

بررسی آزمایشگاهی توزیع دما صفحه افقی تحت شار حرارتی ثابت ناشی از اصابت جت عمودی سیال و ایجاد پرش هیدرولیکی چندضلعی

محسن مخلصی

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه
فردوسی مشهد mohsenmokhlessi@gmail.com

محمدرضا مه‌پیکر

استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی
مشهد mahpeymr@um.ac.ir

علیرضا تیمورتاش

استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی
مشهد teymourtash@um.ac.ir

محمدباقر آیانی

دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی
مشهد mbayani@um.ac.ir

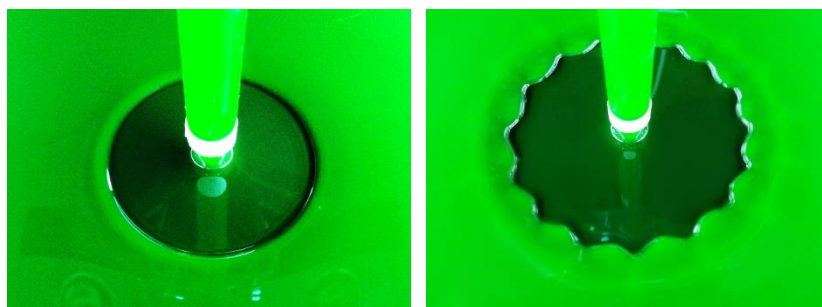
چکیده

در این تحقیق اصابت جت آرام عمودی سیال اتیلن گلیکول با دمای ثابت به صفحه افقی دایروی شکل (صفحه هدف) تحت شار حرارتی ثابت به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با قرار دادن یک مانع حلقوی با ارتفاع قابل تنظیم روی صفحه هدف و در پایین دست آن، پرش‌های هیدرولیکی چند ضلعی ایجاد می‌شود. توزیع دمای صفحه هدف برای پرش‌های هیدرولیکی چند ضلعی تحت تأثیر شار حرارتی ثابت بررسی خواهد شد. دمای صفحه تحت شار حرارتی ثابت توسط ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود. تغییرات ناگهانی دما در اضلاع و گوشه‌های پرش هیدرولیکی چند ضلعی بررسی و مقایسه خواهد شد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که توزیع دما در زوایای مختلف از نقطه اصابت جت متفاوت است و دمای صفحه در امتداد گوشه‌های پرش چند ضلعی پایین تر از نقاط دیگر بعد از پرش است؛ همچنین دما در ناحیه‌ای بعد از پرش هیدرولیکی که گردابه‌ی چسبیده به سطح قرار دارد به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: اصابت جت سیال، صفحه تحت شار حرارتی ثابت، پرش هیدرولیکی چندضلعی، اندازه‌گیری دما

۱- مقدمه

پخش لایه نازک سیال، به علت سرعت بالا و ضخامت کم، شیوه‌ای رایج برای ایجاد منطقه‌ای با نرخ انتقال حرارت بالا بین جت سیال و صفحه هدف است. این خصوصیت در خنک‌کاری بعضی اجزاء الکترونیکی، آینه‌های لیزری [۱] و همچنین در کاربردهای صنعتی مانند تولید شیشه و فلزات، خنک‌کاری توربین‌ها و غیره کاربرد دارد [۲]. زمانی که جت برخوردی به صفحه‌ای افقی، دایروی است، انتظار می‌رود پرش هیدرولیکی نیز به صورت یک پرش دایروی نمایان شود، اما پرش‌هایی وجود دارند که نه تنها شکل دایروی ندارند بلکه ممکن است به صورت یک چندضلعی ظاهر شوند؛ به این پدیده پرش هیدرولیکی چندضلعی یا غیردایروی می‌گویند. شکل ۱ نمونه‌ای از پرش‌های هیدرولیکی دایروی و چندضلعی در نشان داده شده است.



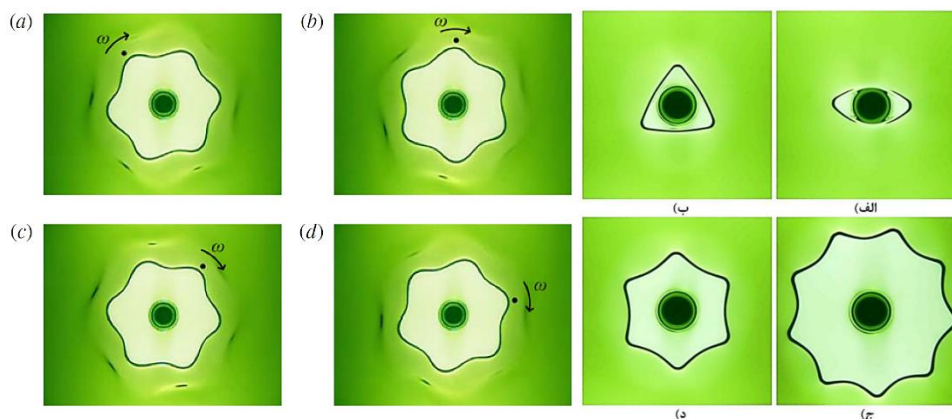
شکل (۱): پرش هیدرولیکی دایروی و چندضلعی ناشی از برخورد جت دایروی اتیلن گلیکول به صفحه هدف افقی حاصل از تحقیق حاضر.

اولین کسی که تأثیر لزجت را در مسئله پرش هیدرولیکی دایروی در نظر گرفت، واتسون در سال ۱۹۶۴ بود [۵]. واتسون در مقاله ارزشمند خود که بارها مورد مطالعه‌ی تجربی و عددی قرار گرفته است، با در نظر گرفتن تأثیر لزجت در پرش هیدرولیکی دایروی، تحلیل خود را بر مبنای تئوری اساسی لایه مرزی پرانتل ارائه کرد و جریان را بر حسب زیرلایه بلازیوس که در نزدیکی نقطه برخورد جت توسعه پیدا می‌کند و نیز یک حل تشابهی دوردست توصیف نمود. تئوری واتسون در مورد پرش هیدرولیکی دایروی پس از او بارها توسط محققان مختلف در سراسر دنیا مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته و فرضیات مورد نظر او ارزیابی گردیده است. از میان افراد زیادی که در این زمینه تحقیقاتی را انجام داده‌اند می‌توان به اولسون و تورکودوگان [۶]، ایشیگای و مکاران [۷]، ناکوریاکوف و همکاران [۸]، بوهادف [۹]، کریک و همکاران [۱۰]، اریکو [۱۱]، واسیستا [۱۲]، لیو و لینهارد [۱۳] و الگارد و همکاران [۱۴] اشاره کرد. تطابق میان تئوری واتسون و نتایج آزمایشگاهی در این تحقیقات مختلف بوده و تئوری تقریباً مورد تأیید قرار گرفته است. حتی خود واتسون نیز آزمایش‌هایی را در مورد تئوری خود انجام داده است که هم مطابقت خوب (به خصوص در مورد جریان آرام) و هم نه‌چندان خوب (جریان درهم) با تئوری خودش داشتند [۵]. مدل واتسون چیزی را در مورد جدایش جریان از سطح پیش‌بینی نمی‌کند، درحالی‌که آزمایش‌های دیگران از جمله کریک و همکاران [۱۰] و نیز لیو و لینهارد [۱۳] نشان از جدایش جریان پس از پرش دارد. لیو و لینهارد علت عدم تطابق تئوری واتسون را با بعضی آزمایش‌های در پروفیل سرعت پشت پرش می‌دانند. طبق نتایج آزمایشگاهی آن‌ها جریان درست بعد از پرش می‌تواند جدا شده و یک گردابه چسبیده به دیواره را ایجاد کند. این جدایش در نتیجه افزایش ناگهانی فشار هیدرواستاتیک در پرش است (که در تئوری واتسون از آن صرف‌نظر شده است). این اثر هنگامی که جریان پایین‌دست عمیق‌تر باشد، بدتر می‌شود [۱۳].

بر خلاف پرش‌های دایروی که سال‌هاست (بیش از یک قرن) مورد توجه محققان بوده و به جرأت می‌توان گفت به مسئله‌ای کاملاً شناخته‌شده تبدیل شده است، پرش‌های غیر دایروی و خصوصاً پرش‌های چندضلعی پدیده‌ای بدیع و نسبتاً جدید است. الگارد و همکارانش که در سال ۱۹۹۶ پرش هیدرولیکی دایروی را مورد آزمایش قرار داده و جدایش جریان را در آن مشاهده و گزارش کرده بودند [۲۰]، در سال ۱۹۹۸ برای اولین بار، پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی ناشی از برخورد جت عمودی سیال بر صفحه افقی را در آزمایش‌ها خود مشاهده کرده [۲۱] و در سال ۱۹۹۹ در مقاله‌ی خود آن‌ها را به همراه یک تحلیل مختصر ارائه دادند [۲۲]؛ این مقاله [۲۲] و پدیده‌ی پرش هیدرولیکی چندضلعی بود که بعدها بوش و همکاران [۲۳] در دانشگاه ام.آی.تی را واداشت تا در سال ۲۰۰۶ این موضوع را مورد مطالعه‌ی آزمایشگاهی دقیق‌تر قرار داده و مطالعات خود را برای رسیدن به نتایج بیشتر در این زمینه معطوف نمایند. آن‌ها با ارائه بحث جامعی در مورد پایداری پرش هیدرولیکی دایروی و تبدیل آن به شکل‌های مختلف چندضلعی توانستند علاوه بر فرم‌های چندضلعی ایستا - که قبلاً توسط الگارد و همکاران [۲۲] ارائه شده بود - فرم‌های پایدار جدیدی از پرش‌های غیر دایروی را که به صورت شبدری شکل در سیالات با لزجت بالاتر (حدود ۳۰ سانتی استوک) ظاهر می‌شود، کشف کنند [۲۳]. ایشان با ارائه‌ی نتایج آزمایشگاهی خود بر اساس اعداد بدون بعد، وابستگی تعداد اضلاع پرش چندضلعی را به قطر جت، ارتفاع پایین‌دست، لزجت سینماتیکی، کشش سطحی سیال و دبی جریان به دست آوردند.

مخلص‌ی و تیمورتاش [۲۴] در سال ۲۰۱۴ به بررسی آزمایشگاهی تأثیر دبی حجمی، ارتفاع پایین‌دست جریان و قطر جت بر پرش هیدرولیکی چندضلعی پرداختند (شکل ۲). نتایج آنان نشان می‌دهد که با افزایش و یا کاهش ارتفاع مانع در پایین‌دست تعداد اضلاع چندضلعی‌های تشکیل شده در دبی حجمی ثابت تغییر می‌کند؛ همچنین مطابق نتایج آزمایشگاهی آن‌ها، در دبی حجمی و ارتفاع پایین‌دست مشخص با کاهش قطر جت سیال می‌توان شعاع متوسط پرش هیدرولیکی را افزایش داد. در سال ۲۰۱۵ تیمورتاش و مخلص‌ی [۲۵] برای اولین بار پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی چرخشی را در آزمایش‌های خود مشاهده نمودند. آنان دریافتند که در شرایط خاصی از اعداد رینولدز و وبر، پرش هیدرولیکی چندضلعی، ظاهری چرخشی به خود گرفته که به علت ایجاد موج سطحی در محل پرش می‌باشد. آن‌ها اثر دبی حجمی، قطر جت و ارتفاع مانع در پایین‌دست پرش را بر تشکیل چندضلعی‌ها و سرعت زاویه‌ای آن‌ها مورد بررسی قرار دادند (شکل ۲).

بررسی تحقیقات گذشته در خصوص پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی نشان می‌دهد که این تحقیقات به حوزه‌ی مکانیک سیالات پدیده محدود بوده و در زمینه‌ی انتقال حرارت، مطالعاتی انجام نگرفته است؛ به همین منظور در این تحقیق سعی می‌شود تأثیر پرش هیدرولیکی چندضلعی بر صفحه حرارتی شار ثابت و تعیین توزیع دمای صفحه در این پدیده به صورت



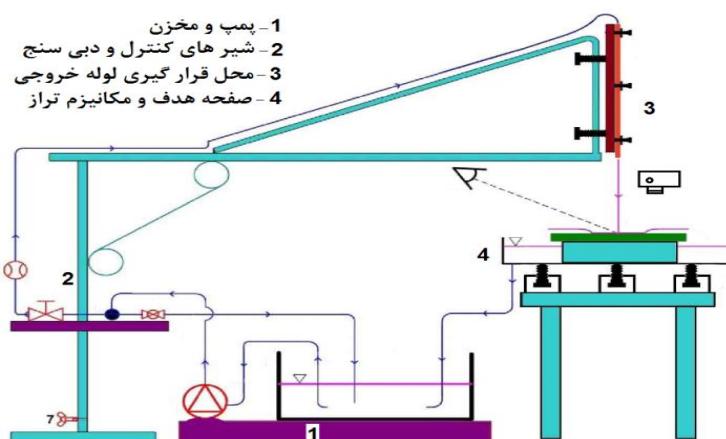
شکل (۲): (الف-د) پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی ثابت، (a-d) چندضلعی چرخشی در فواصل زمانی ۰/۵ ثانیه، تیمورتاش و مخلص [۲۴ و ۲۵]

آزمایشگاهی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. به این منظور با طراحی و تجهیز دستگاه آزمایش موجود در آزمایشگاه مکانیک سیالات دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، شکل‌های مختلف در پرش‌های چندضلعی به‌وسیله‌ی این دستگاه ایجاد شده و با اندازه‌گیری عوامل حاکم بر پدیده، تأثیر این عوامل بر روی این نوع پرش‌ها مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

۲- دستگاه آزمایش

در شکل ۳ نمایی از دستگاه آزمایش نشان داده شده است. دستگاه آزمایش شامل یک مخزن برای نگهداری سیال اتیلن گلیکول، یک عدد پمپ برای پمپاژ سیال، پایه‌های نگهدارنده، لوله‌هایی با قطرهای مختلف برای تنظیم اندازه قطر جت سیال، صفحه‌ی هدف دایروی، مخزن سرریز، مکانیزم‌های ترازبندی افقی و عمودی، مکانیزم‌های نوردهی و تصویربرداری، دبی‌سنج، ابزار اندازه‌گیری ارتفاع سیال (ارتفاع-سنج سوزنی)، کولیس دیجیتالی و دماسنج می‌باشد.

بخش اول دستگاه شامل یک مخزن اصلی است. سیال از داخل این مخزن توسط پمپ مکیده می‌شود و پس از پمپاژ، از مسیر آزمایش عبور کرده و در نهایت به مخزن باز می‌گردد. برای پمپاژ سیال از پمپ سانتریفیوژ PKM60 با توان نیم اسب بخار و دور چرخشی نامی ۲۸۵۰ دور در دقیقه استفاده شده است. دبی جریان در بازه‌ی $0-200 \text{ ml.s}^{-1}$ تغییر می‌کند که توسط تجهیزات مذکور امکان تغییرات خیلی جزئی آن فراهم است. لوله شیشه‌ای عمودی با طول حدود مناسب برای ایجاد یک جت سیال دایروی و کاملاً توسعه‌یافته، بکار رفته است. با ایجاد انحناء مناسب در لبه خروجی لوله شیشه‌ای از هرگونه ایجاد بی‌نظمی در جریان خروجی از لوله جلوگیری شده است.



شکل (۳): شماتیک دستگاه آزمایش

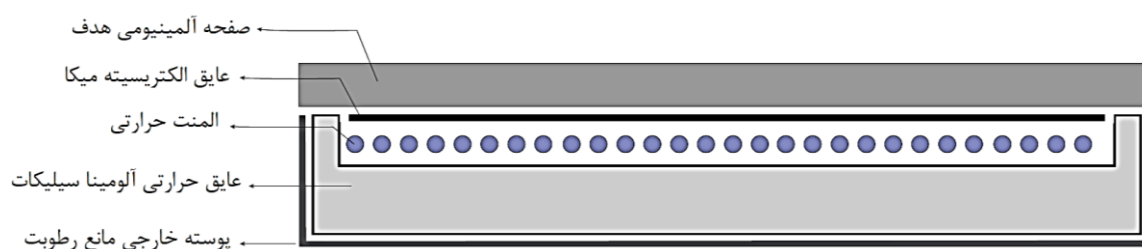
چندین مانع حلقوی با ضخامت‌های مختلف برای ایجاد عمق مورد نیاز در پایین‌دست وجود دارد که بر روی صفحه‌ی هدف قرار می‌گیرند. صفحه‌ی هدف داخل یک ظرف سرریز قرار دارد. به این صورت سیال از روی صفحه‌ی هدف به این مخزن می‌ریزد و از خروجی آن به سمت مخزن اصلی یا در صورت نیاز به سمت دبی سنج هدایت می‌شود. خروجی ظرف سرریز با استفاده از یک سه راهی به مخزن اصلی و دبی‌سنج متصل شده است. خروجی پمپ نیز پس از اتصال به شیرهای کنترل دبی، به وسیله‌ی یک شلنگ به ابتدای لوله‌ی شیشه‌ای عمودی متصل می‌شود.

سه پایه‌ی نگه‌دارنده‌ی تنظیم‌پذیر در زیر ظرف سرریز قرار دارد. از این سه پایه برای تراز نمودن صفحه‌ی هدف استفاده می‌شود. در هر پایه یک پیچ فولادی تعبیه شده است تا با پیچاندن آن، ارتفاع پایه برای ایجاد سطحی افقی قابل تغییر باشد. برای اندازه‌گیری دبی از یک دبی‌سنج مخزنی با خطای نسبی 0.14% درصد استفاده شده است. یک ارتفاع‌سنج سوزنی برای اندازه‌گیری ارتفاع یا عمق سیال در پایین‌دست پرش وجود دارد. دقت کولیس دیجیتالی به کار رفته در مکانیزم اندازه‌گیری ارتفاع سیال 0.1 mm است. یک پایه‌ی صلب نیز برای ثابت نگه‌داشتن کولیس وجود دارد. به منظور اندازه‌گیری مشخصات ابعادی پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی با مدرج کردن صفحه هدف اقدام به ثبت ابعاد می‌شود. در شکل ۴ شماتیک دو بعدی صفحه حرارتی شار ثابت نشان داده شده است. از یک صفحه دایروی آلومینیومی با ضخامت 10 mm و قطر 450 mm برای صفحه‌ی هدف استفاده شده است. ساخت دیسک آلومینیومی توسط ماشین فرز CNC با نقشه مشخص انجام گرفته است.

منبع حرارتی به وسیله سیم المنت حرارتی نیکروم ایجاد می‌شود که به منبع الکتریکی متصل است. سیم المنت به صورت رفت و برگشتی در زیر دیسک آلومینیومی تعبیه می‌شود. بین سیم المنت رفت‌وبرگشتی از چسب سیلیکون برای پایداری سیم و همچنین افزایش ضریب انتقال حرارت استفاده شده است. همچنین بین دیسک آلومینیومی و سیم المنت از یک لایه ورق میکا به ضخامت 1 mm برای اتصال الکتریکی بین سیم و دیسک قطع شود.

منبع الکتریکی توسط یک دیمر کاهنده ولتاژ، ولتاژ متغیر $0-220\text{ V}$ ولت را به دو سر سیم المنت اعمال می‌کند. قطر محدوده سیم المنت 350 mm میلی‌متر است. توان سیم المنت حداکثر به 850 W وات می‌رسد. در زیر المنت دو لایه ورق برد نسوز سرامیکی آلومینا سیلیکات با ضخامت 25 mm میلی‌متری به کار رفته است تا از انتقال حرارت به سمت پایین جلوگیری شود. مجموعه المنت و عایق حرارتی داخل پوسته خارجی مانع رطوبت از جنس آلومینیوم قرار می‌گیرد.

به منظور ایجاد جت سیال با دمای ثابت از یک دستگاه مبدل حرارتی متصل به فن 12 V ولت دور متغیر استفاده شده است. دمای سیال قبل از ورودی به نازل توسط یک عدد ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری می‌شود. دور فن مبدل از طریق میکروکنترلر و درایو موتور تنظیم می‌شود. برای اندازه‌گیری دمای سطح صفحه حرارتی شار ثابت از یک عدد ترموکوپل نوع K استفاده شده است. این ترموکوپل با سیم‌های به قطر 0.4 mm میلی‌متر توسط مکانیزم نگه‌دارنده روی صفحه هدف قرار می‌گیرد. نوک ترموکوپل با اتصال به سطح صفحه هدف، دمای آن را اندازه‌گیری می‌کند. برای نمایش دما از یک عدد دیتالاگر چهار کاناله با دقت اندازه‌گیری $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ درجه سلسیوس استفاده شده است. برای اندازه‌گیری توان حرارتی از ماژول‌های آمپر متر و ولت‌متر برق AC متصل به میکروکنترلر در مسیر تغذیه برق سیم المنت استفاده شده است. با اتصال میکروکنترلر به کامپیوتر توان لحظه‌ای قابل ثبت است.



شکل (۴): شماتیک صفحه حرارتی شار ثابت

۳- تحلیل نتایج آزمایشگاهی

در این بخش نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق ارائه و تحلیل می‌شود. مطالب این بخش شامل نتایج آزمایش‌هایی است که تأثیر پرش‌های هیدرولیکی دایروی و چندضلعی بر توزیع دما صفحه تحت شار حرارتی ثابت بررسی می‌کند. مقادیر لزجت، چگالی و کشش سطحی سیال مربوط به اتیلن گلیکول نیز در دمای 25°C با استفاده از مرجع [۲۶] به ترتیب $\rho=1111 \text{ g/cm}^3$, $\sigma=47/5 \text{ dyn/cm}$, $k=0/25 \text{ W/m.k}$ و $C_p=2400 \text{ J/kg.c}$ است. در این مقاله برای صحت سنجی نتایج حرارتی به دست آمده از آزمایش‌های انجام‌شده، مقایسه‌ای بین نتایج پرش‌های دایروی به دست آمده با روابط ارائه شده توسط لیو و همکاران [۱۷] و همچنین ژائو و ما [۱۸] صورت می‌گیرد. برای مقایسه نتایج از عدد ناسلت محلی استفاده شده است. ناسلت محلی مطابق با دمای جت در مراجع به صورت زیر تعریف می‌شود؛

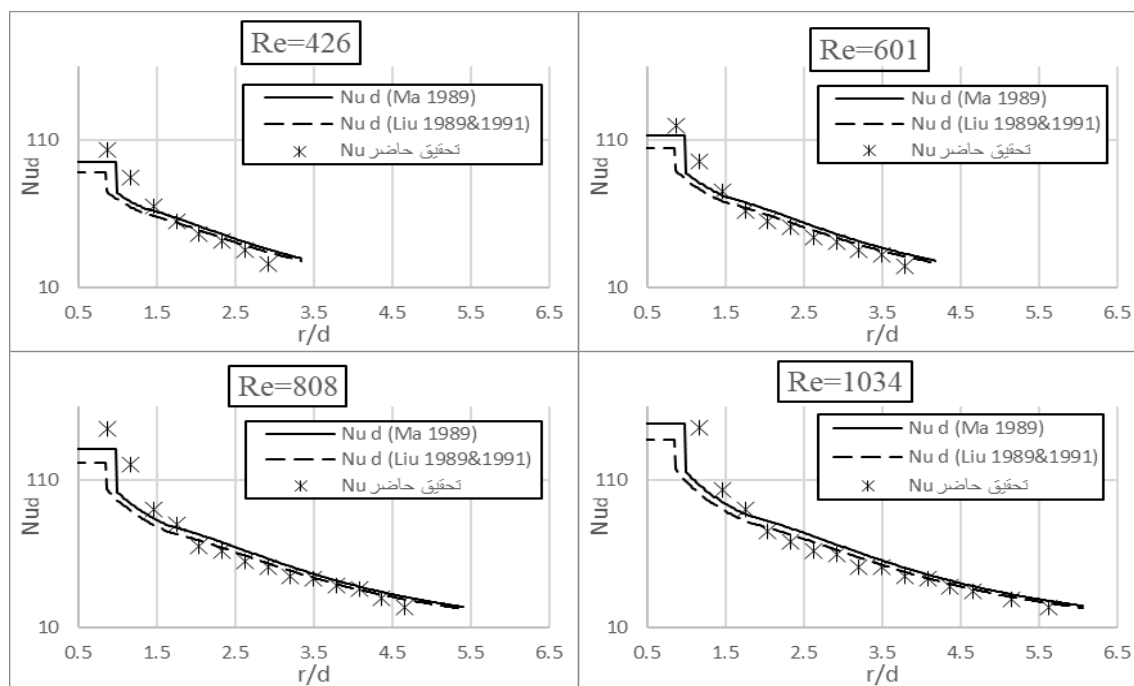
$$Nu_d = \frac{q'' \cdot d}{k(T_s - T_{in})} \quad (11)$$

که در آن q'' شار حرارتی ثابت است که بر صفحه هدف اعمال می‌شود؛ d قطر جت خروجی از نازل شیشه‌ای است که با فاصله یک سانتی‌متر در بالای صفحه هدف قرار دارد؛ k ضریب هدایت حرارتی سیال است؛ T_{in} و T_s نیز به ترتیب دمای سطح صفحه هدف و دمای جت ورودی می‌باشد. طبق روابط مربوط به پیش‌بینی ناسلت محلی صفحه هدف تحت شار حرارتی ثابت لیو و همکاران [۱۷] و همچنین ژائو و ما [۱۸]، میدان‌های حرارتی را به چهار ناحیه جریان لامینار تقسیم می‌شوند. در شکل ۵ مقایسه‌ای بین نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر برای اصابات جت سیال اتیلن گلیکول به صفحه تحت شار حرارتی ثابت با روابط ارائه شده توسط لیو و همکاران [۱۷] و همچنین ژائو و ما [۱۸] نشان داده شده است. قطر جت در این آزمایش‌ها $a=10.3 \text{ mm}$ است. با توجه به اینکه روابط لیو و همکاران [۱۷] و همچنین ژائو و ما [۱۸] مربوط به جریان فوق بحرانی است که تا قبل از پرش وجود دارد، مقایسه صورت گرفته برای این ناحیه از جریان انجام‌شده است. نمودارهای مقایسه‌ای برای شش رینولدز مختلف انجام‌شده است. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۵ نشان می‌دهد تطابق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی حاضر و روابط ارائه شده توسط لیو و همکاران [۱۷] و همچنین ژائو و ما [۱۸] وجود دارد.

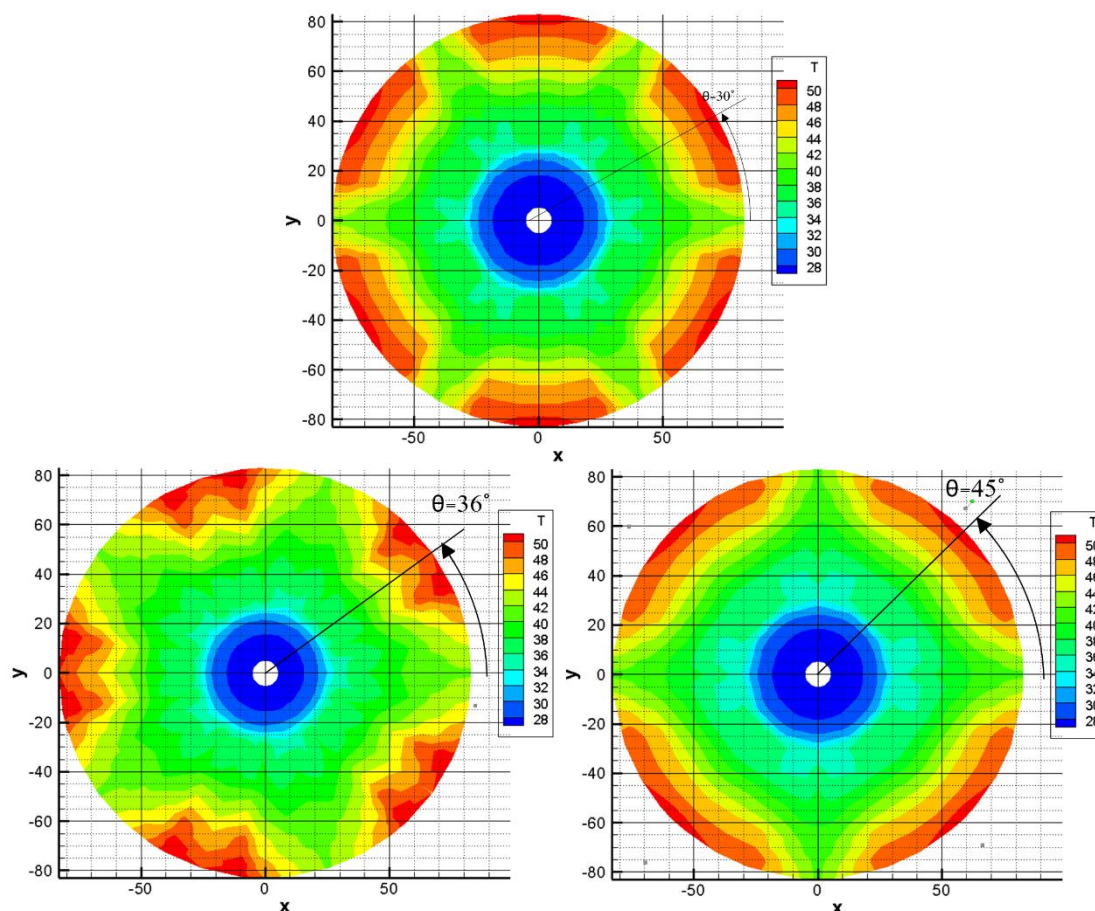
هدف اصلی پژوهش مشاهده تأثیر پرش چندضلعی بر صفحه تحت شار ثابت است. به همین منظور در شکل ۶ کانتور دمای سطح صفحه هدف تحت شار حرارتی ثابت نشان داده شده است که در معرض پرش هیدرولیکی‌های چهار، پنج و شش ضلعی قرار دارد. شار گرمایی از سطح صفحه $3450 \text{ وات بر مترمربع}$ است و قطر جت 10 میلی‌متر ، دمای جت سیال خروجی از نازل 25°C درجه سانتی‌گراد، دمای هوای اتاق 25°C درجه سانتی‌گراد و ارتفاع مانع در پایین‌دست $3/35 \text{ میلی‌متر}$ در نظر گرفته شده است. اندازه‌گیری‌های دما برای چهار، پنج و شش ضلعی، به ترتیب در 30 ، 36 ، 45 و 30 درجه از پرش انجام‌شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع دما دقیقاً از تعداد اضلاع پرش هیدرولیکی پیروی کرده و به صورت یک چندضلعی حرارتی خود را نشان می‌دهد. همان‌طور که تیمورتاش و مخلص [۲۵] گزارش کردند سرعت سیال بعد از پرش در گوشه‌های پرش هیدرولیکی بیشتر از نواحی دیگر است که این توزیع سرعت مستقیماً روی ضریب انتقال حرارت همرفت جریان اثر می‌گذارد.

تأثیر پرش چندضلعی بر توزیع دمای صفحه تحت شار حرارتی ثابت نشان می‌دهد سرعت کم سیال در نواحی بین دو گوشه‌ی پرش، باعث افزایش دمای این نواحی می‌شود؛ همان‌طور که کانتورهای شکل ۷ نشان می‌دهد اختلاف دمای سطح در راستای زاویه‌ای در شعاع حدود 80 میلی‌متری به حدود 10 درجه سلسیوس می‌رسد.



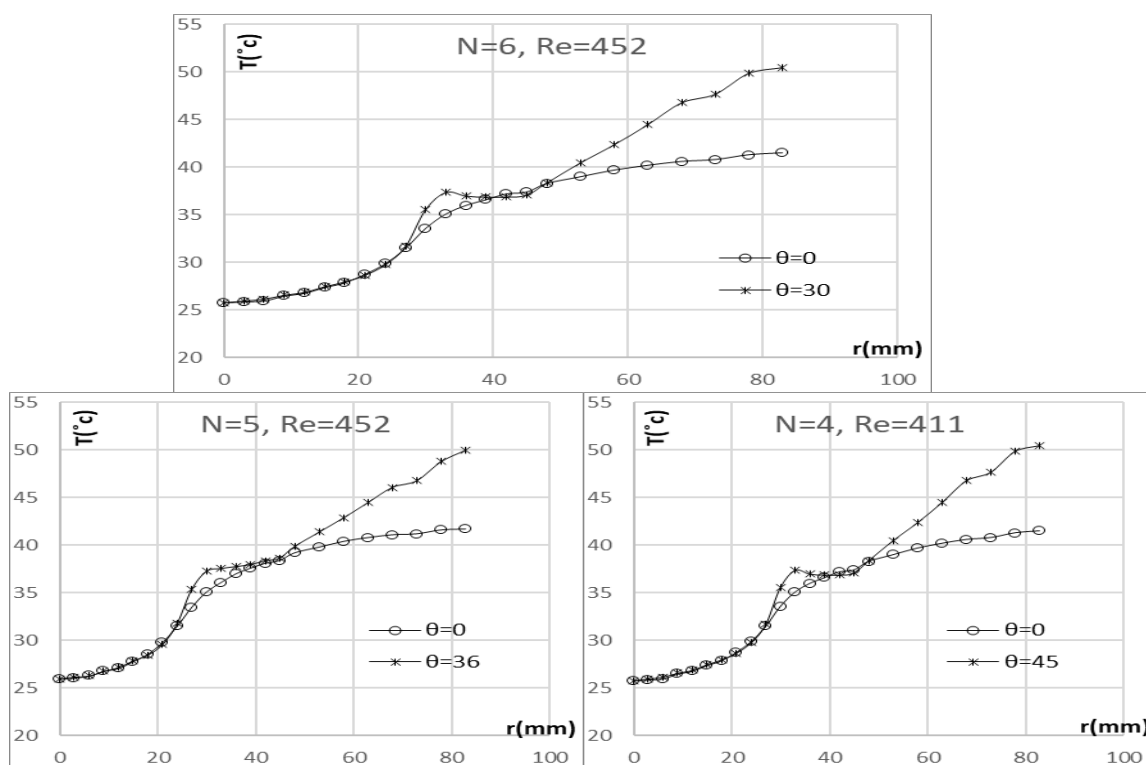
شکل (۵): مقایسه ناسلت محلی نتایج آزمایشگاهی حاضر با روابط لیو و همکاران [۱۷] و همچنین ژائو و ما [۱۸]. سیال اتیلن گلیکول، قطر جت ۱۰/۳ mm و $q''=3450 \text{ W/m}^2$ است.



شکل (۶): کانتور دمای سطح صفحه هدف تحت شار حرارتی ثابت ۳۴۵۰ وات بر مترمربع و قطر جت ۱۰ میلی‌متر برای پرش‌های ۴ و ۵ و ۶ ضلعی (دبی حجمی سیال ۴۷/۳۶ میلی‌لیتر بر ثانیه است)

شکل ۷ نمودار دما در راستای گوشه‌های پرش ($\theta=0^\circ$) و دما در راستای خط وسط ضلع ($\theta=30^\circ, \theta=36^\circ$ و $\theta=45^\circ$) ترسیم شده است. این نمودارها اختلاف دما در این دو راستا را به وضوح نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، ساختار سیال بعد از پرش با توجه به نوع پرش حالت‌های مختلفی می‌تواند داشته باشد. طبق مشاهدات پرش‌های چندضلعی صرفاً در ساختار type II رخ می‌دهند یعنی هم دارای گردابه سطحی و هم دارای گردابه چسبیده به صفحه هدف هستند. با توجه به نمودارهای شکل ۷ روند افزایش دمای سطح با شار حرارتی ثابت تحت پرش هیدرولیکی چندضلعی در شعاع حدود ۲۵ میلی‌متری از نقطه اصابت جت تغییر می‌کند. این روند افزایشی دقیقاً در ناحیه‌ی گردابه چسبیده به سطح اتفاق می‌افتد که نشان می‌دهد به علت وجود این گردابه انتقال حرارت از سطح نسبت به مناطق دیگر کمتر صورت می‌گیرد.

سیال پس از گذر از روی گردابه سطحی مجدد به سطح می‌رسد البته با دمایی که نسبت به گردابه پایین‌تر است؛ همین موضوع باعث ثابت ماندن یا کاهش دمای سطح در ناحیه بعد از گردابه خواهد شد. در این ناحیه دمای دو زاویه نزدیک به هم می‌شود و سپس با افزایش شعاع از هم فاصله خواهد گرفت. این تغییرات دمایی در سطح به دلیل سرعت مختلف سیال در نقاط مختلف بعد از پرش چندضلعی رخ می‌دهد و نشان می‌دهد پرش‌های چندضلعی روی سطح چگونه تأثیر می‌گذارد.



شکل (۷): نمودار دما در راستای گوشه‌های پرش ($\theta=0^\circ$) و دما در راستای خط وسط ضلع ($\theta=30^\circ, \theta=36^\circ$ و $\theta=45^\circ$)، شار حرارتی ثابت ۳۴۵۰ وات بر مترمربع و قطر جت ۱۰ میلی‌متر برای پرش‌های ۶، ۵ و ۴ ضلعی (دبی حجمی سیال ۴۷/۳۶ میلی‌لیتر بر ثانیه است)

۵- نتیجه‌گیری

اصابت جت سیال دایروی به صفحه افقی بر خلاف انتظار می‌تواند منجر به ایجاد پرش هیدرولیکی غیردایروی شود. این عدم ایجاد پرشی که تقارن محور باشد می‌تواند ساختار چندضلعی پیدا کند. شرایط ایجاد پرش‌های چندضلعی در این تحقیق با استفاده از سیال اتیلن گلیکول محقق شد. با استفاده از یک صفحه تحت شار گرمایی ثابت توزیع دما بر سطح این صفحه در حین تشکیل پرش‌های چندضلعی مورد بررسی قرار گرفت. توزیع دما به گونه‌ای است که دما در راستای گوشه‌های پرش هیدرولیکی چندضلعی کمتر از دما در راستای اضلاع آن است که ناشی از سرعت بیشتر سیال در این ناحیه است؛ همچنین در ناحیه‌ای بعد از پرش که گردابه چسبیده به سطح قرار دارد دما به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد و بعد از این ناحیه دما عمدتاً ثابت یا کاهشی خواهد بود.

مراجع

1. Avedisian C. T. and Zhao Z., 2000, The Circular Hydraulic Jump in Low Gravity, Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 456, 2127-2151.
2. Kate R. P., Das P. K. and Chakraborty S., 2008, Investigation on Non-Circular Hydraulic Jumps Formed Due to Obliquely Impinging Circular Liquid Jets, Experimental Thermal and Fluid Science 32, 1429-1439.
3. Rayleigh L., 1914, On the Theory of Long Waves and Bores, Proceedings of the Royal Society of London. Series A 90, 324-328.
4. Birkhoff G. and Zarantonello E. H., 1957, Jets, Wakes and Cavities", Academic Press.
5. Watson E. J., 1964, The Radial Spread of a Liquid Jet over a Horizontal Plane, Journal of Fluid Mechanics 20, 481-499.
6. Olson R. and Turkdogan E., 1966, Radial Spread of a Liquid Stream on a Horizontal Plate, Nature 211, 813-816.
7. Ishigai S., Nakanishi S., Mizuno M. and Imamura T., 1977, Heat Transfer of the Impinging Round Water Jet in the Interference Zone of Film Flow Along the Wall, Bulletin of JSME 20, 85-92.
8. Nakoryakov V. E., Pokusaev B. G. and Troyan E. N., 1978, Impingement of an Axisymmetric Liquid Jet on a Barrier, International Journal of Heat and Mass Transfer 21, 1175-1184.
9. Bouhadeh M., 1978, Étalement En Couche Mince D'un Jet Liquide Cylindrique Vertical Sur Un Plan Horizontal, Z. Anagew. Math. Physics 29, 157-167.
10. Craik A. D. D., Latham R. C., Fawkes M. J. and Gribbon P. W. F., 1981, The Circular Hydraulic Jump, Journal of Fluid Mechanics 112, 347-362.
11. Errico M., 1986, A Study of the Interaction of Liquid Jets with Solid Surfaces, University of California, San Diego.
12. Vasista V. K., 1989, Experimental Study of the Hydrodynamics of an Impinging Liquid Jet, B.S. dissertation, Dept. of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
13. Liu X. and Lienhard J. H. V., 1993, The Hydraulic Jump in Circular Jet Impingement and in Other Thin Liquid Films, Experiments in Fluids 15, 108-116.
14. Ellegaard C., Hansen A. E., Haaning A. and Bohr T., 1996, Experimental results on flow separation and transitions in the circular hydraulic jump, Physica Scripta 105.
15. Chaudhury Z., 1964, Heat transfer in a radial liquid jet. Journal of Fluid Mechanics 20(3): 501-511.
16. Liu X. and Lienhard J., 1989, Liquid jet impingement heat transfer on a uniform flux surface, Heat Transfer Phenomena in Radiation, Combustion, and Fires 106: 523-530.
17. Liu, X. and et al., 1991, Convective heat transfer by impingement of circular liquid jets, J. Heat Transfer 113(3): 571-582.
18. Zhao H. Y. and Ma C. F., 1989, Analytical study of heat transfer with single circular free jets under arbitrary heat flux conditions, J. Beijing Polytechnic University 15, 7-13.
19. Wang Y. and Khayat R. E., 2020, The influence of heating on liquid jet spreading and hydraulic jump, Journal of Fluid Mechanics 883: A59.
20. Ellegaard C., Hansen A. E., Haaning A. and Bohr T., 1996, Experimental results on flow separation and transitions in the circular hydraulic jump, Physica Scripta 105.
21. Ellegaard C., Hansen A. E., Haaning A., Hansen K., Marcussen A. and Bohr T., 1998, Creating corners in kitchen sinks, Nature 392(6678), 767-768.
22. Ellegaard C., Hansen A. E., Haaning A., Hansen K., Marcussen A. and Bohr T., 1999, Cover illustration: Polygonal hydraulic jumps, Nonlinearity 12(1), 1-7.
23. Bush J. W. M., Aristoff J. M. and Hosoi A. E., 2006, An experimental investigation of the stability of the circular hydraulic jump, Journal of Fluid Mechanics 558, 33-52.
۲۴. محسن مخلصي و علیرضا تیمورتاش، ۲۰۱۴، بررسی آزمایشگاهی تأثیر دبی حجمی، ارتفاع پایین دست و قطر جت بر ابعاد پرش‌های هیدرولیکی چندضلعی پایدار، مهندسی مکانیک ایران ۱۵(۴)، ۶۹-۸۹.
25. Teymourtash A. R. and Mokhlesi M., 2015, Experimental investigation of stationary and rotational structures in non-circular hydraulic jumps. Journal of Fluid Mechanics 762: 344-360.
26. White F., M., 2001, Fluid Mechanics, McGraw-Hill, Fourth Edition.