

بررسی تجربی ساختارهای پایدار و ناپایدار در پرش هیدرولیکی چندضلعی

محسن مخلصی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا تیمورتاش* (دانشیار)

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۳)
دوری ۲ - ۳۰، شماره ۱/۲، ص. ۷۶-۶۷

هنگامی که یک جت عمودی مایع به صفحه‌ای افقی برخورد می‌کند، اولین انتظاری که می‌رود تشکیل یک پرش هیدرولیکی دایره‌ای است؛ اما در برخی از سیالات تحت شرایط خاص، انتقال از جریان فوق بحرانی به جریان زیر بحرانی به شکل پرش هیدرولیکی چندضلعی پایدار یا ناپایدار نمایان می‌شود. در این نوشتار علاوه بر پرش‌های چندضلعی پایدار، نوعی دیگر از پرش‌های چندضلعی نادر که رفتاری چرخشی - موجی از خود بروز می‌دهند، ارائه شده است. با تعریف ناحیه‌ی ماندگاری برای پرش‌های چندضلعی، وابستگی این ناحیه به اعداد بی‌بعد حاکم مشخص شده است. شعاع متوسط پرش چندضلعی با نظریه‌ی اصلاح شده‌ی پرش دایره‌ای واتسون مقایسه شده و مطابقت خوبی حاصل شده است. همچنین تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده در این مطالعه نشان می‌دهد که علت ایجاد این پرش‌ها را می‌توان به ناپایداری ریلی - پلاتو مرتبط دانست.

واژگان کلیدی: پرش هیدرولیکی چندضلعی، پرش چرخشی، اصابت جت سیال، پرش ناپایدار، ناپایداری ریلی - پلاتو.

mohsenmokhlessi@gmail.com
teymourtash@um.ac.ir

۱. مقدمه

دو گروه کلی «پرش‌های دایره‌ای» و «پرش‌های غیر دایره‌ای» تقسیم کرد. مهم‌ترین موضوع در پرش هیدرولیکی دایره‌ای پیش‌بینی شعاع پرش و ساختار آن است. طبق نظریه‌ی پرش هیدرولیکی دایره‌ای غیر لزج ناشی از برخورد جت عمودی سیال روی یک صفحه‌ی افقی^[۱] «برابری نیروی فشار با نرخ تغییر اندازه حرکت سیال» شرطی است که باید در محل پرش اعمال شود. نرخ تغییر اندازه حرکت به علت کندشدن جریان، و نیروی فشار ناشی از تغییر ارتفاع سطح مقطع جریان در نظر گرفته می‌شود. واتسون نخستین کسی بود که تأثیر لزجت را در مسئله‌ی پرش هیدرولیکی دایره‌ای در نظر گرفت.^[۲] تحلیل او مبتنی بر نظریه‌ی اساسی لایه‌ی مرزی پراتل بود و جریان را برحسب زیرلایه‌ی بلایزوس - که در نزدیکی نقطه‌ی برخورد توسعه می‌یابد - و نیز حل تشابهی در دوردست توصیف کرد. نظریه‌ی واتسون بارها توسط محققین سراسر دنیا مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت.^[۳-۶] این تحقیقات نشان می‌دهند که نظریه‌ی واتسون در برخی پرش‌ها با نتایج آزمایشگاهی سازگاری کمی دارد. اما در مطالعات بعدی، پژوهشگران با در نظر گرفتن تأثیر کشش سطحی در نظریه‌ی واتسون و تطبیق آن با آزمایشات خود،^[۷] ضمن تصحیح نظریه‌ی واتسون نشان دادند که کشش سطحی نقش مهمی در پرش هیدرولیکی دایره‌ای ایفا می‌کند.

پرش هیدرولیکی غیردایره‌ای یا چندضلعی پدیده‌ی جالبی است که نمونه‌ی آن در شکل ۲ نشان داده شده است. محققین با مشاهده‌ی پرش‌های چندضلعی (غیردایره‌ای) در آزمایشات خود،^[۸] تحلیلی مختصر درمورد آن ارائه دادند. آنها مشاهده کردند اگر لزجت سیال عامل زیاد باشد (تقریباً ۱۱ برابر لزجت آب در آزمایشات) پرش‌هایی با ساختار چندضلعی به وجود می‌آید؛ همچنین وابستگی شکل

اصابت جت عمودی مایع به صفحه‌ی افقی موجب گسترش شعاعی فیلم نازکی از سیال بر سطح می‌شود. چنانچه این لایه‌ی سیال با سرعتی بیش از سرعت بحرانی حرکت کند، طی انتشار در فاصله‌ی خاص از نقطه‌ی اصابت جت، عمق سیال به‌طور ناگهانی افزایش یافته و جریان به حالت زیر بحرانی تغییر وضعیت می‌دهد. این پدیده که یکی از پدیده‌های مهم جریان سیالات است، پرش هیدرولیکی^۱ نامیده می‌شود. این پدیده را می‌توان کم و بیش در گسترش لایه‌ی آب داخل ظرف شویی آشپزخانه - که بر اثر برخورد آب خارج شده از شیر به کف ظرف شویی به وجود می‌آید - مشاهده کرد. اصابت جت عمودی سیال به صفحات صلب در خنک‌کاری بعضی اجزاء الکترونیکی، در بعضی از فرایندهای تولید مواد، و نیز برخی از کاربردهای مکانیکی در رابطه با انتشار شعاعی سوخت مایع اهمیت پیدا می‌کند و گاه برای جلوگیری از ایجاد پرش‌های چندضلعی مورد توجه قرار گرفته است.^[۹]

در شکل ۱ شماتیکی از یک پرش هیدرولیکی دایره‌ای در مختصات قطبی نشان داده شده که برای رعایت تقارن نیمی از آن رسم شده است. برای ایجاد پرش‌هایی با ساختارهای مختلف، از مانعی در پایین دست جریان استفاده می‌شود. آنگاه که جت برخوردی به صفحه‌ی افقی دایره‌ای باشد انتظار می‌رود پرش هیدرولیکی نیز شکل دایره‌ای به خود بگیرد، اما پرش‌هایی نیز وجود دارند که گرچه جت برخوردی دایره‌ای است، ساختار دایره‌ی‌شان را از دست می‌دهند.

پرش هیدرولیکی ناشی از برخورد جت عمودی به سطح افقی را می‌توان به

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت ۱۳۹۱/۱۰/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۲/۲/۲۹، پذیرش ۱۳۹۲/۳/۶.

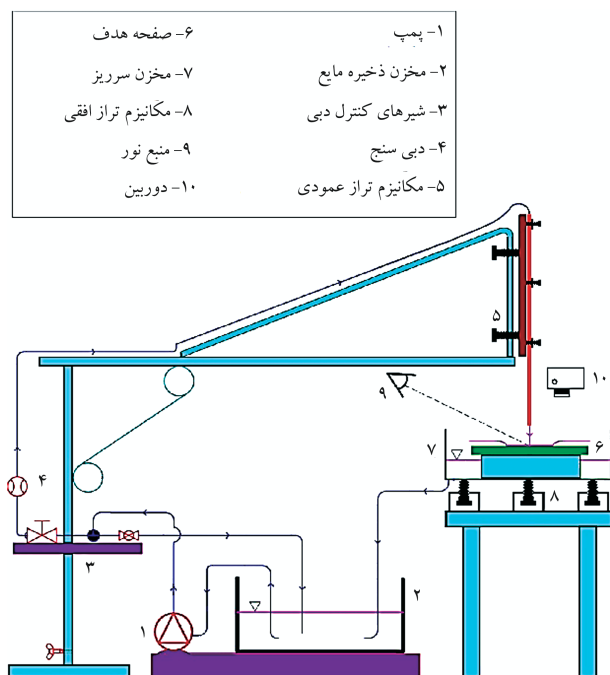
لزجت کاهش می‌یابد.^[۱۷] این موضوع می‌تواند دلیلی بر این ادعا باشد که پرش هیدرولیکی غیر دایره‌یی تنها در سیالات بسیار لزج همچون اتیلن گلیکول ایجاد می‌شود.

محققین با تحلیل ناپایداری ظریفی که می‌تواند پرش‌های دایره‌یی را از حالت تقارن خارج کرده و به سمت پرش‌های نامتقارن سوق دهد، اظهار داشتند^[۹] که ناپایداری در پرش دایره‌یی و ایجاد پرش‌های غیردایره‌یی ممکن است به ناپایداری ریلی - پلاتو^۲ مربوط شود. همچنین آنها با ارائه‌ی یک رابطه‌ی تجربی حاصل از نتایج آزمایشگاهی، نشان دادند که طول موج در تمام فرم‌های پایای غیرمتقارن مشاهده شده با کشش سطحی، چگالی و سرعت شعاعی سیال مرتبط است.

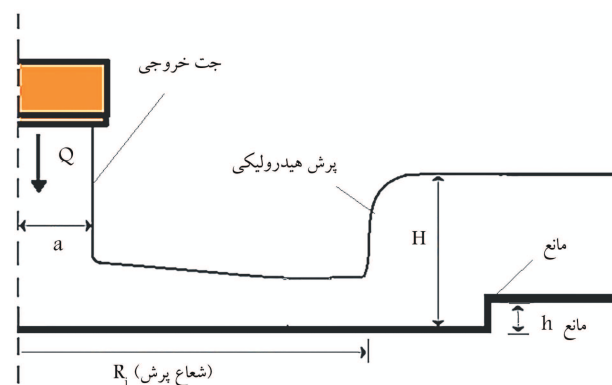
در این تحقیق آزمایشگاهی نتایج تجربی حاصل از پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی پایدار را ارائه خواهیم کرد. علاوه بر ارائه‌ی نمودارهای بی‌بعد که ارتباط تعداد اضلاع پرش با پارامترهای حاکم بر پدیده را مشخص می‌کند، نتایج حاصل از اندازه‌گیری ابعاد چندضلعی در این نوع پرش‌ها برای مقایسه‌ی نسبتاً کامل با نظریه‌ی پرش دایره‌یی واتسون^[۳] بررسی می‌شود. همچنین نوع جدیدی از پرش با عنوان «پرش‌های چرخشی»، که به نظر می‌رسد تاکنون از چشم محققین دور مانده، بررسی خواهد شد.

۲. دستگاه آزمایش

در شکل ۳ شماتیکی از دستگاه آزمایش نشان داده شده است. دستگاه آزمایش شامل یک مخزن برای نگه‌داری سیال، پمپ سانتریفوژ با قدرت نیم‌اسب، دبی‌سنج، لوله‌های مختلف برای تنظیم میزان قطر جت خروجی، تعدادی پایه‌های نگه‌دارنده، سازوکار ترازبندی افقی و عمودی، و نیز سازوکارهای نوردهی و تصویربرداری است. سیال عامل عبارت است از اتیلن‌گلیکول با چگالی $\rho = 1180 \text{ kg/m}^3$ ، لزجت سینماتیکی $\nu = 118 \text{ cSt}$ و کشش سطحی $\sigma = 47.5 \text{ dyn/cm}$ ، که توسط



شکل ۳. شماتیک دستگاه آزمایش.



شکل ۱. شماتیک برخورد جت عمودی با صفحه‌ی افقی و ایجاد پرش هیدرولیکی در مختصات استوانه‌یی.

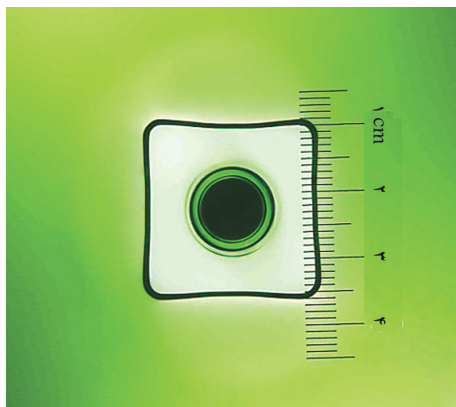


شکل ۲. نمونه‌یی از پرش هیدرولیکی غیردایره‌یی پایدار به شکل شش ضلعی. سیال عامل اتیلن‌گلیکول است (عکس از تحقیق حاضر).

پرش‌ها را به ارتفاع نازل، ارتفاع پایین‌دست جریان و دبی خروجی سیال برای نازلی با شعاع 0.75 سانتی‌متر به صورت تجربی مشخص کردند.

محققین بعدی مطالعات آزمایشگاهی خود را برای رسیدن به نتایج بیشتری در این زمینه معطوف کردند.^[۹] آنها با انجام آزمایشات متعدد علاوه بر ایجاد پرش‌های چندضلعی، فرم جدیدی از پرش غیردایره‌یی را کشف کردند، که به صورت شیدری در سیالات با لزجت بالاتر (حدود 30 cSt) ظاهر می‌شود. آنان با ارائه‌ی نتایج آزمایشگاهی براساس اعداد بی‌بعد، وابستگی تعداد اضلاع پرش چندضلعی را به قطر جت، ارتفاع پایین‌دست، لزجت سینماتیکی، کشش سطحی سیال و دبی جریان به دست آوردند. «پایداری» شاخصه‌یی مهم برای تقسیم‌بندی پرش‌های هیدرولیکی دایره‌یی و غیردایره‌یی محسوب می‌شود. عوامل متعددی در پایداری یک پرش هیدرولیکی نقش دارند؛ ارتفاع پایین‌دست، دبی حجمی جریان، لزجت، کشش سطحی و حتی نیروی گرانش از جمله‌ی این عوامل‌اند. با افزایش ارتفاع پایین‌دست، ساختار پرش تغییر می‌یابد و پرش از حالت پایدار خود خارج، و به پرشی ناپایدار و آشفته سوق داده می‌شود.^[۱۰]

افزایش کشش سطحی تأثیری ناپایدارکننده بر پرش دارد.^[۷] بر همین اساس یک مقدار بحرانی برای کشش سطحی وجود دارد که به‌ازای مقادیر بیشتر از آن، پرش هیدرولیکی دایره‌یی پایا هرگز نمی‌تواند وجود داشته باشد. این بدان معناست که انتقال ممکن است به یکی از دو حالت پرش هیدرولیکی دایره‌یی ناپایا یا پرش هیدرولیکی غیردایره‌یی رخ دهد. این کشش سطحی بحرانی به لزجت، دبی و سایر پارامترهای سیستم وابسته است. به‌طور خاص می‌توان گفت کشش سطحی بحرانی با افزایش



شکل ۵. پرش هیدرولیکی چهارضلعی، تصویر ناحیه زیر محل اصابت جت و تشکیل پرش چندضلعی و نیز نحوه اندازه‌گیری ابعاد پرش (عکس از تحقیق حاضر).

نگه‌دارنده قرار گرفته است. ارتفاع این پایه‌ها برای تراز صفحه‌ی هدف و ایجاد سطحی کاملاً افقی قابل تغییر است. پرش‌های چندضلعی، مخصوصاً پرش‌های ناپایدار که در بخش‌های بعد به آن خواهیم پرداخت، بسیار به تنظیمات دستگاه حساس‌اند، به‌نحوی که کوچک‌ترین انحراف در عمودی بودن جت سیال یا افقی بودن صفحه‌ی هدف، باعث ایجاد پرش‌هایی نامنظم و غیرمتقارن می‌شود.

ارتفاع سیال در پایین‌دست پرش با استفاده از سوزن متصل به انتهای یک کولیس دیجیتالی با دقت 0.1 میلی‌متر که روی پایه‌ی صلب قرار گرفته، اندازه‌گیری شده است. دبی که در محدوده‌ی 0.120 ml.s^{-1} قابل تغییر است، به‌کمک یک دبی‌سنج مخزنی با دقت 0.1 درصد در این محدوده اندازه‌گیری شده است. یکی از نتایج مهم که در این نوشته به آن اشاره خواهد شد، ابعاد پرش است. برای به دست آوردن ابعاد دقیق پرش‌ها، از خط‌کشی مناسب در زیر صفحه‌ی شیشه‌ی هدف و عکس‌برداری از آن ناحیه و استفاده از نرم‌افزارهای مناسب در این زمینه کمک گرفته شده است. در شکل ۵ نمونه‌ی از نحوه‌ی اندازه‌گیری ابعاد پرش نشان داده شده است.

۳. مشاهدات

۱.۳. پرش‌های چندضلعی پایدار

این نوع پرش‌های هیدرولیکی هیچ حرکتی در شکل ظاهری خود ندارند؛ به عبارت دیگر با گذشت زمان چندضلعی حاصل از پرش در جای خود پایدار باقی می‌ماند؛ از همین رو آنها را پرش‌های پایدار می‌نامیم. با تشکیل یک پرش هیدرولیکی چندضلعی، پارامترهای مختلفی در اندازه، تعداد اضلاع و همچنین پایداری آن تأثیرگذار است. از جمله‌ی این پارامترها می‌توان به هندسه‌ی جریان -- مانند دبی (Q)، ارتفاع پایین‌دست (H) و شعاع جت (a) -- و نیز مشخصات سیال -- مانند لزجت (ν)، کشش سطحی (σ) و چگالی (ρ) -- اشاره کرد.

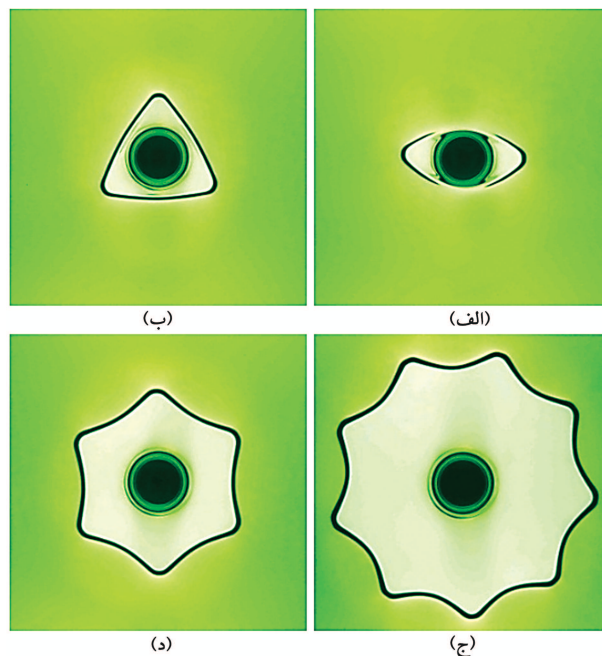
طبق نتایج آزمایشگاهی حاصله، در پرش‌های چندضلعی با افزایش دبی ابعاد پرش بزرگ شده تا جایی که ساختار اضلاع پرش با نوعی ناپایداری موجی شکل همراه شده و نهایتاً یک گوشه به پرش اضافه شده و پرش به حالتی پایدارتر با تعداد گوشه‌های بیشتر تغییر وضعیت می‌دهد. به عنوان مثال اگر پرشی با پنج گوشه داشته باشیم، با افزایش دبی ابعاد این پنج‌ضلعی افزایش می‌یابد تا این که یکی از اضلاع پرش شکسته شده و گوشه‌ی جدید -- گوشه‌ی ششم پرش -- نمایان می‌شود. به‌طور مشابه، با کاهش دبی همان روند اما به صورت معکوس رخ می‌دهد. به عبارت

پمپی با دبی 0.15 ml/s در مسیر به گردش درمی‌آید. تنظیم دبی با استفاده از دو شیر کنترل که در مسیر قرار دارد انجام می‌شود. به دلیل وابستگی زیاد پرش‌های چندضلعی به دبی، از شیرهایی با حساسیت بالا استفاده شده است تا بتوان میزان دبی جریان را با دقت بالایی تغییر داد.

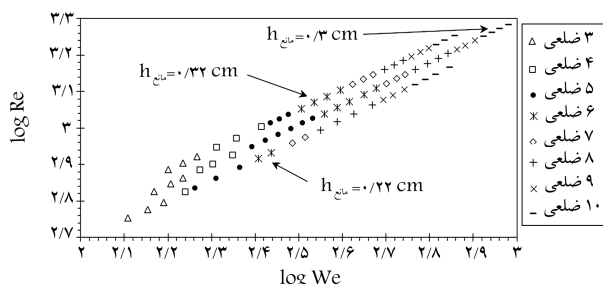
برای ایجاد یک جت کاملاً عمودی، با محور متقارن، و توسعه‌یافته از لوله‌هایی با طول ثابت 9 cm که روی پایه‌ی تنظیم‌پذیر جای می‌گیرد، استفاده شده است. با توجه به این که کوچک‌ترین اغتشاش و بی‌نظمی در جریان سیال خروجی از لوله، منجر به ایجاد خطا در آزمایش می‌شود، سعی شده است عمده‌تاً از لوله‌هایی با جنس شیشه استفاده شود تا از صیقلی بودن داخل لوله اطمینان حاصل شود. علاوه بر این لبه‌ی داخلی لوله در محل خروج جت سیال، کاملاً منحنی شده است تا از هرگونه اغتشاش در جریان جلوگیری به عمل آید.

سیال پس از خروج از لوله به مرکز صفحه‌ی شیشه‌ی به قطر 3.5 cm برخورد می‌کند که به فاصله‌ی قابل تغییر $20^\circ - 0^\circ$ از لوله قرار دارد. روی این صفحه که به آن صفحه‌ی هدف می‌گوییم، پرش‌های هیدرولیکی تشکیل می‌شود. برای بررسی بهتر ابعاد و ساختار پرش‌ها، با ایجاد روشنایی گسترده در بالای محل اصابت جت و ناحیه‌ی تشکیل پرش، از قسمت زیرین و فوقانی صفحه هدف اقدام به تصویربرداری شده است. نمونه‌هایی از پرش‌های هیدرولیکی پایدار ایجاد شده در شکل ۴ نشان داده شده است. خطوطی که با رنگ مشکی در این تصاویر مشخص است، سایه‌ی پرش هیدرولیکی است و محل وقوع آن را نمایان می‌کند.

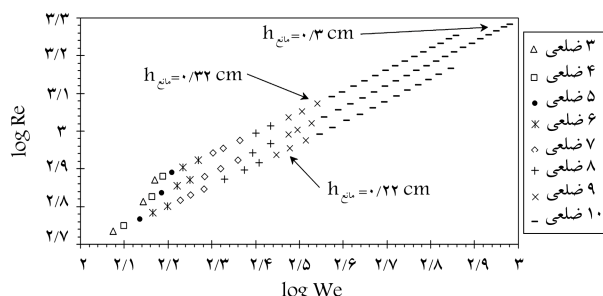
در آزمایشات مربوط به این مقاله، فاصله‌ی نازل از صفحه‌ی هدف 1 سانتی‌متر است. برای ایجاد عمق دلخواه در پایین‌دست، از لبه‌هایی با ضخامت‌های مختلف در دور صفحه‌ی هدف استفاده شده است. وظیفه‌ی این لبه‌ها تنظیم ارتفاع پایین‌دست پرش است، که نقشی مهم و اساسی در ایجاد پرش‌های چندضلعی ایفا می‌کند. سیال پس از عبور از لبه‌ی حلقوی به مخزن سرریزی وارد می‌شود که روی سه پایه‌ی



شکل ۴. پرش‌های چندضلعی پایدار به ترتیب با ۲، ۳، ۴ و ۶ گوشه، نمای نشان داده شده از زیر نقطه‌ی برخورد جت عمودی با صفحه‌ی شیشه‌ی است. شعاع جت خروجی 0.515 cm است (عکس از تحقیق حاضر).

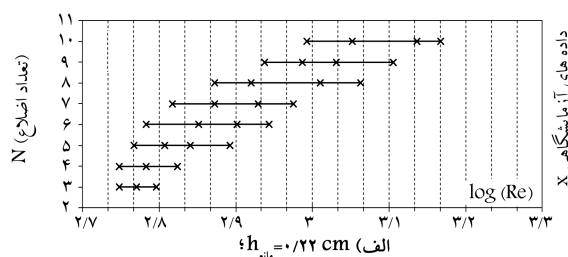


الف) دبی در حال افزایش؛

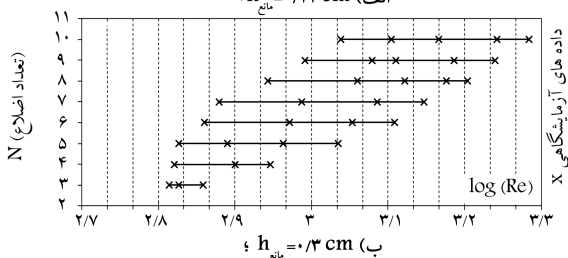


ب) دبی در حال کاهش از نتایج تحقیق حاضر.

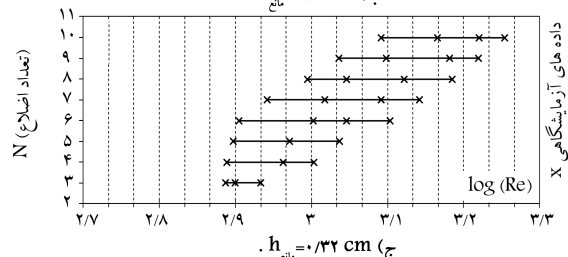
شکل ۶. وابستگی شکل پرش‌ها به عدد رینولدز جت $Re = Q/\nu a$ و عدد وبر پرش $We = \rho Q^2/\sigma H^3$. نتایج برای اتیلن - گلیکول با لزجت $\nu = 11 \text{ cS}$ ارائه شده که از نازلی با شعاع $a = 0.515 \text{ cm}$ و از فاصله $h_{noz} = 1 \text{ cm}$ به صفحه‌ی هدف برخورد می‌کند.



الف) $h_m = 0.22 \text{ cm}$



ب) $h_m = 0.3 \text{ cm}$



ج) $h_m = 0.23 \text{ cm}$

شکل ۷. نمایش وابستگی ناحیه‌ی ماندگاری پرش‌های چندضلعی پایدار به عدد رینولدز جت $Re = Q/\nu a$ حاصل از تحقیق حاضر؛ خطوط افقی در این نمودارها ناحیه‌ی ماندگاری را نشان می‌دهد. شعاع جت عمودی سیال $a = 0.515 \text{ cm}$ است.

دیگر با کاهش دبی ابعاد پرش چندضلعی کوچک، و طول اضلاع چندضلعی آنقدر کاهش می‌یابد که دیگر پایدار باقی نماند. در این هنگام دو گوشه به هم پیوسته و تشکیل یک گوشه را می‌دهند و پرشی با یک ضلع کم‌تر مشاهده خواهد شد.

اعداد بی‌بعد حاصل شامل عدد رینولدز جت $Re = Q/\nu a$ ، عدد وبر پرش $We = \rho Q^2/\sigma H^3$ و عدد باند جت $B = \rho g a^2/\sigma$ است. در شکل ۶ وابستگی شکل پرش‌های چندضلعی پایدار ایجاد شده به اعداد رینولدز و وبر، برای سه ارتفاع مانع مختلف نشان داده شده است. عدد باند متناظر $B = 6.3 \times 10^3$ است. در شکل ۶ الف هر ترسیم‌ی قطری نمایانگر تأثیر افزایش دبی بر شکل پرش در یک ارتفاع مانع ثابت است؛ در حالی که شکل ۶ ب تأثیر کاهش دبی را در همان شرایط نشان می‌دهد. یادآور می‌شود نمودار رسم شده برای عدد باند $B = 4.63 \times 10^3$ فقط نشانگر تأثیر افزایش دبی است و به اختلاف نمودارها در دو حالت افزایش و کاهش دبی توجهی نشده است. این در حالی است که نتایج نشان می‌دهد، نقطه‌ی تبدیل یک چندضلعی به چندضلعی دیگر در وضعیتی که دبی در حال افزایش است با وضعیتی که دبی در حال کاهش است، متفاوت است.

به طور عام می‌توان گفت با افزایش دبی تعداد اضلاع پرش هیدرولیکی افزایش، و با کاهش آن تعداد اضلاع پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد؛ اما این تغییر در تعداد اضلاع با ماندن هر چندضلعی در محدوده‌ی خاص از دبی رخ می‌دهد. این محدوده را «ناحیه‌ی ماندگاری پرش هیدرولیکی غیردایره‌یی» می‌نامیم.

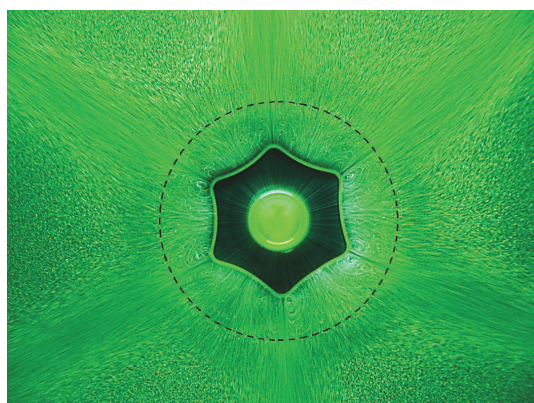
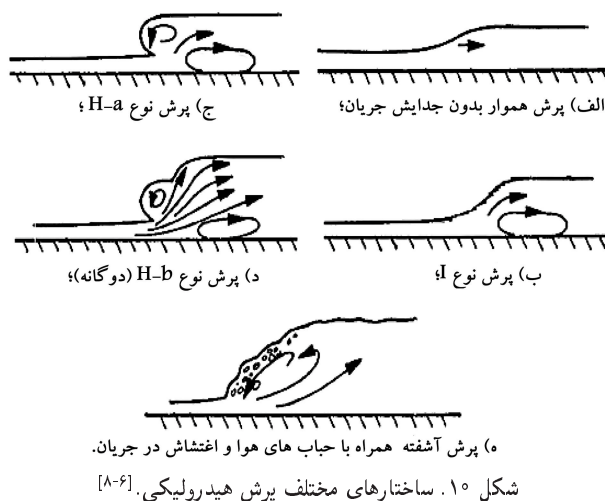
برای مقایسه‌ی مناسب و در برگرفتن ناحیه‌ی ماندگاری در پرش‌های پایدار، از عدد بی‌بعد رینولدز جت استفاده می‌کنیم. در شکل ۷ ناحیه‌ی ماندگاری پرش‌های چندضلعی برحسب عدد رینولدز برای سه ارتفاع مانع مختلف نشان داده شده است. تفاوتی که این نمودار با دیگر نمودارهای ارائه شده [۹] این است که نمودار حاضر امکان تشکیل پرش با اضلاع گوناگون، در رژیم ثابت جریان را به خوبی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت با افزایش/کاهش میزان دبی یا ارتفاع پایین‌دست، پرش چندضلعی تمایل به حفظ ساختار خود دارد.

هر پرش چندضلعی، در ناحیه‌ی ماندگاری خود دارای یک کمینه و بیشینه طول ضلع در این محدوده دبی است. در شکل ۸ ناحیه‌ی ماندگاری یک پرش پنج ضلعی برای ارتفاع مانع $h_m = 0.3 \text{ cm}$ نشان داده شده است.

دیگر پارامتر تأثیرگذار بر شکل، ساختار، ثبات و پایداری پرش عبارت است از «ارتفاع پایین‌دست پرش هیدرولیکی» که با ایجاد نیروی فشاری، شرایط را برای ایجاد پرش مهیا می‌سازد. دو پرش هفت ضلعی در یک دبی ثابت و دو ارتفاع پایین‌دست مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. چنان که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع پایین‌دست مساحت ناحیه‌ی محصور در پرش کاهش یافته، گوشه‌های چندضلعی تیزتر شده و لبه‌های پرش که نشانگر اضلاع چندضلعی است، به سمت داخل انحنا پیدا کرده است. به طور کلی در پرش‌های چندضلعی، با افزایش ارتفاع پایین‌دست مساحت پرش کاهش می‌یابد و به تدریج تعداد گوشه‌های پرش آنقدر کم می‌شود تا پرش بسته شود.

۲.۳. ساختار پرش هیدرولیکی

«ساختار پرش» ویژگی مهمی است که باید برای هر پرش هیدرولیکی مشخص شود. جریان سیال بعد از پرش دارای ساختارهای مختلفی است. در تمام پرش‌های هیدرولیکی -- اعم از پرش‌های پایدار و پرش‌های ناپایدار که بعداً بررسی می‌شوند --



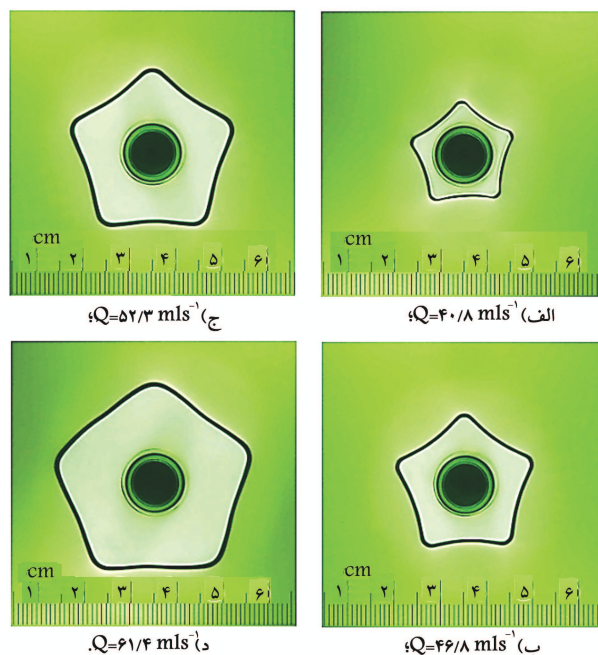
شکل ۱۱. نمایی از یک پرش شش ضلعی پایدار همراه با میکرو حباب های هوا برای نمایش خطوط جریان و تعیین ساختار آن (عکس از تحقیق حاضر). گردابه ی سطحی بین پرش و خط نقطه چین قرار دارد.

و به سمت پایین دست پرش است، مگر در جریان گردابه یی که کمی بعد از پرش روی سطح دیواره وجود دارد. [۱۳]

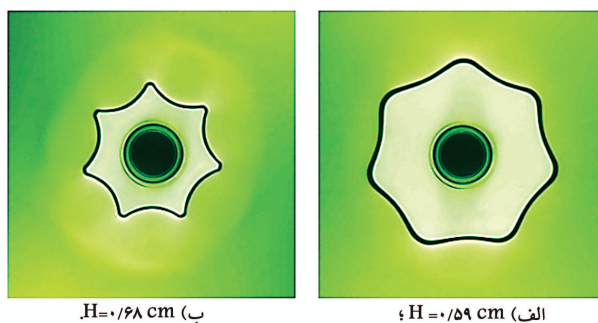
نکته یی که الگارد [۸] و بوش [۹] گزارش داده اند و در تحقیق حاضر نیز مشاهده شده، آن است که پرش های غیردایره یی منحصراً به شکل پرش های نوع II رخ می دهد. برای مشاهده ی رفتار جریان بعد از پرش در این تحقیق از تزریق میکرو حباب هوا در سیال استفاده شده است. شکل ۱۱ نمایی از زیر یک پرش شش ضلعی پایدار را نشان می دهد. ناحیه ی بین اضلاع پرش و خط نقطه چین دایروی، نشانگر گردابه ی ایجاد شده در جریان سطحی است. اختلاف سرعت های شعاعی جریان در امتداد زاویه یی در پایین دست پرش کاملاً مشخص است. مشاهده می شود که گردابه در گوشه های چندضلعی شکسته شده (شکافته شده) و جریان با سرعتی بیشتر نسبت به سایر نقاط به سمت خارج حرکت می کند.

۳.۳. پرش های چندضلعی ناپایدار

در این تحقیق نوعی پرش غیردایره یی مشاهده شده که نه تنها ساختار پایدار چندضلعی را ندارند بلکه به شکلی جالب، رفتاری چرخشی - موجی از خود نشان می دهند. این گونه پرش ها تاکنون گزارش نشده اند و به علت حرکت چرخشی، آنها را «پرش های هیدرولیکی چرخشی» می نامیم. در شکل ۱۲ یک پرش چرخشی شش ضلعی در سه لحظه ی مختلف نشان داده شده است.

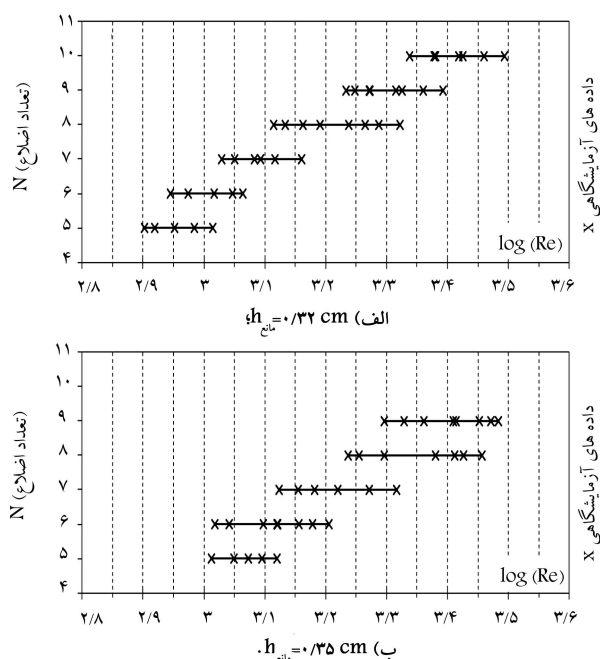


شکل ۸. تأثیر افزایش دبی بر ابعاد پرش هیدرولیکی پنج ضلعی در ناحیه ی ماندگاری آن (عکس ها از تحقیق حاضر). شعاع جت $\alpha = 0.515 \text{ cm}$ و ارتفاع پایین دست $H = 0.62 \sim 0.6 \text{ cm}$ است.



شکل ۹. تأثیر افزایش ارتفاع پایین دست بر پرش هیدرولیکی هفت وجهی در دبی ثابت $Q = 56.5 \text{ mls}^{-1}$ ، شعاع جت $\alpha = 0.515 \text{ cm}$ ، (عکس ها از تحقیق حاضر).

گردابه هایی متصل به پرش وجود دارند که ساختار درونی پرش ها را تشکیل می دهند. همه ی ساختارهای مختلفی که در پرش های هیدرولیکی مشاهده می شوند به ارتفاع پایین دست وابسته اند، و تقسیم بندی هایی که در ادامه می آید، بر همین اساس صورت گرفته است. هنگامی که اختلاف میان ارتفاع پایین دست و بالادست کم است، یک پرش هموار رخ می دهد که در آن عمق لایه ی سیال به طور تدریجی و بدون هیچ جریان برگشتی افزایش می یابد (شکل ۱۰ الف). با افزایش عمق پایین دست ابتدا یک گردابه روی سطح دیواره و نزدیک به پرش شکل می گیرد (شکل ۱۰ ب) سپس پرش بزرگ تر شده و منجر به برگشت جریان و تشکیل گردابه روی سطح آزاد می شود (شکل ۱۰ ج). با افزایش بیش تر ارتفاع پایین دست، پرش یگانه با گردابه ی سطحی (شکل ۱۰ د) تبدیل به پرش دوگانه (شکل ۱۰ د) می شود. [۱۲] پرش هایی که در سطح پرش فاقد گردابه اند اصطلاحاً «پرش های نوع I»، و پرش هایی که دارای گردابه ی سطحی و در واقع برگشت جریان در ناحیه ی پرش اند اصطلاحاً «پرش های نوع II» نامیده می شوند. [۸] در پرش نوع I جریان سیال در همه جا به صورت شعاعی



شکل ۱۳. نمایش وابستگی ناحیه‌ی ماندگاری پرش‌های چرخشی به عدد رینولدز $Re = Q / \nu v$ براساس نتایج تحقیق حاضر؛ خطوط افقی نشان‌دهنده‌ی ناحیه‌ی ماندگاری است. شعاع جت عمودی سیال $a = 0.345$ cm است.

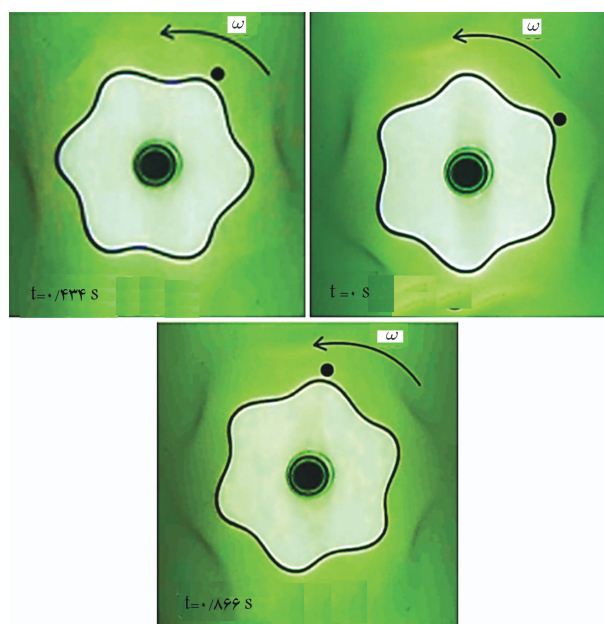
تغییر کند. در شکل ۱۴ وابستگی سرعت زاویه‌ی پرش به پارامتری بعد $We.Re$ برای سه قطر نازل مختلف نشان داده شده است. براساس این نمودارها، اولاً در ناحیه‌ی ماندگاری یک پرش چرخشی سرعت زاویه‌ی پرش ثابت باقی نمی‌ماند و بسته به تعداد چندضلعی تغییر می‌کند؛ دوماً با افزایش تعداد گوشه‌ها در پرش‌های چرخشی، سرعت زاویه‌ی روندی کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر در دبی ثابت، پرشی که تعداد اضلاع بیشتری دارد از سرعت چرخش کم‌تری برخوردار است. به عنوان مثال سرعت زاویه‌ی یک پرش هیدرولیکی شش ضلعی از یک پرش پنج ضلعی، در همان دبی جریان، کم‌تر است.

تغییرات شعاع جت برخوردی به صفحه نیز بر ابعاد و سرعت زاویه‌ی پرش‌های هیدرولیکی چرخشی تأثیرگذار است. براساس نمودارهای شکل ۱۴ با افزایش شعاع جت سرعت زاویه‌ی برای تمام چندضلعی‌ها کاهش می‌یابد.

۴. ابعاد پرش

شماتیک یک پرش چندضلعی پایدار در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با استفاده از تصاویر گرفته شده از هر پرش، L_1 و L_2 به ترتیب شعاع دایره‌های محاطی و محیطی چندضلعی، با دقت مناسب (0.1 mm) اندازه‌گیری شده است. با تعریف نسبت‌های بی‌بعد L_1/H و L_2/H که در آنها H ارتفاع سیال در پایین‌دست است، نمودارهای شکل ۱۶ برحسب لگاریتم حاصل ضرب اعداد وبر و رینولدز رسم شده است. مشاهده می‌شود که L_1 و L_2 با ازدیاد رینولدز و یا وبر به واسطه افزایش دبی یا کاهش ارتفاع پایین‌دست، افزایش می‌یابند. همچنین به نظر می‌رسد L_1/H و L_2/H دارای تغییرات خطی نسبت به $\log(We.Re)$ هستند.

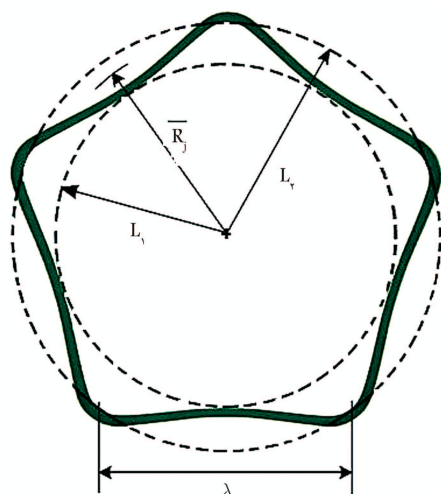
ویژگی جالبی که در اندازه‌گیری ابعاد پرش‌های چندضلعی پایدار به آن برخوردیم یکسان بودن مقادیر L_1 و L_2 برای چندضلعی‌های مختلف، در یک رژیم ثابت جریان



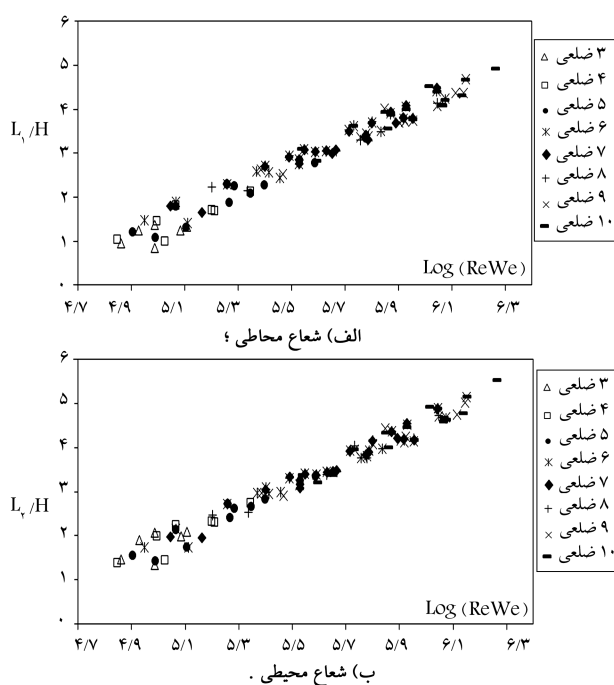
شکل ۱۴. پرش هیدرولیکی چرخشی با شش گوشه، حاصل از تحقیق حاضر. شعاع جت $a = 0.385$ cm است. نقطه‌ی سیاه پررنگ برای نشان دادن یک گوشه‌ی در حال چرخش، در هر لحظه روی عکس رسم شده است ($Q = 67.31$ ml/s, $H = 0.72$ cm).

چنان که اشاره شد، اگر ارتفاع پایین‌دست در چندضلعی‌های پایدار افزایش یابد، وجوه چندضلعی از حالت پایدار خود خارج شده و ناپایداری‌های موجی شکلی در پرش مشاهده می‌شود. حال اگر ارتفاع پایین‌دست باز هم افزایش یابد، کل پرش را ناپایداری در بر می‌گیرد و پرشی با تعداد اضلاع مشخص و در حال چرخش نمایان می‌شود. با اضافه کردن مقداری میکروحباب هوا در سیال عامل، می‌توان در این نوع پرش‌ها ساختار درونی گردابه‌ها و حرکت آنها را نسبت به هم مشاهده کرد. مشاهدات نشان می‌دهد گردابه‌هایی در نزدیک گوشه‌های چندضلعی وجود دارد که با اتصال به پرش هیدرولیکی، همراه با حرکت چرخشی آن می‌چرخند. در واقع اگر پرش یک دور کامل را طی کند، گردابه‌های متصل به گوشه‌ها نیز با همان سرعت زاویه‌ی یک دور کامل را می‌پیمایند. محل تشکیل این گردابه‌ها نزدیک پرش و متماثل به گوشه‌های چندضلعی است. کمی دورتر از پرش، گردابه‌ی اصلی پرش قرار دارد -- مشابه چیزی که در پرش‌های پایدار نشان داده شد -- اما در پرش‌های چرخشی این گردابه رفتار موجی از خود نشان می‌دهد؛ یعنی با حرکت چرخشی پرش گردابه‌ی مذکور در جای خود ساکن مانده و تنها ضخامت شعاعی آن کم و زیاد می‌شود. در این تحقیق ارتباط دقیق ساختار پرش‌های چرخشی به یکی از پرش‌هایی که قبلاً ارائه شد میسر نشد؛ اما به نظر می‌رسد این پرش‌ها ساختاری بسیار مشابه به پرش‌های دوگانه (پرش نوع II-b) دارند.

در پرش‌های چرخشی نیز مانند پرش‌های چندضلعی پایدار، افزایش یا کاهش دبی باعث افزایش یا کاهش مشخص ابعاد پرش بدون تغییر در تعداد اضلاع آن می‌شود. بنابراین برای این پرش‌ها نیز می‌توان ناحیه‌ی ماندگاری تعریف کرد. در شکل ۱۳ وابستگی ناحیه‌ی ماندگاری برای دو ارتفاع پایین‌دست مختلف نشان داده شده است. سرعت زاویه‌ی در این نوع پرش‌ها با ثابت نگه داشتن تمام شرایط -- از جمله دبی و ارتفاع پایین‌دست -- ثابت می‌ماند، اما جهت چرخش (یا جهت حرکت موج) بسته به شرایط اولیه‌ی حاکم بر مسئله، به شکل ساعت‌گرد یا پادساعت‌گرد



شکل ۱۵. شماتیک یک پرش هیدرولیکی چندضلعی پایدار. شعاع دایره‌های محاطی و محیطی چندضلعی به ترتیب L_1 و L_2 ، شعاع متوسط $\bar{R}_j$ و طول ضلع پرش λ است.

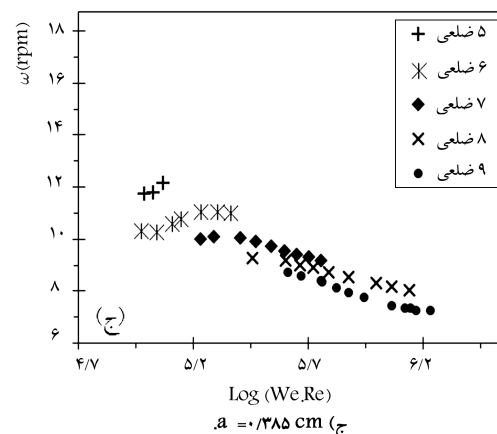
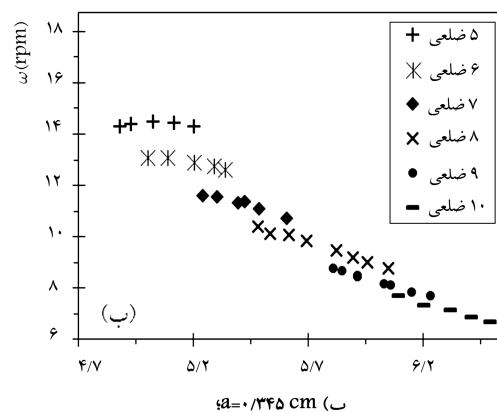
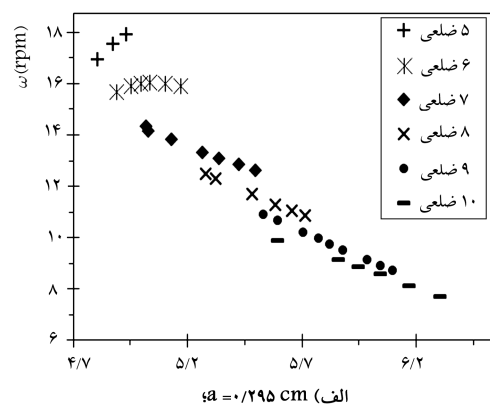


شکل ۱۶. نتایج تجربی اندازه‌ی شعاع برای پرسش‌های چند ضلعی پایدار بر حسب حاصلضرب اعداد رینولدز و وبر حاصل از تحقیق حاضر.

چندضلعی ساختاری متفاوت از پرش‌های دایره‌یی دارند. در ادامه به مقایسه‌ی نتایج به دست آمده برای شعاع متوسط پرش‌های چندضلعی با نظریه‌ی اصلاح‌شده‌ی واتسون^[۷] برای پرش دایره‌یی می‌پردازیم.

۱.۴. نظریه‌ی واتسون

نظریه‌ی لُرج پرش دایره‌یی واتسون^[۳] معتبرترین نظریه در زمینه‌ی تعیین شعاع پرش‌های دایره‌یی است. چنان که می‌دانیم لایه‌ی مرزی از نقطه‌ی اصابت جت به صفحه شروع به رشد می‌کند. این لایه‌ی مرزی در فاصله‌ی بی‌خاص از نقطه‌ی اصابت



شکل ۱۴. نمایش نتایج تجربی وابستگی سرعت زاویه‌یی پرش‌های چرخشی به حاصلضرب اعداد وبر و رینولدز حاصل از تحقیق حاضر. (برای تمام آزمایشات مربوط به این نمودارها ارتفاع مانع در پایین دست جریان $h_{\text{مانع}} = 0.32 \text{ cm}$ است.)

است. جدول ۱ مقادیر L_1 و L_2 را برای چندین پرش با اضلاع مختلف در یک دبی و ارتفاع پایین دست یکسان نشان می‌دهد. بیشترین درصد اختلاف کم‌تر از ۲ درصد است که ناشی از خطای اندازه‌گیری است. شاید این خصوصیت توجهی باشد برای تعریف «شعاع متوسط پرش» برای هر چندضلعی^[۹]؛ زیرا نتایج تجربی حاکی از آن است که شعاع دایره محاطی و محیطی در یک دبی و ارتفاع پایین دست ثابت، به تعداد اضلاع پرش وابسته نیست و می‌توان گفت برای تمام این چندضلعی‌ها یک شعاع متوسط یکتا وجود خواهد داشت. البته این بدان معنا نیست که تغییرات این شعاع متوسط کاملاً طبق نظریه‌ی پرش دایره‌یی خواهد بود، زیرا اصولاً پرش‌های

جدول ۱. نمایش عدم وابستگی مقادیر L_1 و L_2 به تعداد اضلاع در دبی و ارتفاع پایین دست ثابت ($a = 0.295 \text{ cm}$).

دبی جریان و ارتفاع پایین پرش	تعداد اضلاع	L_1 (cm)	L_2 (cm)	بیشترین اختلاف (%)
$Q = 70.21 \text{ ml/s}$ $H = 0.64 \text{ cm}$	۱۰	۲.۴۳	۲.۷۰	۱.۵
	۹	۲.۴۲	۲.۶۸	
	۷	۲.۴۵	۲.۷۰	
	۸	۲.۴۵	۲.۷۲	
$Q = 60.72 \text{ ml/s}$ $H = 0.64 \text{ cm}$	۹	۲.۲۰	۲.۴۳	۱.۶
	۸	۲.۱۸	۲.۴۱	
	۷	۲.۱۸	۲.۴۵	
	۸	۱.۹۲	۲.۱۳	
$Q = 51.99 \text{ ml/s}$ $H = 0.64 \text{ cm}$	۷	۱.۹۲	۲.۱۴	۰.۹
	۶	۱.۹۲	۲.۱۵	
	۷	۱.۹۲	۲.۱۴	
	۷	۱.۹۲	۲.۱۴	

جت به سطح آزاد جریان می‌رسد. طبق نظریه‌ی واتسون این فاصله (r_0) برابر با $0.315 a Re^{1/2}$ است. معادله‌ی مورد نیاز برای به دست آوردن شعاع پرش R_j بسته به این که پرش قبل از r_0 رخ دهد یا بعد از آن، متفاوت است. طبق نظریه‌ی اصلاح شده در $R_j < r_0$ ، سرعت سطح آزاد سیال (U) تا قبل از پرش برابر با سرعت جت خروجی است و معادله‌ی تعیین شعاع به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود: [۷]

$$\frac{R_j H^2 g a^2}{Q^2} \left(1 + \frac{2}{Bo} \right) + \frac{a^2}{2\pi^2 R_j H} = 0.101322 - 0.1297 \left(\frac{R_j}{a} \right)^{\frac{2}{3}} Re^{-\frac{1}{3}} \quad (1)$$

که در آن $Bo = \rho g R_j \Delta H / \sigma$ عدد باند و ΔH ارتفاع پرش است. اما در پرش‌های بیشتر از $r_0 > R_j$ معادله‌ی تعیین شعاع پرش عبارت است از:

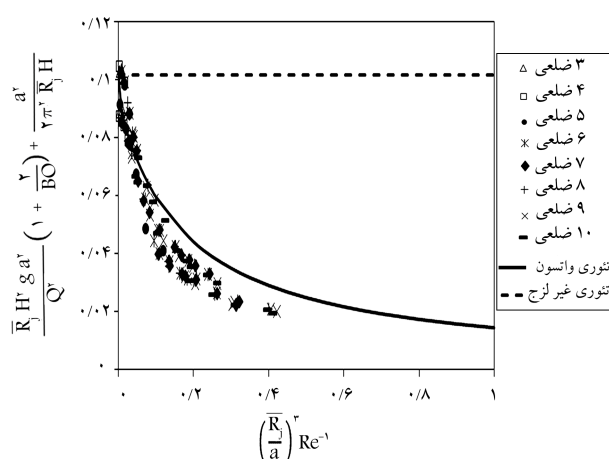
$$\frac{R_j H^2 g a^2}{Q^2} \left(1 + \frac{2}{Bo} \right) + \frac{a^2}{2\pi^2 R_j H} = 0.10676 \left[\left(\frac{R_j}{a} \right)^2 Re^{-1} + 0.1826 \right]^{-1} \quad (2)$$

در این حالت سرعت و ارتفاع سطح آزاد سیال قبل از پرش برابر است با:

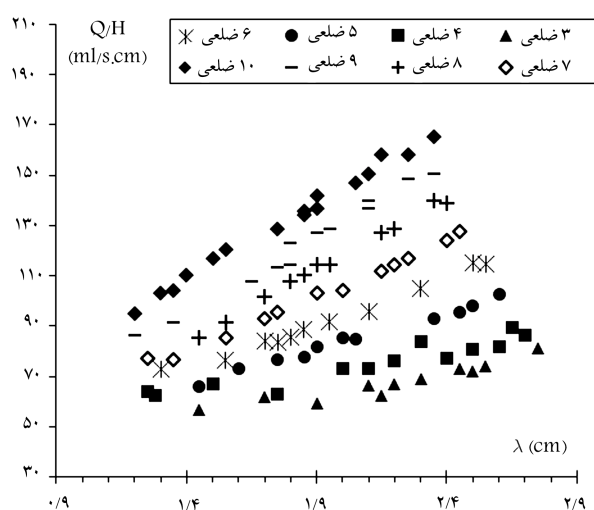
$$U(r) = \frac{2\gamma c^2}{\lambda \pi^2} \frac{Q^2}{\nu(r^2 + l^2)} \quad (3)$$

$$h(r) = \frac{2\pi^2}{3\sqrt{3}} \frac{\nu(r^2 + l^2)}{Qr} \quad (4)$$

که در آن $c = 1.402$ و $l = 0.567 a Re^{1/2}$ است. برای مقایسه‌ی پرش‌های چندضلعی با نظریه‌ی بالا نیازمند تعریف یک شعاع متوسط ($\bar{R}_j$) برای پرش هستیم. در این تحقیق شعاع متوسط پرش برابر با میانگین L_1 و L_2 برآورد شده است. در شکل ۱۷ شعاع متوسط پرش‌های چندضلعی پایدار با نظریه‌ی واتسون و نظریه‌ی غیر لزج ($Re \rightarrow \infty$) مقایسه شده است.



شکل ۱۷. وابستگی شعاع متوسط پرش‌های چند ضلعی پایدار به پارامترهای حاکم ناشی از تحقیق حاضر ضمن مقایسه با نظریه غیر لزج و نظریه واتسون.



شکل ۱۸. وابستگی طول ضلع پرش چندضلعی (λ) به دبی حجمی (Q) و ارتفاع پایین دست پرش (H) حاصل از تحقیق حاضر. شعاع جت $a = 0.515 \text{ cm}$ است.

در شکل ۱۷ به‌طور واضح عدم تطابق نتایج تجربی برای شعاع متوسط با نظریه‌ی غیرلزج نشان داده شده است. برخلاف نظریه‌ی غیرلزج مشاهده می‌شود که بین نتایج تجربی و نظریه‌ی لزج واتسون تطابق نسبتاً خوبی وجود دارد. در اینجا نباید انتظار داشت نتایج پرش‌های چندضلعی کاملاً مطابق با نظریه‌ی واتسون باشد، زیرا اصولاً ساختار پرش دایره‌یی با پرش چندضلعی متفاوت است. در نظریه‌ی واتسون ساختار پرش‌ها از نوع I است، در حالی که پرش‌های چندضلعی تنها به‌شکل ساختارهای نوع II ظاهر می‌شوند. البته از خطای اندازه‌گیری نیز نمی‌توان گذشت و باید گفت علاوه بر خود نظریه‌ی واتسون، شاید خطای اندازه‌گیری نیز یکی از دلایل اختلاف جزئی نتایج ما با نظریه‌ی واتسون باشد.

ارتباط میان طول ضلع (λ) پرش هیدرولیکی چندضلعی با پارامترهای دبی و ارتفاع پایین دست در شکل ۱۸ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش میزان دبی در ارتفاع پایین دست ثابت میزان طول ضلع چندضلعی افزایش می‌یابد. با توجه به این نمودار افزایش ابعاد در پرش‌هایی که تعداد اضلاع کم‌تری دارند، با تغییر دبی سریع‌تر رخ می‌دهد.

۵. ناپایداری در پرش دایروی

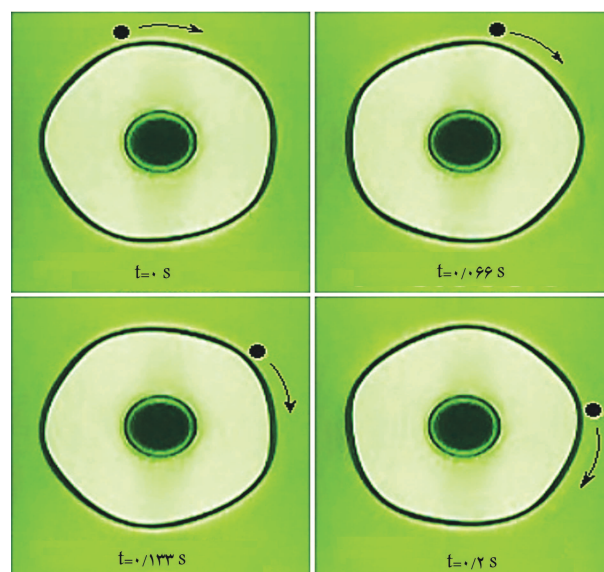
اکنون شاید این سؤال مطرح باشد که علت و دلیل وقوع پرش‌هایی با اشکال غیردایره‌ای چیست؟ با توجه به این که تمام شرایط فیزیکی مسئله از جمله جت برخوردی و مانع پایین‌دست، متقارن محور هستند و هیچ هندسه نامتقارن محوری در آن وجود ندارد، چرا باید اشکالی غیر دایره‌ای در آزمایشات به وجود آید.

می‌دانیم پرش‌های دایره‌ای در ارتفاع پایین‌دستی کم‌تر از پرش‌های چندضلعی رخ می‌دهند. با افزایش ارتفاع پایین‌دست در یک پرش دایره‌ای شعاع پرش کاهش می‌یابد،^[۱۴] تا این که در یک ارتفاع پایین‌دست خاص پرش دایره‌ای ناپایدار شده و حالت دایره‌ای خود را از دست بدهد. آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد که این پرش دایره‌ای با موجی چرخشی که کل پرش را در بر می‌گیرد، به نوسان درمی‌آید. ساختار پرش در این حالت از نوع II، یعنی همراه با یک گردابه‌ی سطحی یک‌پارچه است که هنوز تفکیک یا شکسته نشده است. سرعت زاویه‌ی موج بسیار زیاد و در حدود $10^\circ \sim 50^\circ \text{ rpm}$ است. با افزایش بیشتر ارتفاع پایین‌دست گردابه‌ی سطحی شکسته شده و چندضلعی‌های پایدار پدید می‌آید. در شکل ۱۹ ناپایداری موجی ایجاد شده بر یک پرش دایره‌ای قبل از تفکیک پرش به یک پرش چندضلعی پایدار نشان داده شده است.

۱.۵. ناپایداری ریلی - پلاتو

بوش و همکاران^[۹] در مقاله‌ی ارزش‌مند خود به‌طور کلی ایجاد پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی را ناشی از ناپایداری ریلی - پلاتو توصیف کرده‌اند. ریلی^[۱۵] و پلاتو^[۱۶] اثبات کردند یک شاره (باریکه) استوانه‌ی سیال با نیروی کشش سطحی محدود شده است و در شرایطی برای رسیدن به کم‌ترین انرژی سطحی ممکن است ناپایدار شود. این ناپایداری با توجه به شرایط سیستم -- نظیر طول استوانه یا نرخ شار -- قادر است استوانه‌ی سیال را قطعه قطعه کند یا فقط سطح آن را از حالت استوانه‌ی خارج ساخته و موج‌هایی را جایگزین آن سازد. این پدیده را می‌توان به راحتی در باریکه‌ی آبی که از یک شیر خارج می‌شود مشاهده کرد.

به نظر می‌رسد موج‌هایی که در پرش هیدرولیکی دایره‌ای مشاهده شد (شکل ۱۹)



شکل ۱۹. ناپایداری موجی در پرش دایره‌ای (عکس از تحقیق حاضر).

بسیار شبیه به ناپایداری ریلی - پلاتو است. این رفتار در پرش دایره‌ای برای رسیدن به کمینه انرژی سطحی، با کاهش مساحت پرش به وجود می‌آید. در واقع یک دبی و ارتفاع پایین‌دست خاص وجود دارد که پرش دایره‌ای را ناپایدار می‌کند و به سمت پرش چندضلعی سوق می‌دهد. با افزایش عامل کاهنده‌ی کشش سطحی می‌توان این نقطه را جابه‌جا کرد.^[۹] اگر یک پرش چندضلعی داشته باشیم افزایش مقداری ماده‌ی کاهنده‌ی کشش سطحی به سیال آن را به پرش دایره‌ای تبدیل می‌کند. بنابراین همانند استوانه‌ی سیال که یک نقطه‌ی تبدیل از حالت استوانه‌ی بی به قطرات جدا از هم وجود داشت، در پرش‌های دایره‌ای نیز یک نقطه‌ی تبدیل وجود دارد که احتمالاً کشش سطحی نقش مهمی در آن خواهد داشت. بررسی در این زمینه به صورت سؤال برای تحقیقات بعدی رها شده است.

۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، ابتدا پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی پایدار که قبلاً توسط محققین کشف شده است مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. برخلاف تحقیقات گذشته، نتایج به‌گونه‌ی ارائه شد که می‌توان با استفاده از آنها امکان ایجاد همزمان چندین پرش هیدرولیکی پایدار با اضلاع متفاوت در یک رژیم پارامتری مشخص را به صورت آزمایشگاهی جست‌وجو کرد. با تعریف ناحیه‌ی بی با عنوان «ناحیه‌ی ماندگاری» برای پرش‌های چندضلعی وابستگی، این ناحیه به عدد رینولدز جت مشخص شد. نتایج نشان داد در ناحیه‌ی ماندگاری هر پرش چندضلعی، مساحت پرش با افزایش دبی یا کاهش ارتفاع پایین‌دست، زیاد و با کاهش دبی یا افزایش ارتفاع پایین‌دست کم می‌شود.

علاوه بر پرش‌های پایدار، در تحقیق حاضر گونه‌ی جدید از پرش‌های غیر دایره‌ای مشاهده شد که ساختاری چرخشی - موجی به خود می‌گیرند. مشاهدات حاکی از آن است که ساختار این پرش‌ها مشابه ساختار پرش نوع II-b است. سرعت زاویه‌ی این پرش‌ها حائز اهمیت است. سرعت چرخش یک پرش چرخشی همواره ثابت است، اما با تغییر دبی یا ارتفاع پایین‌دست این سرعت تغییر می‌کند. همچنین با افزایش شعاع جت سرعت زاویه‌ی پرش‌های متحرک کاهش می‌یابد.

با بررسی ابعاد پرش مشخص شد اندازه‌ی شعاع‌های محاطی و محیطی چندضلعی‌های مختلف در یک دبی و ارتفاع پایین‌دست ثابت، یکسان است. نتایج تجربی برای شعاع متوسط پرش‌ها با نظریه‌ی اصلاح‌شده‌ی واتسون مطابقت دارد. در انتها می‌توان گفت تبدیل یک پرش دایره‌ای به یک پرش چندضلعی می‌تواند علتی بسیار شبیه به ناپایداری ریلی - پلاتو داشته باشد.

فهرست علائم

a : شعاع جت

Q : دبی حجمی سیال

H : ارتفاع پایین‌دست جریان

h : مانع ارتفاع مانع در پایین‌دست

Re : عدد رینولدز جت

B : عدد باند جت

We : عدد وبر

L_1 : شعاع دایره‌ی محاطی پرش چندضلعی

L_r : شعاع دایره‌ی محیطی پُرش چندضلعی
 r_0 : شعاع رسیدن لایه‌ی مرزی به سطح آزاد
 $U(r)$: سرعت سطح آزاد جریان قبل از پُرش
 $h(r)$: ارتفاع سیال قبل از پُرش
 g : شتاب گرانش
 Bo : عدد باند پُرش
 R_j : شعاع پُرش دایروی
 $\bar{R}_j$: شعاع متوسط پُرش چندضلعی

h_{noz} : ارتفاع نازل از صفحه‌ی هدف

حروف یونانی

ρ : چگالی سیال
 ν : ویسکوزیته (گرانروی) سیال
 σ : کشش سطحی سیال
 λ : طول ضلع پُرش چندضلعی

پانوشتها

1. hydraulic jump
2. Rayleigh-Plateau instability

منابع (References)

1. Avedisian, C. and Zhao, Z. "The circular hydraulic jump in low gravity", *Proc. R. Soc. Lond. A*, **456**, pp. 2127-2151 (2000).
2. Birkhoff, G. and Zarantonello, E., *Jets, Wakes and Cavities*, Academic press, New York (1957).
3. Watson, E.J. "The radial spread of a liquid jet over a horizontal plane", *Journal of Fluid Mechanics*, **20**, pp. 481-499 (1964).
4. Craik, A., Latham, R., Fawkaes, M. and Gibbon, P. "The circular hydraulic jump", *Journal of Fluid Mechanics*, **112**, pp. 347-362 (1981).
5. Vasista, V. "Experimental study of the hydrodynamics of an impinging liquid jet", B.S. thesis, MIT, Department of Mechanical Engineering (1989).
6. Liu, X. and Lienhard, J. "The hydraulic jump in circular jet impingement and in other thin liquid films", *Experiments in Fluids*, **15**, pp. 108-116 (1993).
7. Bush, J.W.M. and Aristoff, J.M. "The influence of surface tension on the circular hydraulic jumps", *Journal of Fluid Mechanics*, **489**, pp. 229-238 (2003).
8. Ellegaard, C., Hansen, A., Haaning, A., Hansen, K., Marcusson, A., Bohr, T., Lundbek Hansen, J. and Watanabe, S. "Polygonal hydraulic jumps", *Nonlinearity*, **12**, pp. 1-7 (1999).
9. Bush, J.W.M., Aristoff, J.M. and Hosoi, A. "An experimental investigation of the stability of the circular hydraulic jump", *Journal of Fluid Mechanics*, **558**, pp. 33-52 (2006).
10. Ellegaard, C., Hansen, A.E., Haaning, A. and Bohr, T. "Experimental results on flow separation and transitions in the circular hydraulic jump", *Physica Scripta*, **T67**, pp. 105-110 (1996).
11. Kasimov, A.R. "A stationary circular hydraulic jump, the limits of its existence and its gasdynamic analogue", *Journal of Fluid Mechanics*, **601**, pp. 189-198 (2008).
12. Khavari, M. "Numerical and experimental investigation of circular hydraulic jump", M.S. thesis, Ferdowsi University, Department of Mechanical Engineering, Mashhad, Iran (2010).
13. Tani, I. "Water jump in the boundary layer", *J. Phys. Soc. Japan*, **4**, pp. 212-215 (1949).
14. Passandideh-Fard, M., Teymourtash, A. R. and Khavari, M. "Numerical study of circular hydraulic jump using volume-of-fluid method", *Journal of Fluids Engineering*, **133**, pp. 01140-1 (2011).
15. Rayleigh, L. "On the capillary phenomena of jets", *Proc. R. Soc. Lond. A*, **29**, pp. 71-97 (1879).
16. Plateau, J., *Statique Experimentale et Theorique des Liquides Soumis aux Seules Forces Moleculaires*, Gauthier-Villars, Paris (1873).