

مطالعه‌ی اثر چرخش جت سیال در پرش‌های هیدرولیکی دایروی

علی اسدی^۱، سید مجید ملک جعفریان^{۲*}، علیرضا تیمورتاش^۳

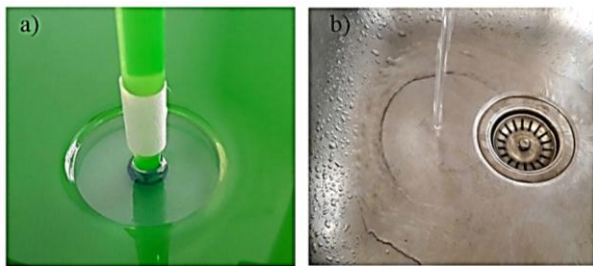
^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه بیرجند، بیرجند، aliasadi@birjand.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشگاه بیرجند، بیرجند، mmjafarian@birjand.ac.ir

^۳ استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، teymourtash@um.ac.ir

چکیده

محققان زیادی در سال‌های اخیر به مطالعه پدیده‌ی پرش هیدرولیکی دایروی بصورت عددی و آزمایشگاهی پرداخته‌اند. از آن جمله می‌توان به کار عددی پسندیده فرد و همکارانش [۲] اشاره کرد. آن‌ها یک مطالعه‌ی پارامتری برای تأثیر پارامترهای مختلف، شامل نرخ حجمی جریان، ارتفاع پایین دست، لزجت و جاذبه روی شعاع پرش هیدرولیکی دایروی و ویژگی‌های آن با در نظر گرفتن اثر کشش سطحی انجام دادند و نتایج عددی و آزمایشگاهی را مقایسه کردند.



شکل ۱: (a) پرش هیدرولیکی دایروی ایجاد شده در آزمایشگاه (b) شکل‌گیری پرش هیدرولیکی در سینک ظرفشویی

رای و بهاتاچارجی [۳] موج‌های ایستا و گذرا در پرش هیدرولیکی دایروی را مطالعه کردند. مایکیلویز و مایکیلویز [۴] یک مدل ساده‌ی پخشی برای پرش‌های هیدرولیکی دایروی پیشنهاد دادند. مدل آن‌ها از تحلیل معادله‌ی برنولی استخراج شد. آن‌ها یک تحلیل مقدماتی روی پرش‌های نوع I و نوع II، یعنی شکل‌گیری یک یا دو گردابه نیز انجام دادند و نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند که رضایت بخش بود.

جانسون و همکارانش [۵] یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی پرش هیدرولیکی سیال آب که روی صفحه‌ای با حفره‌ها و شیارهای متناوبی طراحی شده است، انجام دادند و نتایج خود را با نتایج پرش هیدرولیکی بر روی یک صفحه صاف مقایسه کردند. به دلیل وجود شیارها، سرعت سیال نسبت به حالت صفحه‌ی صاف کاهش یافته و به دلیل وجود همین شیارها، پرش هیدرولیکی به شکل بیضی در خواهد آمد.

چوو و کیم [۶] اثر قطر نازل در پرش هیدرولیکی دایروی ایجاد شده از یک جت سیال خنک کننده را به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. آن‌ها همچنین یک رابطه‌ی تجربی به صورت تابعی از توان برخورد بی‌بعد برای پیش‌بینی شعاع پرش دایروی پیشنهاد دادند. بر

هرگاه یک جت سیال متقارن محوری به صورت عمودی به یک صفحه‌ی هدف افقی برخورد کند، یک پرش هیدرولیکی شکل می‌گیرد. پارامترهای مختلفی از جمله دبی جریان، قطر جت سیال، فاصله‌ی دهانه‌ی نازل تا صفحه‌ی هدف، کشش سطحی سیال و... در مطالعه‌ی این پدیده اهمیت دارند. مطالعات زیادی در زمینه‌ی پرش‌های هیدرولیکی دایروی انجام شده است. اما تا کنون هیچ‌گاه اثر پارامتر مهم و کلیدی چرخش جت سیال در پرش‌های هیدرولیکی مورد توجه قرار نگرفته است که در این تحقیق به عنوان هدف اصلی مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. نتایج این تحقیق که به کمک روش آزمایشگاهی بدست آمده است، نشان می‌دهد که اعمال یک سرعت زاویه‌ای به جت سیال در یک دبی ثابت، باعث افزایش شعاع پرش دایروی می‌شود. میزان افزایش شعاع پرش با سرعت‌های زاویه‌ای نازل ۱۳۲/۸، ۲۶۶/۴ و ۴۰۰/۸ دور بر دقیقه نسبت به حالت نازل ثابت به ترتیب مقدار ۳/۲۹، ۵/۹۰ و ۸/۳۴ درصد می‌باشد. همچنین آزمایشات نشان می‌دهد که پرش‌های ایجاد شده توسط جت چرخشی با کمی اختلاف از روند نتایج تئوری اصلاح شده‌ی واتسون پیروی می‌کنند.

واژه‌های کلیدی

پرش هیدرولیکی دایروی، جت سیال چرخشی، سرعت زاویه‌ای نازل، تئوری اصلاح شده‌ی واتسون

مقدمه

از دیدگاه علم مکانیک سیالات، هنگامی که یک جت عمودی سیال به یک صفحه‌ی افقی برخورد می‌کند، سیال به صورت شعاعی و در همه‌ی جهات پخش می‌شود. در یک فاصله‌ی مشخص از نقطه‌ی اصابت جت سیال به صفحه‌ی افقی، که آن را شعاع پرش هیدرولیکی می‌نامند، ضخامت سیال افزایش یافته و جریان از حالت فوق بحرانی در بالادست پرش به حالت زیر بحرانی در پایین دست پرش تبدیل می‌شود. در این حالت، اصطلاحاً یک پرش هیدرولیکی دایروی شکل می‌گیرد. این پدیده به راحتی در سینک ظرفشویی قابل مشاهده است (شکل ۱). از جمله کاربردهای این پدیده می‌توان به فرایند خنک‌کاری در تولیدات صنعتی اشاره کرد [۱].

اساس نتایج آن‌ها افزایش توان برخورد راندمان خنک کاری را افزایش می‌دهد که البته افزایش هزینه را نیز به دنبال دارد.

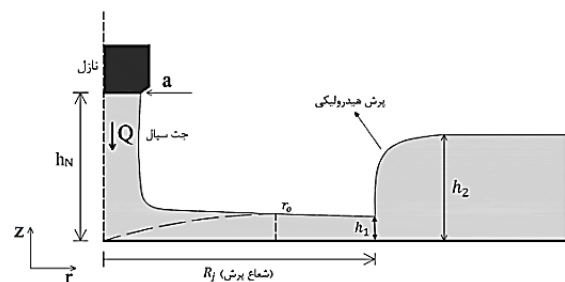
فرناندز و همکاران [۷] برای روشن کردن نقش کشش سطحی در شکل‌گیری پرش هیدرولیکی دایروی، نتایج سه رویکرد مختلف معادلات آب کم عمق بدون در نظر گرفتن اثر کشش سطحی، مدل متوسط‌گیری بر روی عمق از معادلات آب کم عمق با یک پروفیل سرعت پارابولیک و حل کامل عددی معادلات ناویر-استوکس در دو حالت با کشش سطحی و بدون کشش سطحی را مقایسه کردند. یکی از یافته‌های مهم آن‌ها این است که در رویکرد حل کامل معادلات ناویر-استوکس اگر کشش سطحی، که به شرایط جریان، ویژگی‌های سیال و شرایط پایین دست بستگی دارد، از یک مقدار بحرانی بالاتر باشد، هیچ پرش دایروی متقارنی وجود نخواهد داشت.

با مطالعه‌ی تحقیقات محققان درمی‌یابیم که پدیده‌ی پرش هیدرولیکی دایروی و تاثیر پارامترهای مختلف در آن مورد بررسی محققین قرار گرفته است. اما هیچگاه تا به حال اثر پارامتر مهم و کلیدی چرخش جت سیال را در پدیده‌ی پرش هیدرولیکی دایروی مورد مطالعه قرار نگرفته است.

در این تحقیق بصورت آزمایشگاهی، علاوه بر مطالعه‌ی پرش‌های هیدرولیکی دایروی، اثر چرخش جت سیال نیز بر آن مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور اقدام به طراحی و ساخت دستگاهی گردید که قادر است پرش‌های هیدرولیکی دایروی به وسیله‌ی یک جت سیال چرخشی را ایجاد کند.

تئوری

شکل (۲) شماتیک پرش هیدرولیکی دایروی تشکیل شده بر روی یک سطح افقی را نشان می‌دهد. در این شکل شعاع نازل (a)، فاصله نازل از سطح افقی (h_N) شعاع پرش (R_j)، ارتفاع پایین دست پرش (h_2) و سایر پارامترهای پرش نشان داده شده است.



شکل ۲: شماتیک جت عمودی برخورد کننده به صفحه افقی و ایجاد پرش هیدرولیکی دایروی

همانطور که در بخش مقدمه نیز اشاره شد، نقص اصلی تئوری واتسون توسط بوش و اریستوف [۸] اصلاح شد. معادلات تئوری اصلاح شده توسط آن‌ها به صورت روابط (۱) و (۲) می‌باشد.

$$\frac{R_j h_2^2 g a^2}{Q^2} \left(1 + \frac{2}{Bo}\right) + \frac{a^2}{2\pi^2 R_j h_2} = 0.10132 - 0.1297 \left(\frac{R_j}{a}\right)^{3/2} Re^{-1/2}, \quad R_j < r_0 \quad (1)$$

$$\frac{R_j h_2^2 g a^2}{Q^2} \left(1 + \frac{2}{Bo}\right) + \frac{a^2}{2\pi^2 R_j h_2} = 0.01676 \left[\left(\frac{R_j}{a}\right)^3 Re^{-1} + 0.1826\right]^{-1}, \quad R_j \geq r_0 \quad (2)$$

که در آن شعاع پرش، R_j شعاع پرش، h_2 ارتفاع سیال در پایین دست پرش، g شتاب جاذبه، a شعاع دهانه‌ی جت، Q دبی جریان، Bo عدد باند و Re عدد رینولدز است. اعداد رینولدز و باند طبق رابطه‌های (۳) و (۴) تعریف می‌شوند:

$$Bo = \frac{\rho g R_j \Delta H}{\sigma} \quad (3)$$

$$Re = \frac{Q}{av} \quad (4)$$

که در آن ρ چگالی سیال، ΔH اختلاف ارتفاع سیال در بالا و پایین دست پرش، σ کشش سطحی و v لزجت سینماتیکی است.

همانطور که اشاره شد تا به حال تحقیقات مربوط به پرش‌های هیدرولیکی با جت سیال بدون چرخش بوده است. در کار حاضر برای اولین بار اثر جت سیال چرخشی بر پرش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت پارامتر جدیدی به نام عدد چرخش ظاهر می‌گردد که باید اثر آن به صورت خاص و نیز در ارتباط با سایر پارامترهای مؤثر بر این پدیده بررسی گردد.

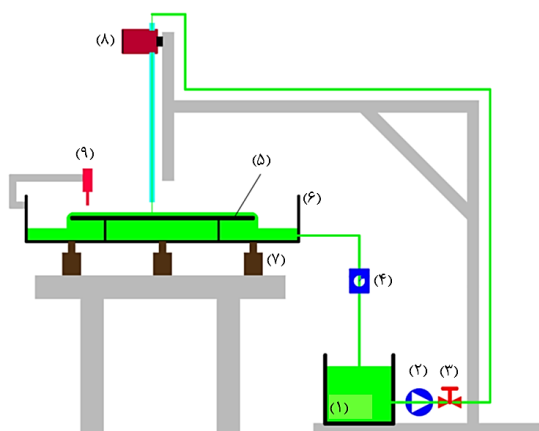
تعاریف مختلفی برای عدد چرخش ارائه شده است. اما با توجه به دستگاه آزمایش و دقت وسایل اندازه‌گیری، مناسب‌تر است از تعریفی که توسط فاجیولو [۹] ارائه شده، استفاده کرد. وی نسبت بین سرعت مماسی در دیواره لوله‌ی جت یعنی ماکزیمم سرعت مماسی و سرعت متوسط محوری توده‌ی سیال را به عنوان عدد چرخش ارائه کرد (رابطه‌ی ۵).

$$S = \frac{V_{\omega}}{U_b} \quad (5)$$

که در آن S عدد چرخش، V_{ω} ماکزیمم سرعت مماسی و U_b سرعت متوسط محوری توده‌ی سیال است.

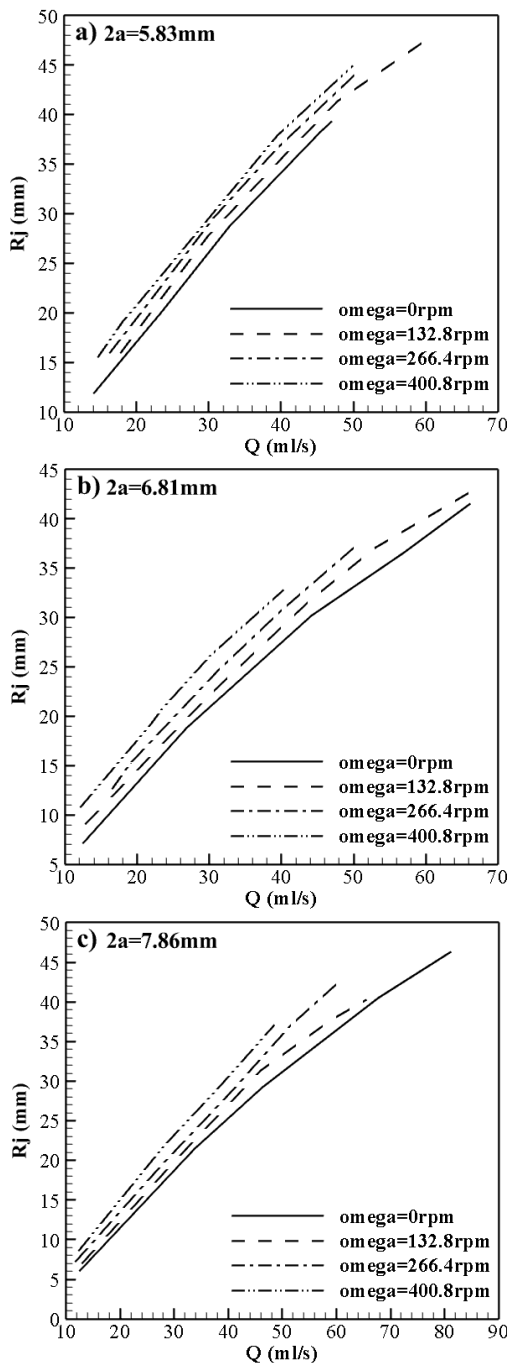
دستگاه آزمایش

شکل (۳) شماتیک و بخش‌های مختلف دستگاه آزمایش طراحی و ساخته شده برای این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۳: شماتیک دستگاه آزمایش مورد استفاده در این تحقیق. (۱) مخزن نگهداری سیال، (۲) پمپ، (۳) شیر تنظیم دبی، (۴) دبی سنج، (۵) صفحه هدف شیشه‌ای، (۶) مخزن سرریز، (۷) مکانیزم ترازبندی افقی، (۸) سیستم ایجاد کننده‌ی چرخش جت سیال و (۹) سیستم اندازه‌گیری ضخامت سیال

خواهد شد. بنابراین منحنی مربوط به سرعت زاویه‌ای صفر در شکل (۵) یک خط عمودی در بالای عدد چرخش صفر است.



شکل ۴: تغییرات شعاع پرش هیدرولیکی دایروی بر حسب دبی در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف نازل برای نازل‌های با قطر متفاوت

دسته‌ی دوم، خطوط ممتد هستند که معرف خطوط دبی ثابت می‌باشند. شیب این خطوط مثبت است. زیرا در یک دبی ثابت، افزایش سرعت زاویه‌ای منجر به افزایش همزمان شعاع پرش دایروی و عدد چرخش می‌شود.

شکل (۶) مقایسه‌ی نتایج پرش‌های هیدرولیکی ایجاد شده به وسیله‌ی جت سیال چرخشی با تئوری اصلاح شده‌ی واتسون را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج از روند تئوری واتسون

سیال از مخزن اصلی و به وسیله‌ی یک پمپ به سمت لوله‌ی ایجاد کننده‌ی جت سیال چرخشی هدایت شده و پس از ایجاد پرش هیدرولیکی بر روی صفحه‌ی هدف، وارد مخزن سرریز می‌شود. سپس سیال به مخزن اصلی بر می‌گردد. به این ترتیب سیکل چرخش سیال کامل می‌شود. برای اندازه‌گیری دبی از یک دبی‌سنج دیجیتال استفاده می‌شود. در این دبی‌سنج دقت اندازه‌گیری حجم ۱ml، دقت اندازه‌گیری زمان ۰/۰۱s و میزان خطا (عدم قطعیت) حداکثر ۰/۱۴ درصد می‌باشد. برای اندازه‌گیری شعاع پرش هیدرولیکی از عکس‌برداری و پردازش تصویر با دقت ۰/۱mm استفاده می‌شود. همچنین از یک کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱mm برای اندازه‌گیری ابعاد و ارتفاع بالا و پایین دست پرش استفاده می‌شود.

نتایج

شکل (۴) تغییرات شعاع پرش هیدرولیکی دایروی بر حسب دبی با قطرهای مختلف نازل در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف نازل را نشان می‌دهد. همانطور که در هر یک از نمودارهای (a-۴) تا (c-۴) مشاهده می‌شود، در هر سرعت زاویه‌ای ثابت، شعاع پرش دایروی با افزایش دبی افزایش می‌یابد. با دقت در منحنی‌های شکل (۴) درمی‌یابیم که منحنی‌های مربوط به سرعت زاویه‌ای بیشتر نازل، بالاتر از منحنی‌های مربوط به سرعت زاویه‌ای کمتر نازل قرار می‌گیرند و این بدان معناست که در یک دبی ثابت، افزایش سرعت زاویه‌ای نازل شعاع پرش دایروی را افزایش می‌دهد.

بررسی دقیق‌تر داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که میزان افزایش شعاع پرش دایروی در حالت نازل چرخشی برای سرعت‌های زاویه‌ای نازل $\omega=132.8rpm$ ، $\omega=266.4rpm$ ، $\omega=400.8rpm$ نسبت به حالت نازل بدون چرخش به ترتیب مقدار ۳/۲۹، ۵/۹۰ و ۸/۳۴ درصد می‌باشد. به عبارتی هر چه سرعت زاویه‌ای نازل بیشتر باشد، درصد افزایش شعاع پرش دایروی نسبت به حالت نازل بدون چرخش بیشتر است. علت این امر آن است که افزایش سرعت زاویه‌ای نازل باعث می‌شود سرعت مماسی سیال خروجی از نازل (گریز از مرکز) بیشتر بوده، پرش دایروی در فاصله‌ی دورتری از محل برخورد جت سیال به صفحه‌ی هدف شکل گرفته و شعاع بزرگتری داشته باشد.

شکل (۵) نتایج آزمایشگاهی را در قالب گروه‌های بی‌بعد نشان می‌دهد. در این شکل تغییرات شعاع بی‌بعد پرش بر حسب عدد چرخش (رابطه‌ی ۵) نشان داده است.

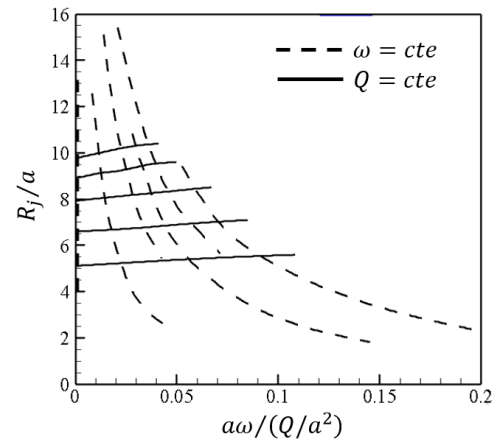
دو دسته خطوط در این شکل قابل مشاهده است. دسته‌ی اول، خط‌چین‌ها هستند که معرف خطوط سرعت زاویه‌ای ثابت هستند. این خطوط دارای شیب منفی هستند که این شیب منفی به تدریج با کاهش عدد چرخش زیاد شده و در نهایت مجانب به ۹۰ درجه می‌شود. علت منفی بودن شیب این خطوط آن است که در یک سرعت زاویه‌ای ثابت، افزایش دبی باعث کاهش عدد چرخش می‌شود. اما در عین حال شعاع پرش دایروی افزایش می‌یابد. وقتی سرعت زاویه‌ای صفر باشد، عدد چرخش همواره برابر با صفر خواهد بود. اما افزایش دبی، حتی در سرعت زاویه‌ای صفر، باعث افزایش شعاع پرش دایروی

- افزایش سرعت زاویه‌ای نازل، باعث افزایش شعاع پرش دایروی در یک دبی ثابت می‌شود.
- میزان افزایش شعاع پرش دایروی در حالت نازل چرخشی برای سرعت‌های زاویه‌ای نازل $\omega=132/8rpm$ ، $\omega=266/4rpm$ و $\omega=400/8rpm$ نسبت به حالت نازل بدون چرخش به ترتیب مقدار $3,29$ ، $5,90$ و $8,34$ درصد می‌باشد.
- در نمودار شعاع بی‌بعد پرش بر حسب عدد بی‌بعد چرخش، خطوط سرعت زاویه‌ای ثابت نازل دارای شیب منفی و خطوط دبی ثابت دارای شیب مثبت هستند.
- پرش‌های ایجاد شده توسط جت سیال چرخشی با کمی اختلاف از روند نتایج تئوری اصلاح شده واتسون پیروی می‌کنند. اختلاف میان نتایج تئوری و آزمایشگاهی به دلیل در نظر نگرفتن پارامتر مهم سرعت زاویه‌ای جت سیال در تئوری واتسون است.

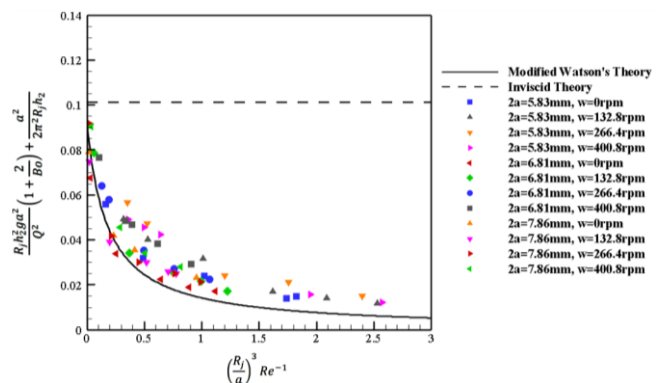
مراجع و منابع

- [1] Avedisian, C. and Zhao, Z., 2000. "The circular hydraulic jump in low gravity", *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, pp. 2127-2151.
- [2] Passandideh-Fard, M., Teymourtash, A. R. and Khavari, M., 2011. "Numerical study of circular hydraulic jump using volume-of-fluid method", *Journal of Fluids Engineering*, vol. 133, p. 011401, 2011.
- [3] Ray, A. K. and Bhattacharjee, J. K. 2007. "Standing and travelling waves in the shallow-water circular hydraulic jump", *Physics Letters A*, vol. 371, pp. 241-248.
- [4] Mikielewicz, J. and Mikielewicz, D., 2009. "A simple dissipation model of circular hydraulic jump", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 17-21.
- [5] Johnson, M., Maynes, D. and Crockett, J., 2014. "Experimental characterization of hydraulic jump caused by jet impingement on micro-patterned surfaces exhibiting ribs and cavities", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 58, pp. 216-223.
- [6] Choo, K. and Kim, S. J., 2016. "The influence of nozzle diameter on the circular hydraulic jump of liquid jet impingement", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 72, pp. 12-17.
- [7] Fernandez-Feria, R., Sanmiguel-Rojas, E. and Benilov, E. S., 2019. "On the origin and structure of a stationary circular hydraulic jump", *Physics of Fluids*, vol. 31, p. 072104.
- [8] Bush, J. W. and Aristoff, J. M., 2003. "The influence of surface tension on the circular hydraulic jump", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 489, pp. 229-238.
- [9] Facciolo, L., 2006. "A study on axially rotating pipe and swirling jet flows", Stockholm, Sweden.

پیروی می‌کنند، اما کمی اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و تئوری وجود دارد. به طور میانگین مقدار $14/4$ درصد خطا در نتایج وجود دارد که البته این میزان خطا به دلیل دقت تجهیزات اندازه‌گیری یا خطای دستگاه آزمایش نمی‌باشد، بلکه به دلیل آن است که مقدار مرجع در محاسبه‌ی خطای نتایج، تئوری اصلاح شده‌ی واتسون که تنها تئوری موجود در زمینه‌ی پرش‌های هیدرولیکی دایروی است، در نظر گرفته شده است. در تئوری واتسون اثر پارامتر چرخش سیال در نظر گرفته نشده است و بنابراین مقایسه‌ی نتایج با این تئوری باعث ایجاد خطا می‌گردد.



شکل ۵: تغییرات شعاع بی‌بعد بر حسب عدد بی‌بعد چرخش



شکل ۶: مقایسه‌ی نتایج پرش‌های هیدرولیکی ایجاد شده به وسیله‌ی جت چرخشی با تئوری اصلاح شده‌ی واتسون

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از طراحی و ساخت دستگاه آزمایشگاهی ایجاد پرش هیدرولیکی با جت سیال چرخشی، به روش آزمایشگاهی اثر چرخش جت سیال بر روی پرش‌های هیدرولیکی دایروی مطالعه شد و نتایج زیر بدست آمد:

- در هر سرعت ثابت زاویه‌ای نازل، افزایش دبی جریان باعث افزایش شعاع پرش هیدرولیکی دایروی می‌شود.