحیه دور و مجاور خواهد بود. با توجه به شکل ۱۰ دیده می‌شود که تاثیر زاویه تمایل نازل بر روی مرز ناحیه خیلی دور و دور خیلی بیشتر از ناحیه دور و مجاور است.



شکل ۱۰- اثر زاویه تمایل یک نازل بر روی مرز نواحی

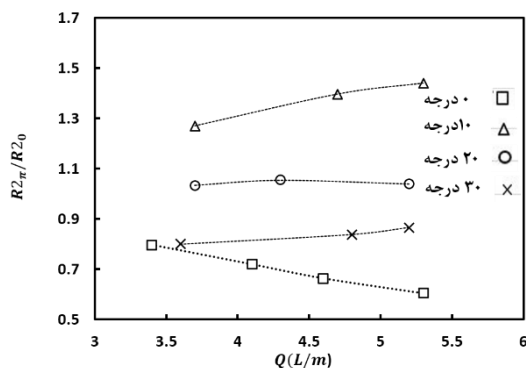
تشکیل شده ناشی از پرش‌های دو جت سیال

۶-۲- اثر زاویه تمایل نازل بر شعاع پرش‌های

هیدرولیکی تشکیل شده در $\frac{S}{D}$ ثابت

هنگام برخورد دو جت عمودی به سطح، شکل و اندازه پرش‌های هیدرولیکی تشکیل شده به عواملی همچون دبی و $\frac{S}{D}$ بستگی دارد. علاوه بر عوامل فوق، به نظر می‌رسد زاویه نازل (شماره ۲)، می‌تواند بر شکل و اندازه پرش‌ها تاثیر گذار باشد که در این قسمت به بررسی این موضوع پرداخته خواهد شد. در شکل ۱۱ شکل پرش‌های برخوردی ناشی از دو نازل به

اندركنش برخورد کمتر بوده که این امر باعث افزایش $R2_{\pi}$ و در نتیجه افزایش $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ می‌شود.



شکل ۱۳- تغییرات $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ نسبت به دبی به ازای زاویه‌های مختلف نازل شماره ۲ ($\frac{S}{D} = 20$)

۳-۶- اثر زاویه تمایل نازل بر شعاع پرش‌های هیدرولیکی تشکیل شده در دبی ثابت

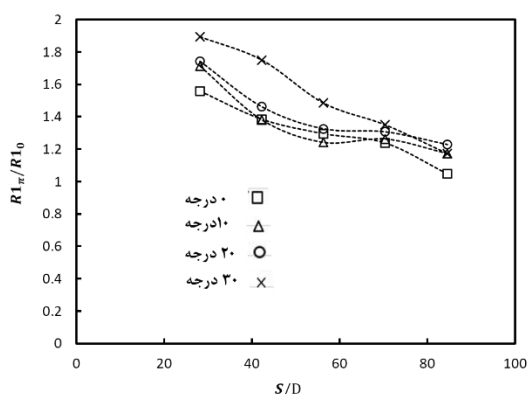
در قسمت قبل اثر زاویه بر روی نسبت‌های $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ و $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ در $\frac{S}{D}$ ثابت بررسی شد. در این قسمت به بررسی اثر زاویه تمایل بر روی نسبت‌های فوق‌الذکر در دبی ثابت پرداخته خواهد شد. شکل ۱۴ برهم‌کنش پرش‌های هیدرولیکی تشکیل شده با زاویه تمایل (نازل شماره ۲)، در زاویه ۲۰ درجه به ازای (الف) $\frac{S}{D} = 56/33$ ، (ب) $\frac{S}{D} = 42/25$ و (ج) در زاویه تمایل ۱۰ درجه با $\frac{S}{D} = 42/25$ به ازای دبی برابر با $Q = 4/4$ Lpm را نشان می‌دهد. در قسمت الف فاصله دو نازل از یکدیگر زیاد بوده و پرش‌ها روی هم اثر کمی می‌گذارند. با کاهش فاصله بین دو نازل اثر برهم‌کنش پرش‌ها بر روی همدیگر زیاد شده است، به طوری که در قسمت ب پرش‌ها روی هم اثر گذاشته و اعوجاج در آنها ظاهر می‌شود؛ همچنین پرش نازل شماره ۲ نیز بر اثر برهم‌کنش بین دو پرش از حالت بیضی شکل خارج شده است. با کاهش فاصله بین دو نازل (در نتیجه تغییر زاویه نازل ۲) اثرات بوجود آمدن فواره در حد فاصل برخورد دو پرش نمایان می‌شود (قسمت ج).

مطابق شکل ۱۲، هر چه زاویه تمایل نازل شماره ۲ بیشتر شود پرش ناشی از این نازل در زاویه ۱۸۰ درجه ($R2_{\pi}$) مانع پرش ناشی از نازل عمودی در زاویه صفر درجه ($R1_0$) شده و مقدار آن را نسبت به $R1_{\pi}$ کاهش می‌دهد؛ لذا نسبت $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ افزایش می‌یابد (شکل ۸). این موضوع برای نازل شماره ۲ مطابق شکل ۱۳ رفتار برعکس را نشان می‌دهد. به این معنی که با افزایش زاویه تمایل، $R2_{\pi}$ نسبت $R2_0$ کاهش یافته و لذا نسبت $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ کمتر خواهد شد. در شکل-های ۱۲ و ۱۳ ملاحظه می‌شود که با افزایش دبی به دلیل افزایش شعاع پرش‌های هیدرولیکی دو نازل، این نسبت‌ها با شیب ملایم افزایش می‌یابند.

به لحاظ فیزیکی هنگامی که دو نازل در فاصله نزدیک قرار دارند، با زیاد شدن دبی (بالا رفتن سرعت سیال)، نسبت $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ افزایش می‌یابد (شکل ۱۲). دلیل این امر این است که شعاع پرش در سمت برخورد ($R1_0$) به واسطه برخورد، کوچکتر شده است، اما شعاع پرش در سمت مخالف برخورد ($R1_{\pi}$) خیلی متاثر از این برخورد نمی‌شود. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش زاویه نازل ۲ در دبی ثابت، $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ افزایش می‌یابد؛ چرا که با افزایش زاویه، اندركنش دو جریان در محل برخورد افزایش یافته که این امر سبب کوچکتر شدن شعاع پرش در سمت برخورد نازل ۱ ($R1_0$) گردیده است، در حالیکه $R1_{\pi}$ خیلی متاثر از این پرش نمی‌شود.

با افزایش دبی، $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ برای نازل عمودی (زاویه تمایل ۰ درجه) کاهش می‌یابد (شکل ۱۳). دلیل این امر این است که این نسبت دقیقاً عکس نسبت $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ است. از آنجایی که در نازل ۱ این نسبت افزایشی بود در اینجا روند کاهشی ملاحظه می‌شود. از طرفی زیاد شدن دبی تاثیر قابل توجهی بر افزایش نسبت $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ در زوایای تمایل ذکر شده نازل‌ها ندارد. توجیه این امر این است که افزایش زاویه تمایل (زمانی که نازل تکی باشد) باعث افزایش $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ می‌شود. منتهی در اینجا به علت اینکه پرش هیدرولیکی نازل ۲ (نازل مایل) با پرش نازل ۱ (نازل عمودی) مواجه می‌شود، این برخورد مانع افزایش $R2_{\pi}$ شده از طرفی $R2_0$ کمتر متاثر از برخورد می‌شود، در نتیجه این نسبت تغییر زیادی نمی‌کند. از طرفی دیده می‌شود که در یک دبی ثابت $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ با کاهش زاویه تمایل افزایش می‌یابد؛ چرا که در زوایای کم نازل ۲، نسبت به زوایای تمایل بیشتر،

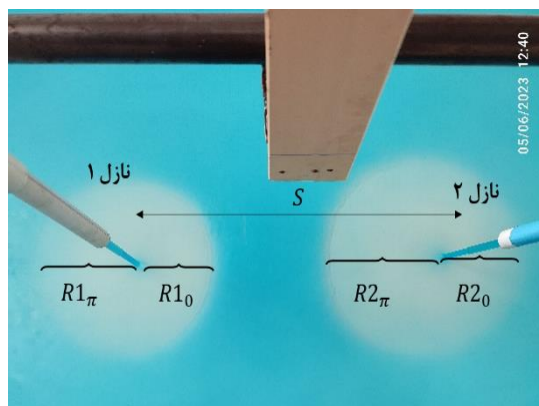
می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش زاویه تمایل، $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ افزایش یافته و با افزایش فاصله بین دو نازل این نسبت کاهش می‌یابد. زمانی که فاصله بین دو نازل زیاد می‌شود پرش‌های شکل گرفته اثر کمتری روی هم گذاشته و در نتیجه نسبت فوق‌الذکر تغییرات کمتری را نشان می‌دهد. بر عکس با کاهش فاصله بین دو نازل، پرش‌های شکل گرفته بلافاصله بر هم اثر گذاشته و مقدار $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ را افزایش می‌دهد.



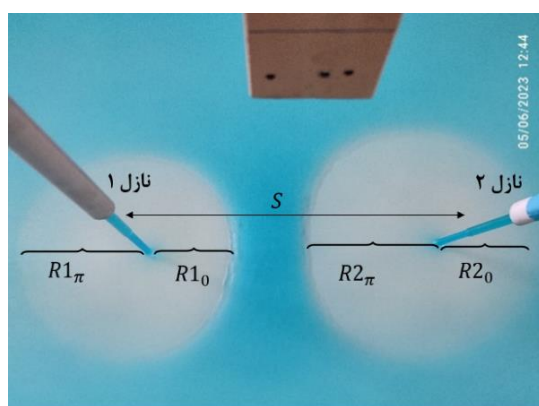
شکل ۱۵- تغییرات $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ نسبت به $\frac{S}{D}$ به ازای زاویه‌های مختلف نازل شماره ۲ ($Q = 4/4 \text{ Lpm}$)

از طرفی شکل ۱۶ تغییرات $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ (پرش حاصله از نازل شماره ۲) نسبت به $\frac{S}{D}$ را نشان می‌دهد. همانطور که به تصویر کشیده شده است با افزایش زاویه تمایل، این نسبت زیاد می‌گردد؛ همچنین تغییرات این کمیت با افزایش فاصله بین دو نازل به علت بزرگتر شدن $R2_{\pi}$ نسبت به $R2_0$ افزایشی است.

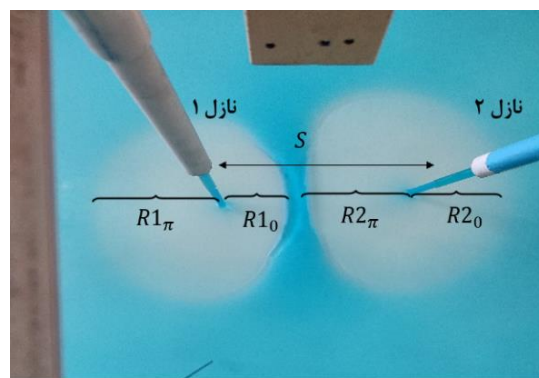
به لحاظ فیزیکی به علت اینکه $R1_{\pi}$ پشت محل برخورد $R1_0$ جلوی محل برخورد است؛ بنابراین $R1_{\pi}$ نسبت به $R1_0$ خیلی تحت تاثیر پرش نازل ۲ قرار می‌گیرد (شکل ۱۵)؛ در نتیجه نسبت $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ افزایش پیدا می‌کند. افزایش زاویه نازل باعث می‌شود که در محل برخورد مومنوم جریان از سمت نازل ۲ افزایش پیدا کند و در نتیجه $R1_0$ بیشتر تحت تاثیر برخورد قرار گیرد؛ در نتیجه $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ افزایش می‌یابد. زمانی که نازل ۲ زاویه‌دار است، تاثیر نزدیک کردن دو نازل به یکدیگر در این حالت بیشتر است؛ چون علاوه بر نزدیک شدن فاصله، زاویه نازل نیز باعث شده مومنوم جریان پرش، قوی‌تر شده و



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۴- پرش‌های هیدرولیکی تشکیل شده توسط دو نازل در دبی $Q = 4/4 \text{ Lpm}$ (الف) $\frac{S}{D} = 56/33$ و زاویه ۲۰ درجه (ب) $\frac{S}{D} = 42/25$ و زاویه ۲۰ درجه (ج) $\frac{S}{D} = 42/25$ و زاویه ۱۰ درجه

شکل شماره ۱۵ تغییرات $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ نسبت به $\frac{S}{D}$ به ازای زاویه‌های مختلف نازل شماره ۲، در دبی $4/4 \text{ lpm}$ را نشان

با تغییر زاویه یک نازل، مرز ناحیه خیلی دور و دور تغییر کرده است؛ به طوریکه با افزایش زاویه تمایل نازل، پرش های هیدرولیکی در فاصله دورتری نسبت به حالت عمودی بر روی هم تاثیر می گذارند. این در حالی است که مرز ناحیه مجاور و دور خیلی متاثر از زاویه تمایل نازل نداشته است.

زمانی که فاصله بین دو نازل ($\frac{S}{D}$) ثابت باشد، تمایل یک نازل بر تقارن پرش های هیدرولیکی اثر گذاشته و باعث افزایش نسبت $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ می شود؛ اما این تغییر زاویه نازل، باعث کاهش نسبت $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ می شود.

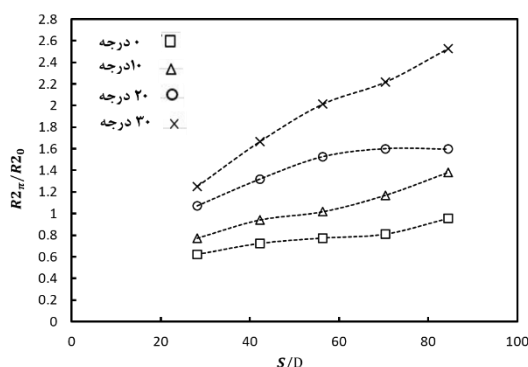
در دبی ثابت با افزایش زاویه تمایل به دلیل برهم کنش پرش نازل مایل روی پرش هیدرولیکی نازل عمودی، نسبت $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ افزایش می یابد. این نسبت با دور شدن نازل ها از یکدیگر روند صعودی دارد.

تاثیر بیشتری روی نازل گذاشته و $\frac{R1_{\pi}}{R1_0}$ را افزایش بیشتری می دهد.

وقتی نازل ۲ در حالت عمودی قرار دارد با نزدیک کردن دو نازل به یکدیگر، به دلیل اینکه شعاع پرش نازل ۲ ($R2_{\pi}$) در محل برخورد متاثر از شعاع پرش نازل ۱ ($R1_0$) است؛ لذا $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ کاهش می یابد و با دور شدن نازل ها از یکدیگر به دلیل اثرگذاری کمتر شعاع پرش ها بر روی یکدیگر، این نسبت افزایش پیدا می کند (شکل ۱۶). همچنین در فاصله ثابت بین دو نازل، با افزایش زاویه تمایل نازل ۲، شعاع پرش $R2_{\pi}$ از $R2_0$ بیشتر می شود، لذا در هنگام برخورد با نازل ۱ شعاع $R2_{\pi}$ کمتر تحت تاثیر شعاع $R1_0$ قرار گرفته است؛ لذا نسبت $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ افزایش می یابد و نهایتاً با دور شدن نازل ها از یکدیگر به کاهش اثرگذاری پرش ها روی یکدیگر، نسبت $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ افزایش می یابد.

۸- علائم، نشانه ها و ارقام

ثابت، ۰/۷۳	C
قطر نازل، mm	D
شتاب گرانش زمین، m/s^2	g
ارتفاع نازل از سطح، mm	H
دبی، lpm	Q
شعاع پرش، mm	R
شعاع نازل، mm	r
فاصله بین دو نازل، mm	S
زمان، s	t
انحراف از معیار	u
سرعت سیال خروجی از نازل ها، m/s	V
زاویه برخورد جت سیال با سطح افق، °	θ
زاویه نازل با سطح افق، °	θ_n
زاویه محیطی شعاع پرش، °	θ
لزجت سینماتیکی، $\frac{kg}{ms}$	ν
ضریب تنش سطحی آب، $\frac{N}{m}$	σ
چگالی، kg/m^3	ρ
معرف جت	j
معرف زاویه صفر درجه	0
معرف زاویه ۱۸۰ درجه	π
معرف نازل شماره یک	1
معرف نازل شماره دو	2



شکل ۱۶- تغییرات $\frac{R2_{\pi}}{R2_0}$ نسبت به $\frac{S}{D}$ به ازای زاویه های مختلف نازل شماره ۲ ($Q = 4/4 \text{ Lpm}$)

۷- نتیجه گیری

در کار حاضر، اثر برهمکنش پرش های هیدرولیکی یک نازل مایل و یک نازل عمودی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. سیال مورد آزمایش آب بوده و جریان سیال در محدوده آرام قرار دارد. در ابتدا نتایج دستگاه مورد استفاده، با نتایج یک نازل مایل و نتایج دو جت عمودی، اعتبار سنجی شد. سپس اثر تغییر زاویه نازل بر مرزبندی های (ناحیه خیلی دور، دور و مجاور) مورد بررسی قرار گرفت. سپس با تغییر زاویه نازل برهمکنش پرش های هیدرولیکی تشکیل شده یک نازل مایل و یک نازل عمودی مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج زیر بدست آمد:

مراجع

- [9] Kate R, Das P, Chakraborty S (2008) Investigation on non-circular hydraulic jumps formed due to obliquely impinging circular liquid jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 32(8): p. 1429-1439.
- [10] Kate R, Das P, Chakraborty S (2009) Effects of jet obliquity on hydraulic jumps formed by impinging circular liquid jets on a moving horizontal plate. *Fluids Eng*. 131(3): p. 034502
- [11] Kate R, Gorde R (2016) Hydraulic jumps and their interactions due to multiple impinging jets. In. *Costa de Sol, Spain 12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*.
- [12] Janghel M K (2015) An experimental study of hydraulic jump due to moving jet impingement.
- [13] Choo K, Kim S J (2016) The influence of nozzle diameter on the circular hydraulic jump of liquid jet impingement. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 72: p. 12-17.
- [14] Singh D, Das A K (2018) Computational simulation of radially asymmetric hydraulic jumps and jump-jump interactions. *Computers & Fluids*: p. 170.1-12.
- [15] Asadi A, Malek Jafarian S M, Teymourtash A R (2021) Experimental Study of the Effect of Fluid Jet Swirl on Circular Hydraulic Jump. *Amirkabir J. Mech. Eng.*: 53(7): p. 4153-4170.
- [1] Rayleigh L (1914) On the theory of long waves and bores. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 90 (619) : p. 324-328.
- [2] Birkhoff G , Zarantonello E (1957) *Jets, wakes, and cavities academic*. New York: p. 294-295.
- [3] Watson E (1964) The radial spread of a liquid jet over a horizontal plane. *J. Fluid Mech.* 20 (3) : p. 481-499.
- [4] Bohr T, Dimon P, Putkaradze V (1993) Shallow-water approach to the circular hydraulic jump *J. Fluid Mech.*..254: p. 635-648.
- [5] Higuera F (1994) The hydraulic jump in a viscous laminar flow. *J. fluid Mech.*..274: p. 69-92.
- [6] Kate R, Das P, Chakraborty S (2007) Hydraulic jumps due to oblique impingement of circular liquid jets on a flat horizontal surface. *J. Fluid Mech.*..573: p. 247-263.
- [7] Kate R, Das P, Chakraborty S (2007) Hydraulic jumps with corners due to obliquely inclined circular liquid jets. *Physical Review E*. 75 (5): p. 056310.
- [8] Kate R, Das P, Chakraborty S (2007) An experimental investigation on the interaction of hydraulic jumps formed by two normal impinging circular liquid jets. *J. Fluid Mech.*..590: p. 355-380.