

## مطالعه تجربی ضخامت لایه مایع حاصل از برخورد افشانه با یک سطح جامد

محمد رضا مراد<sup>۱\*</sup> و علیرضا رضانی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، morad@sharif.ir

۲- کارشناس ارشد، پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی، ramezani\_a@alum.sharif.edu

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۰۵، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۹/۰۱/۱۸، پذیرش: ۹۹/۰۲/۲۶)

**چکیده:** در پژوهش پیش رو، فیزیک برخورد افشانه با سطح جامد در دمای محیط مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی ها نشان می دهد که در دبی های حجمی بالای افشانه یک لایه مایع بر روی سطح جامد تشکیل می شود. در صورتی که ضخامت لایه مایع زیاد باشد، در کاربردهای احتراقی، می تواند منجر به احتراق ناقص سوخت در محفظه احتراق شود. ضخامت لایه مایع به پارامترهای زیادی، نظیر دبی حجمی سیال، فاصله نازل تا سطح و مود شکست افشانه، بستگی دارد. در یک مطالعه تجربی، مقدار ضخامت متوسط لایه مایع حاصل از برخورد افشانه با سطح جامد توسط روش سایه نگاری اندازه گیری شده است. انژکتور جدید و طراحی شده مورد استفاده، که انژکتور جریان پراکنده نام دارد، دارای بازدهی مناسبی نسبت به دیگر انژکتورهای هودمشی است و اختلاف فشار هوا و دبی لازم برای عملکرد این انژکتور پایین است. ضخامت لایه مایع حاصل از برخورد افشانه با سطح در شرایط مختلف اندازه گیری شده است. نتایج نشان می دهد که اندازه ضخامت متوسط لایه مایع با تغییر پارامترهایی نظیر دبی حجمی سیال مایع و گاز و فاصله نازل تا سطح تغییر می کند و این ضخامت در بازه بین ۴۰ تا ۲۲۰ میکرومتر در شرایط مختلف متغیر است.

**کلیدواژگان:** افشانه، لایه مایع، انژکتور هودمشی، انژکتور جریان پراکنده

### مقدمه

در آغاز دهه ۱۹۸۰ میلادی، با کوچک شدن اجزای لوازم الکترونیکی، روش های اساسی برای پایین نگه داشتن دمای اجزا از حد بحرانی آن مورد نیاز بوده است. در دهه ۱۹۸۰ میلادی، برای تشدید نرخ اتلاف حرارتی لوازم الکترونیکی، استفاده از یک فن برای گردش هوا در اطراف اجزا، برای ایجاد یک جریان همرفت، کافی بود. این نوع از خنک کاری، خنک کاری تک فاز نام دارد، اما با گذر زمان تراکم قدرت مدارهای الکتریکی جدیدتر حدوداً پنج مرتبه افزایش یافته و نیازمند خنک کاری قدرتمندتر خواهد بود [۱]. از آنجایی که خنک کاری تک فاز فقط باعث دفع حرارت به صورت محسوس می شود، طراحان دستگاه های خنک کاری به سمت طراحی سیستم هایی رفتند که با استفاده از خنک کار دوفازی، قادر بود مقدار زیادی از حرارت را که چندین برابر بیشتر از خنک کاری تک فاز است، دفع کند، اما این چالش های خنک کاری تنها به تراشه های کامپیوتری محدود نشد. در دهه ۱۹۹۰، همین چالش ها به صورت متعدد در کاربردهای پزشکی، حمل و نقل، انرژی، هوافضا و صنایع دفاع ظهور پیدا کردند [۲]. روش های متعددی در خنک کاری دوفازی برای حذف شار حرارتی پیشنهاد شده است. یکی از این روش های پرکاربرد خنک کاری سطوح داغ با استفاده از افشانه<sup>۱</sup> سیال مایع بوده که این روش دارای بازده بیشتری نسبت به مابقی روش هاست [۳]. برای ایجاد افشانه از افشانگرها<sup>۲</sup> بهره گرفته می شود. افشانگرها انواع مختلفی دارند که از مهم ترین آن ها می توان به افشانگرهای

1. Spray  
2. Atomizer

فشاری<sup>۱</sup>، افشانگرهای دوار<sup>۲</sup> و افشانگرهای هوا-دم<sup>۳</sup> اشاره کرد [۴]. دبی حجمی افشانه مسلماً مهم‌ترین پارامتر در برخورد افشانه با یک سطح جامد است. با توجه به مقدار دبی حجمی، افشانه می‌تواند به شکل رقیق، حد واسط و یا چگال توصیف شود. با توجه به شکل ۱-ا، که طرحواره یک افشانه رقیق را نشان می‌دهد، در هنگام برخورد قطرات با سطح، تقریباً هیچ تعاملی بین آن‌ها رخ نداده و هر قطره مانند برخورد یک تک‌قطره با سطح عمل می‌کند. شکل ۱-ب، طرحواره افشانه حد واسط را نشان می‌دهد که در آن تعامل قطرات باهم بر روی سطح قابل توجه بوده ولی به اندازه کافی بالا نیست که بتواند یک لایه مایع بر روی سطح ایجاد کند. شکل ۱-ج نیز افشانه چگال را ترسیم می‌کند که در آن یک لایه از لایه نازک حاصل از انباشتگی مایع بر اثر تعامل کافی قطرات باهم تشکیل شده است. بنابراین، دو فیزیک متفاوت از هم با توجه به نرخ دبی حجمی وجود دارد؛ یکی برخورد مستقیم قطره با سطح جامد و دیگری برخورد مستقیم قطره با یک سطح از لایه مایع است. هدف از این مطالعه بررسی رفتار افشانه حاصل از یک انژکتور نوین تحت عنوان انژکتور جریان پراکنده<sup>۴</sup> در برخورد با یک سطح جامد و اندازه‌گیری ضخامت لایه مایع بر روی سطح در شرایط مختلف دبی حجمی سیال، دبی حجمی هوا و فواصل مختلف نازل تا سطح است. در این مطالعه، در ابتدا، مروری بر تحقیقات گذشته پیرامون اندازه‌گیری ضخامت لایه مایع بر روی یک سطح صورت می‌گیرد. سپس، به معرفی انژکتور جدید که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته پرداخته می‌شود و در ادامه نتایج مرتبط با اندازه‌گیری ضخامت لایه مایع بر روی سطح گزارش داده می‌شود.

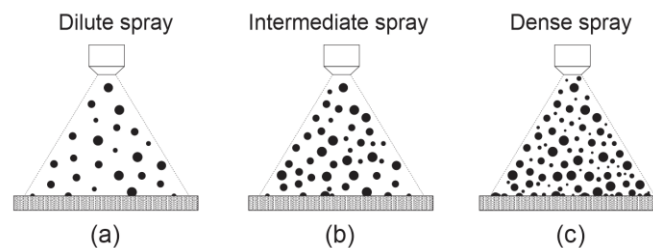


Figure 1- Schematic of spray impingement for different liquid volumetric flow rate: (a) Dilute spray, (b) Intermediate spray, (c) Dense spray

شکل ۱- طرحواره‌ای از برخورد افشانه با سطح برای سه دبی حجمی مختلف (a) رژیم رقیق، (b) رژیم حد واسط و (c) رژیم چگال

## مروری بر تحقیقات پیشین

تیلتون [۵] ضخامت لایه را برای افشانه آب با استفاده از یک سوزن متحرک، که بر روی یک محدوده اندازه‌گیری حرکت می‌کند، اندازه‌گیری کرد. آن‌ها ضخامت را در محدوده ۱۲۰-۳۵۰ میکرومتر با فرض ضخامت یکنواخت لایه اندازه‌گیری کردند. در تحقیق دیگری حداکثر ضخامت لایه با استفاده از تکنیک تداخل هولوگرافی<sup>۵</sup>، برای به‌دست‌آوردن مکان سطح لایه، اندازه‌گیری شد. برای فشار ثابت هوا، ضخامت لایه با افزایش جریان آب افزایش پیدا کرد. در محدوده تغییرات کمتر از ۱ میکرومتر در بازه ۸۵-۲۳۵ میکرومتر، مشخص شد که لایه تقریباً مسطح است [۶]. با استفاده از یک تکنیک نوری غیرتداخلی، ماتیوس و همکاران ضخامت لحظه‌ای یک لایه مایع، که توسط یک افشانه ایزواکتان پاشیده شده بود را اندازه‌گیری کردند. ضخامت لایه از ۲۰ تا ۵۰ میکرومتر برای اندازه قطرات در بازه ۱۱۰-۳۵۰ میکرومتر و سرعت قطرات در بازه ۱۰-۲۱ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد؛ ضمن اینکه تمام این اندازه‌گیری‌های ضخامت لایه تحت شرایط آدیاباتیک انجام شد [۷]. پاتچ و شد، با استفاده از یک تکنیک انعکاس داخلی غیرنفوذی، ضخامت لایه مایع را برای پرفلوئورو هگزان<sup>۶</sup> در سرعت جریان کم از یک نازل

1. Pressure Atomizers  
2. Rotary Atomizers  
3. Airblast Atomizers  
4. Flow Blurring Injector  
5. Holographic Interferometry  
6. FC-72

و سرعت جریان بالا از یک آرایه چهارنازله اندازه‌گیری کردند. آن‌ها دریافتند که ضخامت لایه در ناحیه ضربه افشانه برای شرایط آدیاباتیک و غیرآدیاباتیک تقریباً یکسان است. به‌عنوان مثال، با استفاده از یک نازل تنها با دبی جریان ۳۱۰۷ میلی‌لیتر بر ساعت آن‌ها ضخامت لایه را در حدود ۱۸/۲۹ میکرومتر در شرایط آدیاباتیک اندازه‌گیری کردند که این میزان در مقایسه با شار حرارت سطح ۱۵ وات بر سانتی‌متر مربع در حدود ۱۸/۴۱ میکرومتر بود [۸]. در پژوهش دیگری یک روش اپتیکی برای اندازه‌گیری ضخامت لایه در محدوده ۱/۷۵-۲/۷۵ و ۰/۰۲-۰/۱۴ میلی‌متر برای افشانه آب و پرفلوئورو هگزان مورد استفاده قرار گرفت. برخلاف پانچ و شد، وابستگی شدید ضخامت لایه در شار حرارت نشان داده شد [۹]. با استفاده از سیستم تصویری با سرعت بالا مجهز به میکروسکوپ، مارتینز گالوان و همکاران [۱۰] دریافتند که ضخامت لایه مایع برای تترافلوئورواتان به‌میزان بسیار کمی وابسته به سرعت جریان حجمی یا زبری سطح در رژیم‌های جوشش است. ژی و همکاران [۱۱] یک مدل تئوری برای جریان لایه مایع در امتداد سطح پیشنهاد دادند که منتهی به رابطه زیر برای ضخامت لایه شد:

$$\delta(r) = \left\{ \frac{\dot{m}(r)}{\frac{\rho_f \pi r}{3\mu_f} \left( \frac{dM(r)}{dr} - \frac{dp}{dr} \right)} \right\}^{1/3} \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $\delta(r)$ ،  $\dot{m}_r$ ،  $M(r)$  به ترتیب، بیانگر ضخامت لایه موضعی، دبی جرمی و تکانه شعاعی است که همگی در شعاع  $r$  از محور افشانه تعریف شده است. این مدل مطابقت خوبی با اندازه‌گیری‌هایی، که توسط چن و همکاران [۱۲] انجام شد، داشت.

چیا و همکاران [۱۳] یک مدل متفاوت برای ضخامت لایه با حل معادلات پیوستگی، تکانه و انرژی را با استفاده از سرعت لغزش و شرایط مرزی جهش دما به‌دست آوردند. این مدل نشان داد که لایه در زیر راز همه جا ضخیم‌تر و در جهت شعاعی ضخامت آن کاهش می‌یابد. با استفاده از افشانه‌های جوهرافشان حرارتی، شارما و همکاران [۱۴] لایه مایع تولیدشده توسط افشانه آب یکنواخت با قطرات یکنواخت ۳۳ میکرومتر را بررسی کردند. ضخامت لایه با استفاده از ترکیبی از فلاش، میکروسکوپ و دوربین کوپل‌شده اندازه‌گیری شد. در موتورهای احتراق داخلی، زمانی که سوخت با دبی جرمی بالا به سر پیستون و دیواره سیلندر پاشیده می‌شود، در صورتی که ضخامت لایه مایع تشکیل‌شده زیاد باشد، احتراق به‌صورت کامل انجام نمی‌گیرد و باعث ایجاد دوده و در نتیجه آلودگی هوا می‌شود. بنابراین، مطالعه اندازه ضخامت لایه مایع و وابستگی آن به پارامترهایی نظیر فشار محفظه احتراق، دمای دیواره، دمای سوخت و فاصله نازل سوخت تا دیوار می‌تواند اطلاعات مفیدی در طراحی بهینه موتورهای احتراق داخلی بدهد.

شولز و بیرا [۱۵] با استفاده از روش LIF<sup>۱</sup> لایه مایع حاصل از سوخت ایزواکتان را اندازه‌گیری کردند. روش کار به این صورت بود که درون سوخت مایع یک ماده فلئورسانس را حل کرده و سپس، با تاباندن نور لیزر به آن، ماده فلئورسانس درون سوخت تحریک شده و می‌توان از آن عکس‌برداری کرد. سپس، با تحلیل عکس‌ها می‌توان ضخامت لایه مایع را اندازه‌گیری کرد. نتایج تجربی نشان داد که با افزایش دمای اولیه سوخت، دمای محیط اطراف، فشار محفظه و فاصله نازل تا دیوار، ضخامت لایه مایع کاهش پیدا می‌کند. در کار دیگر، آلوکا و همکاران [۱۶] با استفاده از یک میز آزمایشگاهی اپتیکی شلرین<sup>۲</sup> موفق به عکس‌برداری از برخورد مستقیم افشانه با سطح داغ شده‌اند. آن‌ها با تحلیل عکس‌های گرفته‌شده موفق شدند که لایه مایع از بخار را از هم تفکیک کنند. سپس، با اندازه‌گیری ضخامت لایه مایع توانستند که وابستگی آن نسبت به دمای سطح را مشخص کنند. در تحقیق دیگری، اثر نسبت طول به قطر روزنه<sup>۳</sup> در یک انژکتور پیچشی میکرو در موتور ماهواره با هدف بهبود عملکرد سوخت و احتراق در این نوع انژکتورها به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت [۱۷].

1. Laser Induced Fluorescence  
2. Schlieren  
3. Orifice

افشانه‌سازی<sup>۱</sup> مایع شامل تبدیل بخش کوچکی از انرژی به انرژی سطح می‌شود. منبع انرژی ممکن است مکانیکی، الکترومکانیکی یا صرفاً الکترواستاتیک باشد. متاسفانه، مقدار زیادی از انرژی هدر می‌رود، به طوری که بازده افشانه‌سازی (که به نسبت انرژی سطح به انرژی کل می‌شود) همیشه کوچک است. حمل‌کننده انرژی در افشانه‌سازی هوایی جریان گازی است که با جریان مایع تعامل دارد. این تعامل شامل چندین مکانیزم وابسته به سیال است که منجر به قطرات کوچک می‌شود. با توجه به حضور فاز گاز در جریان آشفته، افشانه‌سازی در این حالت با هدر رفتن زیاد انرژی همراه است و بازدهی انرژی در این حالت بسیار کم است.

برای رفع این مشکل، در سال ۲۰۰۵، یک کشف مهم از گانان کالوو [۱۸] رخ داد که از یک انژکتور جدید به نام انژکتور جریان پراکنده برای افشانه‌سازی مقدار کمی از مایع استفاده کرد. در این افشانگر، با تولید مقیاس‌های آشفتگی کوچک از یک جریان گاز برگشتی در مسیر مایع، عمل افشانه‌سازی بهینه صورت می‌گیرد. بازده افشانه‌سازی نسبت انرژی سطح قطرات به انرژی ورودی تبخیرکننده است. در حالات خاصی، بازدهی این نوع انژکتورها تا ۱۰ برابر کارآمدتر از انژکتورهای هوادمشی بود. برای همان مقادیر ورودی انرژی، قطر قطره برای این نوع نازل‌ها کوچک‌تر است. یک طرح ساده از این نازل در شکل ۲ نشان داده شده است. عملکرد این نوع از انژکتور بر مبنای جریان انشعابی بازگشتی است. این انشعاب به وسیله یک پارامتر هندسی  $\psi$  به نسبت  $H/D$  بیان می‌شود که در آن،  $H$  فاصله بین خروجی مایع و خروج روزه بوده و  $D$  قطر قسمتی است که در آن مایع جریان دارد. اگر این نسبت از  $0/25$  کمتر باشد، جریان از حالت جت به حالت افشانه تغییر حالت می‌دهد. دو مایع استفاده شده در این تحقیق آب و اتانول بودند.

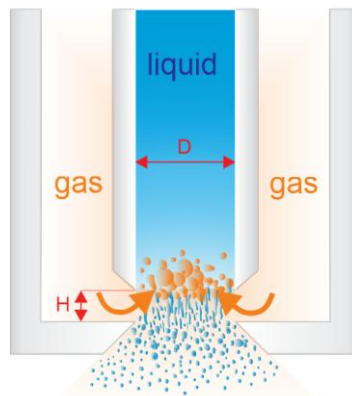


Figure 2- Schematic of flow blurring injector  
شکل ۲- طرحواره انژکتور جریان پراکنده

## چیدمان آزمایشگاهی

چیدمان آزمایشگاهی تحقیق حاضر در شکل ۳ نشان داده شده است. سیال مایع و گاز استفاده شده در این تحقیق به ترتیب آب مقطر و هواست. هوای پرفشار خطوط تغذیه هوا توسط کمپرسور پیستونی تامین شده و با استفاده از روتامتر دبی حجمی هوا (با عدم قطعیت ۰/۴٪) تنظیم می‌شود (بازه بین ۶ تا ۱۸ لیتر بر دقیقه) و به ورودی سیال گاز در انژکتور جریان پراکنده فرستاده می‌شود. هم‌زمان پمپ سرنگی سیال آب مورد نظر را با دبی حجمی مشخص (بازه بین ۶۰۰ تا ۲۴۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت) به ورودی سیال مایع در انژکتور جریان پراکنده می‌فرستد و در خروجی سیال مایع برهمکنش بین سیال مایع و سیال هوا در انژکتور جریان پراکنده همان‌گونه که قبلاً یاد شد باعث شکست سیال مایع و تبدیل آن به قطرات ریزتر می‌شود.

1. Atomization

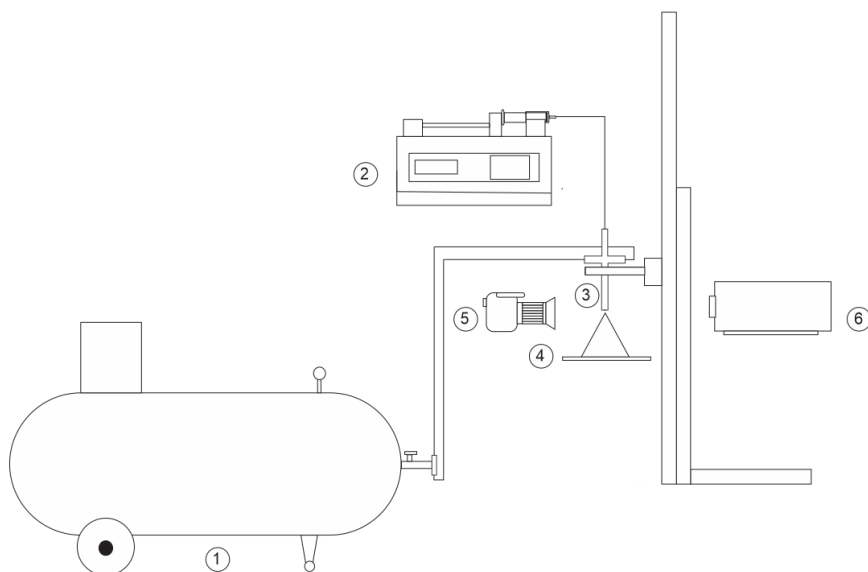


Figure 3- Schematic of experimental setup: (1) piston compressor, (2) syringe pump, (3) flow blurring injector, (4) silicon wafer test surface, (5) camera, (6) LED pulse generator

شکل ۳- طرحواره چیدمان آزمایشگاهی: (۱) کمپرسور، (۲) پمپ سرنگی، (۳) انژکتور جریان پراکنده، (۴) سطح تست از جنس سیلیکون، (۵) دوربین عکس برداری و (۶) دستگاه نور ضربانی

شکل ۴ طراحی انژکتور مورد نظر را نشان می‌دهد. انژکتور مورد استفاده دارای یک مجرای ورودی سیال مایع به صورت عمودی و دو مجرای ورودی سیال گاز به صورت افقی است. قسمت انتهایی مجرای سیال مایع یک استوانه با قطر داخلی ۱/۶ میلی‌متر است. در عین حال، مجرای سیال گاز به صورت یک استوانه هم‌محور با مجرای سیال مایع است. قسمت انتهایی مجرای سیال مایع دارای فاصله‌ای به میزان ۰/۴ میلی‌متر از روزنه بوده که اجازه می‌دهد سیال گاز به صورت شعاعی وارد مجرای سیال مایع شده و با آن تداخل کرده و فرایند شکست را به وجود آورد [۱۹].

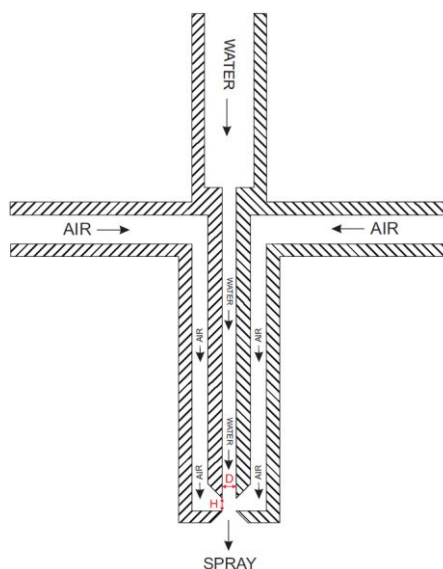


Figure 4- Schematic of flow blurring injector:  $D = 1.6 \text{ mm}$ ,  $H = 0.4 \text{ mm}$

شکل ۴- طرحواره انژکتور جریان پراکنده: قطر مجرای سیال مایع و قطر روزنه (D): ۱/۶ میلی‌متر، فاصله بین خروجی مجرای مایع و روزنه (H): ۰/۴ میلی‌متر

گام اصلی در تصویربرداری از لایه مایع استفاده از یک سیستم نورپردازی مناسب است. در این پژوهش، برای اندازه‌گیری ضخامت لایه مایع، از روش سایه‌نگاری استفاده شده است. در این حالت، به علت بالاتر بودن ضریب شکست آب نسبت به هوا، نور تولیدی توسط دستگاه نور ضربانی پس از برخورد به سیال آب وارد دوربین نشده و باعث می‌شود که یک سایه از سیال بر روی صفحه نمایش دوربین تشکیل شود، اما سطح آزاد لایه مایعی که بر روی سطح تشکیل می‌شود دارای نوسانات است. بنابراین، لازم است که در یک بازه زمانی مشخص تعداد مشخصی عکس از لایه مایع گرفته شود. سپس، ضخامت لایه مایع به صورت میانگینی از مقادیر اندازه‌گیری شده در عکس‌های یادشده گزارش شود. در این پژوهش، از یک سیستم نورپردازی ضربانی برای گرفتن عکس از لایه مایع استفاده شده است. دستگاه نور ضربانی نوری با پهنای یک ضربان ۲ میکروثانیه را وارد دوربین عکاسی دیجیتال می‌کند. سطح جامد مورد نظر در تست‌ها از جنس سیلیکون وافر با زبری سطح ۵ نانومتر است. این سطح دارای طول ۲ سانتی‌متر، عرض ۰/۵ سانتی‌متر و ضخامت استاندارد ۵۲۵ میکرومتر است. این سطح توسط یک گیره ثابت نگه داشته شده و دوربین بر روی مرکز سطح تنظیم شده است. علت انتخاب این سطح حذف پارامتر زبری سطح بوده است.

### نتایج و تحلیل آن‌ها

هدف اصلی از انجام این پژوهش اندازه‌گیری ضخامت لایه مایع تشکیل شده از برخورد افشانه با سطح جامد است. در بسیاری از موارد لازم است که برخورد مستقیم افشانه با سطح انجام شود. اما، با برخورد افشانه با سطح، یک لایه از لایه مایع تشکیل شده که اگر سیال موجود در این لایه به خوبی سوزانده نشود، می‌تواند مشکلاتی از قبیل ایجاد دوده، آلاینده‌های هوا مانند  $\text{NO}_x$  و غیره ایجاد کند. بنابراین، کم کردن ضخامت لایه مایع تشکیل شده بر روی سطح از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، سعی شده است که تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل دبی حجمی سیال آب، دبی حجمی سیال هوا و فاصله نازل تا سطح تست در شرایط اتمسفریک و آزمایشگاهی بر روی اندازه ضخامت لایه مایع مورد بررسی قرار بگیرد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ضخامت لایه مایع فقط حول یک مقدار بیشینه و کمینه با زمان نوسان می‌کند. همچنین، نشان می‌دهد که دامنه این نوسانات نسبت به اندازه ضخامت لایه مایع کم بوده و می‌توان تقریب زد که اندازه ضخامت لایه مایع تابعی از زمان نیست. عرض سطح جامد سیلیکون وافر پنج میلی‌متر است، تا لایه مایع تشکیل شده بر روی سطح تقریباً یک‌بعدی و تابعی از طول سطح باشد.

با توجه به شکل ۵ می‌توان فهمید که در روش سایه‌نگاری نمی‌توان مرز ضخامت لایه مایع از سطح تست را به خوبی تشخیص داد. به همین دلیل برای مجزا کردن مرز لایه مایع بایستی تصویر پشت زمینه از تصویر لایه مایع کم شود (شکل ۶). پردازش تصویر توسط نرم‌افزار متلب انجام گرفته است.

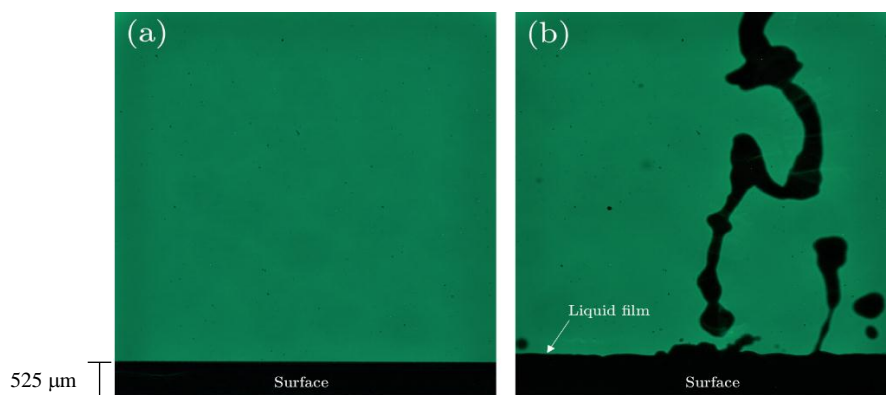


Figure 5- (a) background image of test surface, (b) liquid film on test surface

شکل ۵- (a) عکس پس‌زمینه سطح و (b) عکس سطح به همراه افشانه و لایه مایع بر روی آن

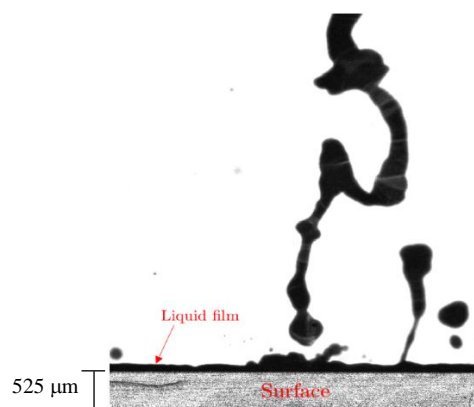


Figure 6- final processed image of liquid film on the test surface  
شکل ۶- عکس حاصل از پردازش نهایی برای نمایش لایه مایع

در هر رژیم تست، سعی شده است که بین ۲۰ تا ۴۰ عدد عکس در مدت بازه زمانی بین ۱۰ تا ۴۰ ثانیه از سطح جامد که افشانه بر روی آن در حال پاشش است، گرفته شود. سپس، ضخامت لایه مایع اندازه‌گیری شده و با میانگین‌گیری از تمامی عکس‌ها، ضخامت متوسط فیلم به دست خواهد آمد.

در هر عکس، ضخامت فیلم مایع از تعداد مشخصی پیکسل تشکیل شده است. بنابراین، در صورتی که اندازه هر پیکسل به میلی‌متر مشخص شود می‌توان اندازه لایه مایع را در واحد میلی‌متر محاسبه کرد. برای محاسبه اندازه هر پیکسل در هر تصویر، از ضخامت خود سطح سیلیکون وافر، که اندازه آن ۵۲۵ میکرون است، استفاده شده است. به این صورت که با توجه به شکل ۷ تعداد پیکسل ضخامت سطح جامد شمرده می‌شود. سپس، با توجه به اینکه اندازه ضخامت سطح سیلیکون وافر مشخص است، اندازه هر پیکسل در تصویر مشخص خواهد شد. در مرحله بعد، تعداد پیکسل ضخامت فیلم مایع در طول سطح شمارش می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود سطح آزاد فیلم مایع در طول سطح ۵ میلی‌متری دارای نوسان است. بدین منظور، در راستای طول سطح، در چندین نقطه (حداکثر شش نقطه) تعداد پیکسل‌های ضخامت فیلم مایع شمارش می‌شود. سپس، با میانگین‌گیری از آن‌ها می‌توان متوسط ضخامت فیلم مایع برای یک عکس را اندازه‌گیری کرد. سپس، با توجه به اینکه در هر رژیم عملکردی تعداد بین ۲۰ تا ۴۰ عکس گرفته شده است، با میانگین‌گیری از اندازه ضخامت فیلم مایع برای تمامی عکس‌ها می‌توان مقدار متوسط ضخامت فیلم مایع در هر رژیم را گزارش کرد. این مقدار متوسط دارای یک بازه خطا که با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده در تمامی عکس‌ها قابل گزارش است. بیشینه خطای این اندازه‌گیری‌ها در حدود ۵٪ اندازه‌گیری شد.

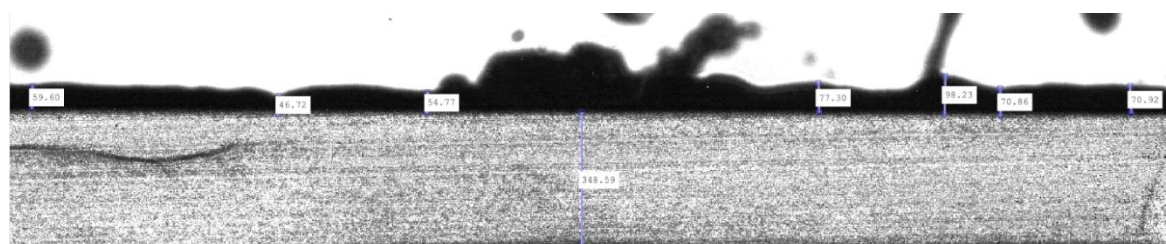


Figure 7- Sample image which indicates the thickness of the silicon wafer and liquid film in terms of the pixel number  
شکل ۷- یک نمونه عکس که در آن اندازه ضخامت سطح سیلیکون وافر و فیلم مایع به تعداد پیکسل عکس نشان داده شده است

در جدول ۱ مقدار ضخامت فیلم مایع برای ۱۰ عکس در رژیم عملکردی با مشخصات ارتفاع افشانه تا سطح یک سانتی‌متر، دبی آب ۲۴۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت و دبی حجمی هوای ۱۸ لیتر بر دقیقه آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضخامت فیلم مایع در این رژیم بین مقدار ۸۴ میکرون تا ۱۰۲ میکرون تغییر می‌کند که مقدار متوسط آن برابر با ۹۱/۸۵

میکرون شده است؛ یعنی با حد بالایی و پایینی خود حدود ۱۰ درصد تفاوت دارد. نکته دیگر، که بایستی به آن توجه شود، لحظه برخورد قطرات افشانه با فیلم مایع است. همان طور که در شکل ۷ دیده می شود، در لحظه ثبت تصویر یک قطره با سطح مایع برخورد کرده است. با توجه به بخش مروری بر ادبیات، بعد از برخورد قطره با فیلم مایع یک حلقه تاجی شکل از سیال تشکیل می شود. تشکیل این حلقه تاجی شکل سبب افزایش موقتی و محلی ضخامت فیلم مایع می شود که بعد از گذشت زمان بسیار اندکی در حد میلی ثانیه جریان بر روی سطح فیلم مایع آرام گرفته و بلندی فیلم مایع به حالت اول خود برخواهد گشت. به همین دلیل نباید قسمت مرتفع شده فیلم مایع به علت برخورد قطره با آن را در اندازه گیری ضخامت فیلم مایع در نظر گرفت.

جدول ۱- گزارش اندازه ضخامت فیلم مایع برای ۱۰ عدد عکس در رژیم عملکردی با مشخصات فاصله انژکتور تا سطح یک سانتی متر،

دبی آب ۲۴۰۰ میلی لیتر بر ساعت و دبی حجمی هوای ۱۸ لیتر بر دقیقه

Table 1- Liquid film thickness for 10 images with distance from nozzle to surface of 1 cm, water flow rate of 2400 mL/h and air flow rate of 18 L/min

Liquid film thickness ( $\mu\text{m}$ )	Image number
86.1	1
89.5	2
84.2	3
101.3	4
95.6	5
84	6
90.3	7
102	8
103.8	9
81.7	10
91.85	Average film thickness

### بررسی تاثیر دبی حجمی سیال مایع و سیال هوا

در این بخش هدف بررسی تاثیر دو پارامتر دبی حجمی آب و دبی حجمی هوا بر روی ضخامت لایه مایع در یک فاصله ثابت انژکتور تا سطح بررسی شده است. برای انجام این پژوهش، تست ها در دو فاصله مختلف انژکتور تا سطح انجام می شود. در فاصله ای که انژکتور به سطح نزدیک است، تولید قطرات به تازگی انجام شده است و قطرات به طور کامل شکسته نشده اند. با افزایش فاصله انژکتور از سطح، شکست ثانویه در قطرات نیز رخ می دهد. در نتیجه قطرات با قطر کمتری به سطح برخورد می کنند. توجه شود که در فاصله نزدیک انژکتور تا سطح جامد، هوای خروجی از انژکتور نیز با سطح جامد برخورد می کند و می تواند تاثیر بسزایی بر روی اندازه ضخامت لایه مایع داشته باشد. شکل ۸ نمودار تاثیر افزایش دبی حجمی آب بر روی ضخامت متوسط لایه مایع در دبی های حجمی ثابت هوا را نشان می دهد. مشاهده می شود که افزایش دبی حجمی سیال آب باعث افزایش ضخامت متوسط لایه مایع می شود، زیرا افزایش دبی حجمی آب باعث افزایش تعداد قطرات موجود در افشانه می شود. وقتی تعداد قطرات موجود در افشانه زیاد می شوند، شانس برخورد آن ها با سطح جامد بیشتر می شود. در نتیجه، تعداد بیشتری قطره به لایه مایع برخورد می کند و باعث افزایش ضخامت آن می شود.

شکل ۹ تاثیر افزایش دبی حجمی سیال هوا در دبی های ثابت سیال آب بر روی ضخامت متوسط لایه مایع را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، ضخامت متوسط لایه مایع در برخورد افشانه در دبی حجمی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه تفاوت نسبتاً محسوسی نسبت به ضخامت لایه در برخورد افشانه در دو دبی حجمی هوای دیگر دارد. در واقع، مقدار ضخامت لایه مایع در دبی حجمی هوای ۱۰ لیتر در دقیقه بیشتر از ضخامت لایه مایع در دو دبی هوای بالاتر است. ضخامت متوسط لایه مایع از دبی ۱۴ به دبی ۱۸ لیتر بر دقیقه تغییر چندانی نمی کند و مقدار آن نهایتاً به اندازه ۴ تا ۵ میکرون کم می شود. در واقع، در دبی ۱۴ لیتر بر دقیقه رفتار افشانه تفاوت چندانی با دبی ۱۸ لیتر بر دقیقه ندارد. به همین علت است که رفتار فیزیکی تغییر ضخامت لایه متوسط مایع با افزایش دبی حجمی آب در شکل ۸ برای دبی حجمی هوای ۱۴ و ۱۸ لیتر بر دقیقه تقریباً منطبق شده است.



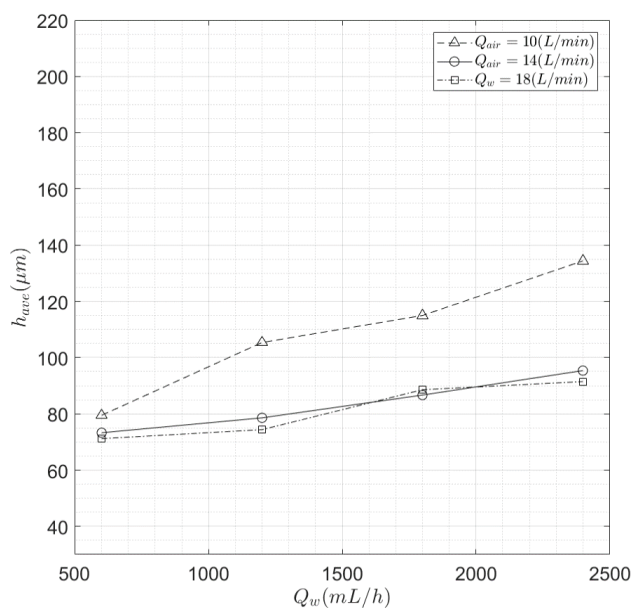


Figure 8- Variation of the liquid film thickness with the volumetric water flow rate in the distance from nozzle to surface of 1 cm  
 شکل ۸- تغییر ضخامت متوسط لایه مایع بر حسب دبی حجمی سیال آب فاصله انژکتور تا سطح یک سانتی‌متر

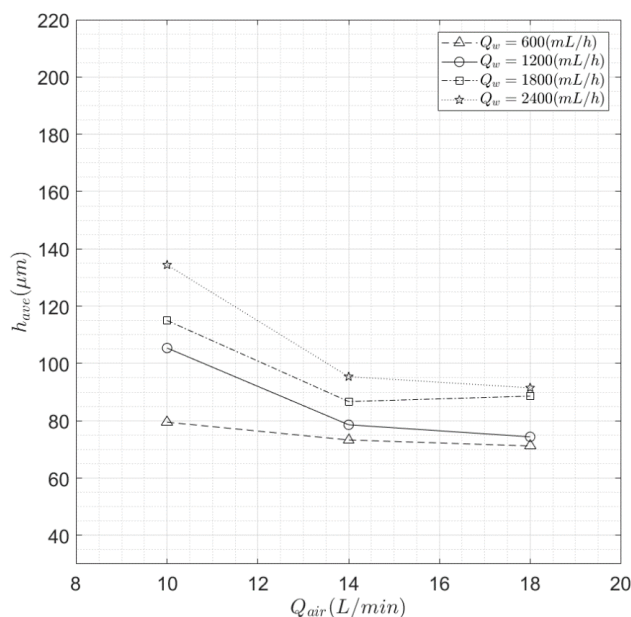
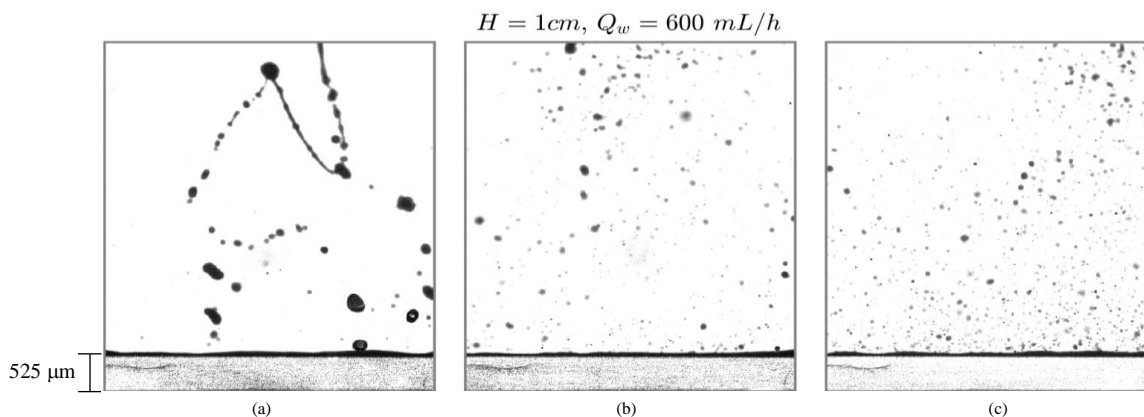


Figure 9- Variation of the liquid film thickness with the volumetric air flow rate in the distance from nozzle to surface of 1 cm  
 شکل ۹- تغییر ضخامت متوسط لایه مایع بر حسب دبی حجمی سیال هوا و فاصله انژکتور تا سطح یک سانتی‌متر

برای درک بهتر این موضوع، در شکل ۱۰، تصویر افشانه به همراه لایه مایع تشکیل شده در دبی حجمی ثابت آب ۶۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت و دبی‌های مختلف هوا نشان داده شده است. همان‌طور که پیداست، حالت شکست و تشکیل قطرات در دبی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه با دو دبی دیگر کاملاً متفاوت است. اندازه قطرات بسیار بزرگ‌تر بوده و رباطها هنوز کاملاً شکسته نشده‌اند که باعث می‌شود ضخامت متوسط لایه مایع رشد بسیار زیادی نسبت به مقدار آن در دبی‌های هوای دیگر داشته باشد.

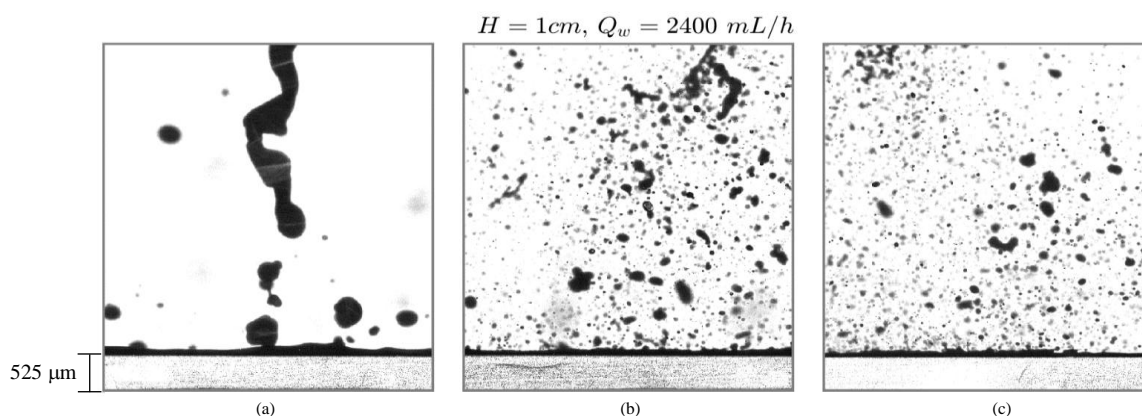
#### 1. Ligaments

با افزایش دبی آب به مقدارهای بالاتر از ۶۰۰ میلی لیتر بر ساعت، همان طور که در نمودار شکل ۹ مشاهده می شود، شیب تغییر ضخامت بالاتر نیز می رود که البته به علت افزایش قطر و تعداد قطرات مایع است.



**Figure 10- Spray impingement and liquid film for volumetric water flow rate of 600 mL/h and different volumetric air flow rate in the distance from nozzle to surface of 1 cm, (a) air flow rate of 10 L/min, (b) air flow rate of 14 L/min, (c) air flow rate of 18 L/min**  
 شکل ۱۰- شکل افشانه به همراه لایه مایع برای افشانه رقیق در ارتفاع یک سانتی متری انژکتور از سطح، (a) دبی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه، (b) دبی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه و (c) دبی هوای ۱۸ لیتر بر دقیقه

برای درک بهتر این موضوع، شکل ۱۱ تصویر افشانه به همراه لایه مایع بر روی سطح جامد در دبی حجمی سیال آب ۲۴۰۰ میلی لیتر بر ساعت را نشان می دهد. همان طور که در شکل پیداست، قطر قطرات نسبت به دبی حجمی سیال آب ۶۰۰ میلی لیتر بر ساعت افزایش پیدا کرده است. بسیار واضح است که افشانه در این دبی حجمی چگال است و پراکندگی قطرات بسیار کم بوده و تعداد آن ها بسیار افزایش پیدا کرده است. نکته مهم دیگر این است که در این فاصله انژکتور تا سطح و در دبی بالای سیال آب، قطرات افشانه از شکست اولیه جت به وجود آمدند. همچنین، با توجه به شکل، می توان قطراتی را مشاهده کرد که با یکدیگر برخورد کرده اند و یک شکل پیچیده غیر کروی از سیال را تشکیل داده اند. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که افشانه در دبی های حجمی بالاتر از ۶۰۰ میلی لیتر بر ساعت چگال شده و باعث ایجاد تفاوت محسوسی در اندازه ضخامت متوسط لایه مایع در دبی هوای ۱۰ (شکل ۱۱- a) با دبی های ۱۴ و ۱۸ لیتر بر دقیقه (شکل ۱۱- b و شکل ۱۱- c) می شود.



**Figure 11- Spray impingement and liquid film for volumetric water flow rate of 2400 mL/h and different volumetric air flow rate in the distance from nozzle to surface of 1 cm, (a) air flow rate of 10 L/min, (b) air flow rate of 14 L/min, (c) air flow rate of 18 L/min**  
 شکل ۱۱- شکل افشانه به همراه لایه مایع برای افشانه چگال در ارتفاع یک سانتی متری انژکتور از سطح، (a) دبی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه، (b) دبی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه و (c) دبی هوای ۱۸ لیتر بر دقیقه

همان طور که اشاره شد، قطرات در فاصله نزدیک انژکتور تا سطح ناشی از شکست اولیه جت سیال اند، اما با دور شدن از انژکتور شکست ثانویه رخ داده و سایز آن ها تغییر می کند. با فاصله گرفتن از انژکتور احتمال برخورد قطرات با یکدیگر نیز کاهش پیدا می کند و شکل قطرات تقریباً کروی باقی می ماند. شکل ۱۲ تغییر ضخامت متوسط لایه مایع بر حسب دبی حجمی سیال آب در سه دبی حجمی هوا را نشان می دهد. با توجه به شکل می توان متوجه شد که تفاوت محسوسی در رفتار تغییر ضخامت متوسط لایه مایع در سه دبی حجمی هوا وجود دارد. در دبی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه، افزایش دبی حجمی آب باعث افزایش ضخامت متوسط لایه مایع به مقدار قابل توجهی حتی تا حدود ۲۱۰ میکرون می شود، اما افزایش دبی حجمی سیال آب در دو دبی دیگر تا حدودی با دبی حجمی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه تفاوت دارد. در دبی هوای ۱۴ و ۱۸ لیتر بر دقیقه، همان طور که مشاهده می شود، رفتار فیزیکی تغییر ضخامت متوسط لایه مایع با دبی حجمی آب بسیار شبیه به هم است و تقریباً هر دو یک رفتار مشابه را از خود نشان می دهند. این مشاهده مجدداً تایید می کند که در دبی هوای کم حالت تشکیل قطرات با دو دبی دیگر کاملاً متفاوت است و اصطلاحاً مود جدیدی با افزایش دبی هوا به بالاتر از ۱۰ لیتر بر دقیقه ایجاد شده است. این مود جدید همان ایجاد قطرات ریزتر و ایجاد یک افشانه یکنواخت توسط جریان هوای بیشتر است. در دو دبی بالاتر هوا، در ابتدا، مقدار ضخامت متوسط لایه مایع در دبی حجمی بسیار پایین آب (۶۰۰ میلی لیتر بر ساعت) کم است. یادآوری می شود که افشانه در دبی یاد شده بسیار رقیق است. با افزایش بیشتر دبی حجمی سیال از حالت رقیق به چگال، ضخامت متوسط لایه مایع در هر دو دبی ۱۴ و ۱۸ لیتر بر دقیقه افزایش می یابد. اما، افزایش بیشتر دبی آب تا مقدار ۲۴۰۰ میلی لیتر بر ساعت دیگر تاثیری بر روی ضخامت متوسط لایه مایع ندارد و مقدار آن در دبی های حجمی سیال، که افشانه در آن چگال است، ثابت باقی می ماند.

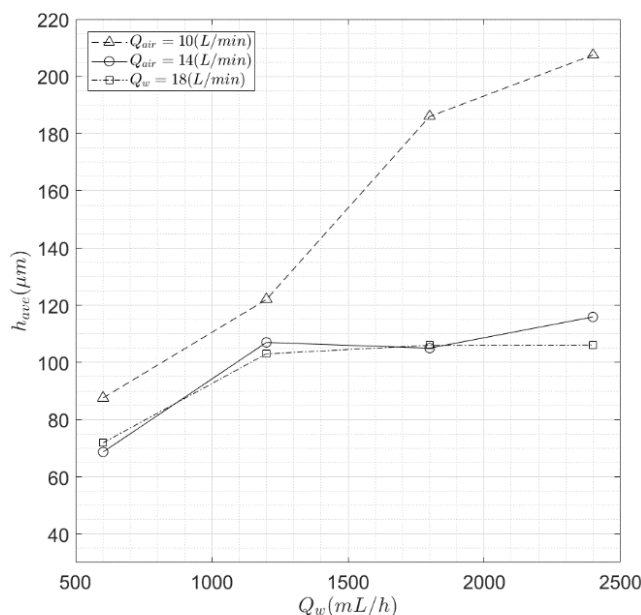


Figure 12- Variation of the liquid film thickness with the volumetric water flow rate in the distance from nozzle to surface of 3 cm  
 شکل ۱۲- تغییر ضخامت متوسط لایه مایع بر حسب دبی حجمی سیال آب فاصله انژکتور تا سطح سه سانتی متر

برای درک بهتر، در شکل ۱۳ تغییرات ضخامت متوسط لایه مایع بر حسب تغییر دبی حجمی هوا در دبی های حجمی ثابت آب نشان داده شده است. با توجه به نمودار مشخص است که در دبی حجمی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه، ضخامت متوسط لایه مایع در ابتدا نسبت به مقدار آن در دو دبی ۱۴ و ۱۸ لیتر بر دقیقه بسیار زیاد است. همچنین، در دو دبی ۱۴ و ۱۸ لیتر بر

دقیقه، ضخامت لایه مایع تقریباً در تمام دبی‌های حجمی سیال مایع ثابت بوده و تغییر محسوسی با افزایش دبی حجمی آب نداشته است. علت فیزیکی این اتفاق به دو امر می‌تواند بسیار مرتبط باشد. اول اینکه در دبی‌های هوا و مایع بیشتر افشانه کاملاً توسعه یافته است و قطرات ریزتری تولید شده‌اند. بنابراین، در مجموع، ضخامت ایجاد شده را به‌طور محسوس تحت تاثیر قرار نمی‌دهند. علت دوم اینکه جریان هوای بیشتر خود باعث می‌شود لایه مایع ایجاد شده تحت فشار هوای بیشتری قرار گیرد، زیرا هوای خروجی از انژکتور نیز بر روی سطح دمیده می‌شود. این فشار هوا خود باعث جلوگیری از رشد بیشتر لایه مایع می‌شود. تصاویر مربوط به افشانه برای دبی حجمی آب ۶۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت و ۲۴۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت به ترتیب در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ نشان داده شده است.

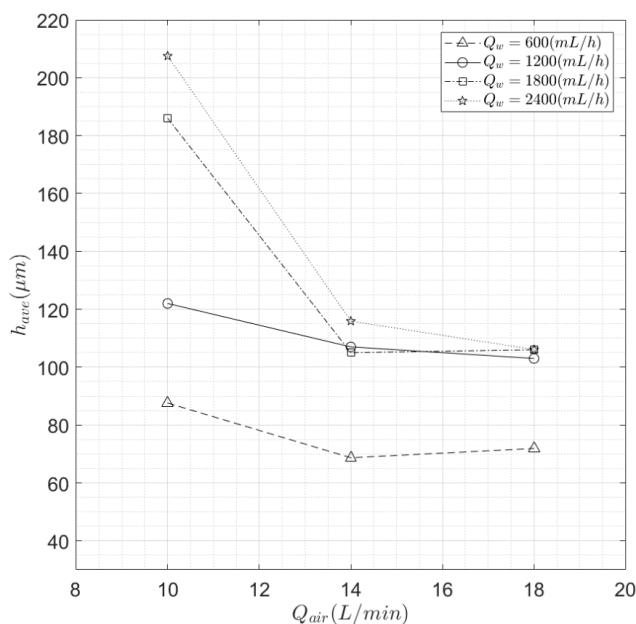


Figure 13- Variation of the liquid film thickness with the volumetric air flow rate in the distance from nozzle to surface of 3 cm

شکل ۱۳- تغییر ضخامت متوسط لایه مایع بر حسب دبی حجمی سیال هوا فاصله انژکتور تا سطح سه سانتی متر

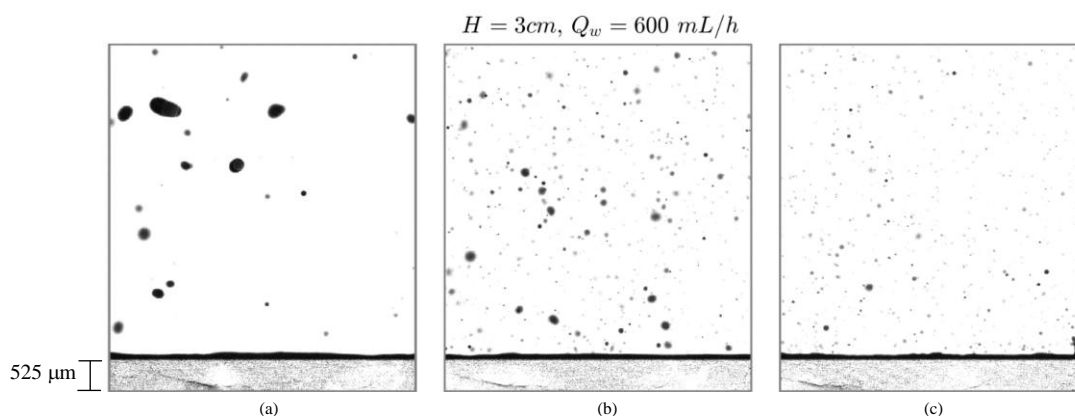
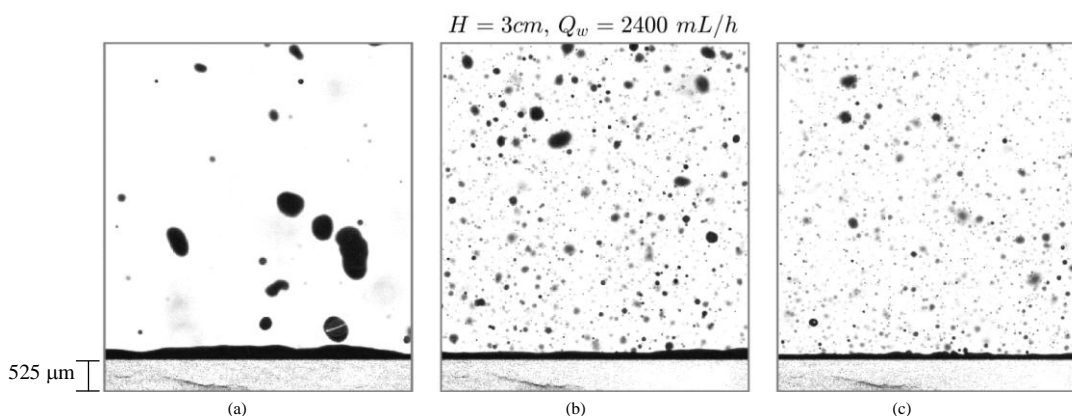


Figure 14- Spray impingement and liquid film for volumetric water flow rate of 600 mL/h and different volumetric air flow rate in the distance from nozzle to surface of 3 cm, (a) air flow rate of 10 L/min, (b) air flow rate of 14 L/min, (c) air flow rate of 18 L/min

شکل ۱۴- شکل افشانه به‌همراه لایه مایع برای افشانه رقیق در ارتفاع سه سانتی‌متری انژکتور از سطح، (a) دبی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه، (b) دبی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه و (c) دبی هوای ۱۸ لیتر بر دقیقه



**Figure 15- Spray impingement and liquid film for volumetric water flow rate of 2400 mL/h and different volumetric air flow rate in the distance from nozzle to surface of 3 cm, (a) air flow rate of 10 L/min, (b) air flow rate of 14 L/min, (c) air flow rate of 18 L/min**

شکل ۱۵- شکل افشانه به همراه لایه مایع برای افشانه چگال در ارتفاع سه سانتی متری انژکتور از سطح، (a) دبی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه، (b) دبی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه و (c) دبی هوای ۱۸ لیتر بر دقیقه

### بررسی تاثیر افزایش فاصله انژکتور تا سطح

شکل ۱۶ نشان دهنده تغییرات ضخامت لایه مایع در فواصل ۱، ۳ و ۶ سانتی متر از سطح تست است. با توجه به این نمودارها می توان دریافت که به طور کلی با افزایش ارتفاع انژکتور تا سطح به مقدار شش سانتی متر، ضخامت متوسط لایه مایع در هر سه دبی حجمی هوا کاهش پیدا می کند. در دبی حجمی سیال آب ۶۰۰ میلی لیتر بر ساعت افشانه بسیار رقیق بوده و تعداد قطرات کم است و همچنین فاصله آن ها از هم زیاد بوده که این امر باعث می شود پراکندگی آن ها زیاد شود. قطر قطرات در طول مسیر نیز، به علت شکست ثانویه، کاهش پیدا می کند. در نتیجه گستردگی افشانه در فواصل دورتر از انژکتور بسیار بیشتر شده و باعث کاهش چشمگیر ضخامت لایه مایع در فاصله شش سانتی متری انژکتور از سطح مایع می شود.

رفتار تغییر ضخامت متوسط لایه مایع با تغییر ارتفاع انژکتور از سطح برای رژیم عملکردی چگال افشانه تا حدودی متفاوت می شود. با توجه به نمودار تغییرات یادشده، در شکل ۱۶، برای دبی های سیال ۱۲۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۴۰۰ میلی لیتر بر ساعت، اول از همه می توان مشاهده کرد که ضخامت متوسط لایه مایع در دبی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه بسیار بیشتر از ضخامت متوسط لایه مایع در دو دبی هوای دیگر است. همچنین، نکته قابل توجه این است که در تمامی دبی های حجمی هوا، ضخامت متوسط لایه مایع، در ابتدا، با افزایش ارتفاع انژکتور تا سطح، به مقدار شش سانتی متر، به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا می کند، اما، با افزایش بیشتر فاصله انژکتور تا سطح، به مقدار شش سانتی متر ضخامت متوسط لایه مایع کاهش پیدا می کند که همچنان مقدار آن بیشتر از مقدار ضخامت متوسط لایه مایع در ارتفاع یک سانتی متری است. علت اینکه ضخامت متوسط لایه مایع در ارتفاع شش سانتی متری انژکتور نسبت به ارتفاع سه سانتی متری کاهش پیدا می کند. پراکنده شدن قطرات در افشانه در فواصل دورتر از انژکتور است. در نتیجه قطرات کمتری به سطح جامد برخورد می کنند. اما، در فاصله یک سانتی متری انژکتور از سطح، علت اینکه ضخامت متوسط لایه مایع نسبت به دو ارتفاع دیگر کمتر شده است تاثیر مستقیم برخورد جت هوای هم محور با لایه مایع است. هندسه انژکتور به نحوی عمل می کند که هوا با دبی حجمی نسبتا بالا از آن خارج می شود. در فاصله نزدیک انژکتور تا سطح، این هوا به طور مستقیم به سطح برخورد می کند. برخورد هوا با سطح باعث جلوگیری از انباشتگی بیش از حد مایع بر روی سطح می شود. در نتیجه، در فاصله نزدیک تا سطح، با استفاده از مزیت برخورد مستقیم هوا به سطح می توان ضخامت متوسط لایه مایع را کنترل کرد و مانع از افزایش بیش از حد آن شد. در واقع، کنترل ضخامت متوسط لایه مایع با استفاده از جت هوای برخوردی با سطح بایستی به نحوی مدیریت شود که هم با کاهش بیش از حد ضخامت لایه مایع بازده خنک کاری

در محفظه احتراق افت پیدا نکند و هم ضخامت بیش از حد آن باعث ایجاد دوده و انباشتگی آن بر روی سطح نشود. در نتیجه، فاصله انژکتور تا سطح نقش مهمی در تغییر ضخامت متوسط لایه مایع دارد.

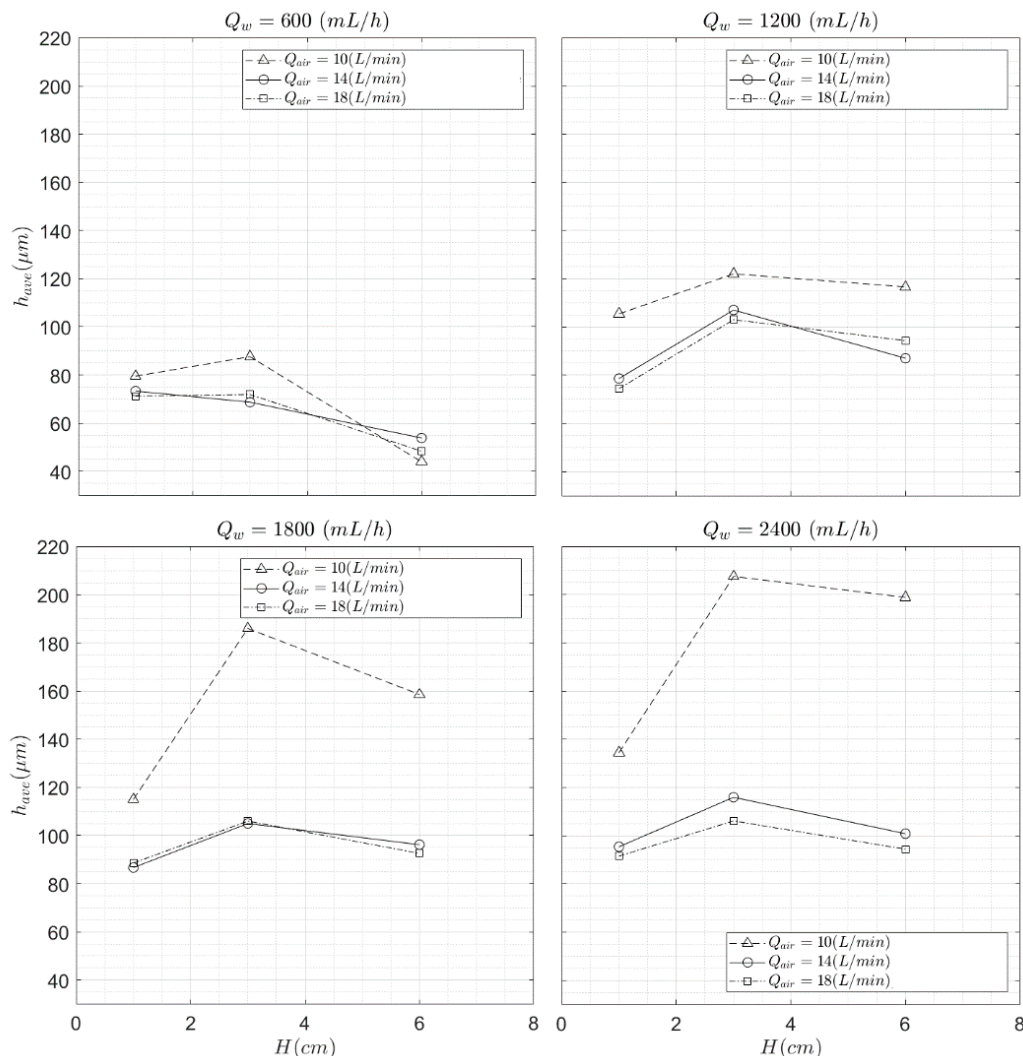


Figure 16- Variation of liquid film thickness with the distance from nozzle to surface  
 شکل ۱۶- نمودار تغییرات ضخامت متوسط لایه مایع بر حسب ارتفاع انژکتور از سطح

### نتیجه گیری

در این پژوهش علمی، سعی شده، با استفاده از روش‌های اپتیکی ممکن، ضخامت لایه مایع حاصل از برخورد افشانه با سطح جامد هم‌دم با محیط آزمایشگاه اندازه‌گیری و سپس تاثیر پارامترهای مختلف بر روی آن بررسی شود. اهمیت این موضوع از این جهت است که در صنعت پدیده برخورد افشانه با سطح دارای کاربردهای مختلفی از جمله خنک‌کاری دیواره داغ محفظه احتراق است. اندازه‌گیری ضخامت لایه مایع تشکیل‌شده بر روی دیواره محفظه احتراق می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد ترکیب سوخت و اکسید قبل از احتراق در اختیار طراح قرار دهد. اما، قبل از پیچیده‌شدن مسئله، بررسی برخورد افشانه با سطح جامد و هم‌دم با محیط می‌تواند امکان بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر اندازه ضخامت لایه مایع را مهیا کند. در این تحقیق، در ابتدا، تحقیقات انجام‌گرفته در زمینه اندازه‌گیری ضخامت لایه مایع مورد مطالعه قرار گرفت و با جمع‌بندی از

روش‌های اپتیکی به کار گرفته شده و امکان‌سنجی از تجهیزات موجود در آزمایشگاه، روش سایه‌نگاری به وسیله نور ضربانی برای اندازه‌گیری ضخامت متوسط لایه مایع برگزیده شد. بعد از توضیح تجهیزات به کاررفته و چیدمان آزمایشگاهی، نحوه پردازش تصاویر و استخراج اندازه ضخامت لایه مایع از عکس‌های خام توضیح داده شد. به‌عبارت دیگر اندازه‌گیری ضخامت لایه مایع، در این پروژه سعی بر این شد که پارامترهای تاثیرگذار بر اندازه ضخامت لایه مایع مورد توجه قرار بگیرد. نتایج نشان می‌دهد که افشانه در دبی‌های حجمی مختلف سیال دو نوع رفتار متفاوت از خود نشان می‌دهد. خلاصه نتایج به‌دست آمده از این آزمایش‌ها را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

- تاثیر افزایش دبی حجمی آب بر روی ضخامت متوسط لایه مایع در دبی‌های حجمی اندازه‌گیری شد. در این آزمایش‌ها دبی حجمی سیال آب از ۶۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت تا ۲۴۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت متغیر بود. همچنین، این آزمایش‌ها برای سه دبی مختلف هوای ۱۰، ۱۴ و ۱۸ لیتر بر دقیقه تکرار شد. نتایج نشان داد که افزایش دبی حجمی سیال آب باعث افزایش ضخامت متوسط لایه مایع می‌شود، زیرا افزایش دبی حجمی آب باعث افزایش تعداد قطرات موجود در افشانه می‌شود.
- تاثیر افزایش دبی حجمی سیال هوا از ۱۰ لیتر بر دقیقه به ۱۸ لیتر بر دقیقه در دبی‌های ثابت سیال آب بر روی ضخامت متوسط لایه مایع اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که ضخامت متوسط لایه مایع در برخورد افشانه در دبی حجمی هوای ۱۰ لیتر بر دقیقه تفاوت محسوسی نسبت به ضخامت لایه در برخورد افشانه در دو دبی حجمی هوای دیگر دارد و با افزایش دبی حجمی هوا ضخامت لایه مایع کاهش می‌یابد.
- تاثیر تغییرات فاصله نازل تا سطح نیز مورد بررسی قرار گرفت و برخورد افشانه بر روی سطح در فواصل ۱، ۳ و ۶ سانتی‌متری آزمایش شد. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که با افزایش ارتفاع انژکتور تا سطح از یک سانتی‌متر به شش سانتی‌متر، ضخامت متوسط لایه مایع در مقادیر مختلف دبی حجمی هوا کاهش پیدا می‌کند. همچنین، مقایسه نتایج برای مقادیر مختلف دبی حجمی آب نشان داد که در دبی حجمی سیال آب ۶۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت، افشانه بسیار رقیق بوده و تعداد قطرات کم است که این امر پراکندگی زیاد قطرات را در پی دارد. قطر قطرات در طول مسیر نیز به علت شکست ثانویه کاهش پیدا می‌کند و باعث گستردگی افشانه در فواصل دورتر از انژکتور و کاهش چشمگیر ضخامت لایه مایع در فواصل بیشتر می‌شود.

## منابع

1. T. Anderson and I. Mudawar, "Microelectronic cooling by enhanced pool boiling of a dielectric fluorocarbon liquid," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, 1989, pp. 752-759.
2. I. Mudawar, "Recent advances in high-flux, two-phase thermal management," *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 5, 2013, , pp. 1-15.
3. I. Mudawar, "Assessment of high-heat-flux thermal management schemes," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 24, 2001, pp. 122-141.
4. A. H. Lefebvre, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Pub., Corp., New York, 1989.
5. D. E. Tilton and C. L. Tilton, *High heat flux evaporative spray cooling*, ed: Google Patents, USA, Parker Intangibles LLC, 1993.
6. J. Yang, L. Chow, M. Pais and A. Ito, "Liquid film thickness and topography determination using Fresnel diffraction and holography," *EXPERIMENTAL HEAT TRANSFER An International Journal*, Vol. 5, 1992, pp. 239-252.
7. W. Mathews, C. F. Lee and J. E. Peters, "Experimental investigations of spray/wall impingement," *Atomization and Sprays*, Vol. 13, 2003, pp. 223-242.
8. A. Pautsch and T. Shedd, "Adiabatic and diabatic measurements of the liquid film thickness during spray cooling with FC-72," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, 2006, pp. 2610-2618.
9. S. S. Hsieh, G. W. Chen and Y. F. Yeh, "Optical flow and thermal measurements for spray cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 87, 2015, pp. 248-253.
10. E. Martínez-Galván, R. Antón, J. C. Ramos and R. Khodabandeh, "Influence of surface roughness on a spray cooling system with R134a. Part I: Heat transfer measurements," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 46, 2013, pp. 183-190.

11. J. Xie, R. Zhao, F. Duan and T. Wong, "Thin liquid film flow and heat transfer under spray impingement," *Applied thermal engineering*, Vol. 48, 2012, pp. 342-348.
12. X. Q. Chen, L. Chow and M. Sehmbe, "Thickness of film produced by pressure atomizing nozzles," *30th Thermophysics Conference*, San Diego, CA, USA, 1995.
13. J. y. Jia, Y. x. Guo, W. d. Wang and S. r. Zhou, "Modeling and experimental research on spray cooling," *2008 Twenty-fourth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, pp. 118-123, San Jose, CA, USA 2008.
14. R. K. Sharma, C. E. Bash and C. D. Patel, "Experimental investigation of heat transfer characteristics of inkjet assisted spray cooling," *ASME 2004 Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference*, pp. 479-486, Charlotte, North Carolina, USA, 2004.
15. F. Schulz and F. Beyrau, "The effect of operating parameters on the formation of fuel wall films as a basis for the reduction of engine particulate emissions," *Fuel*, Vol. 238, 2019, pp. 375-384.
16. L. Allocca, M. Lazzaro, G. Meccariello and A. Montanaro, "Schlieren visualization of a GDI spray impacting on a heated wall: Non-vaporizing and vaporizing evolutions," *Energy*, Vol. 108, 2016, pp. 93-98.
17. H. Mirzabe, M. Bazazzadeh and H. Janipoor, "Numerical investigation of the effect of the back pressure and orifice length to diameter ratio on liquid film thickness and angle of spray in liquid fuel swirl injector", *Mechanical engineering national conference*, Shiraz university, Safashahr kharazmi international institute, 2015. (in persian)
18. A. M. Gañán-Calvo, "Enhanced liquid atomization: From flow-focusing to flow-blurring," *Applied Physics Letters*, Vol. 86, 2005, pp. 1-3.
19. M. Jafari, *Experimental study of spray cooling of a heated wall*, Msc Thesis, Department of Aerospace Engineering, Sharif university of technology, 2020. (in persian)

## English Abstract

### Experimental study of liquid film thickness formed by spray impingement on a solid surface

Mohammad Reza Morad<sup>1\*</sup> and Alireza Ramezani<sup>2</sup>

1- Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology, morad@sharif.ir

2- Iranian Space Research Center, ramezani\_a@alum.sharif.edu

\*Corresponding author

(Received: 2020.02.24, Received in revised form: 2020.04.06, Accepted: 2020.04.14)

Spray impingement on a solid surface has been studied. A flow blurring injector is used to atomized the liquid. In this type of injector, a back flow of air penetrates into the liquid orifice at the orifice exit just before the injection surface. The remained air flow rate also squeezes the two phase flow at the orifice exit. Here, the film thickness formed by the impingement of the spray with a thin wall is measured using imaging techniques. The results showed that at the high volumetric liquid flow rate there is a liquid film on solid surface which can lead to an incomplete combustion. There are many parameters which can affect the liquid film on the surface like liquid and gas flow rates and distance from nozzle to surface. In this study it is intended to measure and analyze the liquid film which is formed by the spray of the novel injector named flow blurring injector and investigate the effect of aforementioned parameters.

**Keywords:** Spray, liquid film, flow blurring injector