

بررسی آزمایشگاهی تأثیر دبی حجمی، ارتفاع پایین- دست و قطر جت بر ابعاد پرش‌های هیدرولیکی چند ضلعی پایدار

محسن مخلصی^۱

کارشناسی ارشد

علیرضا تیمورتاش^۲

دانشیار

پرش هیدرولیکی چندضلعی پدیده‌ای جالب است که بر اثر برخورد یک جت عمودی و دایروی از یک سیال لزج با یک صفحه‌ی افقی ایجاد می‌شود. در این حالت بر خلاف هندسه‌ی مسئله که تماماً دایروی و متقارن محور است، پرش هیدرولیکی به نحوی جالب، نما و ظاهری غیردایروی، به شکل یک چندضلعی پایدار پیدا می‌کند. در این مقاله پدیده‌ی پرش هیدرولیکی چندضلعی پایدار به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از دستگاه آزمایشی که به همین منظور ساخته شده است، تأثیر عوامل حاکم شامل دبی حجمی سیال، ارتفاع پایین‌دست و قطر جت بر پرش‌های چندضلعی پایدار تعیین می‌شود. نتایج بر حسب اعداد بدون بعد رینولدز جت و ویر پایین‌دست ارائه خواهد شد و وابستگی شعاع متوسط پرش چندضلعی که به عنوان معیار اندازه‌گیری در این نوع پرش‌ها به کار می‌رود، به عوامل حاکم مشخص خواهد شد.

واژه‌های راهنما: پرش هیدرولیکی چندضلعی، اصابت جت عمودی سیال، صفحه‌ی افقی، پرش پایدار، شعاع متوسط پرش چندضلعی

۱- مقدمه

به عنوان یک تعریف کلاسیک می‌توان گفت پرش هیدرولیکی^۳ تبدیل ناگهانی جریان از حالت فوق بحرانی^۴ به حالت زیر بحرانی^۵ است. پرش یا جهش هیدرولیکی زمانی رخ می‌دهد که در پایین‌دست جریان شرایطی حاکم باشد که باعث شود جریان سیال در بالادست در محل خاصی به طور آنی تغییر ارتفاع داده و از جریانی با عدد فرود^۶ بیشتر از یک به یک جریان با مشخصه فرود کوچک‌تر از یک تغییر حالت دهد. این شرایط را می‌توان هنگام برخورد یک جت عمودی سیال با یک صفحه‌ی افقی که سیال با عمق کم بر روی آن قرار دارد، به صورت آزمایشگاهی ایجاد و بررسی نمود. در این حالت جت عمودی سیال پس از اصابت به صفحه‌ی افقی با سرعت زیاد و ارتفاع کم بر روی صفحه منتشر می‌شود تا اینکه در یک فاصله‌ی خاص از نقطه برخورد

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد mohsenmokhlessi@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد teymourtash@um.ac.ir

^۳ Hydraulic Jump

^۴ Supercritical Flow

^۵ Subcritical Flow

^۶ Froude Number

جت، به طور ناگهانی ارتفاع سیال افزایش یافته و در پی آن سرعت شعاعی سیال پس از عبور از ناحیه‌ی گردابه‌ای ایجادشده در ناحیه‌ی پرش، به شدت کاهش پیدا می‌کند. این رفتار تا حدود بسیاری مشابه به آن چیزی است که در بحث دینامیک گازها، هنگام عبور جریان گازی از یک شاک^۱ مشاهده می‌شود.

پخش فیلم نازک سیال به صورت شعاعی که به سبب اصابت جت سیال ایجاد می‌شود، تکنیکی معتبر و شیوه‌ای رایج برای ایجاد منطقه‌ای با نرخ انتقال حرارت بالا بین سیال و صفحه هدف است. این خصوصیت در فرآیندهای خنک کاری صنعتی و نیز بعضی از فرآیندهای تولید مواد مانند ساخت شیشه یا تولید کاغذ اهمیت پیدا می‌کند [۱، ۲].

پس از مطرح شدن مسئله پرش هیدرولیکی توسط دانشمند نام‌آشنا، لرد ریلی [۳]، که برای نخستین بار با انجام آزمایش‌های ابتدایی، پرش هیدرولیکی ناشی از اصابت جت عمودی به صفحه‌ی افقی را بررسی نمود، تاکنون افراد مختلف در سراسر این پهنه خاکی در مراکز علمی معتبر این موضوع را مد نظر قرار داده و تحقیقات خود را به این مسئله اختصاص داده‌اند. تحقیقاتی که قریب به اتفاق آن‌ها بر روی پرش‌های هیدرولیکی دایروی صورت گرفته است و به شکل آزمایشگاهی، تئوری و حتی شبیه‌سازی‌های عددی به بررسی پرش دایروی می‌پردازد. در اکثر تحقیقات آزمایشگاهی از آب به عنوان سیال عامل استفاده شده است. مهم‌ترین موضوع در پدیده پرش هیدرولیکی دایروی پیش‌بینی شعاع پرش دایروی و همین‌طور تعیین ساختار آن است. اولین تئوری در زمینه پرش دایروی توسط بیرخوف و زارانتولو [۴] ارائه شد. آن‌ها با انجام محاسبات ابتدایی که در آن اثر لزجت سیال نادیده گرفته شده بود، معادله‌ای ساده برای تعیین شعاع پرش دایروی به دست آوردند؛ اما آزمایش‌های عملی نشان از این داشت که تئوری غیر لزج برای پیش‌بینی محل وقوع پرش از دقت کافی برخوردار نبوده و نمی‌توان از آن به عنوان یک تئوری مناسب استفاده نمود؛ چرا که ضخامت لایه‌ی سیال، مخصوصاً در ناحیه بالادست آن قدر کم است که نمی‌توان از لزجت سیال در تحلیل مسئله صرف‌نظر کرد.

با مطرح شدن پدیده لایه مرزی و کشف اثرات آن بر جریان سیالات، واتسون [۵] برای نخستین بار تأثیر لزجت و لایه مرزی را بر پرش هیدرولیکی دایروی به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار داد. او با ارائه یک حل نسبتاً طولانی با استفاده از پارامترهای تشابهی و بر اساس تقسیم ناحیه بالادست به چهار ناحیه، توانست معادله‌ای ضمنی برای تعیین شعاع پرش دایروی بیابد. اگرچه تئوری واتسون با فرضیاتی که استفاده شده بود مانند صرف نظر کردن از تغییرات شعاعی فشار هیدرواستاتیکی در مقایسه با تنش‌های لزج یا فرض نادیده گرفتن اثرات کشش سطحی سیال، یک حل قابل قبول برای این مسئله محسوب می‌شد؛ اما آزمایش‌ها نشان می‌داد که تئوری واتسون در بعضی شرایط با نتایج آزمایشگاهی تطابق کمتری دارد [۶-۹]. علت این اختلاف سال‌ها بعد توسط بوش و آریستوف [۱۰] آشکار شد. بوش و آریستوف در سال (۲۰۰۳) نشان دادند که کشش سطحی می‌تواند نقش مهمی در پرش هیدرولیکی دایروی داشته باشد. آن‌ها با انجام یک سری محاسبات ریاضی پیچیده و استفاده از بعضی فرضیات موفق شدند تأثیر کشش سطحی را در تئوری واتسون وارد کرده و با تطبیق آن با نتایج تجربی خود، تئوری واتسون را اصلاح نموده و قابلیت تئوری را برای پیش‌بینی شعاع پرش افزایش دهند [۱۰].

¹ Shock

در اکثر تحقیقات تجربی که تا سال (۱۹۹۹) در زمینه پرش‌های دایروی انجام گرفته است، از آب به عنوان سیال عامل استفاده شده است که نتیجه‌ی آن نیز چیزی جز مشاهده پرش‌های دایروی در آزمایش‌ها نبوده است؛ اما در سال (۱۹۹۹) الگارد و همکارانش [۱۱] در حالی که بر روی پرش‌های دایروی مشغول آزمایش و تحقیق بودند به صورت اتفاقی با پدیده‌ای غیرطبیعی و در عین حال جالب روبه‌رو شدند. آن‌ها برای پایدار کردن پرش دایروی ایجادشده با آب که در ارتفاع پایین دست زیاد، ناپایدار می‌شد، سعی کردند با اضافه کردن یک سیال لزج‌تر به آب، پرش را به سمت پایداری سوق دهند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش لزجت سیال عامل، پرش نه تنها پایدار شده بلکه از حالت دایروی نیز خارج شده و به صورت شگفت‌آوری به شکل یک چندضلعی منتظم و پایدار با تعداد اضلاع مشخص تغییر وضعیت می‌دهد. آن‌ها با نام‌گذاری این نوع پرش‌ها به نام پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی^۱، وابستگی تعداد اضلاع پرش به ارتفاع نازل، ارتفاع پایین-دست جریان و دبی حجمی سیال را با ارائه یک نمودار برای جتی با قطر ثابت یک سانتیمتر مشخص کردند [۱۱].

در همین راستا بوش و همکارانش [۱۲] در سال (۲۰۰۶) با تحقیق بیشتر در زمینه پرش‌های چندضلعی موفق شدند تا نوع دیگری از پرش‌های غیر دایروی را کشف کنند که در سیالاتی با لزجت بیشتر (حدود ۳۰ برابر لزجت آب) ظاهر می‌شوند. این نوع از پرش‌ها ساختاری شبدری شکل داشته و در آزمایشات بوش و همکارانش به وسیله محلول آب-گلیسرول ایجاد شده است. آن‌ها وابستگی شکل پرش‌های چندضلعی و شبدری را به اعداد بدون بعد رینولدز و وبر به صورت آزمایشگاهی مشخص کردند [۱۲].

در تحقیق حاضر، پرش‌های چندضلعی پایدار به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور یک دستگاه آزمایش مناسب و مخصوص در آزمایشگاه مکانیک سیالات دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد طراحی و ساخته شده است. با استفاده از این دستگاه پرش‌های چندضلعی ایجاد و عوامل مؤثر بر پرش‌ها اندازه‌گیری شده است. سیال عامل به کار رفته در آزمایش‌ها اتیلن گلیکول^۲ است که لزجتی در حدود ۱۰ برابر لزجت آب دارد. در قسمت ارائه نتایج، تأثیر عوامل حاکم شامل دبی حجمی، ارتفاع پایین دست و قطر جت بر تعداد اضلاع، اندازه و شکل پرش‌های چندضلعی پایدار با استفاده از تصاویر سطحی گرفته‌شده از زیر هر پرش به صورت آزمایشگاهی به شکل کیفی و کمی مشخص خواهد شد.

۲- دستگاه آزمایش ساخته‌شده

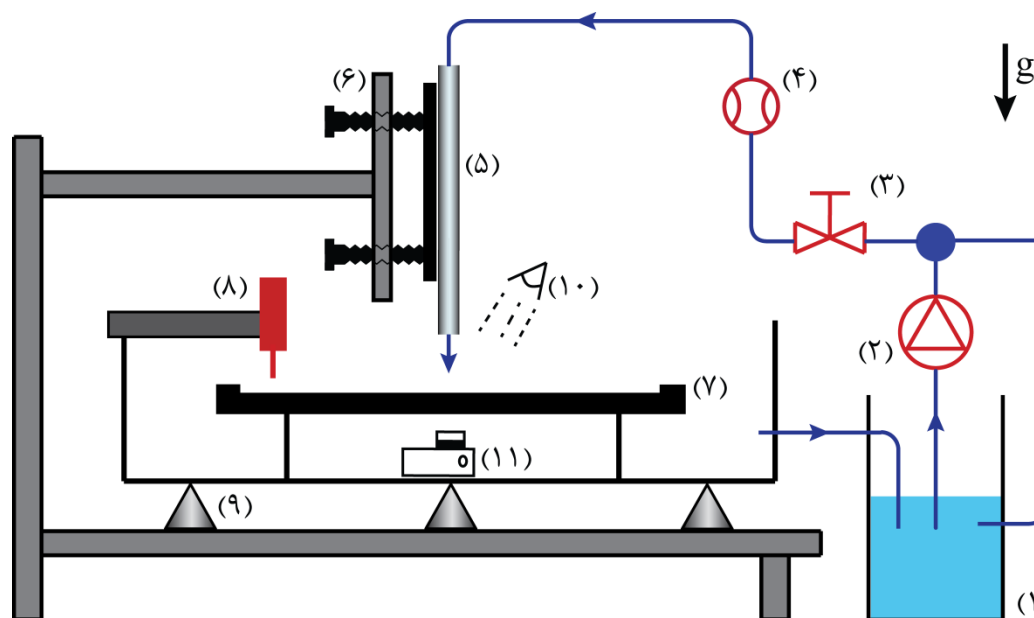
اولین گام برای مطالعه و تحقیق آزمایشگاهی در مورد پرش هیدرولیکی چندضلعی، طراحی و ساخت یک دستگاه آزمایش دقیق و کارآمد است. دستگاهی که به این منظور ساخته می‌شود بایستی شرایط لازم برای ایجاد جتی کاملاً عمودی با قطرهای مختلف و صفحه‌ای افقی با عمق‌های متفاوت، آن هم با قابلیت تنظیم-پذیری و تغییرپذیری در اندازه‌ها را به صورت مطلوب فراهم کند. همچنین دستگاه آزمایش مورد نظر باید دارای تجهیزات اندازه‌گیری دقیق برای ثبت نتایج نیز باشد.

^۱Polygonal Hydraulic Jump

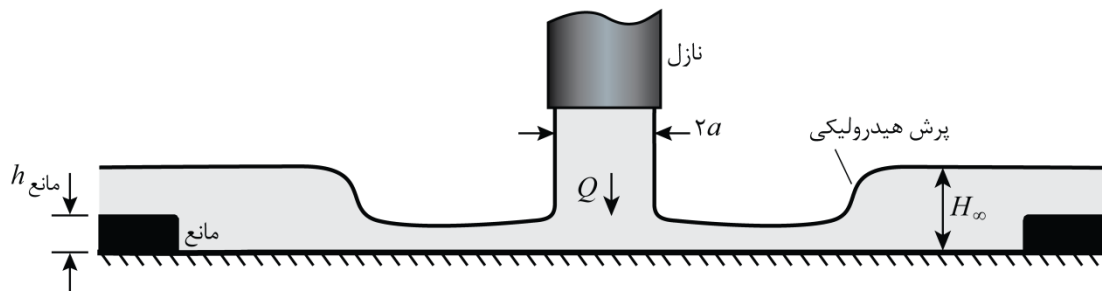
^۲Ethylene Glycol

در شکل (۱) شماتیک دستگاه ساخته شده نشان داده شده است. به صورت اجمالی دستگاه آزمایش شامل یک مخزن اصلی، یک پمپ مخصوص، لوله‌های شیشه‌ای ایجادکننده جت، صفحه‌ی هدف، مکانیزم‌های ترازبندی افقی و عمودی، مکانیزم‌های نورپردازی و تصویربرداری، دی‌سنج الکترونیکی و ارتفاع سنج سوزنی می‌باشد. عملکرد کلی دستگاه به این صورت است که سیال عامل به وسیله پمپ از درون مخزن اصلی مکیده شده و در مسیر بسته‌ای که تا خروجی لوله‌ی ایجادکننده‌ی جت ادامه دارد جریان می‌یابد. سپس سیال با برخورد به صفحه‌ی افقی و پس از ایجاد پرش از طریق مسیری با سطح آزاد دوباره به مخزن اصلی بازگشته و این چرخه ادامه می‌یابد.

برای تمام آزمایش‌ها سیال عامل ثابت بوده و از اتیلن گلیکول با چگالی $\rho = 1/1 \text{ g/cm}^3$ ، لزجت سینماتیکی $\nu = 0/12 \text{ St}$ و کشش سطحی $\sigma = 47/5 \text{ dyn/cm}$ استفاده شده است. جت عمودی با استفاده از لوله‌های شیشه‌ای با قطرهای $0/59 \text{ cm}$ ، $0/69 \text{ cm}$ و $0/77 \text{ cm}$ و $2a = 1/03$ ایجاد شده است. طول لوله‌ها 90 cm است تا از ایجاد یک جریان توسعه یافته اطمینان حاصل شود. برای تشکیل جتی که کاملاً دایروی و متقارن محور باشد، لبه‌ی داخلی تمام لوله‌های شیشه‌ای به وسیله‌ی ایجاد گرمای موضعی منحنی گشته است تا از به وجود آمدن ناخواسته اغتشاش در جریان جت خروجی از لوله‌ها جلوگیری شود؛ چرا که کوچک‌ترین اغتشاش و بی‌نظمی در جریان سیال منجر به ایجاد خطا در آزمایش‌ها خواهد شد. برای عمودی سازی لوله‌ها از یک مکانیزم عمودی‌ساز استفاده شده است که برای همین منظور طراحی شده است.



شکل ۱- شماتیک دستگاه آزمایش ساخته شده در تحقیق حاضر؛ (۱) مخزن اصلی، (۲) پمپ، (۳) شیر کنترل دبی، (۴) دی‌سنج، (۵) لوله شیشه‌ای ایجادکننده جت، (۶) مکانیزم ترازبندی عمودی، (۷) صفحه هدف، (۸) ارتفاع سنج، (۹) مکانیزم ترازبندی افقی، (۱۰) لامپ هالوزن، (۱۱) دوربین



شکل ۲- شماتیک پرش هیدرولیکی ایجادشده بر اثر برخورد جت عمودی با صفحه افقی

لوله‌های شیشه‌ای به صورت عمودی بر روی این مکانیزم قرار گرفته و به وسیله پیچ‌های موجود، زاویه‌ی برخورد جت برای رسیدن به وضعیت عمودی، تنظیم می‌شود. همچنین ارتفاع لوله تا صفحه افقی قرار گرفته در زیر آن، با به کارگیری گیره‌های تعبیه‌شده بر روی مکانیزم با دقت 0.5 cm قابل تنظیم است. این ارتفاع در تمام آزمایش‌ها $h_{\text{نازل}} = 1 \text{ cm}$ در نظر گرفته شده است.

صفحه‌ی افقی که جت عمودی سیال به آن برخورد می‌کند، یک صفحه‌ی شیشه‌ای و دایروی با قطر 35 cm است. پرش هیدرولیکی چندضلعی بر روی این صفحه افقی که به آن صفحه هدف^۱ می‌گوییم به وجود می‌آید. ارتفاع سیال در پایین دست پرش پارامتری است که تأثیر بسیاری در ایجاد پرش هیدرولیکی چندضلعی و بررسی‌های انجام گرفته داشته است. به منظور ایجاد ارتفاع پایین دست دلخواه، از لبه‌هایی حلقوی بر روی صفحه هدف به عنوان مانع در پایین دست جریان استفاده شده است. این لبه‌ها که دارای ضخامت‌های گوناگون و مورد نظر هستند، عمق سیال در پایین دست پرش را تنظیم می‌کنند. همچنین فاصله لبه حلقوی تا محل اصابت جت حدود 30 cm می‌باشد؛ به این ترتیب فاصله‌ی مانع تا محل پرش به اندازه‌ی خواهد بود که مانع هیچ‌گونه تأثیر مستقیمی در پرش هیدرولیکی نداشته باشد. شکل (۲) صفحه هدف و مانع قرار گرفته بر روی آن، جت عمودی سیال و پرش هیدرولیکی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

برای افقی کردن صفحه هدف از سه پایه‌ی نگه‌دارنده تنظیم پذیر استفاده شده است که در زیر صفحه‌ی هدف قرار می‌گیرند. این سه پایه که مکانیزم ترازبندی افقی را تشکیل می‌دهند به گونه‌ای طراحی شده است که ارتفاع هر پایه قابل تغییر باشد. با استفاده از آن‌ها می‌توان شیب صفحه هدف را تغییر داده و آن را برای ایجاد سطحی کاملاً افقی تنظیم نمود. پرش‌های چندضلعی بسیار به تنظیمات دستگاه آزمایش حساس‌اند، به نحوی که کوچک‌ترین انحراف در عمودی بودن جت سیال یا کمترین خطا در افقی بودن صفحه هدف، باعث ایجاد پرش‌هایی نامنظم، غیر متقارن و در عین حال غیر منظم خواهد شد؛ بنابراین سعی شده است با طراحی دقیق این قسمت‌ها، دستگاه آزمایش قادر به برآورده کردن ملزومات اساسی ذکر شده برای انجام آزمایش‌های دقیق باشد.

شکل (۳) تصویری از یک پرش پنج ضلعی پایدار را که به وسیله‌ی دستگاه ساخته شده ایجاد شده، نشان می‌دهد. در این تصویر قطر لوله‌ی شیشه‌ای نازل $2a = 1.3 \text{ cm}$ می‌باشد که برای مشخص بودن محل خروجی جت از یک نوار سفید رنگ پیرامون لوله شیشه‌ای استفاده شده است.

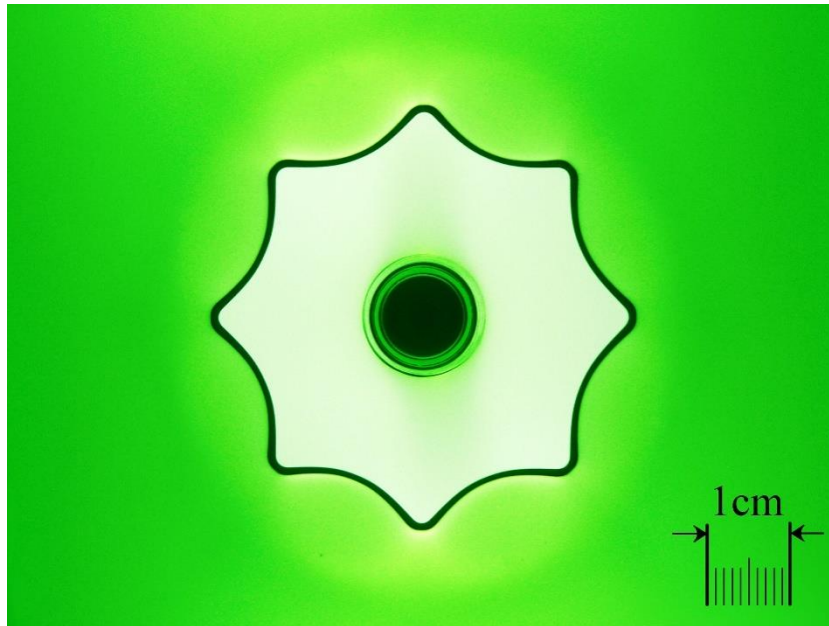
¹Target Plate



شکل ۳- نمونه‌ای از یک پرش هیدرولیکی پنج ضلعی پایدار؛ نوار سفید رنگ محل خروجی لوله شیشه‌ای را نشان می‌دهد.

دبی سیال خروجی از لوله نیز با استفاده از دو شیر کنترل کشویی که در مسیر جریان خروجی از پمپ قرار گرفته‌اند تنظیم می‌شود. به علت حساس بودن پرش‌های چندضلعی به تغییرات دبی، سعی شده است تا از شیرهایی با دقت بالا استفاده شود تا میزان دبی حجمی جریان به صورت آرام و کنترل شده قابل تغییر باشد. مشخصات جریان که شامل ارتفاع پایین دست و دبی حجمی جریان می‌شود با به کارگیری یک ارتفاع سنج سوزنی و یک دبی سنج الکترونیکی مخزنی اندازه‌گیری شده است. ارتفاع سنج از یک کولیس دیجیتالی با دقت 0.1 mm ، سوزن متصل به انتهای کولیس و پایه‌ی صلب نگه‌دارنده تشکیل شده است که با قرار گرفتن در قسمت بالای صفحه هدف عمق سیال در پایین دست پرش با استفاده از آن اندازه‌گیری شده است. دبی سنج نیز در محدوده دبی $Q = 0 - 120 \text{ mls}^{-1}$ عمل می‌کند که خطای اندازه‌گیری آن در این محدوده در حدود 0.1 درصد می‌باشد.

یکی از اهداف اصلی در آزمایش‌ها به دست آوردن ابعاد دقیق هر پرش بوده است. برای دست یابی به این هدف، با ایجاد یک روشنایی گسترده در بالای صفحه هدف -درست در قسمت فوقانی محل وقوع پرش- از ناحیه‌ی زیرین صفحه‌ی شیشه‌ای هدف اقدام به تصویربرداری شده است. این روش نورپردازی و تصویربرداری شرایط را به نحوی فراهم می‌کند تا محل وقوع پرش به شکل کاملاً واضح در تصاویر مشخص شود. نمونه‌ای از یک پرش چندضلعی پایدار با هشت ضلع را در شکل (۴) مشاهده می‌کنید که نمای زیر نقطه‌ی برخورد جت با صفحه را نشان می‌دهد. منحنی تیره رنگی که به صورت یک چندضلعی در تصویر مشخص است، در واقع سایه‌ی پرش هیدرولیکی می‌باشد و محل وقوع آن را مشخص می‌کند که به علت نورپردازی صورت گرفته به این شکل ظاهر می‌شود. برای اندازه‌گیری ابعاد دقیق پرش‌ها نیز از یک خط کش در زیر صفحه‌ی هدف و استفاده از نرم‌افزارهای مناسب در این زمینه کمک گرفته شده است.



شکل ۴- تصویری از یک پرش هشت ضلعی پایدار از نمای زیر پرش؛ خطوطی که توسط نورپردازی آزمایشگاهی به رنگ مشکی دیده می شود، محل وقوع پرش هیدرولیکی را نمایان می کند. دایره‌ی تیره رنگ قرار گرفته در وسط چندضلعی، محل اصابت جت سیال به صفحه است که از زیر صفحه هدف به این شکل دیده می شود.

۳- مشاهدات و نتایج آزمایشگاهی پرش‌های چندضلعی پایدار

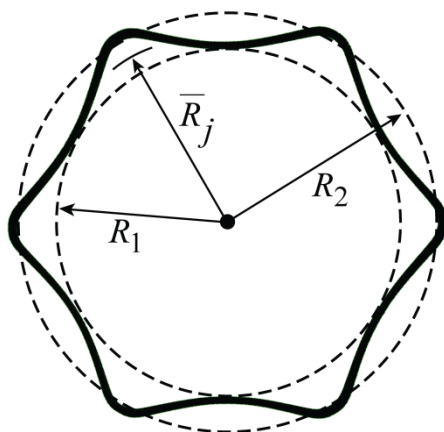
در این بخش نتایج مربوط به پرش‌های چندضلعی پایدار ارائه می شود که تصاویری از این نوع پرش‌ها را در شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده کردید. نتایج ارائه شده مربوط به تأثیر پارامترهای مختلف شامل دبی حجمی سیال، ارتفاع پایین دست پرش و قطر جت بر شکل، تعداد اضلاع و ابعاد این نوع پرش‌ها می باشد. منظور از پرش چندضلعی پایدار یا پرش چندضلعی ایستا در واقع همان پرش چندضلعی است که در گذشته توسط الگارد و همکارانش [۱۱] ارائه شده است و در این مقاله، به علت مواجه شدن با یک نوع جدید از پرش‌های غیردایروی (پرش‌های چرخشی) در مشاهدات آزمایشگاهی [۱۳-۱۵]، به این نام خوانده می شود.

پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی پایدار یا ایستا هیچ گونه حرکتی در شکل ظاهری خود ندارند؛ به همین دلیل، صفت "پایدار" یا "ایستا" در این تحقیق برای این نوع پرش‌ها انتخاب شده است. این ویژگی باعث می شود تا بتوان با عکس برداری از هر پرش، خصوصیات ابعادی آن را اندازه گیری نمود؛ چرا که آنچه در عکس دیده می شود دقیقاً همان چیزی است که در محیط آزمایشگاه و از نزدیک مشاهده می شود.

البته وابسته به زمان نبودن این نوع پرش‌ها فقط به شکل ظاهری آن‌ها محدود می گردد. روشن است که جریان سیال بعد از پرش دچار تحولاتی می شود که حاصل از تشکیل گردابه هاست؛ اما به این مطلب بایستی اشاره کرد که این حرکت گردابه‌ای مطمئناً با مفهوم ایستایی پرش در تناقض نیست، زیرا که ایستایی مربوط به موقعیت مکانی پرش چندضلعی یا در حقیقت مربوط به هندسه‌ی بیرونی آن است، در حالی که حرکت گردابه‌ای به جریان داخلی سیال و رفتار آن مربوط می شود. پر واضح است که این دو با هم متفاوت بوده و به عنوان دو موضوع جدا از یکدیگر قابل بررسی می باشند.

۳-۱- معیار مقایسه ابعاد در پرش‌های چندضلعی پایدار

در پرش‌های دایروی معیار مناسب برای سنجش اندازه‌ی پرش‌ها، همان شعاع پرش دایروی است. در حالی که در پرش‌های چندضلعی، به دلیل غیر دایروی بودن شکل پرش، امکان استفاده از این معیار وجود ندارد. به این دلیل در این پژوهش از دو پارامتر شعاع دایره‌ی محاطی (R_1) و شعاع دایره‌ی محیطی (R_2) چندضلعی، به عنوان معیارهای تشخیص اندازه‌ی پرش استفاده شده است. شماتیک یک پرش چندضلعی به همراه دایره‌های محاطی و محیطی آن در شکل (۵) نشان داده شده است. اندازه‌گیری این دو پارامتر (R_1 و R_2) علاوه بر این که امکان ارائه مستقیم نتایج بر اساس خود آن‌ها را فراهم می‌کند، مزیت دیگری نیز دارد و آن این است که می‌توان با تعریف شعاع متوسط برای هر چندضلعی از این شعاع برای مقایسه با تئوری پرش دایروی بهره برد. با توجه به رفتار کاملاً مشابهی که دو پارامتر R_1 و R_2 به ازای تغییرات از خود نشان می‌دهند، برای ارائه نتایج، از میانگین R_1 و R_2 به عنوان شعاع متوسط پرش چندضلعی (\bar{R}_j) استفاده گردیده است. همان طور که اشاره شد برای اندازه‌گیری R_1 و R_2 با ثبت عکس از هر پرش، عملیات پردازش تصویر بر روی تصاویر صورت گرفته و ویژگی‌های ظاهری آن‌ها اندازه‌گیری شده است.



شکل ۵- شماتیک یک پرش هیدرولیکی چندضلعی پایدار؛ شعاع دایره‌های محاطی و محیطی چندضلعی به ترتیب R_1 و R_2 و شعاع متوسط \bar{R}_j است.

تئوری واتسون: تئوری لزج پرش دایروی واتسون [۵] معتبرترین تئوری در زمینه تعیین شعاع پرش‌های دایروی است. همان طور که می‌دانیم لایه مرزی از نقطه اصابت جت به صفحه شروع به رشد می‌کند. این لایه مرزی در فاصله‌ای خاص از نقطه اصابت جت به سطح آزاد جریان می‌رسد. بر طبق تئوری واتسون این فاصله از $r_0 = 0.315 a Re^{1/3}$ است. معادله 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 [۱۰].

بر طبق تئوری اصلاح شده در $R_j < r_0$ سرعت سطح آزاد سیال (U) تا قبل از پرش برابر با سرعت جت خروجی است و معادله تعیین شعاع به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۰]:

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

که $Bo = \rho g R_j \Delta H / \sigma$ عدد باند و ΔH ارتفاع پرش است. برای $R_j > r_0$ معادله تعیین شعاع پرش،

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

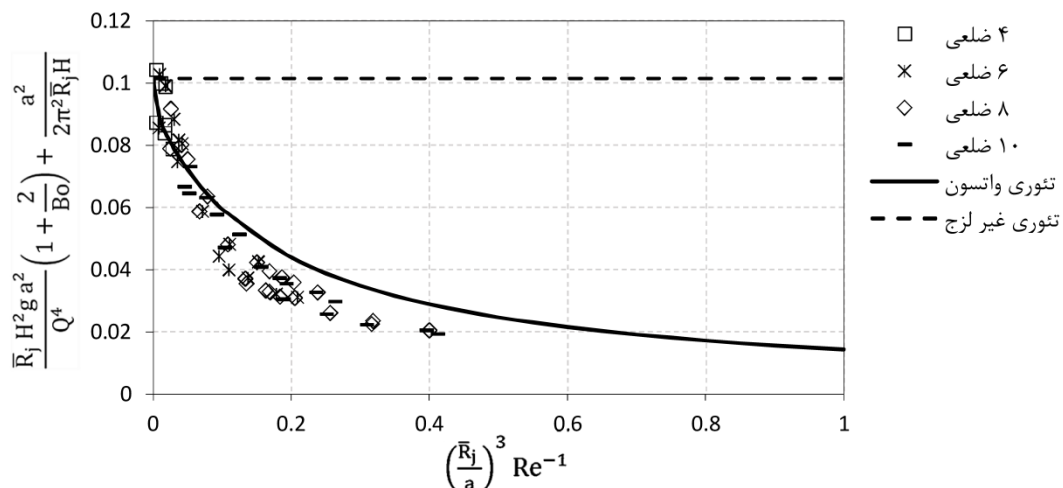
است. در این حالت سرعت و ارتفاع سطح آزاد سیال قبل از پرش،

$$U(r) = \frac{27c^2}{8\pi^4} \frac{Q^2}{v(r^3 + l^3)} \quad (3)$$

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

می باشد، که $c = 1.402$ و $l = 0.567a Re^{1/3}$ است [۱۰].

برای مقایسه پرش های چندضلعی با تئوری بالا نیاز به تعریف یک شعاع متوسط، \bar{R}_j برای پرش می باشد. در این تحقیق شعاع متوسط پرش برابر با میانگین R_1 و R_2 تقریب زده شده است. در شکل (۶) شعاع متوسط پرش های چندضلعی پایدار با تئوری واتسون و تئوری غیر لزج ($Re \rightarrow \infty$) مقایسه شده است. نمودار شکل (۶) به طور واضح عدم تطابق نتایج تجربی برای شعاع متوسط با تئوری غیر لزج را نشان می دهد. اما بر خلاف تئوری غیر لزج مشاهده می شود که بین نتایج تجربی و تئوری لزج واتسون تطابق نسبتاً خوبی وجود دارد. در اینجا نباید انتظار داشت نتایج پرش های چندضلعی کاملاً مطابق با تئوری واتسون باشد، زیرا اصولاً ساختار پرش دایروی با پرش چندضلعی متفاوت است. در تئوری واتسون ساختار پرش ها از نوع I می باشد، در حالی که پرش های چندضلعی تنها به شکل ساختارهای نوع II ظاهر می شوند [۱۰]. البته از خطای اندازه گیری نیز نمی توان گذشت و باید گفت علاوه بر خود تئوری واتسون، شاید خطای اندازه گیری نیز یکی از دلایل اختلاف جزئی نتایج حاضر با تئوری واتسون باشد.



شکل ۶- مقایسه نتایج تجربی شعاع متوسط پرش های چندضلعی پایدار حاصل از تحقیق حاضر با تئوری پرش دایروی واتسون (اصلاح شده). نتایج شامل جت هایی با شعاع های ۰/۳، ۰/۷۷، ۰/۶۹، و ۰/۵۹ cm است.

۳-۲- تأثیر دبی بر پرش هیدرولیکی چندضلعی پایدار

یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در بررسی این گونه مسائل سیالاتی، همواره دبی حجمی جریان بوده است. تغییر دبی حجمی باعث می‌شود با تغییر سرعت سیال در برخورد به صفحه هدف، سرعت پخش سیال بر روی صفحه‌ی هدف تغییر یابد. این تغییر خود باعث ایجاد دگرگونی در شکل، ساختار و اندازه‌ی پرش‌های چندضلعی پایدار می‌گردد.

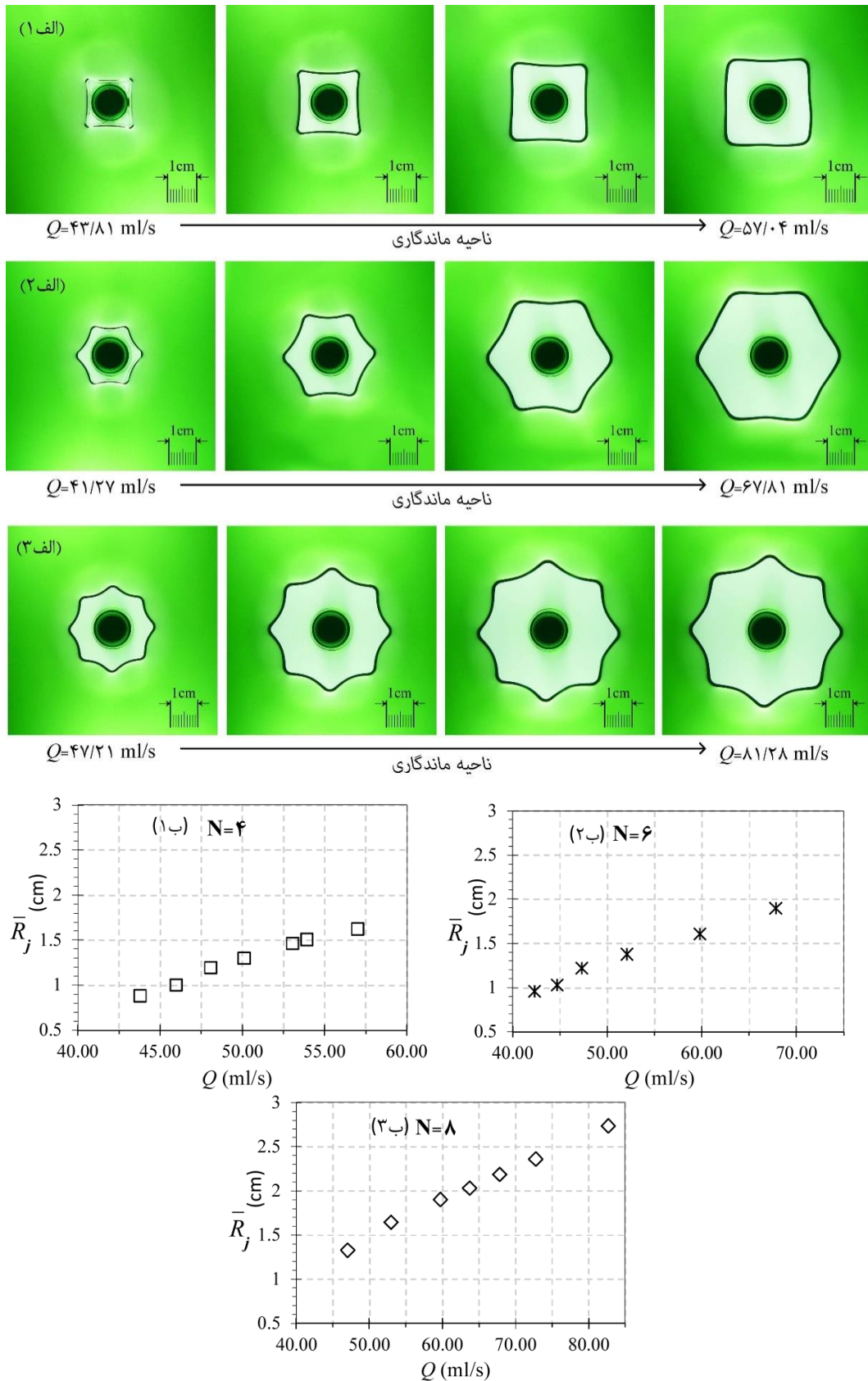
تأثیر دبی در پرش‌های دایروی واضح بوده و همان طور که انتظار می‌رود در یک پرش دایروی، با افزایش دبی حجمی، شعاع پرش دایروی افزایش یافته و با کاهش آن شعاع پرش دایروی کم می‌شود [۱۶]؛ اما این موضوع در پرش‌های چندضلعی پایدار تا حدی متفاوت است. علت اصلی تفاوت نیز به چندضلعی بودن پرش بازمی‌گردد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، دبی حجمی به دو صورت بر یک پرش هیدرولیکی چندضلعی پایدار تأثیر می‌گذارد؛ نخستین نقش، تأثیر بر ابعاد و اندازه‌ی پرش چندضلعی است و نقش دیگر، تأثیر بر تعداد اضلاع آن می‌باشد.

همانند یک پرش دایروی، در یک پرش چندضلعی پایدار نیز با تغییر دبی جریان، ابعاد پرش دچار تغییر خواهد شد. با افزایش یا کاهش دبی حجمی اندازه‌ی یک پرش چندضلعی تا حد مشخصی بزرگ یا کوچک می‌شود. بزرگ یا کوچک شدن پرش بدین معنی است که مساحت سطح داخلی چندضلعی افزایش یا کاهش می‌یابد. این محدوده که در آن تغییر دبی باعث تغییر در تعداد اضلاع نمی‌شود و همواره تعداد اضلاع پرش ثابت باقی می‌ماند، ناحیه‌ی ماندگاری پرش هیدرولیکی چندضلعی پایدار نامیده می‌شود [۱۷].

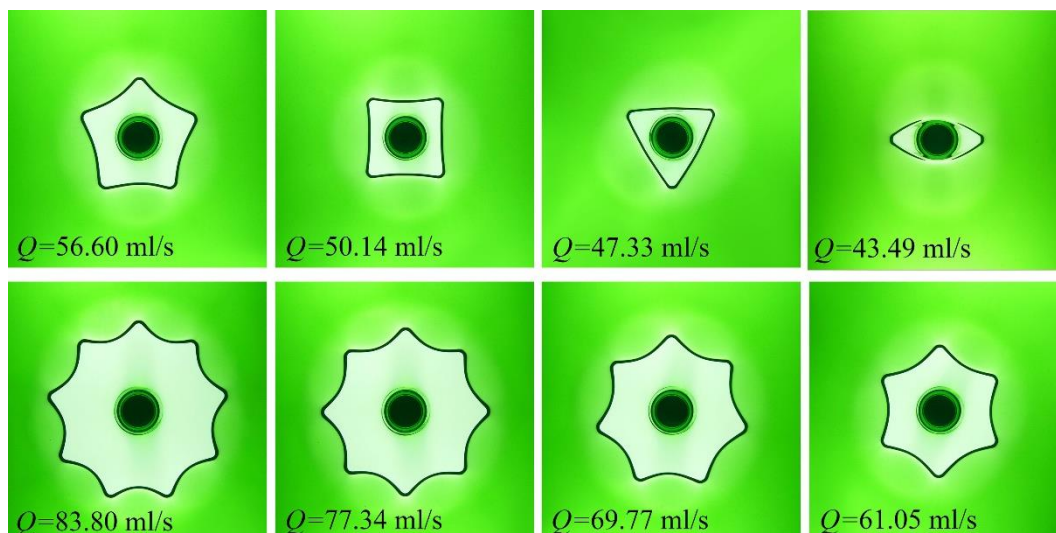
مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد با افزایش دبی حجمی، اندازه یک پرش چندضلعی بدون تغییر در تعداد اضلاع تا حد خاصی گسترش می‌یابد که به آن حد بالای ناحیه ماندگاری می‌گوییم. همچنین با کاهش دبی، پرش چندضلعی تا یک اندازه‌ی مشخص کاهش اندازه خواهد داد که این ناحیه را حد پایین ناحیه ماندگاری می‌نامیم. شکل (۷-الف)، ناحیه‌ی ماندگاری را به ترتیب برای پرش‌هایی با چهار، شش و هشت ضلع نشان می‌دهد. همان طور که در تصاویر به شکل کیفی مشاهده می‌شود با افزایش دبی، ابعاد پرش چندضلعی گسترش پیدا می‌کند. این خصوصیت نشان می‌دهد که اگر تعداد اضلاع ثابت باشد، پرش‌های چندضلعی رفتاری مشابه با پرش‌های دایروی خواهند داشت.

نتایج کمی مربوط به تأثیر دبی حجمی بر پرش‌های چهار، شش و هشت ضلعی نیز در شکل (۷-ب) نشان داده شده است. در این نمودارها شعاع متوسط پرش بر حسب دبی حجمی برای یک قطر جت و یک ارتفاع مانع ثابت ترسیم شده است. همان طور که دیده می‌شود، نمودارهای شکل (۷-ب) نتایج کیفی را به وضوح تأیید می‌کنند.

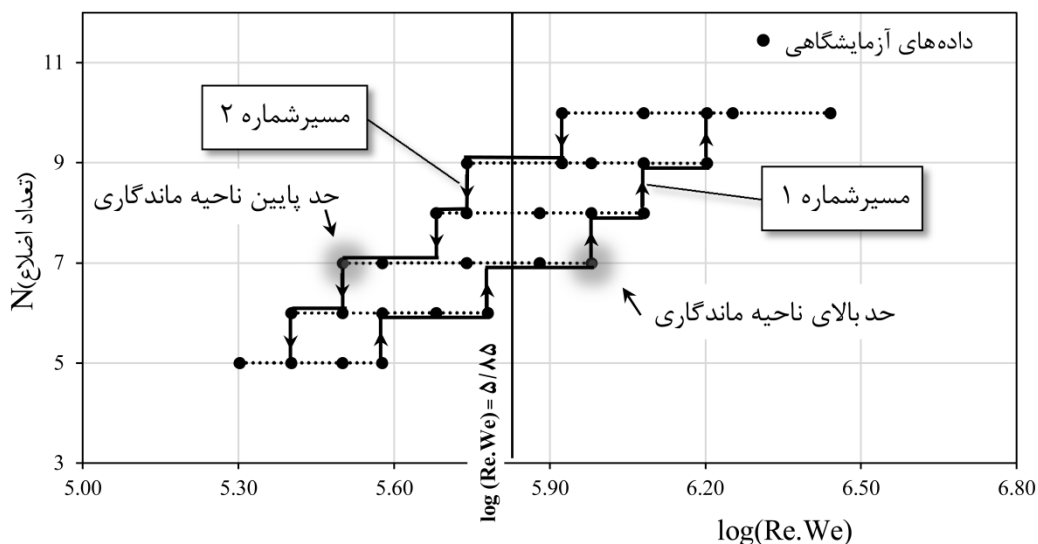
با افزایش دبی حجمی پرش چندضلعی تا حد بالای ناحیه ماندگاری تعداد اضلاع ثابتی دارد؛ اما اگر دبی حجمی باز هم افزایش یابد تعداد اضلاع پرش تغییر کرده و پرش چندضلعی به پرشی با یک ضلع بیشتر تغییر وضعیت می‌دهد. به طور مشابه با کاهش دبی، یک پرش چندضلعی پس از رسیدن به حد پایین ناحیه ماندگاری خود، به پرشی با تعداد اضلاع کمتر تبدیل خواهد شد. در شکل (۸) تأثیر افزایش دبی بر تعداد اضلاع پرش‌های چندضلعی پایدار نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش دبی حجمی، پرش هیدرولیکی از یک دو ضلعی تا یک نه ضلعی تغییر کرده است.



شکل ۷- تأثیر افزایش دبی بر شعاع متوسط پرش‌های چندضلعی پایدار در ناحیه ماندگاری برای ارتفاع مانع $h_{\text{مانع}}=0/30$ cm برای ۴ ضلعی و $h_{\text{مانع}}=0/25$ cm برای ۶ و ۸ ضلعی) و قطر جت ثابت ($2a=1/03$ cm؛ الف) نتایج کیفی و ب) نتایج کمی.



شکل ۸- تأثیر تغییر دبی بر تعداد اضلاع پرش هیدرولیکی چندضلعی پایدار ($h_{\text{مانع}}=0/30\text{ cm}$ و $2a=1/03\text{ cm}$)؛ (بزرگ‌نمایی تصاویر یکسان است)



شکل ۹- نمایش وابستگی تعداد اضلاع و ناحیه ماندگاری پرش‌های چندضلعی پایدار به حاصل ضرب اعداد رینولدز $Re=Q/av$ و وبر $We=\rho Q^2/\sigma H_{\infty}^3$ ؛ خط‌چین‌های افقی ناحیه ماندگاری را نشان می‌دهد. مسیر شماره ۱ روند افزایش دبی حجمی و مسیر شماره ۲ مسیر کاهش دبی حجمی را نمایش می‌دهند. ($h_{\text{مانع}}=0/25\text{ cm}$ و $2a=0/69\text{ cm}$)

شکل (۹) وابستگی تعداد اضلاع و ناحیه ماندگاری پرش‌های چندضلعی پایدار را به حاصل ضرب اعداد رینولدز^۱ جت ($Re=Q/av$) و وبر^۲ ($We=\rho Q^2/\sigma H_{\infty}^3$)، برای لوله‌ی نازلی با قطر $2a=0/69\text{ cm}$ و مانعی با ارتفاع $h_{\text{مانع}}=0/25\text{ cm}$ نشان می‌دهد. در این نمودار هر خط‌چین افقی نشان‌دهنده‌ی ناحیه‌ی ماندگاری پرش چندضلعی با تعداد اضلاع معین است. همچنین حدهای بالا و پایین ناحیه ماندگاری پرش هفت ضلعی نیز در نمودار مشخص گردیده است.

^۱Reynolds

^۲Weber

بر طبق نتایج تجربی نمودار شکل (۹)، حد پایین ناحیه‌ی ماندگاری در یک چندضلعی از حد بالای ناحیه‌ی ماندگاری در پرشی با یک ضلع کمتر، کوچک‌تر است و همین موضوع باعث می‌شود تا نواحی ماندگاری پرش‌های چندضلعی با یکدیگر تداخل داشته باشند. این تداخل نشان می‌دهد که در یک رژیم ثابت جریان، امکان تشکیل پرش‌هایی با تعداد اضلاع مختلف متوالی وجود خواهد داشت. رژیم ثابت جریان به معنی آن است که تمام پارامترهای حاکم بر مسئله، از جمله دبی حجمی، ارتفاع پایین دست، قطر جت، نوع سیال و ... ثابت و بدون تغییر باشد. به همین دلیل هر خط فرضی عمودی که در نمودار شکل (۹) ترسیم شود، نشان‌دهنده‌ی یک رژیم ثابت جریان خواهد بود. برای درک بهتر، خط عمودی $\log(We.Re)=5/85$ به عنوان نمونه در این نمودار ترسیم شده است. با استفاده از این خط می‌توان دریافت که در این رژیم جریان امکان تشکیل پرش‌هایی با تعداد اضلاع ۷، ۸ و ۹ ضلع وجود دارد.

نکته‌ی دیگری که نمودار شکل (۹) نشان می‌دهد، نحوه‌ی افزایش تعداد اضلاع بر اثر افزایش دبی حجمی جریان است. مسیر پلکانی شماره ۱ ترسیم شده در شکل این روند را به شکل شماتیک نمایش می‌دهد. با افزایش دبی حجمی، رفتار پرش در جهت مسیر ترسیم شده تغییر خواهد کرد و همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد با افزایش دبی تعداد اضلاع پرش افزایش خواهد یافت. این افزایش تعداد اضلاع با ماندن هر چندضلعی، در بخشی از ناحیه‌ی ماندگاری خود همراه می‌شود و به این صورت روند افزایشی تعداد اضلاع ادامه می‌یابد. با افزایش آرام و تدریجی دبی حجمی، این روند و مسیر نشان داده شده، همواره با عبور از حد بالای ناحیه‌ی ماندگاری هر پرش چندضلعی طی خواهد شد و افزایش در تعداد اضلاع همیشه در این محدوده به وقوع خواهد پیوست. این در حالی است که با کاهش دبی حجمی، روند یا مسیر کاهش تعداد اضلاع، دیگر آن روند یا مسیری نخواهد بود که در حالت افزایش دبی نشان داده شد؛ بلکه در این شرایط با کاهش دبی حجمی، کاهش تعداد اضلاع در محدوده‌ی حدهای پایین ناحیه‌های ماندگاری رخ خواهد داد. مسیر پلکانی شماره ۲ در شکل (۹) نحوه‌ی کاهش تعداد اضلاع را در حالتی که دبی به آرامی در حال کاهش است، به صورت شماتیک نشان می‌دهد. متفاوت بودن رفتار پرش‌های چندضلعی در وضعیتی که دبی در حال کاهش است با حالتی که دبی در حال افزایش است، خصوصیتی است که می‌توان از آن به عنوان یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد در این نوع پرش‌ها نام برد.

۳-۳- تأثیر ارتفاع پایین دست در پرش هیدرولیکی چندضلعی پایدار

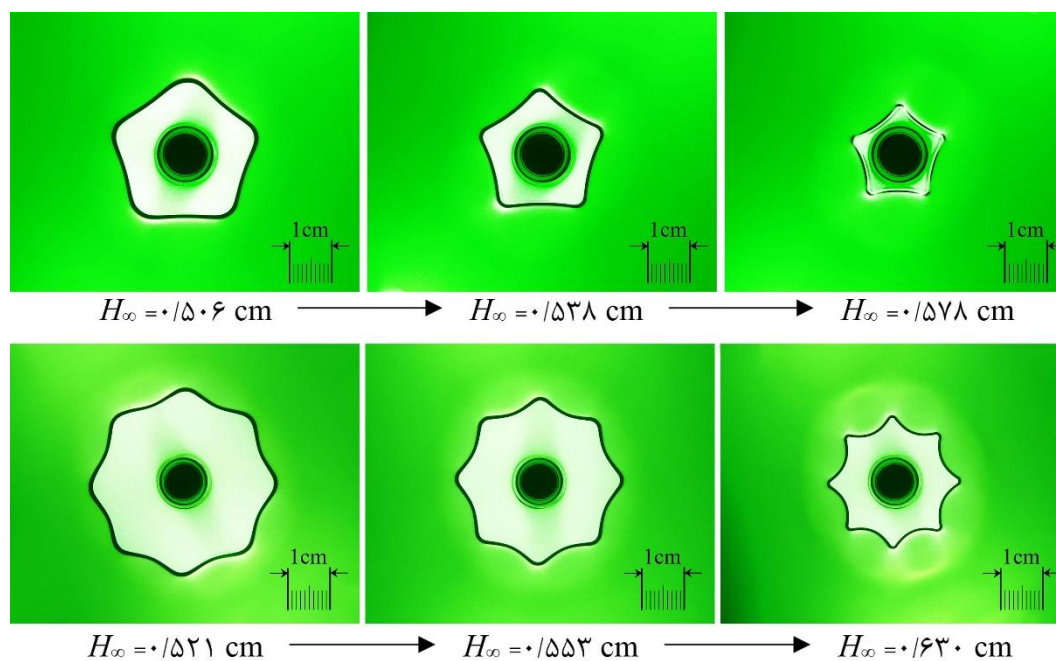
پارامتر دیگری که در ثبات و پایداری پرش و نیز در شکل و ساختار آن نقش دارد، ارتفاع پایین دست پرش هیدرولیکی است. همان طور که می‌دانیم منظور از پایین دست پرش، محلی است که جریان پس از عبور از پرش هیدرولیکی به آن جا می‌رسد و ارتفاع یا عمق پایین دست پرش به فاصله‌ی سطح آزاد سیال در این قسمت تا صفحه زیرین آن گفته می‌شود.

ارتفاع پایین دست با ایجاد نیروی فشاری لازم، شرایط را برای ایجاد پرش هیدرولیکی مهیا می‌سازد. همان‌گونه که در توضیح دستگاه آزمایش بیان شد، تنظیم این ارتفاع به کمک مانع‌های حلقوی قرارگرفته بر روی صفحه هدف انجام می‌پذیرد. مشاهدات نشان می‌دهند اگر هیچ مانعی در پایین دست وجود نداشته باشد یا حتی در صورت وجود ارتفاع لازم را نداشته باشد، به هیچ عنوان یک پرش هیدرولیکی غیردایرویی تشکیل

نخواهد شد و در این حالت امکان ایجاد و مشاهده‌ی پرشی به غیر از پرش دایروی اصولاً مهیا نخواهد بود؛ بنابراین نقش ارتفاع پایین‌دست که در اثر وجود مانع در پایین‌دست جریان به وجود می‌آید و توسط آن تنظیم می‌شود، یک نقش کلیدی و مهم در پرش‌های غیردایروی خصوصاً پرش‌های چندضلعی خواهد بود.

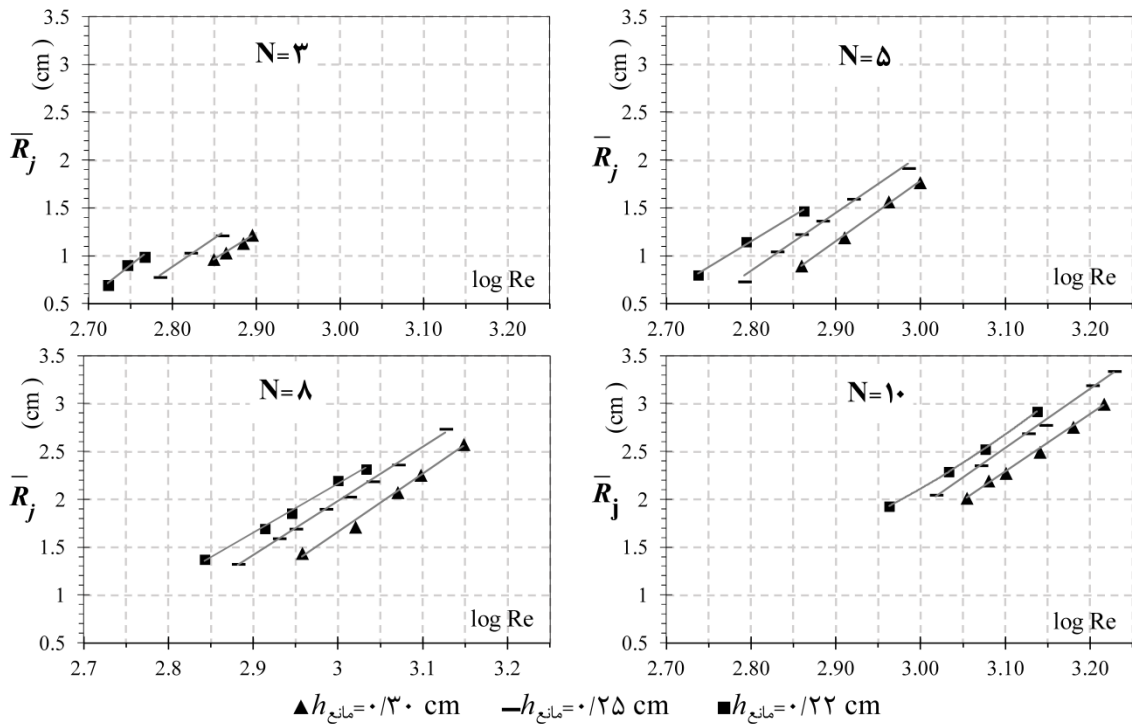
به طور کلی روند تغییرات در یک پرش چندضلعی که بر اثر تغییر ارتفاع پایین‌دست به وجود می‌آید، بسیار شبیه به روندی است که تغییر دبی می‌تواند در آن ایجاد کند. در شکل (۱۰) پرش‌هایی با ۵ و ۸ ضلع در سه ارتفاع پایین‌دست مختلف برای نازلی با قطر $2a=1/0.3$ cm نشان داده شده است. در هر چندضلعی دبی حجمی جریان ثابت بوده و فقط ارتفاع پایین‌دست افزایش یافته است. همان طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع پایین‌دست مساحت ناحیه‌ی محصور در پرش کاهش پیدا کرده که در نتیجه‌ی آن اندازه‌ی پرش چندضلعی کوچک‌تر شده است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عمق پایین‌دست، چندضلعی از لحاظ شکل ظاهری نیز تا حدودی تغییر می‌کند. به صورتی که گوشه‌های چندضلعی که در ارتفاع پایین‌دست کم، تورفتگی و نوک‌تیزی کمی دارند، در ارتفاع پایین‌دست زیاد، نوک‌تیزتر شده و تورفتگی آن‌ها بیشتر می‌شود. اضلاع چندضلعی نیز با افزایش ارتفاع پایین‌دست تغییر حالت داده و انحناء آن‌ها به سمت داخل چندضلعی زیادتر می‌گردد.

برای بررسی تأثیر ارتفاع پایین‌دست بر شعاع میانگین پرش، نمودارهای شکل (۱۱) بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است. شکل (۱۱) تغییرات شعاع میانگین پرش‌های چندضلعی پایدار را بر حسب عدد رینولدز به ازای سه مانع با ارتفاع‌های $h_{\text{مانع}}=0/30, 0/25, 0/22$ cm برای چهار پرش چندضلعی متفاوت در ناحیه ماندگاری‌شان نشان می‌دهد. همان طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع مانع، شعاع میانگین پرش برای تمام چندضلعی‌ها کاهش می‌یابد و این روند وابسته به تعداد اضلاع نخواهد بود.



شکل ۱۰- تأثیر افزایش ارتفاع پایین‌دست بر شکل پرش‌های چندضلعی پایدار با پنج و هشت ضلع

به ترتیب در دبی حجمی ثابت $Q=44/66$ ml/s و $Q=65/16$ ml/s. ($2a=1/0.3$ cm)



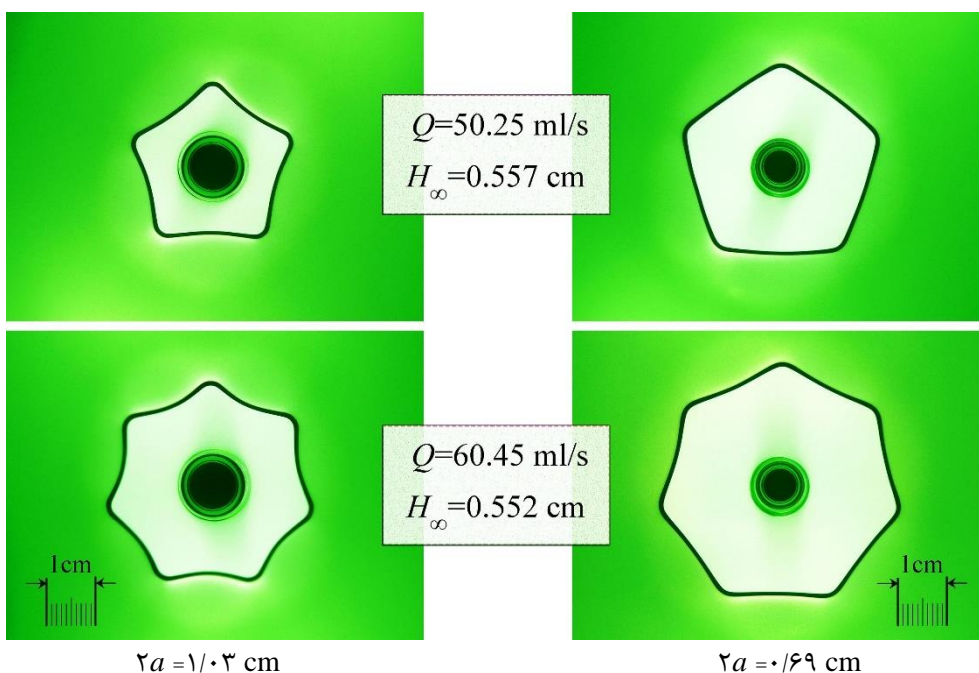
شکل ۱۱- نتایج آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع پایین دست بر شعاع متوسط پرش‌های چندضلعی پایدار در ناحیه‌ی ماندگاری بر حسب عدد رینولدز جت $Re=Q/av$ ، برای ۳ مانع مختلف. ($2a=1/0.3 \text{ cm}$)

در واقع با افزایش ارتفاع پایین دست، نیروی فشار هیدرواستاتیکی افزایش یافته و باعث می‌شود تا نیروی اینرسی سیال بالادست قادر به ثابت نگه داشتن محل پرش نباشد و به این ترتیب محل وقوع پرش به سمت داخل چندضلعی تغییر مکان می‌یابد.

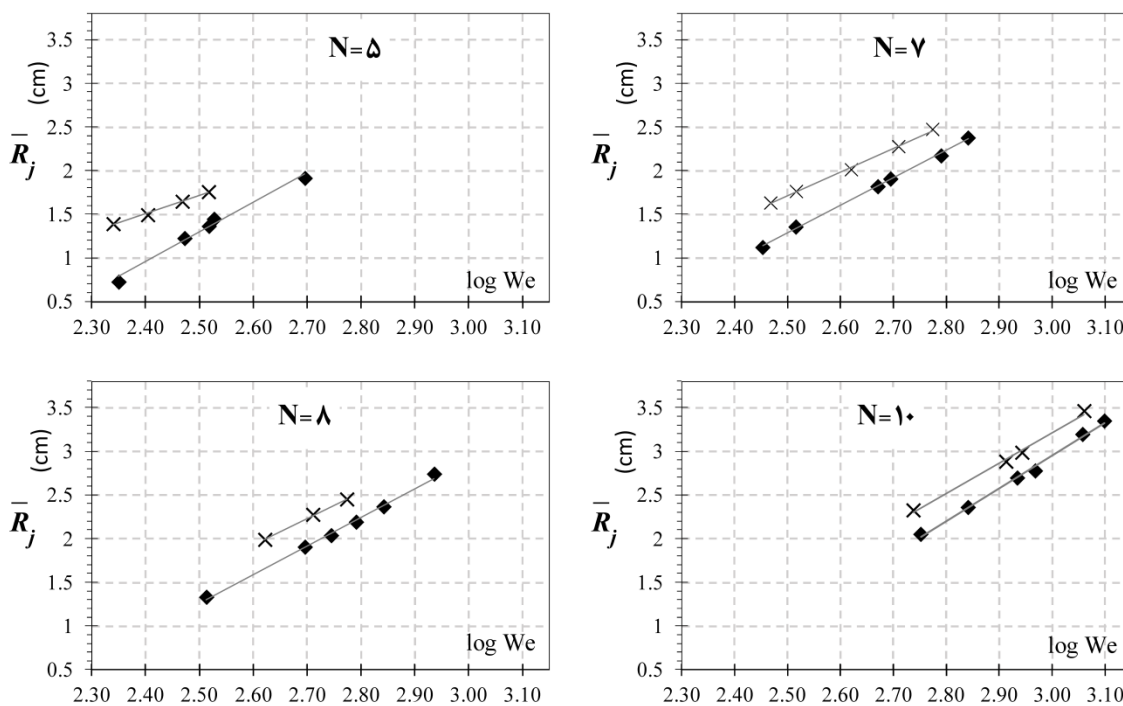
تأثیر دیگری که ارتفاع پایین دست بر پرش‌های چندضلعی پایدار می‌گذارد، تغییر در تعداد اضلاع پرش چندضلعی است. به طور کلی با افزایش ارتفاع پایین دست در یک دبی حجمی ثابت، تعداد اضلاع پرش چندضلعی با کاهش روبه‌رو خواهد شد تا در نهایت پرش هیدرولیکی بسته می‌شود. بسته شدن پرش به این معنی است که در این حالت دیگر هیچ پرشی تشکیل نمی‌شود؛ تقریباً مانند آنچه در برخورد جت سیال با یک ظرف عمیق و پر از مایع رخ می‌دهد.

۳-۴- تأثیر قطر جت بر پرش هیدرولیکی چندضلعی پایدار

تاکنون اثرات تغییر دبی حجمی و ارتفاع پایین دست بر پرش‌های چندضلعی پایدار بررسی شد. در این قسمت تأثیر تغییر قطر جت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۱۲) پرش‌هایی با ۵ و ۷ ضلع برای دو نازل با قطرهای 0.69 cm و 1.03 cm در دبی حجمی و ارتفاع پایین دست ثابت به صورت کیفی نشان داده شده است. با توجه به این تصاویر که نمونه‌هایی از مشاهدات صورت گرفته است، دو تفاوت مشخص در پرش‌های چندضلعی پایدار در نازل‌ها مختلف به چشم می‌خورد؛ اولین تفاوت این است که هر چقدر قطر جت کاهش می‌یابد، اندازه‌ی یک پرش چندضلعی افزایش پیدا می‌کند. این رفتار دقیقاً مشابه با تأثیر تغییر قطر بر یک پرش دایروی است.



شکل ۱۲- تأثیر تغییر قطر بر پخش‌هایی با ۵ و ۷ ضلع برای نازل‌هایی با قطرهای $\gamma a = ۱/۰۳$ cm و $\gamma a = ۰/۶۹$ cm در دبی حجمی و ارتفاع پایین‌دست ثابت.



شکل ۱۳- نتایج آزمایشگاهی تأثیر قطر جت بر شعاع متوسط پخش‌های چندضلعی پایدار در ناحیه‌ی ماندگاری بر حسب عدد وبر $We = \rho Q^2 / \sigma H_\infty^3$ ، برای ۲ نازل با قطرهای $\gamma a = ۱/۰۳$ cm و $\gamma a = ۰/۶۹$ cm × (مانع $h = ۰/۲۵$ cm)

علت این رفتار نیز می‌تواند مربوط به تغییر سرعت سیال ورودی به صفحه‌ی هدف باشد؛ چرا که سرعت سیال با کاهش قطر جت، به دلیل ثابت بودن دبی حجمی، افزایش می‌یابد و در پی آن سرعت پخش سیال بر روی صفحه زیاد می‌گردد. این افزایش سرعت سیال در بالادست باعث می‌شود تا نیروی اینرسی سیال برای تعادل با نیروهای فشار هیدرواستاتیکی ناشی از عمق سیال پایین دست و همین طور نیروی کشش سطحی، قادر باشد محل وقوع پرش را به عقب رانده و باعث شود پرش در یک فاصله‌ی بیش‌تری از محل اصابت جت رخ دهد.

بررسی کمی تأثیر قطر جت بر شعاع میانگین پرش‌های چندضلعی پایدار در نمودار شکل (۱۳) ارائه شده است. در این نمودارها شعاع میانگین پرش بر حسب عدد و بر برای دو نازل با قطرهای مختلف نشان داده شده است. بر طبق این نتایج باید اظهار داشت که با کاهش قطر نازل، شعاع میانگین پرش برای تمام پرش‌های چندضلعی پایدار افزایش پیدا می‌کند.

تغییر دومی که کاهش قطر جت بر یک پرش چندضلعی با تعداد اضلاع ثابت ایجاد می‌کند، تغییر در شکل چندضلعی است. همان طور که در شکل (۱۲) مشاهده شد با کاهش قطر جت ورودی، انحناء ضلع‌های چندضلعی که برای جت قشورتر به سمت داخل چندضلعی متمایل است، کم شده و ضلع‌های چندضلعی رفته‌رفته به خط راست متمایل می‌شوند. بر طبق این رفتار می‌توان پیش‌بینی کرد با کاهش بیش‌تر قطر جت ورودی - که در این تحقیق امکان‌پذیر نبود - احتمالاً انحناء ضلع‌های پرش به سمت خارج چندضلعی تغییر کرده و در همین دبی حجمی و ارتفاع پایین دست ثابت، پرش چندضلعی پایدار به یک پرش دایروی با اندازه بزرگ‌تر تغییر وضعیت دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اصابت جت عمودی سیال به صفحه‌ی دایروی و افقی به صورت آزمایشگاهی برای سیال اتیلن گلیکول مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که مشاهده شد در این حالت پرش هیدرولیکی حاصل از تغییر ارتفاع ناگهانی سیال، بر خلاف گمان قبلی، می‌تواند به جای داشتن یک شکل دایروی با کمال شگفتی به صورت یک چندضلعی نمایان شود؛ در شرایطی که هندسه‌ی ایجاد پرش کاملاً و تماماً دایروی و متقارن محور است. نتایج نهایی مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها مربوط به تأثیر دبی حجمی، ارتفاع پایین دست و قطر جت بر پرش‌های چندضلعی پایدار به این ترتیب است؛

- در ارتفاع مانع و قطر جت ثابت، با افزایش دبی حجمی جریان تعداد اضلاع پرش رو به افزایش می‌رود.
- در ناحیه ماندگاری هر پرش چندضلعی با افزایش/کاهش دبی حجمی تغییری در تعداد اضلاع پرش رخ نمی‌دهد و فقط شعاع متوسط پرش افزایش/کاهش می‌یابد.
- با افزایش ارتفاع پایین دست در یک دبی حجمی و قطر جت ثابت، شعاع متوسط پرش چندضلعی کاهش می‌یابد و از تعداد اضلاع چندضلعی کاسته شده تا اینکه در نهایت پرش بسته می‌شود.
- با کاهش قطر جت برخوردی به صفحه در یک دبی حجمی و ارتفاع پایین دست ثابت، شعاع متوسط پرش به علت افزایش نیروی اینرسی بالادست افزایش پیدا می‌کند.

مراجع

- [1] Avedisian, C. T., and Zhao, Z., "The Circular Hydraulic Jump in Low Gravity", Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 456, pp. 2127-2151, (2000).
- [2] Kate, R. P., Das, P. K., and Chakraborty, S., "Investigation on Non-circular Hydraulic Jumps Formed Due to Obliquely Impinging Circular Liquid Jets", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, pp. 1429-1439, (2008).
- [3] Rayleigh, L., "On the Theory of Long Waves and Bores", Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Vol. 90, pp. 324-328, (1914).
- [4] Birkhoff, G., and Zarantonello, E. H., "*Jets, Wakes and Cavities*", Academic Press, New York, USA, (1957).
- [5] Watson, E. J., "The Radial Spread of a Liquid Jet over a Horizontal Plane", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 20, pp. 481-499, (1964).
- [6] Bouhadeh, M., "Étalement En Couche Mince D'un Jet Liquide Cylindrique Vertical Sur un Plan Horizontal", Z. Anagew. Math. Physics, Vol. 29, pp. 157-167, (1978).
- [7] Ishigai, S., Nakanishi, S., Mizuno, M., and Imamura, T., "Heat Transfer of the Impinging Round Water Jet in the Interference Zone of Film Flow Along the Wall", Bulletin of JSME, Vol. 20, pp. 85-92, (1977).
- [8] Nakoryakov, V. E., Pokusaev, B. G., and Troyan, E. N., "Impingement of an Axisymmetric Liquid Jet on a Barrier", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 21, pp. 1175-1184, (1978).
- [9] Olson, R., and Turkdogan, E., "Radial Spread of a Liquid Stream on a Horizontal Plate", Nature, Vol. 211, pp. 813-816, (1966).
- [10] Bush, J. W. M. and Aristoff, J. M., "The Influence of Surface Tension on the Circular Hydraulic Jumps", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 489, pp. 229-238, (2003).
- [11] Ellegaard, C., Hansen, A. E., Haaning, A., Hansen, K., Marcussen, A., Bohr, T., Hansen, J. L., and Watanabe, S., "Cover Illustration: Polygonal Hydraulic Jumps", Nonlinearity, Vol. 12, pp. 1-7, (1999).
- [12] Bush, J. W. M., Aristoff, J. M., and Hosoi, A. E., "An Experimental Investigation of the Stability of the Circular Hydraulic Jump", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 558, pp. 33-52, (2006).
- [۱۳] محسن مخلصی و علیرضا تیمورتاش، "بررسی تجربی ساختارهای پایدار و ناپایدار در پرش هیدرولیکی چندضلعی"، در نوبت چاپ، مجله علمی و پژوهشی شریف، دوره ۳-۳۰، شماره ۲، پاییز (۱۳۹۳).

[۱۴] محسن مخلصی و علیرضا تیمورتاش، "بررسی آزمایشگاهی ساختارهای چندضلعی در پرش هیدرولیکی ناشی از برخورد جت عمودی سیال لزج با صفحه افقی"، ارائه شده در بیست و یکمین همایش بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران (ISME2013)، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، (۱۳۹۲).

[۱۵] محسن مخلصی، "ایجاد و بررسی تجربی پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران، (۱۳۹۲).

[16] Passandideh-Fard, M., Teymourtash, A. R., and Khavari, M., "Numerical Study of Circular Hydraulic Jump using Volume-of-fluid Method", Journal of Fluids Engineering, Vol. 133, pp. 011401, (2011).

[۱۷] محسن مخلصی و علیرضا تیمورتاش، "بررسی آزمایشگاهی تبدیل جریان فوق بحرانی به زیربحرانی به شکل چندضلعی ثابت و متحرک"، ارائه شده در اولین کنفرانس ملی آیرودینامیک و هیدرودینامیک، پژوهشکده سازمان صنایع هوایی، تهران، ایران، (۱۳۹۱).

فهرست نمادهای انگلیسی

| | |
|-------------------|---|
| $2a$ | : قطر جت عمودی سیال |
| h | : ارتفاع نازل تا صفحه هدف |
| $h_{\text{مانع}}$ | : ارتفاع مانع در پایین دست |
| Q | : دبی حجمی |
| H_{∞} | : ارتفاع سیال پایین دست |
| R_1 | : شعاع دایره محاطی پرش هیدرولیکی چندضلعی |
| R_2 | : شعاع دایره محیطی پرش هیدرولیکی چندضلعی |
| \bar{R}_j | : شعاع متوسط پرش هیدرولیکی چندضلعی |
| N | : تعداد اضلاع پرش هیدرولیکی چندضلعی |
| Re | : عدد رینولدز جت ($Re=Q/av$) |
| We | : عدد وبر ($We=\rho Q^2/\sigma H_{\infty}^3$) |
| r_0 | : شعاع رسیدن لایه مرزی به سطح آزاد |
| $U(r)$ | : سرعت سطح آزاد جریان قبل از پرش |
| $h(r)$ | : ارتفاع سیال قبل از پرش |
| g | : شتاب گرانش |
| Bo | : عدد باند پرش |
| R_j | : شعاع پرش دایروی |

نمادهای یونانی

| | |
|---------------------|------------|
| چگالی سیال | : ρ |
| لزجت سینماتیکی سیال | : ν |
| کشش سطحی سیال | : σ |

Abstract

Polygonal hydraulic jump is caused by the impact of a vertical and circular viscous liquid jet on a solid horizontal surface. In this condition the hydraulic jump may formed as a stable symmetry polygonal shape. In the present study, this phenomenon is investigated experimentally. The effects of flow rate, downstream height and jet diameter on stable polygonal jumps are studied. The mean radius of polygonal jump is considered as a measurement scale. The results are presented in dimensionless form and the effects of mentioned parameters on mean radius of jump is obtained.