



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

بررسی تجربی برخورد قطرات با سطوح با در نظر گرفتن اثرات

حرارتی

نگارنده:

سحر عرش تبار

اساتید راهنما:

دکتر محسن نظری

دکتر محمد محسن شاه مردان

اردیبهشت ۱۳۹۷

ب

شماره: ۱۵۹/۲۹۷/۱۳
تاریخ: ۲۴/۳/۹۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم سحر عرش تبار با شماره دانشجویی ۹۴۱۲۲۰۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی تجربی برخورد قطرات با سطوح با در نظر گرفتن اثرات حراتی که در تاریخ ۱۳۹۷/۲/۱۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود <input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: عالی.....)			
نوع تحقیق: <input type="checkbox"/> نظری <input checked="" type="checkbox"/> عملی			
امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر محسن نظری	۱- استاد راهنمای اول
	دانشیار	دکتر محمد محسن شاه مردان	۲- استاد راهنمای دوم
	-	-	۳- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر پوریا اکبر زاده	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر محمود نوروزی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر علی سررشته داری	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم به:

بهترین‌های زندگی‌ام

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی:

نمال را "باران" باید، تا سیرایش کند از آبه حیات و "آفتاب" باید تا بتاباند نیرو
را و محکم کند شاخه های تازه روپیده را:

بسی شایسته است از اساتید فرهیخته و با کمالات، جناب آقای دکتر محسن
نظری و دکتر محمدمحسن شاه مردان که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و
فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این
پروژه را برعهده گرفتند، کمال تشکر و قدردانی را بجای آورم.

با سپاس و تشکر فراوان از دوستان عزیزم، ساجده شعبانپور و مینا محمدی که
در طول به انجام رساندن این پروژه، از هیچ محبتی به من دریغ نکردند و بهانه‌ای
برای دلگرمی اینجانب برای ادامه‌ی راه بوده‌اند.

سحر عرش تبار

بهار ۱۳۹۷

تعهد نامه

اینجانب سحر عرش تبار دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تجربی برخورد قطرات با سطوح با در نظر گرفتن اثرات حرارتی تحت راهنمایی دکتر محسن نظری و دکتر محمد محسن شاه مردان متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

برخورد قطره با سطح جامد، پدیده‌ای است که به‌طور فراوان در طبیعت رخ می‌دهد و در موارد زیادی حائز اهمیت است و کاربردهای صنعتی فراوانی در زمینه‌های مهندسی مدرن و پزشکی دارد. در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی تجربی برخورد قطره‌ی آب با سطح مسی با در نظر گرفتن اثرات حرارتی پرداخته می‌شود. اثرات پارامترهای موثر مانند جنس سطح برخورد، ارتفاع قطره از سطح، سرعت برخورد و اثرات حرارتی برخورد بر رفتار قطره در حین پخش شدن و جمع شدن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در نهایت به محاسبه‌ی قطر تماس بی‌بعد، شار حرارتی، انتقال حرارت کل جذب شده توسط قطره و اثرات خنک کننده می‌پردازیم. قطره‌ی آب در سرعت‌های برخورد ۰/۳۵۲، ۰/۷۶۱، ۱/۲۷۲، ۱/۴۵۹ و ۱/۶۰۹ متر بر ثانیه بر روی سطح مسی با دماهای متفاوت ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲، ۶۵ و ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد برخورد می‌کند. بررسی آزمایشگاهی حاضر نشان می‌دهد با در نظر گرفتن دمای ثابت برای سطح مسی، چنانچه عدد وبر برای لحظه‌ی برخورد افزایش یابد، قطرهای تماس بی‌بعد نیز افزایش می‌یابند در حالیکه زمان رسیدن به ماکزیمم قطر پخش شدن اندکی کاهش می‌یابد. همچنین هنگامی که قطره‌ی آب با سطح مسی گرم برخورد می‌کند، ماکزیمم مقدار شار حرارتی در لحظات اولیه‌ی برخورد صورت می‌گیرد و با گذشت زمان از مقدار شار حرارتی کاسته خواهد شد. همچنین با افزایش دمای اولیه‌ی سطح، مقدار شار حرارتی نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود در عدد وبر ثابت با افزایش دما، ماکزیمم قطر پخش شدن اندکی افزایش می‌یابد، در حالیکه ماکزیمم قطر جمع شدن به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش ویسکوزیته لایه نازک مایع روی سطح گرم می‌باشد.

کلمات کلیدی: برخورد قطره، سطح جامد، سرعت برخورد، دمای سطح.

فهرست مطالب

۱- فصل اول.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- کاربردها.....	۲
۱-۳- مروری بر مطالعات انجام شده.....	۴
۱-۴- اهداف تحقیق و نوآوری.....	۲۲
۱-۵- ساختار پایان نامه.....	۲۳
۲- فصل دوم.....	۲۵
۲-۱- مقدمه.....	۲۶
۲-۲- دیتالاگر.....	۲۶
۲-۳- دوربین عکس برداری پرسرعت.....	۲۶
۲-۴- پمپ تزریق سرنگی.....	۲۸
۲-۵- عایق پشم شیشه.....	۲۹
۲-۶- عایق پلی آمید.....	۳۰
۲-۷- کویل هیتر.....	۳۰
۲-۸- سنسور اندازه گیری دما.....	۳۱
۲-۹- کنترل کننده ی پی آی دی.....	۳۲
۲-۹-۱- کنترلر ای پنج سی سی.....	۳۲
۲-۱۰- رله اس آر یا حالت جامد.....	۳۳
۲-۱۰-۱- سطح برخورد مسی.....	۳۳
۲-۱۱- چیدمان نهایی تجهیزات آزمایشگاهی و شرح آزمایش.....	۳۳

۳۳	..... دستگاه آزمایش ۱-۱۱-۲
۳۵	..... شرح آزمایش ۲-۱۱-۲
۳۹	..... فصل سوم ۳-۱۱-۲
۴۰	..... مقدمه ۱-۳-۳
۴۰	..... تحلیل داده‌ها و نتایج ۲-۳-۳
۴۰	..... حرکت سقوط آزاد قطره ۳-۳-۳
۴۱	..... عدد بی بعد مشخصه فیزیک حاضر ۴-۳-۳
۴۱	..... نتایج آزمایشگاهی برخورد قطره آب به سطح مسی بدون اثرات انتقال حرارت ۵-۳-۳
۴۶	..... نتایج آزمایشگاهی برخورد قطره آب به سطح مسی با اثرات انتقال حرارت ۶-۳-۳
۵۰	..... اثرات دماهای مختلف سطح بر تغییر شکل قطره ۱-۶-۳
۵۲	..... اثرات دمای سطح بر روی میزان پخش شدگی قطره روی سطح ۲-۶-۳
۵۵	..... شرح اثر خنک کننده ۷-۳-۳
۵۷	..... اثر خنک کننده ۱-۷-۳
۵۷	..... مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی حاضر با بررسی‌های پیشین ۸-۳-۳
۶۲	..... بررسی انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره‌ی آب بعد از برخورد روی سطح ۹-۳-۳
۶۴	..... بررسی نتایج آزمایشگاهی اثر خنک کننده ۱۰-۳-۳
۷۱	..... تکرار کردن آزمایشات انجام شده به منظور دستیابی به نتایج صحیح‌تر ۱۲-۳-۳
۷۳	..... فصل چهارم ۴-۱۱-۲
۷۴	..... نتیجه‌گیری ۱-۴-۴
۷۵	..... پیشنهادات ۲-۴-۴
۷۷	..... پیوست ۵-۱۱-۲

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: شماتیکی از فرایند لایه نشانی توسط پاشش پلاسمایی [۷]..... ۳
- شکل ۱-۲: تصاویر مربوط به نتایج آزمایشگاهی برخورد قطره‌ی قلع مذاب با سطح فولادی در دماهای متفاوت ۲۵، ۱۵۰ و ۲۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و با سرعت برخورد ۱/۶ متر برثانیه [۱۴]. ۶
- شکل ۱-۳: مقایسه تصاویر آزمایشگاهی بدست آمده توسط پسندیده و همکاران [۱۶] با تصاویر بدست آمده از حل عددی توسط استروتوس و همکاران [۱۵] برای برخورد قطره بر روی سطح با سرعت ۱/۳ متر بر ثانیه..... ۸
- شکل ۲-۲: پمپ تزریق سرنگ JMS همراه با سرنگ تزریق..... ۲۹
- شکل ۲-۵: کویل هیتر استفاده شده در نیمه‌ی پایینی استوانه‌ی مسی با توان ۳۰۰ وات..... ۳۱
- شکل ۲-۷: کنترلر پی‌آی دی مدل ای پنج سی سی، ساخت شرکت امرن ژاپن..... ۳۲
- شکل ۲-۱۰ (الف): تصویری از چیدمان نهایی تجهیزات آزمایشگاهی..... ۳۶
- شکل ۳-۱: برخورد قطره‌ی آب با سطح مسی با دمای ۲۴/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد در اعداد وبر مختلف..... ۴۳
- شکل ۳-۲: مراحل تغییر شکل قطره‌ی آب پس از برخورد بر روی سطح مسی با دمای ۲۴/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد و عدد وبر ۲۴/۳..... ۴۴
- شکل ۳-۳: برخورد قطره‌ی آب با سطح مسی با دمای ۲۴/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد در اعداد وبر مختلف..... ۴۶

فهرست جداول

جدول ۱-۳ خصوصیات آب و ماس مورد استفاده در شرایط

آزمایشگاهی.....۵۸

فهرست علائم و اختصارات

<p>مساحت ناحیه تماس قطره با سطح جامد در حین پخش و جمع شدن قطره بر روی سطح، m^2</p>	A_c
<p>گرمای ویژه قطره، $\frac{J}{kg.K}$</p>	C_p
<p>گرمای ویژه قطره مایع در لحظه‌ی برخورد با سطح، $\frac{J}{kg.K}$</p>	$C_{p,liq,0}$
<p>ضریب اصلاح برای شار گرمایی جذب شده توسط قطره، -</p>	C_q
<p>قطر تماس قطره و سطح، m</p>	$D(t)$
<p>قطر تماس بی‌بعد، -</p>	D^*
<p>قطر اولیه‌ی قطره، m</p>	D_0
<p>قطر افقی قطره، m</p>	d_x
<p>قطر عمودی قطره، m</p>	d_y
<p>شتاب گرانش زمین، $\frac{m}{s^2}$</p>	g
<p>فاصله‌ی قطره از لحظه‌ی رها شدن تا برخورد با سطح، m</p>	H
<p>ارتفاع بی‌بعد قطره در حین پخش و جمع شدن، -</p>	H^*
<p>ضریب اصلاح، -</p>	I_0
<p>رسانایی گرمایی، $\frac{W}{m.K}$</p>	K
<p>جرم قطره مایع، Kg</p>	m_{liq}
<p>عدد پرانتل، -</p>	Pr
<p>حداکثر انرژی حرارتی که قطره می‌تواند جذب کند، J</p>	$Q_{liq,max}$

$Q_{liq,tot}$	انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره، J
$q''_{c,th}$	شار حرارتی تئوری در نقطه‌ی برخورد، $\frac{W}{m^2}$
$q''_{liq,mean}$	میانگین شار حرارتی جذب شده توسط قطره، $\frac{W}{m^2}$
T	دمای سطح برخورد، °C
T_b	دمای اشباع، °C
$T_{c,th,0}$	دمای تماس اولیه در هنگام برخورد قطره به سطح، °C
T_{dr0}	دمای قطره در لحظه‌ی برخورد، °C
T_{fr}	دمای انجماد، °C
T_{w0}	دمای دیوار در لحظه‌ی برخورد قطره با سطح، °C
t	زمان، S
V_0	سرعت لحظه‌ی برخورد قطره با سطح، $\frac{m}{s}$
We	عدد وبر، -
Γ	ضریب وزن، -
γ	پخش کننده‌ی حرارتی، $\frac{J}{m^2 s^{0.5}}$
θ_c	دمای تماس بی‌بعد، -
θ_{dr}	دمای بی‌بعد قطره، -
ρ	چگالی قطره، $\frac{kg}{m^3}$
σ_{LV}	کشش سطحی بین فازهای مایع و گاز، $\frac{N}{m}$
α	ضریب نفوذ گرمایی، $\frac{m^2}{s}$
$\varepsilon(t)$	اثر خنک کننده، -

ویسکوزیته‌ی سینماتیکی، $\frac{m^2}{s}$

۹

فصل اول

مقدمه و تاریخچه

۱-۱- مقدمه

مطالعه‌ی بنیادی دینامیک قطرات و برخورد قطره با سطوح جامد گرم نقش مهمی در بسیاری از کاربردهای صنعتی دارد. کاربردهایی همانند: فرایندهای نقاشی و چاپ، صنایع متالوژی، در زمینه‌ی کشاورزی برای پاشش سموم روی گیاهان و از بین بردن آفت‌ها، همچنین در طبیعت هم می‌توان به تشکیل قطرات باران اشاره نمود. مطالعات نشان می‌دهد که با توجه به جنس سطح برخورد، ارتفاع قطره از سطح، سرعت برخورد، خواص قطره و دمای سطح، رفتار دینامیکی قطره پس از برخورد می‌تواند شامل حالت‌هایی مانند: ۱- پخش شدن کامل روی سطح تا رسیدن به حالت تعادل ۲- پخش شدن روی سطح همراه با تولید قطرات ثانویه ۳- بالا جستن، در این حالت قطره پس از برخورد با سطح و تغییر شکل بدون پارگی و تجزیه، از سطح جدا می‌شود [۱]. در این فصل ابتدا به بیان کاربردهای این موضوع در زمینه‌های مختلف می‌پردازیم. سپس به مروری بر مطالعات انجام شده توسط محققین، خواهیم پرداخت. در ادامه، اهداف تحقیق حاضر را بیان می‌کنیم و در نهایت به بیان کلی ساختار پایان نامه می‌پردازیم.

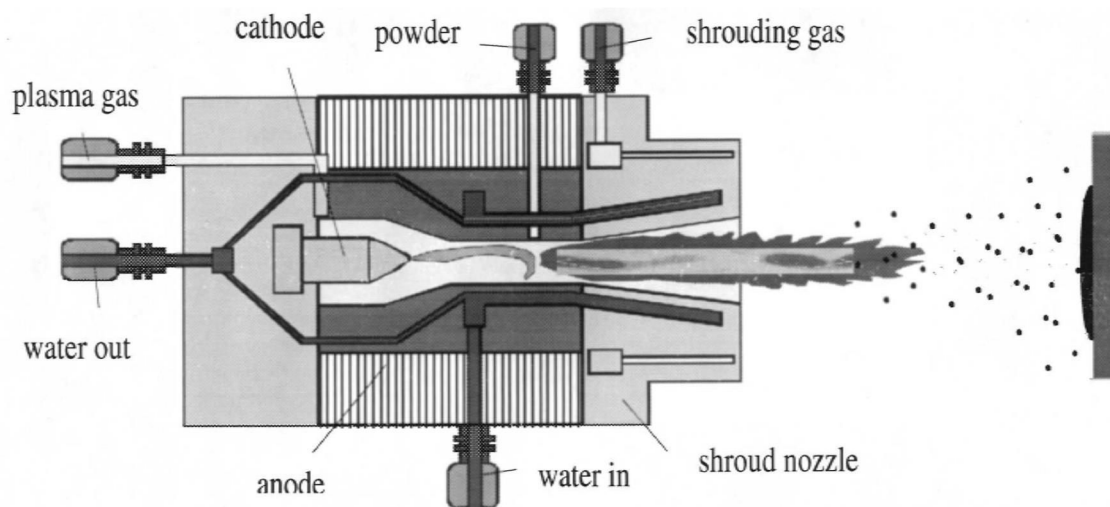
۱-۲- کاربردها

مطالعه بنیادی دینامیک قطرات و برخورد قطره با سطح جامد گرم در صدهای گذشته تا به امروز موضوع قابل توجهی بسیاری از محققین بوده است که به روش‌های مختلف عددی، تحلیلی و تجربی به بحث و بررسی در رابطه با این موضوع پرداختند. همچنین این پدیده نقش مهمی در بسیاری از کاربردهای صنعتی دارد. کاربردهایی همانند: فرسایش خاک، مواد و متالوژی، در زمینه کشاورزی می‌توان به پاشش سموم روی گیاهان اشاره نمود. سیستم‌های خنک‌سازی و آبپاش برای خاموش کردن آتش در هنگام آتش‌سوزی [۲]، در زمینه علوم کامپیوتر در چاپگر جوهرافشان^۱ [۳]، عملیات حرارتی آلیاژهای فلزی [۴]، چرخه تبرید^۲ [۵]، در طبیعت می‌توان به ساییدگی سطوح ناشی از انباشته شدن

¹ Inkjet printing

² Refrigeration Cycles

باران اشاره کرد. برای مثال: مکانیزم برخورد و گسترش یافتن قطرات سرد باران روی بدنه و بال هواپیما و تشکیل یخ بر روی آنها که این امر می‌تواند آیرودینامیک پرواز را به شدت تحت تاثیر خود قرار دهد [۶]. در صنایع تولید حشره کش‌ها، تقطیر، استخراج نفت از سنگ‌های متخلخل، فرسایش تیغه های توربین در صورت مرطوب بودن بخار ورودی به توربین، نقاشی، پاشش حرارتی پلاسمایی به منظور ایجاد لایه های بسیار مقاوم در مقابل خوردگی که در این فرایند ابتدا پودر یک ماده فلزی یا غیر فلزی ذوب شده و سپس با سرعت زیاد بر روی سطح مورد نظر پاشیده می‌شود. این فرآیند در فشار اتمسفر یا خلا انجام می‌گیرد. شکل ۱-۱ نشان دهنده‌ی یک طرح کلی از فرایند لایه نشانی به روش پاشش حرارتی پلاسمایی می‌باشد. شکل و مشخصات لایه تشکیل شده به خواص پودر مصرفی، شرایط فرآیند از جمله شرایط برخورد ذرات و شرایط سطح بستگی دارد [۷].



شکل ۱-۱: شماتیکی از فرایند لایه نشانی توسط پاشش پلاسمایی [۷].

از دیگر کاربردها نیز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: روکش کاری، رنگ آمیزی به روش اسپری، میکرو ساختارها و میکروکانال‌ها [۸]. اسپری مو، اسپری رنگ برای پوشش سطح، اسپری خشک کن^۱ در فراوری‌های شیمیایی، اسپری حرارتی^۲، اسپری تمیز کننده^۳ در زمینه شست و شوی خودروها و

¹ Spray drying

² Thermal Spray

³ Spray Cleaning

تمیز کنندگی سطوح، روغنکاری، موتورهای احتراق داخلی^۱ بطوریکه سوخت مستقیماً به محفظه سیلندری موتور تزریق شده و در نتیجه‌ی برخورد اسپری با جداره داخلی محفظه متلاشی می‌گردد [۴]. اسپری خنک کننده^۲ یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای خنک کردن تجهیزات توسط آب در صنایع آهن و فولاد کاربرد دارد. پاشیدن و اسپری کردن یک سطح گرم با قطرات مایع می‌تواند منجر به تولید شارگرمایی بیشتری گردد. در صنایع فلزی هم برای ساخت محصولات فلزی با کیفیت بالا، کاهش هزینه تولید، کاهش مصرف انرژی، کاهش اندازه‌ها و پیچیدگی تجهیزات از روش اسپری خنک کننده استفاده می‌گردد که در نهایت منجر به سود آوری هرچه بیشتر محصول نهایی می‌گردد. همچنین خنک کردن شمش آلومینیوم با اسپری آب و افزایش انتقال حرارت در قطعات الکترونیکی از جمله کاربردهای دیگر اسپری خنک کننده می‌باشد [۹، ۱۰، ۱۱].

۱-۳- مروری بر مطالعات انجام شده

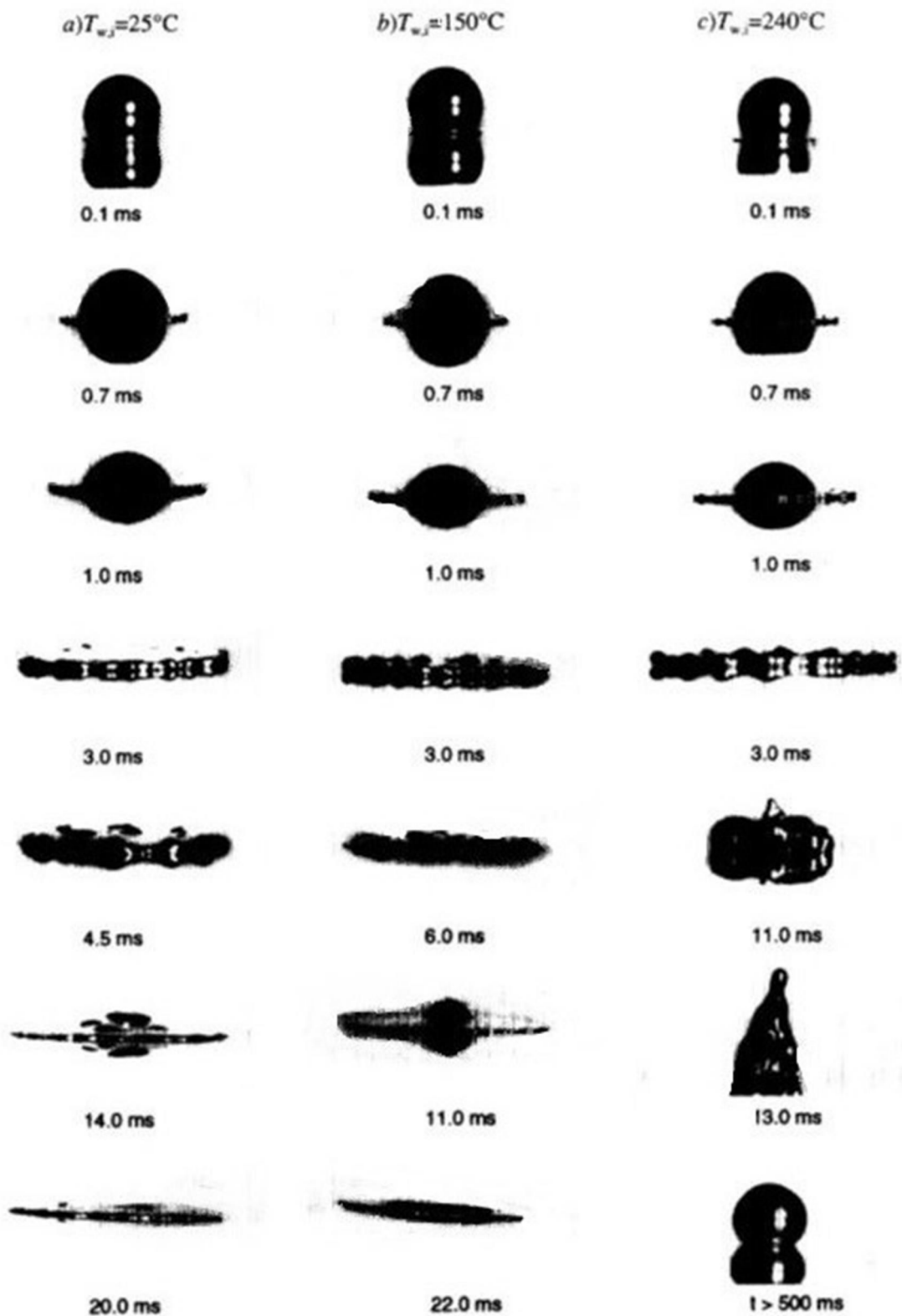
رفتار دینامیکی برخورد قطره با سطح گرم، انتقال گرما بین مایع و سطح جامد و دینامیک رطوبت پذیری سطح، موضوع تحقیق در بسیاری از صنایع و برنامه‌های کاربردی صنعتی بوده است. متأسفانه مطالعات اندکی در مورد انتقال حرارت در طول فاز پخش و جمع شدن قطرات زیر دمای اشباع وجود دارد. هنگامی که دمای سطح زیر ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد باشد، تبخیر قطره‌ی آب در فازهای پخش و جمع شدن ناچیز است. از آنجایی که دمای قطره مطابق مکان و زمان تغییر می‌کند، اندازه‌گیری سیر تکامل زمانی قطره گرم شده اندکی مشکل می‌باشد. تا به امروز، برخی مطالعات در مورد تغییر و تحولات قطره که تحت تاثیر سطح گرم قرار می‌گیرد در شرایط مکانی و زمانی مختلف به روش‌های عددی، تحلیلی و تجربی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. ژائو و همکاران [۱۲] به بررسی برخورد قطره بر روی سطح گرم با استفاده از فرمول لاگرانژ و روش المان محدود پرداختند. همچنین رفتار دینامیکی قطره و انتقال حرارت در طول فرایند برخورد قطره به سطح جامد را به صورت تجربی

¹ Internal combustion engines

² Spray Cooling

و حل عددی مورد مطالعه قرار دادند. مطابقت خوبی بین نتایج تجربی و عددی مشاهده شده بود. در ادامه‌ی مطالعه‌ی ژائو و همکاران، والدوگل و همکاران [۱۳] فرمولی مشابه فرمول لاگرانژ ارائه کردند که شامل نیروهای تنش سطحی و اثرات انتقال حرارت، اثر دمایی اولیه‌ی قطره، سرعت برخورد، دمایی اولیه سطح و شکل نهایی قطره بوده است. پسندیده و همکاران [۱۴] مدل‌سازی تغییر شکل قطره، اثرات خنک کننده و انتقال حرارت بین قطره و سطح جامد را با استفاده از حل معادلات ناویر استوکس^۱، معادله انرژی و با استفاده از روش SOLA – VOF بیان کردند. انتقال حرارت در قطره با حل معادله انرژی مدل‌سازی شده بود. در حقیقت آنها مدل خود را برای تغییر فاز و انتقال حرارت توسعه دادند و جامد شدن قطرات قلع را در برخورد قطره‌ی مذاب آن با سطح شبیه‌سازی کردند. همچنین آنها این پدیده را به صورت تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج تجربی و شبیه‌سازی باهم مقایسه شدند و مطابقت مطلوبی بین نتایج مشاهده شده بود. شکل ۱-۲ تصاویر آزمایشگاهی بدست آمده توسط پسندیده و همکاران را نشان می‌دهد.

¹ Navier- Stokes

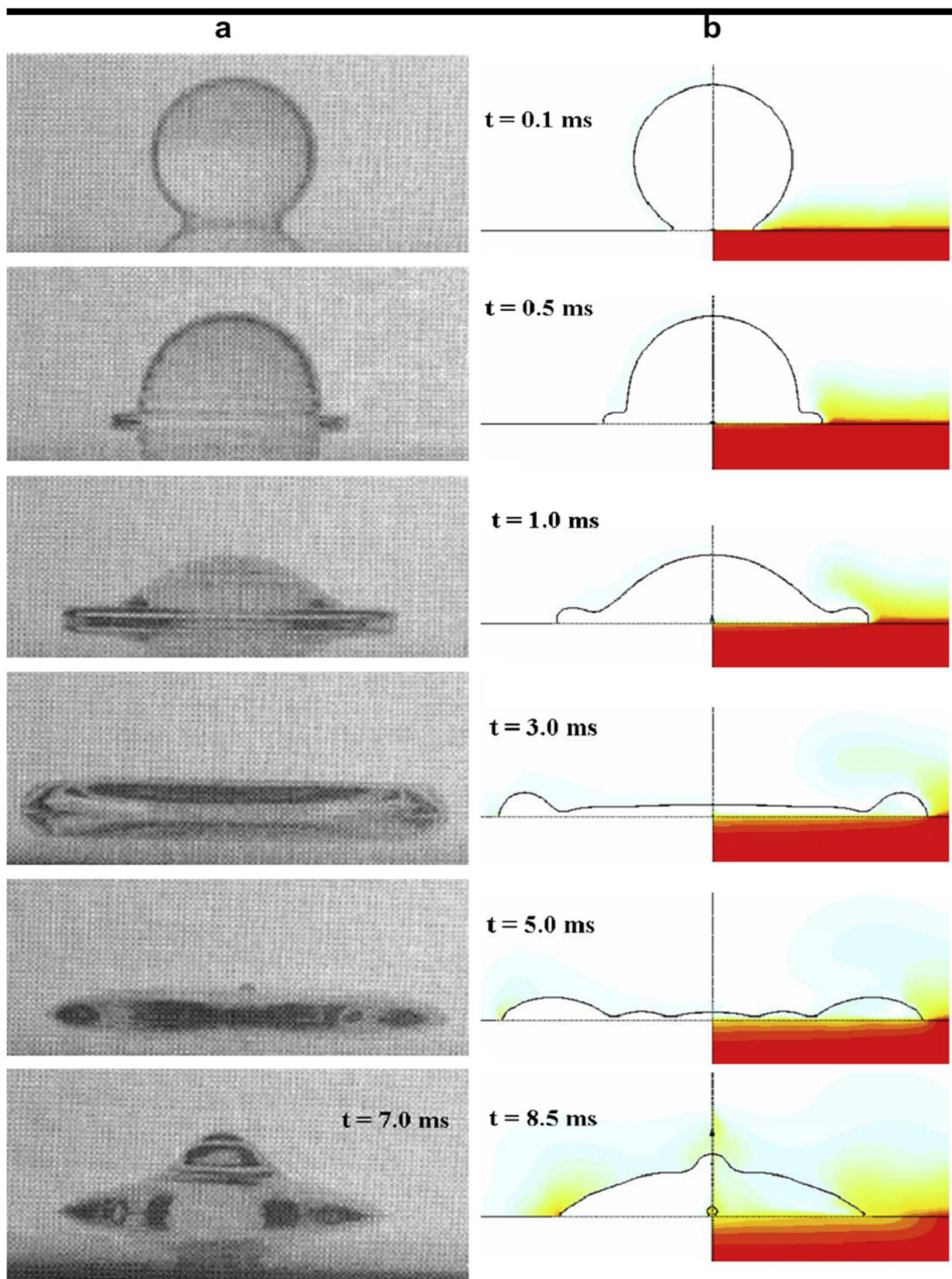


شکل ۱-۲: تصاویر مربوط به نتایج آزمایشگاهی برخورد قطره‌ی قلع مذاب با سطح فولادی در دماهای متفاوت ۲۵،

۱۵۰ و ۲۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و با سرعت برخورد ۱/۶ متر بر ثانیه [۱۴].

استروتوس و همکاران [۱۵] به بررسی عددی اثرات خنک کننده قطره‌ای که بر روی سطح گرم برخورد می‌کند پرداختند. آنها فرض کردند دمای سطح جامد ۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، قطر اولیه قطره ۲ میلی‌متر، محدوده‌ی سرعت برخورد قطره بر روی سطح بین ۱/۳ تا ۳ متر بر ثانیه بوده است. همچنین با در نظرگیری اینکه قطره پس از برخورد بر روی سطح گرم تغییر فاز می‌دهد و مقداری از قطره مایع تبخیر می‌شود با استفاده از حل عددی حجم سیال به بررسی اثرات خنک کننده این پدیده پرداختند. نرخ تبخیر قطره با استفاده از یک مدل، براساس قانون فیک^۱ و با در نظر گرفتن خواص فیزیکی متغییر پیش بینی شد. آنها همچنین بیان کردند افزایش سرعت برخورد قطره به سطح جامد منجر به افزایش قطر پخش شونده می‌گردد و سرعت برخورد تاثیر قابل توجهی در خنک کردن سطح گرم دارد. نتایج عددی استروتوس و همکاران در مقایسه با نتایج تجربی بدست آمده توسط پسندیده و همکاران [۱۶] مقایسه شده بودند و مطابقت مطلوبی مشاهده شده بود.

¹ Ficks



شکل ۳-۱: مقایسه تصاویر آزمایشگاهی بدست آمده توسط پسندیده و همکاران [۱۶] با تصاویر بدست آمده از حل عددی توسط استروتوس و همکاران [۱۵] برای برخورد قطره بر روی سطح با سرعت $1/3$ متر بر ثانیه.

پسندیده و همکاران [۱۸] پدیده‌ی برخورد قطرات آب بر روی سطح فولاد ضد زنگ گرم را با استفاده از روش‌های تجربی و مدل‌سازی عددی مورد مطالعه قرار دادند. دماهای اولیه‌ی سطح بین ۵۰ تا ۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد متغیر بودند. سرعت‌های برخورد قطره بر روی سطح را بین ۰/۵ تا ۴ متر بر ثانیه در نظر گرفتند. مکانیزم سیال و انتقال حرارت در طول برخورد قطره بر روی سطح با استفاده از روش حجم سیال^۱ مدل شده بودند. نتایج محاسبات عددی وابسته به پدیده‌ی برخورد قطره بر روی سطح جامد گرم موافقت خوبی با نتایج تجربی داشته است. نتایج شبیه‌سازی و تجربی نشان دادند با افزایش سرعت برخورد قطره به سطح، شار حرارتی از سطح تنها به مقدار کمی افزایش می‌یابد، بلکه تاثیر اصلی سرعت هنگامی می‌باشد که با افزایش سرعت برخورد، قطره بیشتر روی سطح جامد گسترش پیدا می‌کند و پخش می‌شود. همچنین این افزایش سرعت منجر به افزایش سطح مرطوبی می‌شود که در آن انتقال حرارت رخ می‌دهد. آنها همچنین مدل ساده‌ی انتقال حرارت درون قطره را با استفاده از حل هدایت یک بعدی در یک لایه‌ی مرزی نازک توسعه دادند، که در نهایت تخمینی از اثرات خنک کننده قطره را نشان می‌داد که موافقت خوبی با نتایج مدل عددی داشته است. آنها بیان کردند مدل تحلیلی نشان داد که، در یک عدد رینولدز ثابت، اثرات خنک کننده با افزایش عدد وبر افزایش یافت. درحالی‌که برای عددهای وبر بزرگ هنگامی که $We \gg Re^{0.5}$ اثرات خنک کننده مستقل از سرعت قطره یا اندازه آن می‌باشند و تنها به عدد پرانتل بستگی دارند. نتایج شبیه‌سازی و تجربی آنها نشان داد که سرعت برخورد تنها اثر ضعیفی روی تغییرات دمای سطح و شار حرارتی داشته است. آنها مدل ریاضی اثرات خنک کننده را نیز بر اساس مدل‌های قبلی توسعه دادند [۱۸]:

$$\varepsilon = \frac{2}{Pr^{0.6}} \left[\frac{We + 12}{3(1 - \cos \theta_a) Re^{0.5} + 4We} \right] \quad (1-1)$$

هنگامی که سرعت برخورد زیاد باشد، زمانی که $We \gg Re^{0.5}$ و $We \gg 12$ معادله بالا بصورت زیر بیان می‌گردد:

¹ Volume-of-Fluid

$$\varepsilon = \frac{1}{2Pr^{0.6}} \quad (2-1)$$

θ_a زاویه تماس پیشروی مایع - جامد در طول گسترش یافتن قطره بر روی سطح می‌باشد. Re ، We و Pr به ترتیب اعداد بی‌بعد وبر، رینولدز و پرانتل می‌باشند. ε نیز اثرات خنک کننده نامیده می‌شود. توانگر ریزی و همکاران [۱۷] پدیده‌ی برخورد قطره با سطح جامد را بصورت عددی شبیه سازی کردند و برای این کار معادلات ناویر استوکس برای سیال داخل و خارج قطره با استفاده از روش تفاضل محدود و مرز شناوری حل شده بود. ابتدا قطره توسط نیروی حجمی ثابتی به سوی سطح رانده شده و قبل از اینکه به آن برخورد کند، نیرو از روی قطره برداشته شده است. آنها بیان کردند هنگامیکه قطره به سطح برخورد کرد، سیال درون قطره در جهت شعاعی حرکت کرده و باعث تغییر شکل قطره شده است. این تغییر شکل با تبدیل انرژی جنبشی به انرژی کشش سطحی و بالعکس همراه بوده است. پس از برخورد و طی مراحل مختلف تغییر شکل، قطره از سطح جدا شده و پس از نوسانات متعدد به حالت اولیه‌ی خود برگشته است. در شبیه‌سازی انجام شده توسط توانگر و همکاران به این نتیجه رسیدند هنگامی که عدد وبر بالا بوده است، تغییر شکل قطره روی دیواره بیشتر و بصورت یکنواخت تر مشاهده شد. همچنین در اعداد وبر پایین، اگر انرژی برخورد قطره با دیواره افزایش می‌یافت، تغییر شکل قطره روی دیواره بصورت یکنواخت مشاهده می‌شد. استروتوس و همکاران [۱۵، ۱۹، ۲۰، ۲۱] معادله اصلاح شده اثرات خنک کننده را پیشنهاد کردند و همچنین به کمک شبیه‌سازی‌های عددی برای پیش بینی قطر تماسی قطره مایع با سطح جامد که برای تخمین اثرات خنک کننده استفاده می‌شده است، بهره بردند. علاوه بر این آنها از معادله هدایت حرارتی گذرا برای تحلیل مشخصه‌های انتقال حرارت وابسته به برخورد قطره بر روی سطح صاف استفاده کردند. با این حال، مدل‌های اثرات خنک کننده ذکر شده در بالا به طور ذاتی نمی‌توانست برای سطوح بافت مورد استفاده قرار گیرد. به همین دلیل جوهیون و همکاران [۲۲] برخورد قطره مایع بر روی سطوح گرم و دارای بافت را مورد بررسی قرار دادند. آنها رفتار دینامیکی قطره در طول فازهای پخش و جمع

شدن، انتقال گرما از سطوح صاف و بافت به قطره‌ی مایع و مرطوب شدن سطح را بررسی کردند. همچنین آنها توانستند معادلات اصلاح شده‌ای از کل انرژی حرارتی جذب شده توسط قطره و اثرات خنک کننده برای سطوح بافت، با در نظرگیری سه حالت متفاوت مرطوب شدن را بیان کنند: غیر مرطوب، جزئی مرطوب، مرطوب شدن کامل. برای بررسی تاثیر عدد وبر، دمای سطح و... از دوربین-های با سرعت بالا برای ضبط تصاویر بهره بردند. همچنین آنها بیان کردند برای سطوح دارای بافت^۱ (سطوح دارای زبری)، اثرات خنک کننده با افزایش عدد وبر افزایش یافت و تغییر آن اساساً به حالت مرطوب شدن بستگی داشت. آنها همچنین بیان کردند ماکزیمم قطر پخش شدن با افزایش ناحیه تحت بافت کاهش یافته است بدلیل اینکه مایع در درون منافذ و سوراخ‌های ناحیه بافت نفوذ کرده بود. آنها بیان کردند اثرات خنک کننده بطور قابل توجهی به حالت مرطوب شدن بستگی دارد: حالت غیر مرطوب، جزئی مرطوب، مرطوب کامل. اثرات خنک کننده با افزایش عدد وبر افزایش یافت بدلیل اینکه با افزایش عدد وبر ناحیه‌ی تماس بین قطره و سطح جامد افزایش یافته است. در حالت غیر مرطوب اثر خنک کننده با افزایش ناحیه بافت کاهش یافته بود. پژوهشگران زیادی موضوع برخورد قطره با سطح جامد را در فرایندهای پاششی مورد توجه قرار داده‌اند. لیو و همکاران [۲۳] روش عددی رایپل^۲ که بر پایه‌ی روش نسبت حجمی سیال بود استفاده نمودند. پسندیده فرد و همکاران [۲۴] از روش اصلاح شده‌ی SOLA - VOF که توسط هایت و همکاران بیان شد [۲۵]، برای شبیه سازی برخورد قطرات آب استفاده کرده و زاویه تماس جامد- مایع را اصلاح نمودند. همچنین بیان کردند رفتار قطره در برخورد با سطح جامد، تحت تاثیر خیس شوندگی^۳ سطح بوده است. همچنین یک مدل تحلیلی بر اساس موازنه انرژی‌های جنبشی، سطحی و کار انجام شده توسط لزجت قطره‌ی مایع در هنگام برخورد عمودی قطره با سطح ارائه کردند که در آن از زاویه تماس پیشروی استفاده گردیده شده بود. پسندیده فرد و همکاران [۲۶، ۲۷] برخورد عمودی قطرات سیال به سطح جامد را بررسی

¹ Textured

² Ripple

³ Wettability

کرده و مطالعات گسترده‌ای روی تخمین مقاومت حرارتی بین قطره و سطح جامد انجام دادند. مطالعات پسندیده فرد و همکاران [۲۷] نشان داده است که در پاشش‌های حرارتی، عمل پخش شدن قطره بر روی سطح، بسیار سریع انجام می‌پذیرد (در حد میکرو ثانیه). بنابراین در شبیه‌سازی برخورد قطره می‌توان مرحله پخش شدن را جدا از مرحله انتقال حرارت و انجماد بررسی کرد. در مطالعه برخورد ذرات با سطح، تخمین مقدار حداکثر پخش قطره بر روی سطح از جمله مهمترین و کاربردی‌ترین موضوعاتی بوده که مورد نظر محققین بوده است. برای مثال پسندیده فرد و همکاران [۲۴] مدلی تحلیلی بر اساس موازنه‌ی انرژی‌های جنبشی، سطحی و کار انجام شده بر علیه لزجت در هنگام برخورد عمودی قطره با سطح ارائه دادند. آنها مدل خود را برای برخورد انواع قطرات، مانند قطرات آب، پارافین و قلع مذاب به سطوحی مانند فولاد ضد زنگ و آلومینیوم در اعداد وبر کم، آزمایش نمودند که نتایج رضایت بخشی بدست آوردند. پس از آنها رویزمن و همکاران [۲۸] معادله حرکت لبه‌ی قطره را که براساس موازنه جرم و انرژی بدست آورده بودند برای تخمین مقدار حداکثر پخش قطرات آب با استفاده از زاویه تماس پیشروی، بکار بردند. یوکیو و همکاران [۲۹] با تاکید بر اهمیت مقدار حداکثر پخش قطره بر روی سطح، آزمایشهایی برای برخورد قطرات آب و فرم آمید^۱ انجام داده و نتایج خود را با مدل‌های پیشین مقایسه کردند. اسدی و همکاران [۳۰] برخورد مایل قطره با سطح جامد در فرایند لایه نشانی به روش پاشش حرارتی به روش‌های عددی و تحلیلی را مورد مطالعه قرار دادند. در شبیه سازی عددی از روش نسبت حجمی سیال استفاده کردند و زاویه تماس قطره با سطح جامد بر اساس دو زاویه تماس پیشرونده^۲ و پسرونده^۳، در نظر گرفته شده بود. با موازنه‌ی انرژی‌های قطره، قبل و بعد از برخورد با سطح، یک مدل تحلیلی برای محاسبه حداکثر پخش قطره در برخورد مایل با سطح، ارائه کردند. نتایج شبیه سازی عددی که حاصل از برخورد قطره با سطح برای آلیاژهای

¹ Formamide

² Advance Angles

³ Receding Angles

زیرکونیا^۱ و استرولوی^۲ بوده است را با نتایج تجربی مقایسه کردند که نشان دهنده دقت بالای حل عددی بوده است. نتایج حاصل از محاسبات مدل تحلیلی نیز با نتایج آزمایشگاهی برای دو آلیاژ زیرکونیا و استرولوی مقایسه شده بود که توافق مطلوبی را نشان می‌داد. مدل تحلیلی نشان داد که با کاهش زاویه برخورد و در اعداد رینولدز بالا، وابستگی مقدار حداکثر پخش قطره به عدد وبر افزایش یافته و برای مقادیر پایین عدد رینولدز و زوایای برخورد نزدیک به ۹۰ درجه، مقادیر ثابت و یکسانی برای مقدار حداکثر پخش قطره بدست آمده بود. استروتوس و همکاران [۲۰] پارامترهایی را برای پیش بینی اثرات خنک کننده در رابطه با برخورد قطرات بر روی سطوح صاف با دمای متوسط بیان کردند. آنها به بررسی مسئله جریان مایع و انتقال گرما در طول برخورد قطره‌ی آب بر روی سطح گرم با استفاده از روش عددی حجم سیال^۳ پرداختند. آنها برای حل، این فرایند را به صورت دو بعدی متقارن محوری فرض کردند. همچنین دمای سطح به گونه‌ای بوده که مانع از شروع جوشش هسته‌ای می‌شده است. آنها اثر عدد وبر، اندازه‌ی قطره، دمای اولیه سطح و خواص حرارتی مایع را در روند خنک‌سازی صفحه گرم در طول فرایند برخورد قطره بر روی سطح گرم مورد بررسی قرار دادند. متغیرهای اصلی برای توصیف این پدیده بصورت بی‌بعد بوده‌اند که برای توصیف رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی بکار رفته‌اند. آنها برای بیان درجه‌ی حرارت بی‌بعد در عمق دیوار و در محور تقارن آن، معادله‌ی زیر را بیان کردند:

$$T_w^* = 1.4 * \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{a_{sol}t}} \right) \quad (3-1)$$

$\eta = \frac{z}{2\sqrt{a_{sol}t}}$ متغیر تشابهی می‌باشد. z فاصله عمق دیوار تا سطح بر حسب متر، t زمان بر حسب ثانیه، $a_{sol} = \frac{k}{\rho c_p}$ ضریب نفوذ گرمایی، بر حسب مترمربع بر ثانیه می‌باشد. k رسانندگی گرمایی، ρ

¹ Zirconia

² Astroloy

³ Vof

چگالی و c_p ظرفیت گرمایی ویژه و $erfc$ تابع خطا می‌باشند. رویزمن و همکاران [۸] به طور تحلیلی به بررسی برخورد قطره و گسترش یافتن سریع لایه‌ی مایع بر روی یک سطح گرم پرداختند. این گسترش یافتن همراه با انتقال گرما و در ادامه‌ی آن با تغییر فاز همراه بوده است. آنها برای توضیح و تفسیر این فرایند از ترکیب کردن معادلات ناویر استوکس و معادله‌ی انرژی استفاده کردند. آنها با استفاده از این معادلات توانستند توزیع دما درون لایه مایع و چگونگی پخش و جمع شدن قطره بر روی سطح را پیش بینی کنند. حالت‌های مختلفی برای لایه‌ی مایع روی بستر جامد گرم اتفاق افتاد مانند: جوشش لایه‌ی مایع، ایجاد قطرات ریز ثانویه بعد از برخورد قطره به سطح که هر یک از این حالت‌ها به سرعت برخورد قطره به سطح جامد و دمای سطح بستگی داشته است. آنها از اعداد بی‌بعد رینولدز، وبر، پراتل^۱ و استفان^۲ برای توضیح پارامترهای این فرایند استفاده نمودند. همچنین مطالعه‌ی رویزمن و همکاران چگونگی تغییر فاز قطره‌ی مایع بر روی بستر جامد گرم را به خوبی توصیف کرد، که اگر دمای سطح از میزان مشخصی بیشتر باشد قطره پس از برخورد روی سطح و گسترش یافتن تبخیر می‌گردد. آنها همچنین توانستند دمای تماس قطره‌ی مایع با سطح جامد را بطور تئوری پیش بینی کنند. همچنین این پیش بینی با داده‌های تجربی مطابقت خوبی داشت. استروتوس و همکاران [۳۱] به بررسی اثرات خنک کننده قطرات در اعداد وبر پایین پرداختند. آنها برخورد قطرات آب بر روی سطح گرم با استفاده از روش عددی حجم سیال را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین به مطالعه پارامتری اثرات دمای اولیه سطح جامد و دمای اولیه قطره پرداختند. در حالی که تمام پارامترهای دیگر که در طول فرایند برخورد قطره به سطح، تاثیر گذار بوده‌اند ثابت فرض شدند. برای اینکه از جوشش هسته‌ای جلوگیری شود درجه حرارت سطح برخورد به اندازه کافی کم در نظر گرفته شده بود. علاوه بر این، فرمولی برای تخمین ماکزیمم قطر پخش‌شدگی قطره بر روی سطح گرم پیشنهاد کردند:

¹ Prandtl

² Stefan

$$\frac{D_{c,max}}{D_0} = \sqrt{\frac{We + 12}{3(1 - \cos \theta_{adv}) \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} + 4 \frac{We}{\sqrt{Re}} \frac{\mu_{0-ma}}{\mu_0}}} \quad (۴-۱)$$

$D_{c,max}$ ماکزیمم قطر تماسی، D_0 قطر اولیه‌ی قطره، θ_{adv} زاویه پیشروی، σ_{max} کشش سطحی در لحظه‌ی ماکزیمم گسترش یافتن قطره، σ_0 کشش سطحی در لحظه‌ی برخورد، μ_0 ویسکوزیته در لحظه‌ی برخورد و μ_{0-ma} ویسکوزیته‌ی مایع که با میانگین گیری دمای لحظه‌ی برخورد قطره و دمای لحظه‌ی رسیدن به ماکزیمم قطر گسترش قطره محاسبه می‌گردد. آنها برای دمای بی‌بعد و شار حرارتی از عبارت تحلیلی که اخیراً توسط رویزن بیان شد [۸]، استفاده نموده‌اند. آنها بیان کردند میانگین شار حرارتی جذب شده توسط قطره تقریباً ۲۰ تا ۲۵ درصد بیشتر از مقدار تئوری محاسبه شده توسط محققین، می‌باشد. جوسیرند و زالسکی [۳۲] برای انتقال بین دو پدیده‌ی نشست^۱ و پخش^۲، عدد بدون بعد سامرفلد $K = We^{0.5} Re^{0.25}$ را معرفی کردند که We و Re اعداد بی‌بعد رینولدز و وبر می‌باشند. آنها نشان دادند اگر سرعت قطره بسیار بالا باشد یا قطره به سطح جامد زیر برخورد کند، قطرات ثانویه خیلی سریع شکل می‌گیرند، اما در سرعت‌های پایین و در برخورد با سطح جامد هموار ممکن است قطرات ثانویه شکل نگرفته و قطره به آرامی بر روی سطح جامد پخش شود. برای مقادیر بزرگتر از سامرفلد بحرانی تجزیه و مقادیر کوچکتر از آن پخش روی می‌دهد. عدد سامرفلد بحرانی در حدود ۵۰ است. نیکولوپولوس و همکارانش [۳۳] برخورد قطره به فیلم سیال را مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از روش حجم سیال و روش گسسته سازی حجم محدود رفتار قطره را شبیه سازی کردند. بررویک و همکارانش [۳۴] در یک مطالعه‌ی عددی، تئوری و آزمایشگاهی به بررسی برخورد قطره به فیلم محدود سیال پرداختند. جعفری و همکاران [۳۵] به بررسی و مقایسه‌ی مدل‌های زاویه‌ی تماس در پیش بینی رفتار قطره پس از برخورد به سطح جامد

¹ Deposition

² Spreading

پرداختند. دو فاز غیر قابل تراکم، مخلوط نشدنی و سیال‌ها نیوتنی بوده‌اند. برای شبیه‌سازی فصل مشترک بین دو فاز از روش حجم سیال تابع رنگ^۱ در نرم افزار متن باز اپن فوم استفاده کردند. بررسی‌های آنها نشان داد مدل زاویه تماس استاتیکی با وجود سادگی بهترین مدل برای پیش بینی رفتار قطره در محدوده‌ی وسیعی از شرایط مختلف برخورد قطره به سطح جامد بوده است. همچنین آنها نشان دادند ویسکوزیته‌ی سیال در تعیین نوع الگوی برخورد قطره تاثیر گذار بوده است. با افزایش ویسکوزیته‌ی سیال انرژی بیشتری برای برخاست دوباره قطره از سطح لازم بوده است. همچنین ناپایداری کلوین - هلمهولتز^۲ ناشی از اختلاف سرعت بین دو فاز قطره و هوا، بعنوان عاملی در تغییر شکل فصل مشترک بوده و با ایجاد طول موج‌هایی روی سطح مشترک در شبیه سازی‌ها دیده شده بود. مطالعه پیرامون موضوع اثر دمای سطح روی برخورد قطره بر روی سطح و بحث انتقال حرارت با استفاده از تکنیک‌های عکس برداری با دوربین‌های پر سرعت همراه با اندازه گیری میانگین دمای سطح با استفاده از ترموکوپل‌ها توسط تعدادی از محققین انجام شده است. برای مثال: کاستنت و همکاران [۳۶] و برنردین و همکاران [۳۷] علاقه‌مند به مطالعه‌ی رژیم‌های انتقال حرارت بودند، اما نتوانستند مقدار داده‌های وابسته به زمان و مکان مربوط به توسعه‌ی مکانیسم مدل‌های انتقال حرارت مانند: توزیع درجه حرارت سطح، شار حرارت محلی، ناحیه انتقال حرارت موثر، نرخ انتقال حرارت آنی و ضخامت لایه‌ی بخار برای برخورد قطره با سطح را فراهم کنند. در مقابل، مطالعات اخیر محققین همانند: لیلانگ و همکاران [۳۸]، داناند و همکاران [۳۹] و چاتزیکی ریاکو و همکاران [۴۰] به بررسی آزمایشگاهی پدیده‌ی برخورد قطره بر روی سطوح گرم پرداختند. همچنین از تکنیک‌های دوربین‌های حرارتی با سرعت بالا (تکنیک دماسنجی با اشعه مادون قرمز) استفاده کردند و توانستند جزئیات ویژگی‌های انتقال حرارت بین سطح و قطره را بررسی کنند. آنها توانستند دمای تماس مایع و سطح جامد و شار حرارت محلی را محاسبه کنند. نتایج اندازه گیری‌های بدست آمده با روش حرارت سنجی

¹ Cf-Vof

² Kelvin-Helmholtz Instability

با اشعه مادون قرمز توسط دوربین‌های حرارتی با سرعت بالا برای تعیین کردن توزیع دمای سطح و شار حرارت محلی هنگام برخورد قطره با یک سطح گرم بسیار موثر و مفید بوده است. آزمایشات به گونه‌ای بوده که دمای سطح بین دمای اشباع و دمای لیدن فراست^۱ بوده است. همچنین بررسی آزمایشگاهی دیگر، برای دماهای سطح متفاوت در این رنج دمایی توسط چاندرا و اودیزیزان [۴۱] انجام شد. همچنین آنها اثر دما روی الگوهای جریان و زمان تبخیر شدن کامل قطره را مورد بررسی قرار دادند. جانگ و همکاران [۴۲] با استفاده از دوربین‌های حرارتی مادون قرمز^۲ به بررسی تجربی انتقال حرارت بین قطره و سطح جامد گرم هنگامی که قطره با سطح برخورد می‌کند پرداختند. محدوده‌ی دمای سطح بین ۱۷۶ تا ۳۷۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. رفتار دینامیکی قطره و توزیع درجه حرارت سطح با استفاده از دوربین‌های پرسرعت که با دوربین‌های حرارتی مادون قرمز هماهنگ شده بودند ثبت می‌گردید. سه معادله هدایت گذرای بی‌بعد برای سطح گرم با استفاده از اندازه‌گیری دمای سطح بصورت عددی حل شد. همچنین شرایط مرزی و شار حرارتی سطح نسبت به زمان و مکان نیز محاسبه شدند. خواص فیزیکی متنوع مرتبط با انتقال حرارت در طول برخورد قطره با سطح گرم همانند: توزیع شار حرارتی محلی، ناحیه تحت انتقال حرارت، نرخ انتقال حرارت آنی، انتقال حرارت کل و ضخامت لایه‌ی مایع بخار شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. آنها توانستند با استفاده از دوربین‌های حرارتی توزیع دمای سطح قطره را در هنگام برخورد قطره بر روی سطح گرم بدست آورند. آنها یافتند هنگامی که قطره‌ی مایع بر روی سطح برخورد می‌کند با توجه به درجه‌ی حرارت سطح می‌توان سه رژیم متفاوت را بیان کرد: رژیم مرطوب شدن^۳، رژیم تماسی- بازگشتی^۴، رژیم غیرتماسی- بازگشتی^۵. تمایز واضحی بین انتقال حرارت کل برای رژیم مرطوب شدن و تماسی - بازگشتی در نقطه‌ی لیدن فراست مشاهده شد. تشخیص دادن بین رژیم تماسی - بازگشتی و رژیم

¹ Leidenfrost

² Infrared Camera

³ Wetting Regime

⁴ Contact-Rebound regime

⁵ Noncontact-Rebound regime

غیرتماسی-بازگشتی نیازمند دمای سطح و توزیع شار حرارتی بوده است تا تعیین گردد آیا تماس محلی اتفاق افتاده یا خیر. آنها همچنین بیان کردند هنگامی که تماس مستقیم بین قطره و سطح به طور کامل ناپدید می‌گردد، ناحیه انتقال حرارت موثر و شار حرارتی نسبتاً خفیفی مشاهده شده است. در نتیجه میزان انتقال حرارت کل بیشتر کاهش یافته است. همچنین آنها توانستند در رژیم غیرتماسی - بازگشتی ضخامت لایه‌ی بخار زیر قطره‌ای که بر روی سطح برخورد کرده را با استفاده از دمای سطح محلی و داده‌های شار حرارتی تخمین بزنند. این ضخامت لایه بخار محاسبه شده توسط جانگ و همکاران مطابقت منطقی با نتایج بدست آمده توسط محققین قبلی داشته است. هربرت و همکاران [۴۳] بحث هیدرودینامیکی و انتقال حرارت در طول برخورد قطره بر روی سطح گرم با استفاده از اعداد بی بعد مهم را مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین نشان دادند که انتقال حرارت سطح جامد به قطره در طول فاز پخش شدن قطره تاثیر قابل توجهی در رفتار دینامیکی قطره می‌گذارد. هن و همکاران [۴۴] حالت‌های مرطوب شدن سطح گرم و زیر را در اثر برخورد قطره‌ی مایع بر روی آن مورد مطالعه قرار دادند. آنها تغییرات قطره را طی فرایند تغییر فاز و تبخیر شدن بوسیله‌ی اندازه گیری زاویه تماس دینامیکی مورد بررسی قرار دادند. علیزاده و همکاران [۴۵] پخش و جمع شدن دینامیکی قطره روی سطوح بافت آب گریز و آب دوست با زوایای تماسی متفاوت را مورد بررسی قرار دادند، دمای سطح زیر ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. نگید و همکاران [۴۶] اثرات زبری و لایه‌ای از اکسیداسیون سطح را روی رفتار دینامیکی برخورد قطره بر روی سطوح گرم مورد مطالعه قرار دادند. ترن و همکاران [۴۷، ۴۸] تغییر فاز قطره هنگام برخورد قطره بر روی سطوح بیش از حد گرم را مورد مطالعه قرار دادند. آنها رژیم‌های جوشش تماسی، پدیده لیدن فراست^۱ و جوشش لایه نازک مایع روی سطح را بیان کردند. برای توضیح و تفسیر موارد بالا اثرات سرعت برخورد قطره و ویژگی‌های فیزیکی سطح را در نظر گرفته بودند. در حقیقت مطالعات فراوانی در مورد پدیده لیدن فراست مربوط به برخورد یک قطره بر روی سطح دارای بافت ذکر شده بود [۵۰، ۴۹، ۵۱]. اگرچه تعداد

¹ Leidenfrost phenomena

زیادی از محققین برخورد قطره بر روی سطح جامد گرم را گزارش کردند، اما با این حال کمبود داده-های تجربی برای توضیح و تفسیر روابط بین رفتار دینامیکی قطره و انتقال حرارت برای سطوح بافت زیر دمای اشباع وجود دارد. هاروی [۵۲] برخورد قطرات با سطوح را مورد مطالعه قرار داد. مجموعه‌ای از مقالات اخیر توسط واچترز و همکاران [۵۳، ۵۴، ۵۵] به چاپ رسید که، گزارشی از مطالعه تجربی در رابطه با انتقال حرارت از قطرات نسبتاً بزرگ [۵۳] و گزارشی از اسپری قطرات کوچک [۵۵] بر روی سطوح بوده است. سرعت تقریبی قطرات کار پدرس و همکاران چندین برابر بیشتر از مطالعات هاروی و همکاران [۵۲] بوده است. اندازه‌ی قطر و سرعت مورد مطالعه توسط پدرس و همکاران [۵۶] مشابه اندازه‌ی قطر و سرعتی بوده‌اند که در اسپری‌های کاربردی واقعی استفاده می‌شد. پدرس [۵۶] به بررسی تجربی رفتار دینامیکی و ویژگی‌های انتقال حرارت در رابطه با برخورد قطرات آب بر روی سطح گرم و کارایی اسپری خنک کننده پرداخت. رنج قطر قطره‌ها از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر بوده است. رنج تغییرات سرعت از ۸ تا ۳۳ فوت بر ثانیه بوده است. اثر تغییر دمای سطح از دمای اشباع تا ۱۸۰۰ درجه‌ی فارنهایت مورد مطالعه قرار گرفت. عکس‌برداری از پروسه‌ی برخورد قطرات آب بر روی سطح نشان داد که حتی متوسط سرعت برخورد قطره بر روی سطح در ایجاد قطرات کوچکی که بعد از برخورد روی سطح تشکیل می‌شوند نقش داشتند. داده‌های مربوط به انتقال حرارت نشان دادند که در رژیم غیر مرطوب سرعت تقریبی اثر غالبی روی انتقال حرارت قطره دارد و دمای سطح اثر کمتری روی انتقال حرارت می‌گذارد. در محدوده‌ی سرعت‌های مطالعه شده توسط پدرس و همکاران پدیده لیدن فراست مشاهده نشده بود. به نظر می‌رسید که اثر انتقال حرارت می‌تواند بوسیله سرعت برخورد قطره و خواص سطح مانند: زبری، اکسیداسیون و... مشاهده شود. در حالت غیر مرطوب اثر بخشی انتقال حرارت با افزایش سرعت می‌تواند افزایش پیدا کند و نرخ افزایش سرعت در این مطالعه تا ۳۳ فوت بر ثانیه و قطر قطره هم ۴۰۰ میکرومتر بوده است. مرور جامع روی آثار هیدرو دینامیکی و الگوهای جریان در طول فرایند برخورد قطره بر روی دیواره‌های خشک توسط یارین و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [۵۷]. فوکایی و همکاران [۵۸] محاسبات عددی برخورد قطره بر روی سطح را

مورد مطالعه قرار دادند. سیکالو و همکاران [۵۹] اثر دینامیکی مدل زاویه تماس و شعاع پخش شدن قطره بر روی سطح را با استفاده از مدل حجم سیال [۶۰] بررسی کردند. آنها همچنین اثر زاویه تماس روی پروسه برخورد قطره با سطح را در فاز پخش شدن و جمع شدن گزارش کردند. نیکولوپوس و همکاران [۶۱]، استروتوس و همکاران [۱۵،۱۹] حل عددی شامل فرایند تبخیر قطره در شرایط اتمسفر، در هم آمیختن انتقال حرارت بین سطح جامد گرم و قطره‌ی مایع را مورد بررسی قرار دادند. استفان و همکاران [۶۲] انتقال حرارت محلی و پدیده تغییر فاز در طول برخورد قطره بر روی سطح گرم را بصورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آزمایشات با استفاده از مبرد FC - 72 در یک فضای بخار اشباع انجام شدند. شرایط مرزی برای شبیه سازی عددی با توجه به بررسی‌های آزمایشگاهی بیان شدند. محاسبات شبیه سازی برای جریان دو فاز اندکی پیچیده، شامل انتقال بخار و جرم بوده است. در نهایت نتایج آزمایشگاهی و عددی با هم مقایسه شدند و مکانیزم اساسی و جالبی از انتقال حرارت در طول برخورد قطره بر روی سطح را در این مطالعه نشان دادند. آنها همچنین انتقال حرارت در طول برخورد قطره بر روی سطح گرم را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. همچنین مدل عددی برای محاسبات، تجزیه و تحلیل اثرات حرارتی را توسعه دادند. نتایج محاسبات عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و مطابقت مطلوبی بینشان وجود داشت. آنها دلایل احتمالی برای انحراف‌های کوچک در مقایسه با مطالعات قبلی را نیز مورد بحث و بررسی قرار دادند. عملکرد انتقال حرارت در طول تغییر فاز قطره در پروسه برخورد قطره بر روی سطح متفاوت بوده است. اثر انتقال حرارت در طول فاز پخش شدن بیشتر دیده شده بود در حالیکه پدیده تبخیر اساساً در طول فاز جمع شدن مشاهده شد. این مشاهدات می‌تواند به یک تغییر در الگوی جریان در درون قطره در طول برخورد قطره به سطح در فازهای متفاوت نسبت داده شود. اثر عدد رینولدز با استفاده از مدل عددی روی انتقال حرارت و تبخیر به طور سیستماتیک بررسی شد. بایر و همکاران [۶۳] بیان کردند که رطوبت پذیری هر سطح بوسیله زاویه تماس بین مایع با سطح جامد مشخص می‌گردد. پسندیده و همکاران [۱۴، ۲۴] بیان کردند زاویه تماس تعادلی θ_c به تنش‌های سطحی جامد-گاز،

جامد- مایع و مایع - گاز بستگی دارد و در حالت ایستایی کامل قطره بر روی سطح، اندازه گیری می‌شود. زاویه تماس تعادلی منحصر به خواص فیزیکی سطح بستگی دارد. زاویه تماسی که در حین حرکت خط تماس مشاهده می‌گردد را، زاویه تماس دینامیکی θ_a می‌نامند. باسمن و همکاران [۶۴] بیان کردند زاویه تماس دینامیکی به وجود آمده را در حین پخش شدن قطره بر روی سطح (حرکت خط تماس به سمت فاز گاز)، زاویه تماس پیشروی θ_a و در حین جمع شدن قطره (حرکت خط تماس به سمت فاز مایع)، زاویه تماس پسروی θ_r ، می‌نامند. زاویه تماس دینامیکی، بر خلاف زاویه تماس تعادلی، خاصیت فیزیکی و مادی نبوده بلکه به سرعت خط تماس بستگی دارد. مراحل مختلف برخورد قطره با سطح، زاویه تماس دینامیکی به عنوان شرط مرزی مهم، در مدل سازی‌ها نقش بسزایی داشته است. آنها یک مدل عددی سه بعدی برای برخورد قطرات به دست آوردند که در آن، از دو مقدار ثابت اندازه گیری شده توسط عکس برداری برای زاویه تماس پیشروی و پسروی قطرات، استفاده شده بود. هارلو و همکاران [۶۵] اولین مدل‌های عددی در زمینه زاویه تماس برخورد قطره با سطح جامد را ارائه کردند. از اثر تنش سطحی و زاویه تماس صرف نظر کرده بودند. تسور یوتای و همکاران [۶۶] در مدل‌های بعدی زاویه تماس را به صورت یک زاویه ثابت در طول فرایند برخورد قطره در نظر گرفته بودند که نسبت به مدل‌های اولیه دقت بیشتری داشت. سپس فوکایی و همکاران [۶۷] به وسیله عکس برداری و اندازه گیری تغییرات زاویه تماس در هر مقطع زمانی و به کارگیری آنها در شرایط مرزی حل عددی، جواب‌های بهتری نسبت به حل عددی با زاویه تماس ثابت، بدست آوردند. بنت و همکاران [۶۸] ابتدا با اصلاح مدل مادجسکی [۶۹] مدلی تحلیلی برای حداکثر پخش قطره ارائه کردند که در آن از زاویه تماس پیشروی استفاده شده بود. همچنین درصد خطای بالایی که تا برخی موارد به ۵۰ درصد می‌رسید داشت. همانطور که مشاهده شده در اکثر مدل‌های تحلیلی گذشته که محققین بیان کردند از زاویه تماس پیشروی در معادله تخمین حداکثر پخش قطره بر روی سطح استفاده شده است. اسدی و همکاران [۷۰] اثر زاویه تماس در برخورد قطره با سطح را مدل سازی کردند. آنها ابتدا با استفاده از تئوری سینیتیک مولکولی رابطه‌ای برای تعیین زاویه تماس

دینامیکی قطره با سطح بدست آوردند. سپس این رابطه را در شبیه سازی عددی قطره با سطح بکار گرفتند. مقایسه مدل با نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده ی دقت بالای مدل و همچنین شبیه سازی دقیق رفتار قطره در برخورد با سطح بوده است. آنها همچنین مدلی تحلیلی برای بررسی تاثیر زاویه تماس در تعیین مقدار حداکثر پخش قطره بر روی سطح، ارائه کردند. نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی در اعداد موئینگی^۱ کم، نشان داد که با افزایش زاویه تماس تعادلی یا کاهش عدد وبر، مقدار حداکثر پخش قطره کاهش یافته و وابستگی کمتری به عدد رینولدز پیدا کرده است.

۴-۱- اهداف تحقیق و نوآوری

در این تحقیق به بررسی برخورد قطره با سطح مسی با دماهای مختلف می پردازیم. همچنین برخورد قطره با سطح با سرعت های مختلفی صورت می گیرد. بنابراین هدف از انجام این تحقیق بیان چگونگی تاثیر دما روی فرایند برخورد قطره با سطح و چگونگی پخش و جمع شدن قطره می باشد. همچنین با تغییر ارتفاع قطره و در ادامه آن با در نظر گرفتن اعداد وبر متفاوت برای قطره تاثیر پارامتر سرعت بر رفتار دینامیکی قطره در طول فرایند مورد بررسی قرار می گیرد. در پایان نیز با توجه به شرایط در نظر گرفته برای برخورد قطره با سطح، به بررسی شار حرارتی تئوری در نقطه ی تماس قطره با سطح می- پردازیم. همچنین به بیان اثرات خنک کننده قطره در طول فرایند برخورد قطره با سطح و میزان گرمای جذب شده توسط قطره خواهیم پرداخت. همچنین از جمله نوآوری در این تحقیق محاسبه ی میزان ماکزیمم پخش شونده ی قطره روی سطح و میزان ارتفاع بالا آمدن قطره از سطح، بعد از برخورد قطره بر روی سطح می باشد که با حضور دما مطالعه شده و با حالت بدون دما مقایسه شده است. همچنین برای محاسبه ی میزان گرمای جذب شده توسط قطره، هنگامی که قطره با سطح گرم برخورد می کند از دوربین حرارتی استفاده نموده ایم. این تحقیق مقدمه ای است برای شروع تحقیق دیگری که شامل تغییر فاز است و قطره در حین برخورد با سطح گرم تغییر فاز خواهد داد.

¹ Capillary

۱-۵- ساختار پایان نامه

در ادامه‌ی معرفی فصل اول به بیان ساختار کلی فصل دوم می‌پردازیم. در فصل دوم به بیان تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده در این مطالعه می‌پردازیم، همچنین ساختار کلی و نحوه کار با این تجهیزات را بیان کرده و در ادامه، چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی این بررسی و تحقیق را برای انجام تست‌های مورد نظر بیان می‌کنیم. در فصل سوم به تحلیل داده‌های بدست آمده از انجام آزمایشات مختلف می‌پردازیم. به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و کامل‌تر در این فصل، آزمایشات در چندین مرحله تکرار می‌شوند. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی حاضر به صورت نمودارهایی با شرایط مختلف دمایی و اعداد وبر متفاوت، برای بیان پارامترهایی نظیر قطر تماس بی‌بعد قطره با سطح، شار حرارتی تئوری در نقطه تماس بین قطره با سطح برخورد، اثرات خنک کننده قطره، در برخورد با سطح با دماهای متفاوت و همچنین بیان میزان گرمای جذب شده توسط قطره، نشان داده می‌شوند. در پایان نیز در فصل چهارم، به بیان مهم‌ترین نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده می‌پردازیم.

فصل دوم

تجهيزات آزمایشگاهی

۲-۱- مقدمه

با توجه به شرایط آزمایشگاهی مطالعه‌ی حاضر، استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی مدرن و کارآمد، برای دستیابی به نتایج بهتر و دقیق‌تر امری ضروری به‌نظر می‌رسد. همچنین لازم است برای استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی مورد نیاز در طول آزمایش و تسریع در روند آزمایشات، نحوه‌ی کار کردن و استفاده از این تجهیزات را به‌طور کامل فراگیریم. همچنین برای ثبت تصاویر برخورد قطره با سطح مسی از دوربین پر سرعت استفاده می‌نماییم. استفاده از این دوربین پایه و اساس مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر می‌باشد. در نهایت برای استخراج و تحلیل داده‌ها از روش پردازش تصویر استفاده می‌نماییم. در انتهای فصل نیز، به بیان چیدمان نهایی تجهیزات آزمایشگاهی و ستاپ^۱ استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر می‌پردازیم. همچنین شرح مختصری از نحوه‌ی آزمایش و گرفتن تست‌های مورد نیاز را بیان خواهیم کرد.

۲-۲- دیتالاگر

در این آزمایش از سنسورهایی استفاده نموده‌ایم. برای ثبت دماهای مورد نظر، تمامی سنسورها به دستگاه دیجیتالی ADAM 4015 متصل می‌شوند. این دستگاه قابلیت اتصال ۶ سنسور را به‌طور همزمان دارا می‌باشد. برای تبدیل داده‌های این دستگاه باید از دستگاه ADAM 4561 استفاده نماییم. در نهایت با اتصال ADAM 4561 به رایانه می‌توانیم داده‌های نهایی را مشاهده کنیم. نرم افزار شرکت ADAM با نام Adam Apax. NET Utility می‌باشد که برای نمایش داده‌ها در کامپیوتر با دقت ۰/۰۱ درجه‌ی سانتی‌گراد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۳- دوربین عکس برداری پرسرعت

برای تجزیه و تحلیل مکانیزم برخورد قطره بر روی سطح از دوربین پرسرعت مدل pco. dimax S1 استفاده می‌کنیم. این نوع از دوربین‌ها کاربردهای فراوانی در زمینه‌ی علمی، هوافضا، صنعتی و حمل

¹ Setup

ونقل دارند. رزولوشن^۱ دوربین مقادیر 1008 × 1008، 528 × 528، 480 × 240 و 240 × 16 را دارا می‌باشد که نرخ فریم^۲ آنها به ترتیب ۴۴۶۷، ۱۲۹۳۲، ۲۷۶۴۲ و ۱۵۲۸۱۱ فریم در ثانیه است. بنابراین این دوربین در بالاترین و پایین ترین رزولوشن، توانایی ثبت ۴۴۶۷ و ۱۵۲۸۱۱ تصویر بر ثانیه را دارد. وضوح تصویری یا رزولوشن تصویری در علوم تصویری به توانایی یک سیستم برای متمایز سازی جزئیات یک تصویر در یک سیگنال تصویری را گویند. همانطور که می‌دانیم هر چه رزولوشن تصویر و ابعاد آن کمتر باشد، تعداد تصاویری که می‌توان روی مقدار معینی از حافظه‌ی دوربین ثبت کرد بیشتر می‌شود اما در عوض دقت و وضوح آن کمتر می‌شود اما دقت و وضوح کمتر لزوماً به معنی کیفیت پایین تر نیست. عوامل دیگری همچون کیفیت کار لنز، میزان بزرگنمایی آن و میزان روشنایی تصویر تاثیر بسزایی در کیفیت و شفافیت عکس دارند. در این آزمایش برای ثبت و ذخیره سازی عکس‌ها و فیلم‌ها به ترتیب از فرمت JPEG و WMV استفاده نموده‌ایم. این دوربین برای ثبت و ذخیره‌ی تصاویر دارای حافظه‌ی داخلی ۳۶ گیگا بایت می‌باشد.



شکل ۱-۲: دوربین پر سرعت CMOS مدل pco.dimax S1

لنز نیکون^۳ مدل AF – S Micro – Nikkor 105mm f/2.8G IF – ED VR ساخت شرکت نیکون می‌باشد. طول و قطر لنز به ترتیب ۱۱۶ و ۸۳ میلی‌متر و فاصله‌ی کانونی لنز ۱۰۵ میلی‌متر است که

^۱ Resolution

^۲ Frame Per second

^۳Nikon

بیشینه‌ی نسبت کانونی و کمینه‌ی نسبت کانونی آن به ترتیب $f/2.8$ و $f/32$ است. این لنز دارای فوکوس خودکار می‌باشد و نوع موتور فوکوس نیز الترا سونیک است. حداقل فاصله فوکوس ۳۱ سانتیمتر و وزن این لنز ۷۲۰ گرم می‌باشد. همچنین دارای لرزش گیر تصویر می‌باشد.

۲-۴- پمپ تزریق سرنگی

در این آزمایش از پمپ تزریق سرنگ^۱ JMS مدل SP – 500 ساخت کشور ژاپن^۲ استفاده کرده‌ایم. این پمپ فوق العاده کاربر پسند بوده، با کیفیت عالی و کاربری ساده خود بعنوان یکی از محصولات خوب ارائه شده در این زمینه می‌باشد. در حقیقت پمپ تزریقی که تزریق محلول‌ها را با سرعت پایین و با کنترل دقیق جریان با خارج کردن مایع از یک سرنگ انجام می‌دهد. از این پمپ در مصارف پزشکی به منظور تزریق‌های دقیق، مداوم و با سرعت مشخص انواع داروهای شیمی درمانی، آنتی بیوتیک‌های خاص، داروهای قلب و عروق که نیاز به تنظیم سرعت تزریق دارند استفاده می‌گردد. این پمپ مجهز به دو عدد CPU می‌باشد که به طور همزمان عملکرد دستگاه را از نظر ایمنی و فقدان اشتباه مانیتور می‌نماید. این پمپ‌ها معمولاً یک موتور دارند که یک مکانیزم پیچشی یا دنده‌ای را راه اندازی کرده و پیستون یا بدنه‌ی سرنگ را با نرخ از پیش تعیین شده جلو می‌برند همچنین این دستگاه شامل کنترل کننده‌های الکتریکی و آلارم می‌باشد. سرنگ پلاستیکی حاوی مایع در قسمت نگهدارنده قرار داده می‌شود. هنگامی که نرخ جریان مایع مشخص شد، پمپ پلانگر سرنگ را تحت فشار قرار داده تا مایع جریان پیدا کند. سرعت تزریق وابسته به قطر سرنگ و نرخ جریان تنظیم شده برای پمپ است. زمانی که پمپ در حال کار است میزان نرخ جریان، حجم و فشار مایع دائماً اندازه گیری می‌شود. در صورت فشار بالا در طی مسیر تزریق و یا مسدود شدن راه تیوب، چراغی تعبیه شده روی دستگاه که مشکل انسدادی را با بوق و آلارم اعلام می‌کند. پمپ‌ها برای کار با نوع خاصی از سرنگ‌ها مشخص می‌شوند. همچنین روی دستگاه چراغ‌هایی تعبیه شده که حجم سرنگ استفاده شده در سیستم را بر

¹ Syringe Pump

² Japan

حسب میلی لیتر نشان می دهند که انواع سرنگ‌های قابل استفاده به صورت برچسب بر روی دستگاه مشخص می گردد. در این صورت خطاهای قابل توجه در تغییرات نرخ جریان و حجم مایع، زمانی که از سرنگ‌های غیر مجاز استفاده شود، مشخص می گردد. این پمپ دارای صفحه‌ی نمایشگری می‌باشد که نشان دهنده‌ی انسداد در سه سطح کم، متوسط و زیاد می‌باشد و در صورت رخ دادن هر یک از این حالت‌ها چراغ مربوطه روشن می‌گردد. هنگامی که سرنگ بیش از حد پر شده باشد یا در طول مسیر گرفتگی ایجاد شده باشد چراغ مربوطه روی صفحه نمایشگر روشن می‌گردد. علاوه بر این، چراغ نمایشگر سایز سرنگ در قسمت صفحه‌ی نمایش تعبیه شده که با توجه به سایز سرنگ مورد استفاده، چراغ مربوطه نیز روشن می‌شود. این دستگاه با سرنگ‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ میلی لیتر هماهنگی دارد.



شکل ۲-۲: پمپ تزریق سرنگ JMS همراه با سرنگ تزریق.

۲-۵- عایق پشم شیشه

در این آزمایش به منظور جلوگیری از اتلاف حرارت قطعه‌ی مس گرم شده و هیتر متصل به آن از عایق نسوز پشم شیشه به شکل لوله‌ای استفاده نموده‌ایم. حداکثر تحمل حرارتی آن ۵۵۰ درجه‌ی سانتی گراد است.

۲-۶- عایق پلی آمید^۱

در این آزمایش به منظور عایق بندی و جاسازی مطلوب مجموعه‌ی مس، هیتر و عایق پشم شیشه از عایق پلی آمید که توسط فرایند تراشکاری به صورت شکل مطلوب و مورد نظر در آمده است، استفاده می‌کنیم. همچنین تا ۱۴۰ درجه حرارت را می‌توانند تحمل کنند. علاوه براین ماشین کاری بسیار آسان از ویژگی‌های آنها می‌باشد.

۲-۷- کوئل هیتر

در این آزمایش برای گرم کردن قطعه‌ی مس از کوئل هیتری با توان ۳۰۰ وات و ۲۳۰ ولت استفاده نموده‌ایم که همانند فنی دارای سطح مقطع دایره‌ای به قطر ۲/۲ سانتی‌متر می‌باشد و اطراف نیمه پایینی استوانه مسی را تحت پوشش قرار داده است. همچنین با شروع به کار کردن، منجر به گرم شدن قطعه‌ی مس و بالا رفتن دمای سطح مس می‌گردد. المنت کوئل هیتر در واقع نوعی المنت میله‌ای با کارایی بالا می‌باشد. این المنت‌ها معمولاً بصورت مثلثی، مربع یا دایره‌ای می‌باشند. همچنین کوئل هیترها قابل انعطاف بوده و می‌توانند اشکال گوناگونی به خود بگیرند. هسته‌ی گرم‌زای آنها سیمی از جنس نیکل کروم^۲ با نقطه‌ی ذوب ۱۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده که بصورت سیم پیچی شده یا صاف می‌باشد. همچنین لایه‌ی خارجی آن از اکسید منیزیم بوده و دارای قسمت انتهایی آب بندی شده با آرگون می‌باشد. تحمل دمای بالای حداکثر تا ۹۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد از دیگر قابلیت‌های این نوع هیتر به شمار می‌رود. لازم به ذکر است المنت‌های فوق به صورت صاف به مقطع گرد و تخت می‌باشند که از ۲۵۰ الی ۲۰۰۰ وات در سایزهای مختلف قابل ساخت است. هنگامی که به دمای زیاد در یک فضای محدود احتیاج باشد می‌توان با سیم پیچی کردن سیم المنت و تبدیل آن به المنت کوئل هیتر این نیاز را بر طرف کرد.

¹ Polyamide

² Nickel Chrome



شکل ۲-۳: کویل هیتر استفاده شده در نیمه‌ی پایینی استوانه‌ی مسی با توان ۳۰۰ وات.

۲-۸- سنسور اندازه‌گیری دما

در این آزمایش برای ثبت دما از پنج عدد سنسورهای مقاومتی آر تی دی^۱ از نوع پی تی^۲ ۱۰۰ استفاده نموده‌ایم. هرکدام از این سنسورها به ترتیب در ارتفاع‌های ۱، ۱، ۷، ۱۱ و ۱۷ میلی‌متر از سطح مس قرار گرفته‌اند. به طوری که به اندازه‌ی ۱ میلی‌متر از انتهای این سنسورها در داخل سوراخ‌هایی که روی بدنه‌ی استوانه‌ی مسی و در ارتفاع‌های ذکر شده تعبیه شده‌اند، قرار گرفته‌اند. نوک این سنسورها دقیقاً روی محور تقارن استوانه‌ی مسی قرار می‌گیرد و دمای این نقاط از مس را گزارش می‌کند. حروف P و T در نام این سنسورها به دلیل استفاده از پلاتینیوم^۳ (با نام اختصاری Pt در جدول عناصر) است. عدد ۱۰۰ نشان دهنده‌ی این موضوع می‌باشد که در صفر درجه‌ی سانتی‌گراد این سنسور ۱۰۰ اهم مقاومت دارد. این سنسورها دارای دقت $\pm 0.1\%$ درجه‌ی سانتی‌گراد هستند. سنسورهای آر تی دی تولید شده از شرکت جومو^۴ آلمان می‌باشند. نکته‌ی مهمی که در مورد پی تی ۱۰۰ جومو باید در نظر داشته باشیم محدوده‌ی دمایی سنسور است. مدل‌های متفاوت دارای رنج‌های دمایی متفاوتی هستند. این رنج‌ها می‌توانند ۵۰- تا ۶۰۰+ یا ۵۰- تا ۱۲۰+ درجه‌ی سانتی‌گراد باشند. نوع سنسور می‌تواند مجرایبی، پیچی و گداختی باشد. اولین موضوعی که باید در مورد سنسورهای

^۱ Rtd

^۲ Pt

^۳ Platinum

^۴ Jumo

آرتی دی مد نظر قرار داد دقت بالای این سنسورها در مقایسه با دیگر سنسورهای دما می باشد. سنسورهای آرتی دی توانایی تحمل دماهای بالا مثلا تا ۶۰۰ درجه ی سانتی گراد را دارند.

۹-۲- کنترل کننده ی پی آی دی^۱

کنترل کننده ی پی آی دی از رایج ترین نمونه های الگوریتم کنترل باز خوردی^۲ است که در بسیاری از فرایندهای کنترلی نظیر کنترل سرعت موتور DC، کنترل فشار و کنترل دما کاربرد دارد. کنترل کننده ی پی آی دی مقدار خطای بین خروجی فرایند و مقدار ورودی مطلوب را محاسبه می کند. هدف کنترل کننده، به حداقل رساندن خطا با تنظیم ورودی های کنترلر است. اصولا کنترلهای دمایی وظیفه ی مقایسه ی مقدار دمای واقعی فرایند انجام شده با مقدار مطلوب و همچنین فرمان دادن به هیتر جهت تنظیم دما را دارند.



شکل ۲-۴: کنترلر پی آی دی مدل ای پنج سی سی، ساخت شرکت امرن ژاپن.

۹-۲-۱- کنترلر ای پنج سی سی^۳

یکی از بهترین تجهیزاتی که در اکثر پروژه ها مورد استفاده قرار می گیرد کنترلهای هستند که انواع مختلفی دارند. در این پروژه نیز از کنترلر ای پنج سی سی که یکی از بهترین نوع کنترلهای پی آی

¹ Proportional-integral-derivative controller

² Feed back

³ E5cc

دی می‌باشد، استفاده نموده‌ایم. کنترلر ای پنج سی سی، ساخت شرکت امرن^۱ ژاپن می‌باشد. این کنترلر ورودی‌های مختلفی را می‌تواند پشتیبانی نماید برخی از ورودی‌هایی که توسط ای پنج سی سی کنترل می‌شوند، عبارتند از ترموکوپل‌های K، J، T، E، L، U، N، S، B، W و R. دیگر سنسورهای دما از قبیل پی تی ۱۰۰ و پی تی ۱۰۰۰، همچنین ورودی‌های آنالوگ از قبیل سیگنال‌های استاندارد ولتاژی و جریانی نیز توسط کنترلر ای پنج سی سی پشتیبانی می‌شوند.

۲-۱۰- رله اس اس آر^۲ یا حالت جامد

رله حالت جامد یا اس اس آر یک قطعه‌ی الکترونیکی نیمه هادی است که کاری شبیه رله‌های الکترومکانیکی را انجام می‌دهد. در حقیقت رله حالت جامد یک قطعه‌ی الکترونیکی است، که در آن با یک سیگنال کنترلی کوچک می‌توان جریان یا ولتاژ بزرگتری را کنترل کرد. در آزمایش انجام شده نیز از رله اس اس آر، با جریان عبوری ۱۰ آمپر استفاده نموده‌ایم. در این آزمایش از رله اس اس آر به دلیل دقت و کارایی زیاد در کنار کنترلر ای پنج سی سی استفاده شده است، تا با کنترل هر چه دقیق‌تر بتوان دما را در سطح تماس قطره با جامد ثابت نگه داشت.

۲-۱۱- سطح برخورد مسی

در مطالعه‌ی حاضر، از استوانه‌ی مسی به ارتفاع ۸ سانتی‌متر و قطر ۲ سانتی‌متر استفاده شده، سطح بالایی قاعده استوانه کاملاً صاف بوده و به عنوان سطح برخورد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سطح توسط صفحه‌ی سنگ کاملاً صاف شده است.

۲-۱۲- چیدمان نهایی تجهیزات آزمایشگاهی و شرح آزمایش

۲-۱۲-۱- دستگاه آزمایش

در مطالعه‌ی حاضر، از استوانه‌ی مسی به ارتفاع ۸ سانتی‌متر و قطر ۲ سانتی‌متر استفاده شده، سطح

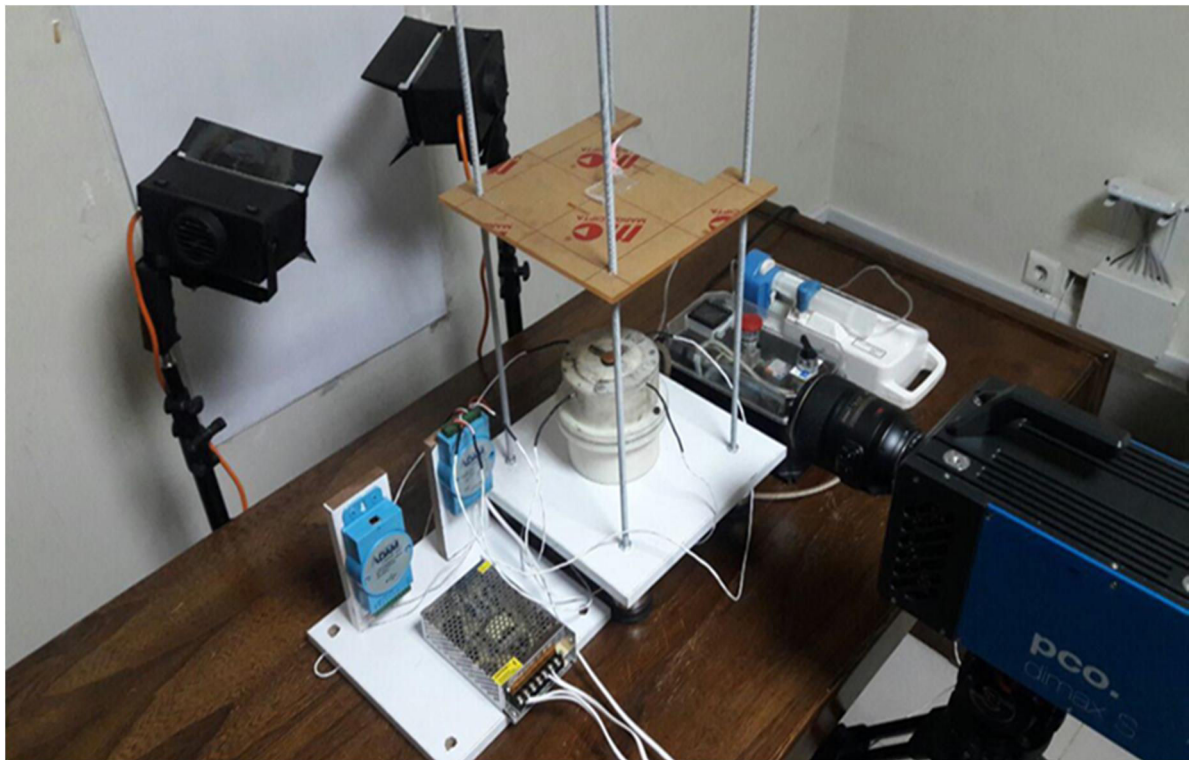
¹ Omron

² State Relay Solid

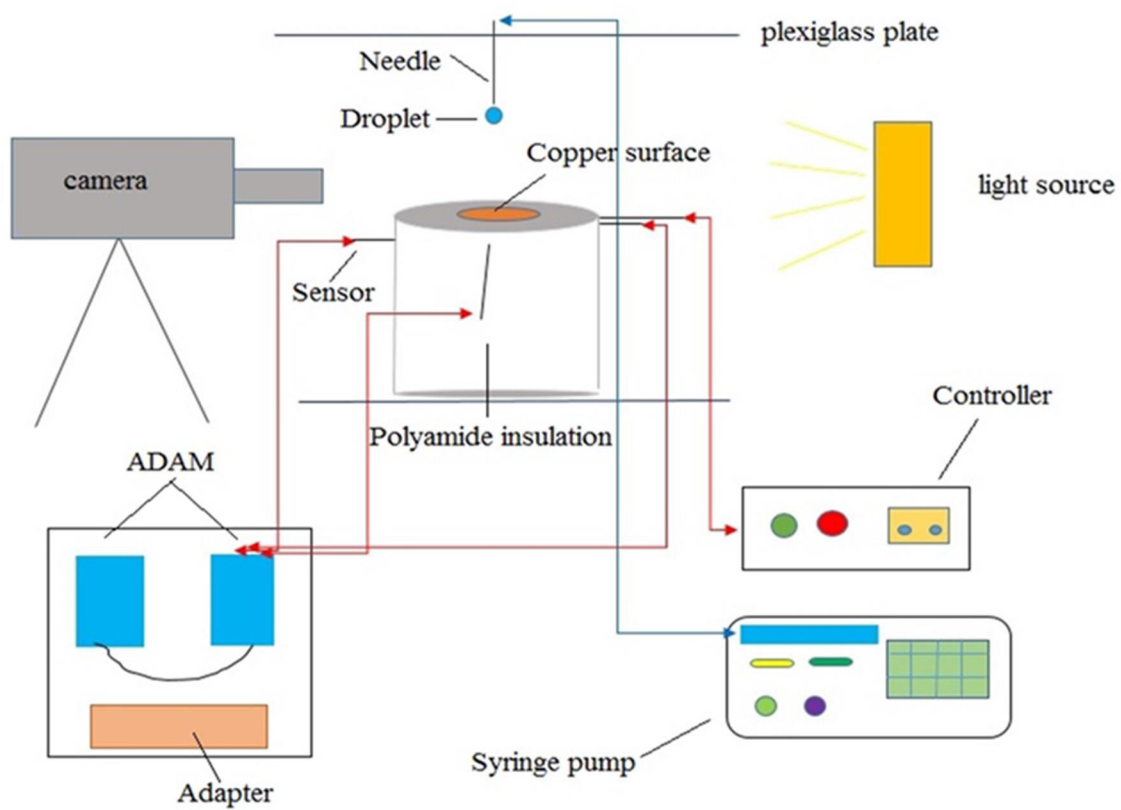
بالایی قاعده استوانه کاملاً صاف بوده و به عنوان سطح برخورد مورد استفاده قرار می‌گیرد. استوانه‌ی مسی در ارتفاع‌های ۱، ۷، ۱۱ و ۱۷ میلی‌متر از سطح برخورد به اندازه نوک پی تی ۱۰۰ سوراخ شده است. عمق این سوراخ‌ها به اندازه‌ی یک میلی‌متر بوده، بطوریکه نوک سنسور هایی که در این سوراخ‌ها تعبیه می‌شوند روی محورد تقارن استوانه قرار می‌گیرند و دمای این نقاط را نشان می‌دهند. در مجموع از چهار سنسور در این آزمایش استفاده کرده‌ایم. برای ثبت دماهای مورد نظر، تمامی سنسورها به دستگاه دیجیتالی ADAM 4015 متصل شده‌اند. برای تبدیل داده‌های این دستگاه باید از دستگاه ADAM 4561 استفاده کنیم. در نهایت با اتصال ADAM 4561 به رایانه می‌توانیم داده‌های نهایی را مشاهده کنیم. نرم افزار شرکت ADAM برای نمایش داده‌ها در کامپیوتر با دقت ۰/۰۱ درجه‌ی سانتی‌گراد استفاده شده است. با استفاده از کویل هیتر ۳۰۰ وات که همانند فنری در اطراف نیمه‌ی پایینی استوانه تعبیه شده است، برای گرم شدن استوانه‌ی مسی استفاده می‌کنیم. برای تنظیم و ثابت نگه داشتن دمای سطح، کویل هیتر به مجموعه‌ای که شامل کنترلر PID بوده متصل شده است. در حین گرم شدن استوانه‌ی مسی به دلیل اینکه از اتلاف گرما جلوگیری شود از عایق پشم شیشه برای پوشاندن اطراف و قسمت قاعده‌ی پایینی استوانه استفاده می‌کنیم. علاوه بر این، برای ثابت نگه داشتن مجموعه‌ی استوانه‌ی مسی و عایق پشم شیشه از محفظه‌ای تقریباً استوانه‌ای شکل به جنس پلی‌آمید استفاده می‌کنیم، که تمامی مس و عایق اطراف آن به غیر از قسمت سطح برخورد مس را تحت پوشش قرار می‌دهد. برای تولید قطرات از سوزن تزریق ۱۶ G استفاده شده است. همچنین برای ثابت نگه داشتن سوزن تزریق از پایه‌ای که از جنس پلکسی‌گلاس می‌باشد استفاده می‌نماییم که این پایه شامل محلی برای قرار گیری سوزن می‌باشد. برای هدایت آب مقطر به داخل سوزن تزریق از دستگاه پمپ تزریق سرنگ استفاده می‌کنیم. این دستگاه شامل محلی برای تعبیه‌ی انواع سرنگ‌ها می‌باشد که با توجه به مشخصات و ظرفیت سرنگ، قابلیت تزریق و هدایت مقدار مشخصی از آب مقطر با سرعت‌ها و دبی‌های مختلف را دارا می‌باشد. برای تصویر برداری از حرکت قطرات از دوربین پرسرعت استفاده شده است.

۲-۱۲-۲- شرح آزمایش

برای انجام آزمایش در هر مرحله، ابتدا توسط کنترلر PID دمای مشخصی را برای سطح مسی تنظیم می‌کنیم. در این آزمایش دماهای ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲، ۶۵ و ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد برای سطح مسی در نظر می‌گیریم. سپس هیتر را روشن کرده تا دمای سطح به دمای تنظیم شده کنترلر برسد، بعد از رسیدن سطح به دمای تنظیم شده با فرمان کنترلر، هیتر به طور خودکار خاموش می‌گردد و عمل گرم شدن متوقف می‌شود. با توجه به سرعت برخورد قطره به سطح، قطره باید از ارتفاعی مشخص از سوزن تزریق رها شود. بدین منظور از صفحه‌ی پلکسی گلاس که پایه‌ی سوزن تزریق روی آن تعبیه شده استفاده می‌کنیم. این صفحه توسط چهار میله‌ی رزوه شده قابل کنترل می‌باشد و با توجه به رزوه بودن میله‌ها می‌توان به راحتی ارتفاع را تغییر داد. در این آزمایش ارتفاع سقوط قطره به ترتیب ۰/۹۵، ۳/۲۳، ۸/۴۲، ۱۰/۹۷ و ۱۳/۲۸ سانتی‌متر می‌باشند. سپس با استفاده از پمپ سرنگی و تنظیم دبی مشخص برای آن، آب مقطر به سمت سوزن تزریق هدایت می‌شود. بعد از رسیدن آب به درون سوزن تزریق و قبل از تولید قطره‌ی آب، دبی پمپ را کاهش داده تا فرایند تولید قطره با دبی کم انجام گیرد و قطره با سرعت از سوزن تزریق جدا نگردد. بعد از تولید قطره پمپ را خاموش می‌کنیم و منتظر می‌مانیم تا نیروی وزن قطره بر نیروی کشش سطحی بین قطره و نوک سوزن غلبه کند و اصطلاحاً قطره از نوک سوزن رها شود. با توجه به استفاده از سوزن ۱۶ G، قطر قطره‌ی جدا شده $D_0 = (d_x^2 \times d_y)^{\frac{1}{3}}$ [۷۲] میلی‌متر می‌باشد. همچنین قطر معادل قطره، با استفاده از رابطه محاسبه می‌گردد. d_x و d_y به ترتیب قطر افقی و عمودی قطره می‌باشند که با استفاده از پردازش تصویر محاسبه می‌گردند. سنسورهای اندازه‌گیری دما نیز باید به مجموعه‌ی ADAM و رایانه متصل باشند تا دمای نقاط مورد نظر در حین آزمایش ثبت گردد. برای دست یافتن به نتایج دقیق‌تر، هر آزمایش حداقل چهار مرتبه تکرار می‌گردد.



شکل ۲-۵ (الف): تصویری از چیدمان نهایی تجهیزات آزمایشگاهی.



شکل ۵-۲ (ب): شماتیک از چیدمان نهایی تجهیزات آزمایشگاهی.

فصل سوم

نتایج آزمایشگاهی

۳-۱- مقدمه

در این فصل به تحلیل داده‌ها و نتایج حاصل از آزمایشات بر روی پدیده‌ی برخورد قطره بر روی سطح مسی با دماهای متفاوت می‌پردازیم. لازم به ذکر است، برای تحلیل داده‌ها و نتایج ابتدا می‌بایست عکس‌های ثبت شده توسط دوربین پر سرعت را پردازش نماییم. بنابراین مروری بر پردازش تصویر خواهیم داشت. سپس مشخصات اولیه‌ی قطره همانند: قطر و دمای اولیه آن را بیان خواهیم نمود. همچنین ارتفاع سقوط قطره بر روی سطح و دماهای مختلفی که برای سطح در نظر گرفته شده است را بیان می‌کنیم. در ادامه به بررسی پارامترهای متفاوتی همانند: قطر تماسی بی‌بعد، ارتفاع بی‌بعد، شار حرارتی، اثرات خنک کننده و انرژی حرارتی مربوط به پدیده‌ی برخورد قطره بر روی سطح می‌پردازیم.

۳-۲- تحلیل داده‌ها و نتایج

همانطور که در فصل قبل اشاره کردیم، قطره‌ی آب تولید شده توسط نوک سوزن فلزی متصل به پمپ سرنگی هنگامی که نیروی وزن قطره بر نیروی کشش سطحی آن غلبه می‌کند از نوک سوزن جدا می‌شود و به صفحه مسی برخورد می‌کند. قطر قطره‌ی جدا شده ۳/۳۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین قطر معادل قطره، با استفاده از رابطه $D_0 = (d_x^2 \times d_y)^{\frac{1}{3}}$ [۷۲] محاسبه می‌گردد. d_x و d_y به ترتیب قطر افقی و عمودی قطره می‌باشند که با استفاده از پردازش تصویر محاسبه می‌گردند.

۳-۳- حرکت سقوط آزاد قطره

پدیده‌ی رها شدن قطره از سوزن تزریق و برخورد آن با سطح مسی، نمونه‌ای از حرکت سقوط آزاد می‌باشد. همانطور که می‌دانیم در حرکت سقوط آزاد قطره برای محاسبه‌ی سرعت قطره در لحظه‌ی برخورد با سطح مسی می‌توانیم از رابطه‌ی زیر استفاده نماییم:

$$V_0 = \sqrt{2g(H - D_0)} \quad (۱-۳)$$

با توجه به رابطه (۱-۳) که برای سرعت قطره در لحظه برخورد به سطح به دست می‌آید و با داشتن

مقادیر ارتفاع سقوط قطره که برابر با ۰/۹۵، ۳/۲۳، ۸/۴۲، ۱۰/۹۷۹ و ۱۳/۲۸ سانتی‌متر می‌باشند و با داشتن قطر اولیه قطره که ۳/۳۶ میلی‌متر می‌باشد. مقادیر سرعت قطره در لحظه‌ی برخورد به سطح مسی به ترتیب برابر با ۰/۳۵۲، ۰/۷۶۱، ۱/۲۷۲، ۱/۴۵۹ و ۱/۶۰۹ متر بر ثانیه می‌باشند. لازم به ذکر است که مقادیر سرعت محاسبه شده توسط رابطه‌ی (۳-۱) با مقادیر سرعت تجربی محاسبه شده اختلافی ندارد.

۳-۴- عدد بی بعد مشخصه فیزیک حاضر

عدد وبر، عدد بی‌بعدی است که در بخش تحلیل داده‌ها و بیان نتایج در طول انجام پروژه از آن استفاده می‌کنیم، که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$we = \frac{\rho V_0^2 D_0}{\sigma_{LV}} \quad (۳-۲)$$

ρ چگالی قطره، V_0 سرعت لحظه برخورد قطره به سطح، D_0 قطر اولیه قطره و σ_{LV} کشش سطحی بین فازهای مایع و گاز می‌باشد، که با توجه به رابطه‌ی ۳-۱۸ محاسبه می‌گردد. با توجه به سرعت‌های ۰/۳۵۲، ۰/۷۶۱، ۱/۲۷۲، ۱/۴۵۹ و ۱/۶۰۹ متر بر ثانیه مقادیر اعداد بی‌بعد وبر در این آزمایش به ترتیب ۵/۲۳، ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ می‌باشند.

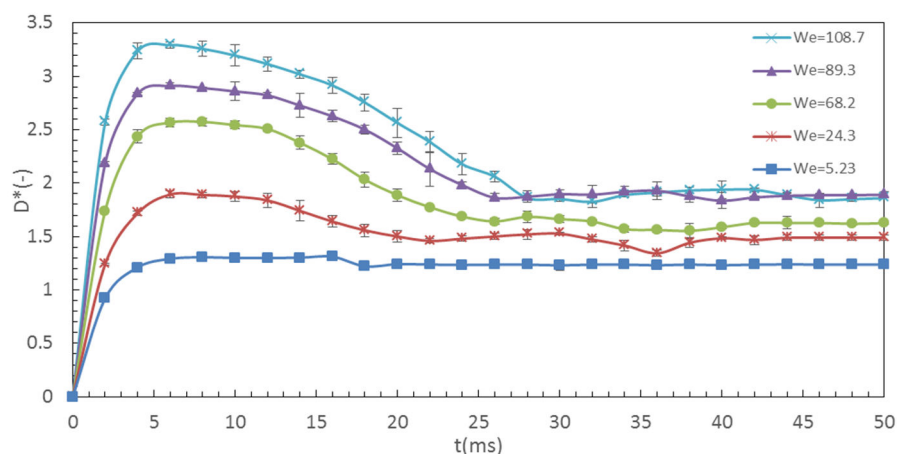
۳-۵- نتایج آزمایشگاهی برخورد قطره آب به سطح مسی بدون اثرات انتقال

حرارت

شماتیک سیستم آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش در فصل دوم بصورت کامل توضیح داده شده است. قطره‌ی آب با دمای ۲۴/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد، قطر اولیه ۳/۳۶ میلی‌متر و سرعت‌های متفاوت ۰/۳۵۲، ۰/۷۶۱، ۱/۲۷۲، ۱/۴۵۹ و ۱/۶۰۹ متر بر ثانیه که هر کدام به ترتیب مقادیر وبر ۵/۲۳، ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ را می‌دهند، به سطح مسی با دمای ۲۴/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد برخورد می‌کند. همانطور که در شکل ۳-۱ مشاهده می‌شود در لحظه‌ی برخورد قطره با سطح ($t = 0ms$) قطره

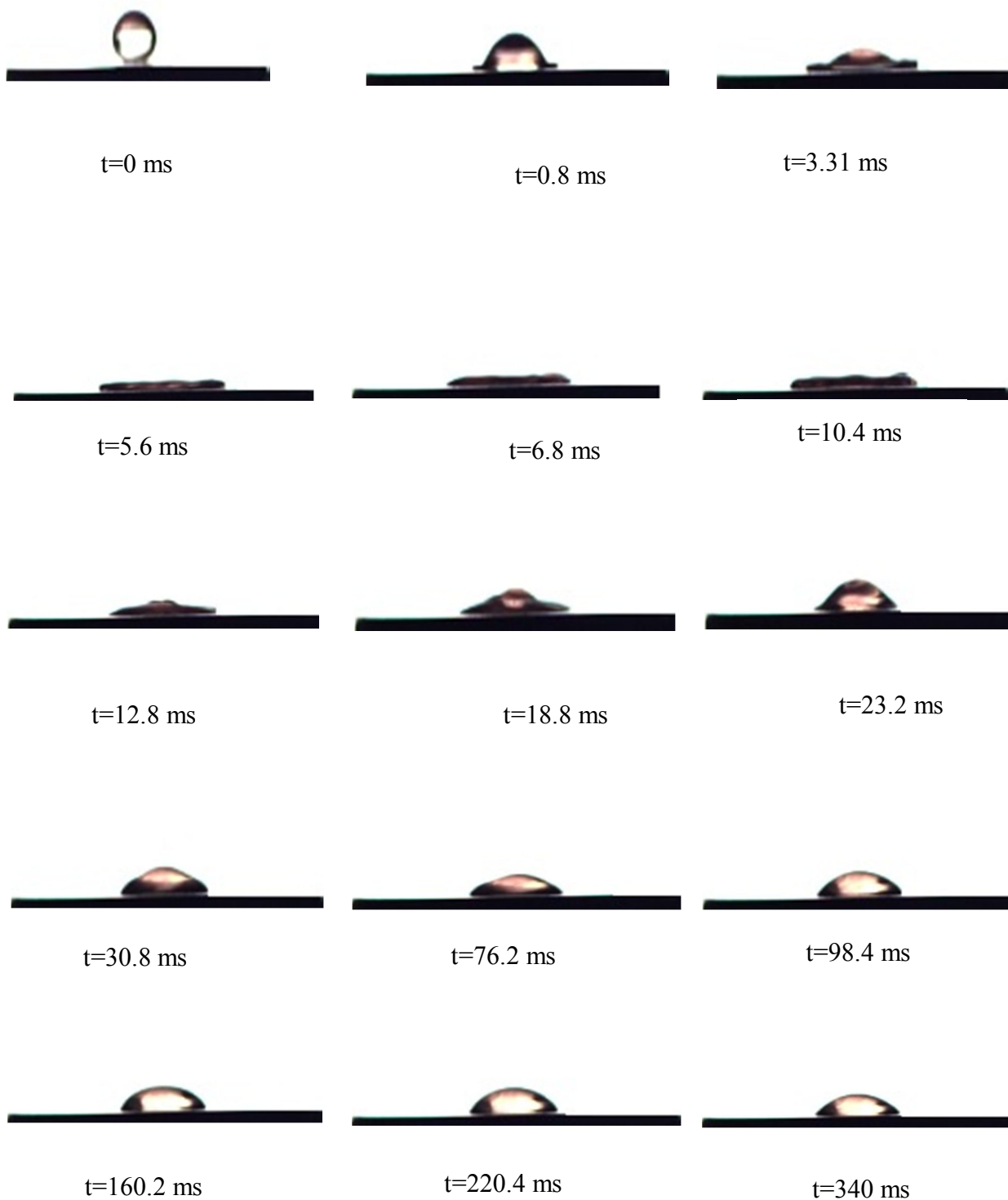
بصورت مماس با سطح خواهد بود. در نتیجه مقدار قطر تماس بی‌بعد (D^*)، برای تمامی حالت‌ها با وبرهای متفاوت در این لحظه برابر صفر خواهد بود. اما به تدریج با گذشت زمان قطره بر روی سطح پخش می‌شود تا جایی که به ماکزیمم قطر تماس بی‌بعد می‌رسد. به این مقدار ماکزیمم پخش‌شوندگی نیز گفته می‌شود که برای نمودارها با اعداد وبر $۵/۲۳$ ، $۲۴/۳$ ، $۶۸/۲$ ، $۸۹/۳$ و $۱۰۸/۷$ به ترتیب مقادیر $۱/۳$ ، $۱/۸۹$ ، $۲/۵۷$ ، $۲/۹$ و $۳/۲۹$ می‌باشند. با مشاهده اعداد ذکر شده و مشاهده شکل ۳-۱ به این نتیجه می‌رسیم که هر چه عدد وبر افزایش یابد میزان قطر تماس بی‌بعد نیز بیشتر می‌گردد. پس از رسیدن قطره به ماکزیمم پخش‌شوندگی، قطره وارد مرحله‌ی جمع شدن می‌گردد. بنابراین در این مرحله با گذشت زمان قطر قطره به تدریج کاهش می‌یابد تا جایی که قطره به ماکزیمم جمع شدن خود برسد. در لحظه‌ی ماکزیمم جمع شدن قطره تا ارتفاع مشخصی از سطح بالا می‌آید، اصطلاحاً می‌گوییم حالت برگشتن^۱ از سطح و منعکس شدن اتفاق می‌افتد. مقادیر ماکزیمم جمع شدن برای نمودارها با اعداد وبر $۵/۲۳$ ، $۲۴/۳$ ، $۶۸/۲$ ، $۸۹/۳$ و $۱۰۸/۷$ به ترتیب $۱/۲۲$ ، $۱/۴$ ، $۱/۶$ ، $۱/۸۳$ و $۱/۸۶$ می‌باشند. بعد از مرحله‌ی ماکزیمم جمع شدن نیز همچنان قطره در حالت تعادل خود قرار ندارد. بنابراین تمایل دارد به حالت تعادل خود برسد. در نتیجه دوباره بر روی سطح پخش و جمع می‌شود. قطره حرکت پخش و جمع شدن را به‌طور نوسانی و پی در پی انجام می‌دهد تا جایی که به حالت تعادل خود برسد. حالت تعادل نهایی قطره لحظه‌ای می‌باشد که قطر قطره بعد از آن لحظه هیچ تغییری نمی‌کند و اصطلاحاً می‌گوییم قطره به قطر تعادل نهایی خود می‌رسد. همچنین با دقت بر روی فیلم‌های ثبت شده توسط دوربین پر سرعت از مکانیزم سقوط قطره تا برخورد با سطح و پخش و جمع شدن روی سطح مشاهده می‌کنیم، در لحظات تعادل نهایی، قطره هیچ لرزشی از خود نشان نمی‌دهد. همچنین عکس‌های ثبت شده در لحظات تعادل نهایی نیز کاملاً مشابه هم بوده و این واقعیت را به خوبی بیان می‌کنند. در حالیکه در لحظات قبل از رسیدن به تعادل نهایی، قطره دارای لرزش‌هایی خواهد بود.

^۱ Rebounding



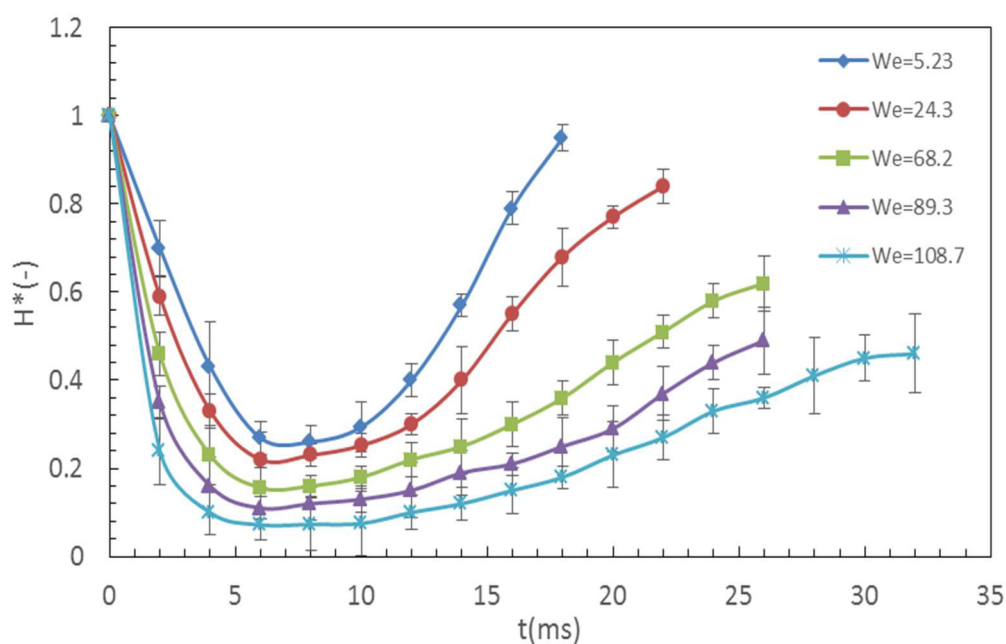
شکل ۳-۱: برخورد قطره‌ی آب با سطح مسی با دمای ۲۴/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد در اعداد وبر مختلف.

در حالیکه قطره‌ی آب با دمای ۲۴/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد، قطر اولیه‌ی ۳/۳۶ میلی‌متر و عدد وبر ثابت ۸۹/۳ بر روی سطح مسی با دمای ۲۴/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد برخورد می‌کند، شکل ۳-۲ تصاویر ثبت شده از این فرآیند را در طول برخورد قطره‌ی آب بر روی سطح مسی در مدت زمان ۳۴۰ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳-۲ مشاهده می‌شود در لحظه‌ی برخورد قطره با سطح، حالتی که قطره با سطح مماس می‌شود مقدار قطر تماس بی‌بعد قطره با سطح صفر می‌باشد. اما با گذشت زمان میزان پخش شوندگی قطره بر روی سطح افزایش می‌یابد. بطوریکه در زمان ۵/۶ میلی‌ثانیه، قطره بطور کامل بر روی سطح پخش می‌شود و بصورت یک دیسک کاملاً صاف مشاهده می‌گردد. این لحظه حالتی را نشان می‌دهد که قطره به ماکزیمم قطر تماسی خود با سطح می‌رسد. مقدار ماکزیمم قطر تماسی بی‌بعد در این حالت ۲/۹ می‌باشد. سپس با گذشت زمان قطره به تدریج شروع به جمع شدن می‌کند تا جایی که در زمان تقریباً ۲۶ میلی‌ثانیه به ماکزیمم قطر جمع شدن می‌رسد. مقدار ماکزیمم قطر جمع شدن ۱/۸۸ است. ماکزیمم قطر مرحله‌ی جمع شدن به عنوان حداقل مقدار فاز جمع شدن تعریف می‌شود و از لحاظ فیزیکی با انرژی اتلاف ویسکوزیته در طول فاز جمع شدن مرتبط است. بعد از مرحله‌ی جمع شدن، قطره به تدریج روی سطح بطور نوسانی، پخش و جمع می‌شود تا جایی که قطره بعد از گذشت ۳۴۰ میلی‌ثانیه به حالت تعادل نهایی خود می‌رسد.



شکل ۳-۲: مراحل تغییر شکل قطره‌ی آب پس از برخورد بر روی سطح مسی با دمای ۲۴/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد و عدد وبر ۸۹/۳.

قطره‌ی آب با دمای ۲۴/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد، قطر اولیه‌ی ۳/۳۶ میلی‌متر و سرعت‌های متفاوت ۰/۳۵۲، ۰/۷۶۱، ۱/۲۷۲، ۱/۴۵۹ و ۱/۶۰۹ متر بر ثانیه که هر کدام به ترتیب مقادیر وبر ۵/۲۳، ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ را می‌دهند، به سطح مسی با دمای ۲۴/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد برخورد می‌کند. در لحظه‌ی برخورد قطره با سطح، قطره بصورت مماس با سطح خواهد بود. همانطور که در شکل ۳-۳ مشاهده می‌شود مقدار ارتفاع بی‌بعد قطره (H^*)، برای تمامی حالت‌ها با وبرهای متفاوت در این لحظه یک خواهد بود. اما به تدریج با گذشت زمان قطره بر روی سطح پخش می‌شود و از ارتفاع آن کاسته خواهد شد تا جایی که به ماکزیمم قطر تماس بی‌بعد می‌رسد که در آن لحظه ارتفاع بی‌بعد قطره نیز به مینیمم مقدار خود می‌رسد. مینیمم ارتفاع بی‌بعد قطره برای نمودارها با اعداد وبر ۵/۲۳، ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ به ترتیب مقادیر ۰/۲۶، ۰/۲۲، ۰/۱۵۶، ۰/۱۱ و ۰/۰۷۲ می‌باشند. با مشاهده اعداد ذکر شده و مشاهده شکل ۳-۳ به این نتیجه می‌رسیم که هر چه عدد وبر افزایش یابد میزان ارتفاع بی‌بعد قطره پس از برخورد قطره با سطح با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد. پس از رسیدن قطره به ماکزیمم پخش شونده‌ی، قطره وارد مرحله‌ی جمع شدن می‌گردد. بنابراین در این مرحله با گذشت زمان قطر قطره به تدریج کاهش می‌یابد در حالیکه ارتفاع بی‌بعد قطره با گذشت زمان افزایش می‌یابد. تا جایی که قطره به ماکزیمم جمع شدن خود برسد. در لحظه ماکزیمم جمع شدن قطره تا ارتفاع مشخصی از سطح بالا می‌آید. مقادیر ارتفاع بی‌بعد قطره برای لحظه‌ای که قطره به ماکزیمم جمع شدن خود می‌رسد برای نمودارها با اعداد وبر ۵/۲۳، ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ به ترتیب مقادیر ۰/۹۵، ۰/۸۴، ۰/۶۲، ۰/۵۳ و ۰/۴۶ می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود هرچه میزان عدد وبر افزایش یابد میزان ارتفاع بالا آمدن قطره در لحظه‌ی ماکزیمم جمع شدن کمتر خواهد بود. بعد از مرحله‌ی ماکزیمم جمع شدن نیز همچنان قطره در حالت تعادل خود قرار ندارد. بنابراین تمایل دارد به حالت تعادل خود برسد. در نتیجه دوباره بر روی سطح پخش و جمع می‌شود. با پخش و جمع شدن قطره بر روی سطح ارتفاع بالا آمدن قطره نیز بصورت نوسانی و پی در پی تغییر می‌کند.



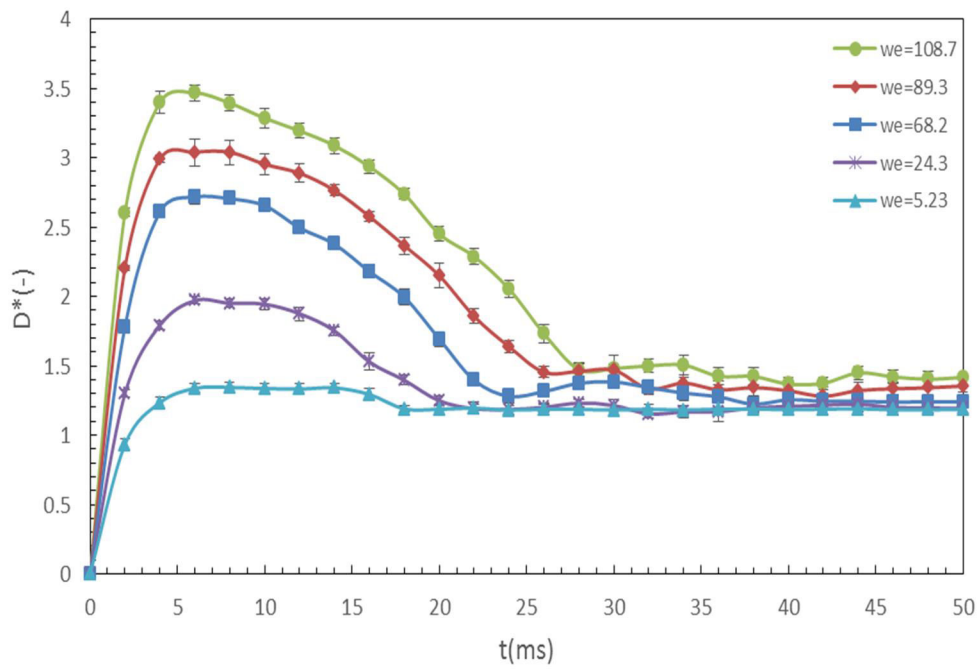
شکل ۳-۳: برخورد قطره‌ی آب با سطح مسی با دمای ۲۴/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد در اعداد وبر مختلف.

۳-۶- نتایج آزمایشگاهی برخورد قطره آب بر روی سطح مسی با اثرات انتقال

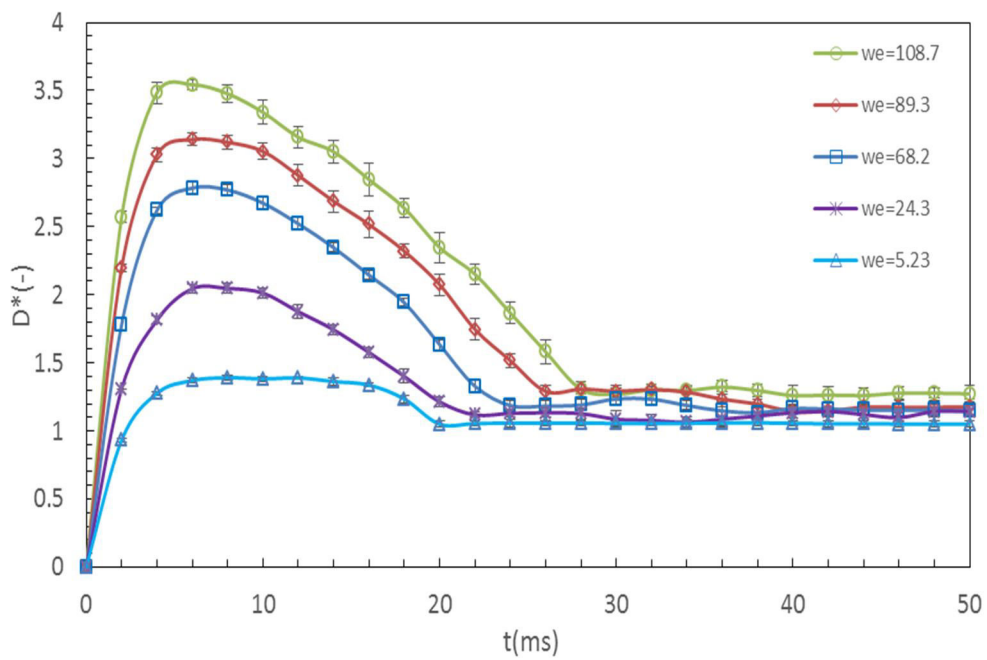
حرارت

در این قسمت، قطره‌ی آب با دمای ۲۴/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد و قطر اولیه ۳/۳۶ میلی‌متر روی سطح مسی با دمای اولیه ۶۵ و ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد برخورد می‌کند. شرایط آزمایش به گونه‌ای می‌باشد که با تغییر ارتفاع سقوط قطره، سرعت‌های برخورد قطره به سطح مسی ۰/۳۵۲، ۰/۷۶۱، ۱/۲۷۲، ۱/۴۵۹ و ۱/۶۰۹ متر بر ثانیه می‌باشند. که هرکدام به ترتیب اعداد وبر ۵/۲۳، ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ را نتیجه می‌دهند. شکل ۳-۴ و ۳-۵ میزان پخش شوندگی قطره را بر حسب زمان t ، برای برخورد قطره آب روی سطح مسی به ترتیب با دماهای ۶۵ و ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد و با در نظر گرفتن اعداد وبر متفاوت را نشان می‌دهند. طبق این دو نمودار هر چه مقدار عدد وبر افزایش یابد، زمان رسیدن به ماکزیمم پخش شوندگی اندکی کاهش می‌یابد، زیرا انرژی جنبشی بالاتر باعث تغییر قابل توجهی در انرژی سطحی و انرژی اتلاف ویسکوزیته می‌شود. شکل ۳-۴ مربوط به سطح مسی با دمای ۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد، مشاهده می‌کنیم که زمان رسیدن به ماکزیمم پخش شوندگی در اعداد وبر ۵/۲۳، ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ به ترتیب ۷/۲، ۶/۸، ۶، ۵/۶ و ۵/۲ میلی‌ثانیه می‌-

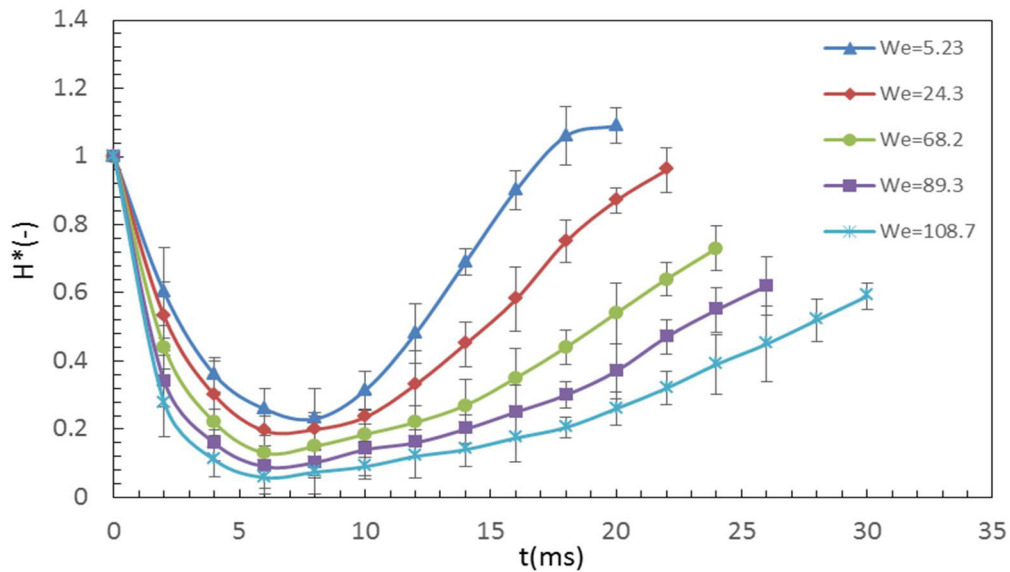
باشند. با توجه به شکل ۳-۵ که دمای سطح مسی $79/8$ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد، مشاهده می‌کنیم که زمان رسیدن به ماکزیمم پخش شوندگی برای اعداد وبر نامبرده تقریباً مشابه زمان رسیدن به ماکزیمم پخش شوندگی سطح مسی با دمای 65 درجه‌ی سانتی‌گراد است و در محدوده‌ی 5 تا 7 میلی‌ثانیه می‌باشد. با توجه به نمودارهای شکل ۳-۴ مشاهده می‌کنیم که هرچه عدد وبر افزایش یابد، نمودار مربوط به آن عدد وبر با شیب بیشتری نزول می‌یابد. برای مثال شیب نزولی نمودار با عدد وبر $108/7$ نسبت به نمودارهای با عدد وبر $5/23$ ، $24/3$ ، $68/2$ و $89/3$ بیشتر می‌باشد. همچنین نموداری که دارای عدد وبر بیشتری باشد ماکزیمم پخش شوندگی بیشتری نسبت به دیگر نمودارها با اعداد وبر کمتر خواهد داشت. برای شکل ۳-۴ ماکزیمم پخش شوندگی برای نمودارهای با اعداد وبر $5/23$ ، $24/3$ ، $68/2$ ، $89/3$ و $108/7$ به ترتیب $1/345$ ، $1/97$ ، $2/71$ ، $3/039$ و $3/46$ می‌باشند. برای شکل ۳-۵ ماکزیمم پخش شوندگی برای نمودارهای با اعداد وبر $5/23$ ، $24/3$ ، $68/2$ ، $89/3$ و $108/7$ به ترتیب $1/391$ ، $2/035$ ، $2/783$ ، $3/14$ و $3/54$ می‌باشند. ماکزیمم قطر مرحله جمع شدن به عنوان حداقل مقدار فاز جمع شدن تعریف می‌شود و از لحاظ فیزیکی با انرژی اتلاف ویسکوزیته در طول فاز جمع شدن مرتبط است. با توجه به شکل‌های ۳-۴ و ۳-۵ مشاهده می‌کنیم، مقدار حداکثر قطر جمع شدن برای تمامی نمودارهای با اعداد وبر متفاوت تقریباً مقداری مشابه را نشان می‌دهند در حالیکه زمان رسیدن به ماکزیمم قطر جمع شدن با توجه به اعداد وبر متفاوت نمودارها، متغیر می‌باشند. برای مثال شکل ۳-۴، زمان رسیدن به ماکزیمم قطر جمع شدن برای اعداد وبر $5/23$ ، $24/3$ ، $68/2$ ، $89/3$ و $108/7$ بین 20 تا 29 میلی‌ثانیه می‌باشند. در صورتی که مقدار حداکثر قطر جمع شدن برای نمودارهای با این اعداد وبر تقریباً بین $1/18$ و $1/47$ می‌باشند. همچنین برای شکل ۳-۵، زمان رسیدن به ماکزیمم قطر جمع شدن برای اعداد وبر $5/23$ ، $24/3$ ، $68/2$ ، $89/3$ و $108/7$ تقریباً مشابه زمان رسیدن به ماکزیمم قطر جمع شدن در دمای 65 درجه‌ی سانتی‌گراد در محدوده‌ی 20 تا 29 میلی‌ثانیه می‌باشند. در صورتیکه مقدار حداکثر قطر جمع شدن برای نمودارهای با این اعداد وبر تقریباً بین $1/05$ و $1/29$ می‌باشند.



شکل ۳-۴: مراحل پخش شدن قطره‌ی آب روی سطح مسی با دمای ۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد با وبرهای مختلف.



شکل ۳-۵: مراحل پخش شدن قطره‌ی آب روی سطح مسی با دمای ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد با وبرهای مختلف.



شکل ۳-۶: میزان ارتفاع بی‌بعد قطره‌ی آب روی سطح مسی با دمای ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد با وبرهای مختلف. قطره‌ی آب با دمای ۲۴/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد، قطر اولیه‌ی ۳/۳۶ میلی‌متر و سرعت‌های متفاوت ۰/۳۵۲، ۰/۷۶۱، ۱/۲۷۲، ۱/۴۵۹ و ۱/۶۰۹ متر بر ثانیه که هر کدام به ترتیب مقادیر وبر ۵/۲۳، ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ را می‌دهند، به سطح مسی با دمای ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد برخورد می‌کند. در لحظه‌ی برخورد قطره با سطح، قطره بصورت مماس با سطح خواهد بود. همانطور که در شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود مقدار ارتفاع بی‌بعد قطره برای تمامی حالت‌ها با وبرهای متفاوت در این لحظه یک خواهد بود. اما به تدریج با گذشت زمان قطره بر روی سطح پخش می‌شود و از ارتفاع آن کاسته خواهد شد تا جایی که به ماکزیمم قطر تماس بی‌بعد می‌رسد که در آن لحظه ارتفاع بی‌بعد قطره نیز به مینیمم مقدار خود می‌رسد. مینیمم ارتفاع بی‌بعد قطره برای نمودارها با اعداد وبر ۵/۲۳، ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ به ترتیب مقادیر ۰/۲۳، ۰/۱۹۵، ۰/۱۳، ۰/۰۹ و ۰/۰۵۸ می‌باشند. با مشاهده اعداد ذکر شده و مشاهده شکل ۳-۶ به این نتیجه می‌رسیم که هر چه عدد وبر افزایش یابد میزان ارتفاع بی‌بعد قطره پس از برخورد قطره با سطح با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد. پس از رسیدن قطره به ماکزیمم پخش شونده‌ی، قطره وارد مرحله‌ی جمع شدن می‌گردد. بنابراین در این مرحله با گذشت زمان قطر قطره به تدریج کاهش می‌یابد در حالیکه ارتفاع بی‌بعد قطره با گذشت زمان افزایش می‌یابد. تا جایی که قطره به ماکزیمم جمع شدن خود برسد. در لحظه ماکزیمم جمع شدن، قطره تا

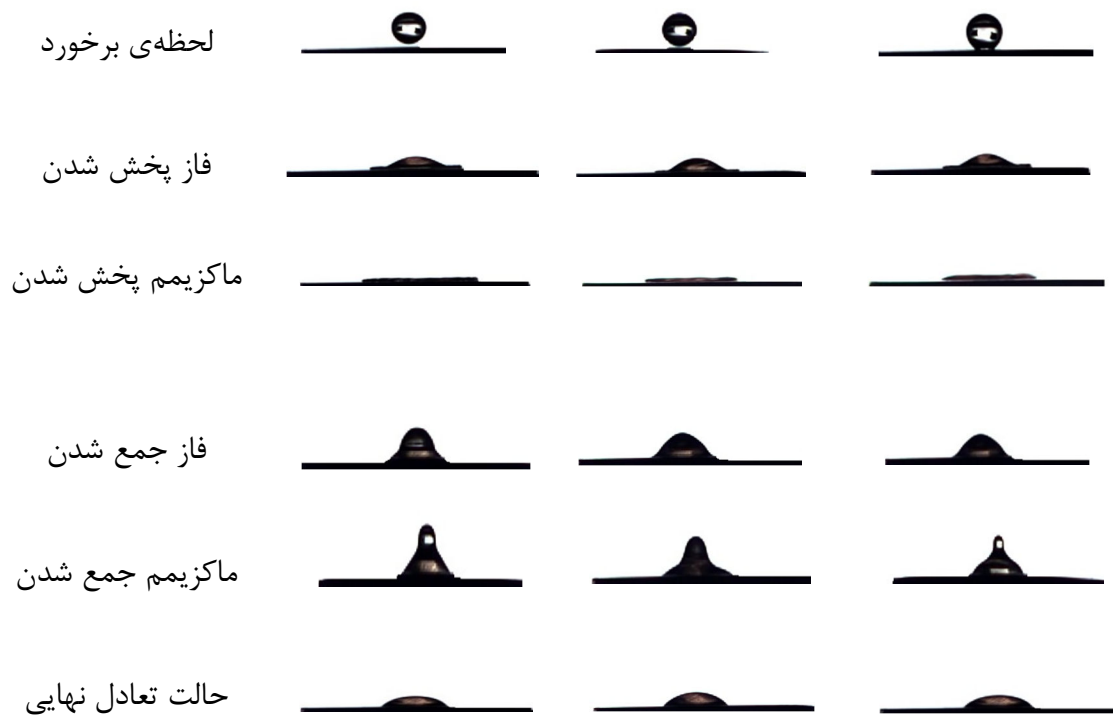
ارتفاع مشخصی از سطح بالا می‌آید. مقادیر ارتفاع بی‌بعد قطره برای لحظه‌ای که قطره به ماکزیمم جمع شدن خود می‌رسد برای نمودارها با اعداد وبر $۵/۲۳$ ، $۲۴/۳$ ، $۶۸/۲$ ، $۸۹/۳$ و $۱۰۸/۷$ به ترتیب مقادیر $۱/۰۹$ ، $۰/۹۶$ ، $۰/۷۳$ ، $۰/۶۲$ و $۰/۵۹$ می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود هرچه میزان عدد وبر افزایش یابد میزان ارتفاع بالا آمدن قطره در لحظه‌ی ماکزیمم جمع شدن کمتر خواهد بود. علاوه بر این با افزایش عدد وبر میزان ماکزیمم ارتفاع بی‌بعد قطره که در لحظه ماکزیمم جمع شدن قطره اتفاق می‌افتد، در زمان‌های بالاتری از لحظه‌ی برخورد قطره با سطح اتفاق می‌افتد. زیرا با افزایش عدد وبر میزان ماکزیمم قطر جمع شدن در زمان‌های بالاتری از برخورد اتفاق می‌افتد.

۳-۶-۱- اثرات دماهای مختلف سطح بر تغییر شکل قطره

شکل ۳-۷ تصاویر پیوسته‌ای از حرکت پخش و جمع شدن قطره‌ی آب به قطر $۳/۳۶$ میلی‌متر با عدد وبر $۵/۲۳$ روی سطح صاف مسی با دماهای متفاوت $۳۵/۱$ ، $۴۴/۹$ و $۷۹/۸$ درجه‌ی سانتی‌گراد، برخورد می‌کند را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳-۷ قطره در ابتدا بعد از برخورد روی سطح، پخش می‌شود و بعد از گذشت $۷/۲$ میلی‌ثانیه به ماکزیمم پخش شدن می‌رسد. در ادامه قطر قطره با گذشت زمان کمتر می‌شود، تا زمانیکه به ماکزیمم جمع شدن می‌رسد. بعد از گذشت تقریباً ۲۰ میلی‌ثانیه از برخورد قطره به سطح، قطره به ماکزیمم جمع شدن می‌رسد. در نهایت بعد از سپری شدن مدت زمان تقریباً ۳۰۰ میلی‌ثانیه به حالت تعادل نهایی می‌رسد. با مقایسه شکل‌های برخورد قطره روی سطح مسی با دماهای متفاوت به این نتیجه می‌رسیم که میزان پخش شدن قطره تقریباً تا لحظه‌ی رسیدن به ماکزیمم پخش‌شوندگی در تمامی دماها با هم برابرند و تفاوتی را در شکل‌ها مشاهده نمی‌کنیم، اما در لحظه رسیدن به ماکزیمم پخش شدن تغییراتی در شکل‌های قطره مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌کنیم میزان ماکزیمم پخش‌شوندگی قطره در دماهای پایین‌تر مانند: $۳۵/۱$ و $۴۴/۹$ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای بالاتر، $۷۹/۸$ درجه سانتی‌گراد اندکی کمتر است. برای مثال میزان ماکزیمم پخش‌شوندگی برای دماهای $۳۵/۱$ ، $۴۴/۹$ و $۷۹/۸$ درجه‌ی سانتی‌گراد به ترتیب $۱/۳۲$ ، $۱/۳۴$ و $۱/۴$ می‌باشند. با وارد شدن به فاز جمع شدن قطره، مشاهده می‌کنیم که هر چه دما افزایش یابد، میزان

جمع شدن قطره بیشتر می‌شود. برای دماهای ذکر شده ماکزیمم جمع شدن به ترتیب ۱/۱۹، ۱/۱۶ و ۱/۰۶ می‌باشند. همچنین میزان ماکزیمم ارتفاع بی‌بعد قطره که در لحظه‌ی ماکزیمم جمع شدن و در زمان تقریباً ۲۰ میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد، برای دماهای ۳۵/۱، ۴۴/۹ و ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد به ترتیب مقادیر ۰/۹۷۸، ۱/۰۰۷ و ۱/۰۹ می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود در عدد وبر ثابت هر چه میزان دمای سطح بیشتر شود، میزان ماکزیمم ارتفاع بی‌بعد قطره که در لحظه‌ی ماکزیمم جمع شدن قطره اتفاق می‌افتد افزایش می‌یابد. زیرا در دماهای پایین‌تر سطح ۳۵/۱ و ۴۴/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد میزان جمع شدن قطره کمتر از حالتی است که دمای سطح ۷۹/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. تفاوت بسیار اندکی بین مراحل تغییر شکل قطره آب پس از برخورد بر روی سطح مسی با دمای ۳۵/۱ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با دمای سطح ۴۴/۹ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. با تحلیل شکل ۳-۷ و نتایج حاصل شده از شکل‌های ۳-۸ و ۳-۹ که نمودار میزان پخش شونده‌ی قطره روی سطح در عدد وبر ثابت و دماهای متفاوت سطح را نشان می‌دهند، به این نتیجه می‌رسیم که در یک عدد وبر ثابت با در نظر گرفتن دماهای متفاوت برای سطحی که قطره با آن برخورد می‌کند، دمای سطح در طی فاز جمع شدن اثر بیشتری دارد. در حالیکه دمای سطح در فاز پخش شدن تاثیر چندانی ندارد.

۳۵/۱ درجه سانتی‌گراد ۴۴/۹ درجه سانتی‌گراد ۷۹/۸ درجه سانتی - دمای سطح برخورد
 گراد

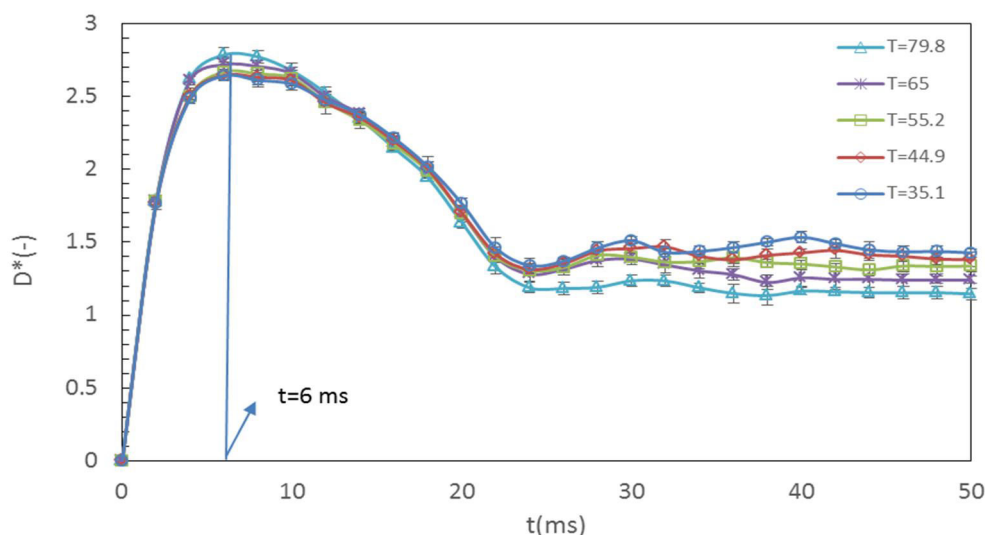


شکل ۳-۷: مراحل تغییر شکل قطره آب پس از برخورد بر روی سطح مسی با دماهای ۳۵/۱، ۴۴/۹ و ۷۹/۸ درجه سانتی‌گراد با عدد وبر ۵/۲۳.

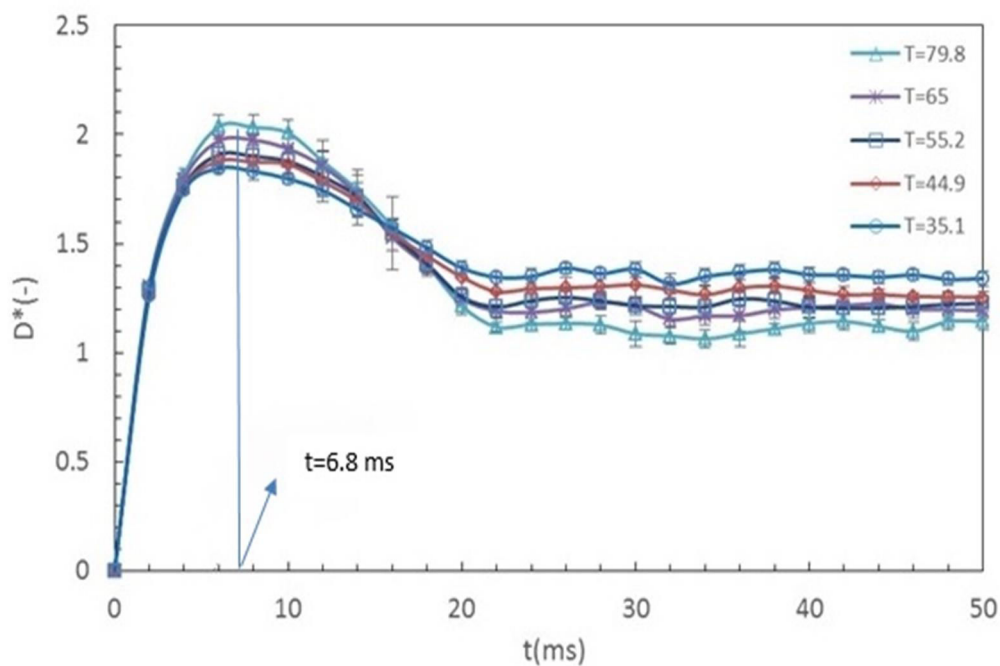
۳-۶-۲- اثرات دمای سطح بر روی میزان پخش شدگی قطره روی سطح

قطره‌ی آب با دمای ۲۴/۳ درجه سانتی‌گراد و قطر ۳/۳۶ میلی‌متر با عدد وبر ثابت ۶۸/۲ بر روی سطح مسی با دماهای ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲، ۶۵ و ۷۹/۸ درجه سانتی‌گراد برخورد می‌کند. با توجه به شکل-های ۳-۸ و ۳-۹ با افزایش دمای سطح مقدار ماکزیمم پخش شونده برای تمامی نمودارها با دماهای متفاوت تقریباً یکسان می‌باشد. تنها تغییر اندکی در لحظات رسیدن به ماکزیمم پخش شونده مشاهده می‌شود. مقدار ماکزیمم پخش شونده در عدد وبر ثابت ۶۸/۲ برای دماهای سطح ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲، ۶۵ و ۷۹/۸ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۲/۶۴، ۲/۶۴۳، ۲/۶۶۶، ۲/۷۱ و ۲/۷۸۳ می‌باشند. همچنین مقدار ماکزیمم پخش شونده در عدد وبر ثابت ۲۴/۳ برای دماهای سطح ذکر شده به

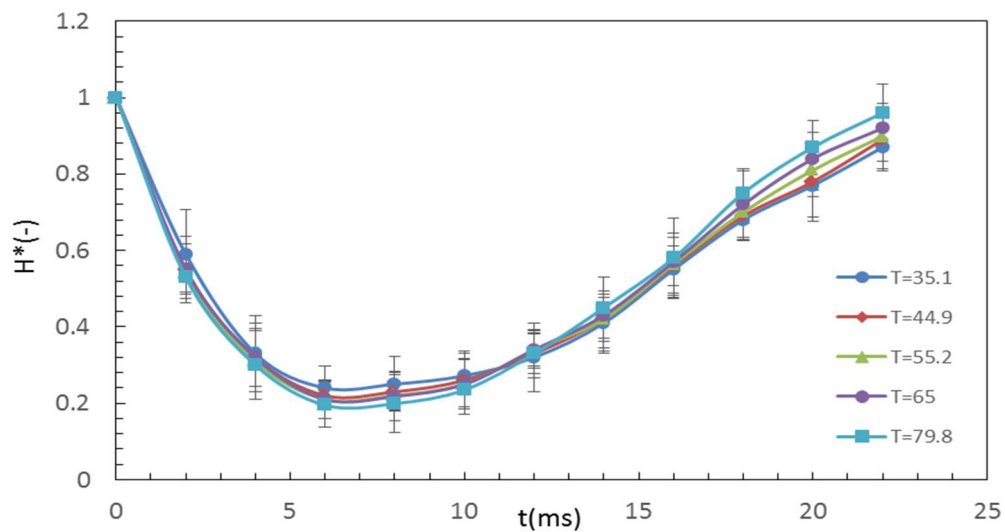
ترتیب ۱/۸۴۵، ۱/۸۷۷، ۱/۹۰۶، ۱/۹۷ و ۲/۰۳۵ می‌باشند. در حالیکه ماکزیمم قطر جمع شدن با افزایش دمای سطح، کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل ۳-۸ مشاهده می‌شود، ماکزیمم قطر جمع شدن برای دماهای ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲ و ۶۵ و ۷۹/۸ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱/۳۱۳، ۱/۳۰۶، ۱/۲۸ و ۱/۱۸۲ می‌باشند. زمان رسیدن به ماکزیمم پخش شدن برای تمامی نمودارها با دماهای متفاوت و عدد و بر ثابت ۶۸/۲ تقریباً مشابه و حدوداً برابر ۶ میلی ثانیه می‌باشد. همچنین مطابق شکل ۳-۹ ماکزیمم قطر جمع شدن برای دماهای ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲ و ۶۵ و ۷۹/۸ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱/۳۴۶، ۱/۲۸، ۱/۲۱، ۱/۱۸۵ و ۱/۱۱۸ می‌باشند و زمان رسیدن به ماکزیمم پخش شدن تقریباً برابر ۶/۸ میلی ثانیه می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود زمان رسیدن به ماکزیمم جمع شدن، با افزایش دمای سطح افزایش می‌یابد. این مشاهدات می‌تواند به دلیل کاهش در ویسکوزیته مایع باشد که به دمای سطح بستگی دارد. همچنین تغییر دمای سطح باعث تغییرات در ویسکوزیته مایع در فاز جمع شدن می‌شود که به دلیل انتقال انرژی از سطح به لایه مایع می‌باشد. به همین دلیل تغییرات قابل توجهی در قطر تماس بی‌بعد در فاز جمع شدن مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۸: مراحل برخورد قطره آب روی سطح مسی با دماهای ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲، ۶۵ و ۷۹/۸ درجه سانتی-گراد در عدد و بر ثابت ۶۸/۲



شکل ۳-۹: مراحل برخورد قطره آب روی سطح مسی با دماهای ۷۹/۸ و ۶۵، ۵۵/۲، ۴۴/۹، ۳۵/۱ درجه سانتی-گراد در عدد وبر ثابت ۲۴/۳.



شکل ۳-۱۰: میزان ارتفاع بی بعد قطره آب روی سطح مسی با دماهای ۷۹/۸ و ۶۵، ۵۵/۲، ۴۴/۹، ۳۵/۱ درجه سانتی-گراد در عدد وبر ثابت ۲۴/۳.

قطره‌ی آب با دمای ۲۴/۳ درجه سانتی‌گراد و قطر ۳/۳۶ میلی‌متر با عدد وبر ثابت ۲۴/۳ بر روی سطح مسی با دماهای ۷۹/۸ و ۶۵، ۵۵/۲، ۴۴/۹، ۳۵/۱ درجه سانتی‌گراد برخورد می‌کند. با توجه به شکل-های ۳-۸ و ۳-۹ با افزایش دمای سطح مقدار ماکزیمم پخش شوندگی برای تمامی نمودارها با دماهای

متفاوت تقریباً یکسان می‌باشد. تنها تغییر اندکی در لحظات رسیدن به ماکزیمم پخش شونده می‌شود. بنابراین همانطور که در شکل ۳-۱۰ مشاهده می‌شود مینیمم ارتفاع بی‌بعد قطره که در لحظه رسیدن به ماکزیمم پخش شونده اتفاق می‌افتد، در دماهای متفاوت نیز تفاوت اندکی با هم دارند. مقدار مینیمم ارتفاع بی‌بعد قطره در عدد وبر ثابت ۲۴/۳ برای دماهای سطح ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲، ۶۵ و ۷۹/۸ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۰/۲۴، ۰/۲۲، ۰/۲۱۷، ۰/۲۱ و ۰/۱۹۵ می‌باشند. با توجه به شکل های ۳-۸ و ۳-۹ ماکزیمم قطر جمع شدن با افزایش دمای سطح، کاهش می‌یابد. بنابراین ماکزیمم ارتفاع بی‌بعد قطره که در این لحظه اتفاق می‌افتد با افزایش دمای سطح افزایش می‌یابد. برای دماهای ذکر شده میزان ماکزیمم ارتفاع بی‌بعد قطره به ترتیب ۰/۸۷، ۰/۸۹، ۰/۸۹۹، ۰/۹۲ و ۰/۹۶ می‌باشند. تغییرات قابل توجهی در قطر تماس بی‌بعد در فاز جمع شدن مشاهده می‌شود و بنابراین ارتفاع بی‌بعد قطره نیز در فاز جمع شدن در عدد وبر ثابت و دماهای متفاوت با هم متفاوتند.

۳-۷- شرح اثر خنک کننده:

هنگامی که دو ماده نیمه بی‌نهایت به نام A و B که ابتدا در دمای یکنواخت و متفاوت T_A و T_B می‌باشند. زمانی که این دو در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، دمای سطح و شار حرارتی را می‌توان از نظریه انتقال حرارت هدایتی گذار که توسط کاراسلو و جاگر [۷۳] بیان شد، مطرح نمود. به تازگی استروتوس و همکاران [۲۱] و رویزمن [۸] به طور تحلیلی اثر برخورد قطرات روی دیوار گرم را مورد مطالعه قرار دادند و دمای سطح و شار حرارتی را بر اساس عدد پرانتل قطره مطرح نمودند.

دمای تماس اولیه در هنگام برخورد قطره به سطح $T_{c,th,0}$ می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T_{c,th,0} = \Gamma T_{w0} + (1 - \Gamma) T_{dr0} \quad (3-3)$$

در این معادله T_{w0} و T_{dr0} به ترتیب دمای دیوار و قطره در لحظه برخورد می‌باشند و γ پخش کننده-

ی حرارتی $\left(= (k\rho c_p)^{0.5} \right)$ می‌باشد [۲۱].

Γ ضریب وزن می‌باشد که به خصوصیات مایع و جامد بستگی دارد که توسط استروتوس و همکاران بصورت زیر پیشنهاد شده است [۲۱]:

$$\Gamma = \frac{\gamma_{sol,0} I_0}{\gamma_{liq,0} + \gamma_{sol,0} I_0} \quad (۴-۳)$$

$$I_0 = 0.6272 + 0.13251 x + 0.02009 x^2 - 0.00978x^3 - 0.00167x^4 + 0.00065x^5, \quad (۵-۳)$$

I_0 ضریب اصلاح می‌باشد که به عدد پرانتل مایع بستگی دارد و توسط استروتوس و همکاران [۲۱] بیان شده است. مقدار x همان $\log(Pr)$ می‌باشد و رنج پرانتل از ۰/۰۱ تا ۱۰۰ معتبر می‌باشد [۲۱].

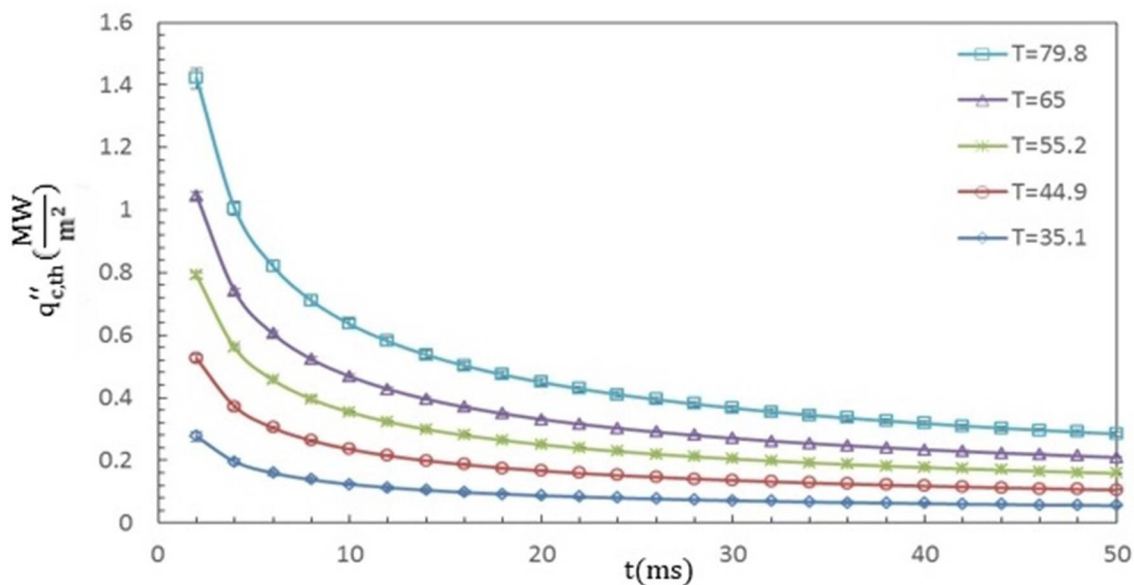
شار حرارتی تئوری در نقطه‌ی برخورد قطره با سطح به شرح زیر می‌باشد [۲۱]: (به پیوست الف مراجعه شود).

$$q''_{c,th}(t) = \frac{\Gamma}{I_0} \gamma_{liq,0} \frac{T_{w0} - T_{dro}}{\sqrt{\pi t}} \quad (۶-۳)$$

۳-۷-۱- شار حرارتی تئوری در نقطه تماس بین مایع و سطح جامد

قطره‌ی آب با قطر ۳/۳۶ میلی‌متر روی سطح مسی با دماهای اولیه ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲، ۶۵ و ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد برخورد می‌کند. شار حرارتی به روش انتقال گرمای هدایت در نقطه برخورد، بین سطح مسی و قطره آب منتقل می‌شود و طبق معادله ۳-۶ محاسبه می‌شود. همانطور که در شکل ۳-۱۱ مشاهده می‌شود، در طول انتقال حرارت بین قطره و سطح جامد، شار حرارتی با زمان کاهش می‌یابد و ماکزیمم مقدار شار حرارتی در مراحل اولیه‌ی برخورد قطره بر روی سطح مسی اتفاق می‌افتد. همچنین هرچه مقدار دمای اولیه سطح افزایش یابد، شار حرارتی نیز افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود شار حرارتی مربوط به برخورد قطره‌ی آب بر روی سطح با دمای ۷۹/۸ درجه سانتی-

گراد بیشتر از حالت‌هایی می‌باشد که دمای سطح ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد است. همچنین میزان کل شار حرارتی جذب شده توسط قطره آب در مدت زمان ۵۰ میلی‌ثانیه که قطره با سطح مسی با دماهای ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲، ۶۵ و ۷۹/۸ درجه سانتی‌گراد برخورد می‌کند در شکل ۳-۱۱ نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن کمترین دمای سطح ۳۵/۱ درجه سانتی‌گراد و بیشترین دمای سطح ۷۹/۸ درجه سانتی‌گراد و مقایسه بیشینه و کمینه مقدار شار حرارتی در این دو حالت مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی مقدار شار حرارتی آنها تفاوت قابل توجهی با هم دارند و این موضوع بیانگر این می‌باشد که در لحظه اولیه برخورد که ماکزیمم مقدار شار حرارتی اتفاق می‌افتد، اختلاف دما بین قطره و سطح بیشتر می‌باشد در حالیکه با گذشت زمان دمای قطره آب و سطح مسی به تعادل دمایی می‌رسند و در نتیجه میزان شار حرارتی با گذشت زمان کمتر می‌شود.



شکل ۳-۱۱: مقادیر شار حرارتی در نقطه برخورد قطره‌ی آب با سطح مسی با دماهای متفاوت ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲، ۶۵ و ۷۹/۸ درجه سانتی‌گراد.

۳-۷-۲- اثر خنک کننده

هنگامی که قطره به سطح برخورد می‌کند، چگونگی خنک شدن سطح با زمان را اثر خنک کننده $\varepsilon(t)$ می‌گویند. علاوه بر این اثر خنک کننده به صورت انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره $Q_{liq,tot}(t)$ تقسیم بر حداکثر انرژی حرارتی که قطره می‌تواند جذب کند $Q_{liq,max}$ بیان می‌شود

[۱۶]:

$$\varepsilon(t) = \frac{Q_{liq,tot}(t)}{Q_{liq,max}} = \frac{\int_0^t \left(\int_0^{A_c} q''_{liq,mean}(t) dA_c \right) dt}{m_{liq} c_{p,liq,0} (T_{w0} - T_{dr0})} \quad (۷-۳)$$

A_c مساحت سطح تماس بین قطره و سطوح جامد می‌باشد، هنگامی که قطره بعد از برخورد روی سطح پخش و جمع می‌شود. $D(t)$ قطر تماس قطره و سطح می‌باشد و از نتایج تجربی مطالعه‌ی حاضر قابل اندازه‌گیری است.

$$A_c = \frac{\pi D(t)^2}{4} \quad (۸-۳)$$

$Q_{liq,tot}(t)$ انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره بصورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_{liq,tot}(t) = \int_0^t \left(\int_0^{A_c} q''_{liq,mean}(t) dA_c \right) dt \quad (۹-۳)$$

m_{liq} جرم قطره‌ی مایع و $c_{p,liq,0}$ گرمای ویژه قطره‌ی مایع در لحظه برخورد به سطح می‌باشند.

$q''_{liq,mean}(t)$ میانگین شار حرارتی جذب شده توسط قطره می‌باشد [۲۱]:

$$q''_{liq,mean}(t) \approx C_q \cdot q''_{c,th}(t) \quad (۱۰-۳)$$

استروتوس و همکاران [۲۱]، در مطالعات خود توزیع شار حرارتی جذب شده توسط قطره در واحد سطح را محاسبه نمودند. طبق محاسبات آنها میزان شار حرارتی در لحظات اولیه‌ی برخورد مقادیر بزرگی را شامل می‌شد و میزان شار حرارتی به لحاظ تئوری و با توجه به معادله‌ی ۳-۶، در لحظات اولیه برخورد قطره با سطح نیز به عدد بزرگی میل کرده بود. همچنین با توجه به معادله ۳-۶، مقدار شار حرارتی تئوری با زمان کاهش یافته بود. در حالیکه آنها مشاهده کردند مقدار شار حرارتی به طور

نظری به طور یکنواختی کاهش نمی‌یابد، که به دلیل نوسانات انجام شده توسط قطره در مراحل پخش و جمع شدن بوده است. در نهایت آنها میزان شار حرارتی واقعی محاسبه شده را بر شار حرارتی تئوری بیان شده در معادله ۳-۶، تقسیم کردند. در نهایت میزان شار حرارتی بی‌بعد بین ۰/۶۸ و ۱/۴۶ را متغییر بوده است. با توجه به نتایج حاصل شده از مشاهدات ذکر شده، در نهایت آنها معادله ۳-۱۰ را بیان نمودند. با توجه به ضریب اصلاح بیان شده در معادله ۳-۱۱، میانگین شار حرارتی جذب شده توسط قطره به مقدار دمای اولیه قطره و دمای اولیه سطح نیز بستگی دارد.

C_q ضریب اصلاح برای شار گرمایی جذب شده توسط قطره می‌باشد. این ضریب به مقدار دمای اولیه قطره و دمای اولیه سطح بستگی دارد، که به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۲۱]:

$$C_q = 1 + 0.2164 \theta_c^{0.7968} \theta_{dr}^{-0.1347} \quad (۱۱-۳)$$

θ_c و θ_{dr} دماهای بی‌بعد قطره می‌باشند که بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\theta_c = \frac{T_{c,th,0} - T_{fr}}{T_b - T_{fr}} \quad (۱۲-۳)$$

$$\theta_{dr} = \frac{T_{dr,0} - T_{fr}}{T_b - T_{fr}} \quad (۱۳-۳)$$

T_b و T_{fr} دمای اشباع و دمای انجماد را نشان می‌دهند. این مقادیر برای قطره آب به ترتیب ۱۰۰ و ۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده‌اند.

اخیرا استروتوس و همکاران [۲۱] اثر خنک سازی را برای سطح صاف بصورت زیر پیشنهاد کردند، در حقیقت معادله ۳-۱۴ با ترکیب معادلات ۳-۷، ۳-۱۰ و سپس انتگرال‌گیری در بازه‌ی مکان و زمان محاسبه می‌گردد:

$$\varepsilon(t) = C_q \frac{6\Gamma\sqrt{\alpha_{liq,0}}}{D_0^3 I_0 \pi \sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{\pi D(t)^2}{4\sqrt{t}} dt \quad (14-3)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (15-3)$$

$\alpha_{liq,0}$ ضریب نفوذ گرمایی را نشان می‌دهد. k رسانایی گرمایی، ρ چگالی و c_p گرمای ویژه می‌باشند. خصوصیات مس بدست آمده توسط اینکروپرا و همکاران [۷۴] در جدول ۱-۳ مشاهده می‌شود. پربرویس و همکاران [۷۵]، ویسکوزیته جنبشی (ϑ)، رسانایی گرمایی (k) و کشش سطحی بین فازهای مایع و گاز (σ_{LV}) مربوط به آب را به عنوان تابعی از دمای قطره مایع در لحظه برخورد قطره به سطح T_{dr} به صورت زیر بیان کردند:

$$\vartheta = -2.61 \cdot 10^{-12} T_{dr}^3 + 5.82 \cdot 10^{-10} T_{dr}^2 - 4.68 \cdot 10^{-8} T_{dr} + 1.74 \cdot 10^{-6} \quad (16-3)$$

$$k = -9.74 \cdot 10^{-6} T_{dr}^2 + 2.12 \cdot 10^{-3} T_{dr} + 0.558 \quad (17-3)$$

$$\sigma_{LV} = 1.68 \cdot 10^{-4} T_{dr} + 7.6 \cdot 10^{-2} \quad (18-3)$$

T_{dr} در واحد سلسیوس بیان می‌شود. خصوصیات آب و مس در جدول ۱-۳ نشان داده می‌شوند.

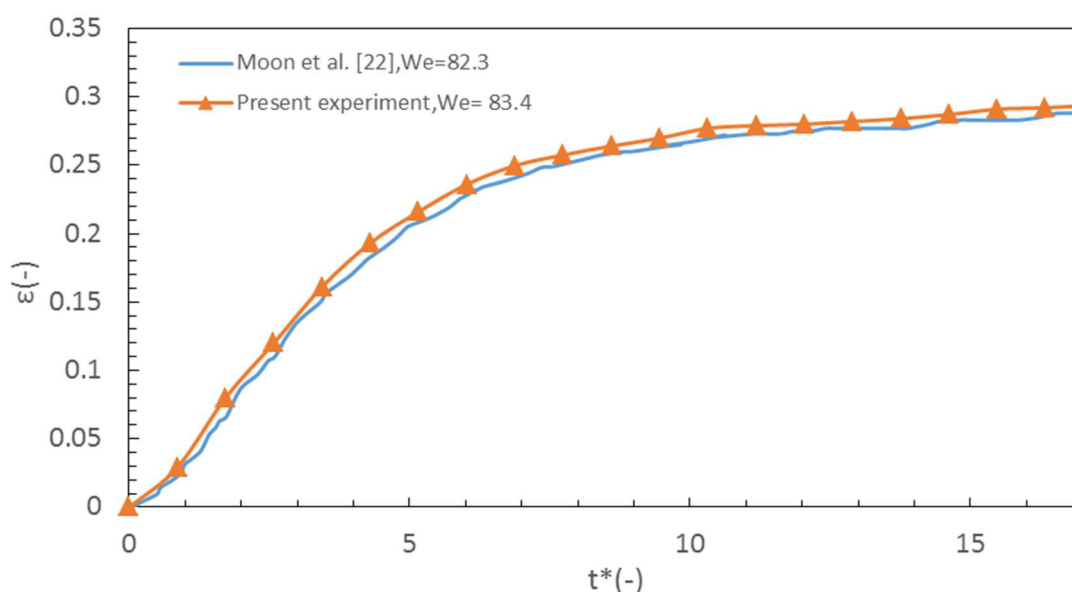
جدول ۳-۱: خصوصیات آب و مس مورد استفاده در شرایط آزمایشگاهی.

Water		Copper		
$T_{dro} = 20^{\circ}\text{C}$	$T_{dro} = 80^{\circ}\text{C}$	$T_{W0} = 20^{\circ}\text{C}$	$T_{W0} = 80^{\circ}\text{C}$	
1	0.384	-	-	$\mu(\text{mPa}\cdot\text{s})$
999	971	8933 (ثابت)	-	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$
0.5965	0.6653	398 (ثابت)	-	$k\left(\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right)$
0.0726	0.0626	-	-	$\sigma_{LV}\left(\frac{\text{N}}{\text{m}}\right)$
4185	4196	389.11 (ثابت)	-	c_p

۳-۸- مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی حاضر با بررسی‌های پیشین

قطره‌ی آب با دمای $24/3$ درجه سانتی‌گراد با قطر $3/36$ میلی‌متر و عدد وبر $83/4$ با سطح مسی به دمای $79/8$ درجه‌ی سانتی‌گراد برخورد می‌کند. در بررسی‌های آزمایشگاهی حاضر با استفاده از پردازش تصویر، قطر تماس قطره‌ی آب با سطح جامد از لحظه شروع مرحله برخورد قطره بر روی سطح تا رسیدن به زمان 50 میلی‌ثانیه محاسبه می‌شود. قطر تماس تا لحظه رسیدن به زمان 50 میلی‌ثانیه متغیر می‌باشد و ما با استفاده از این قطر تماس متغیر و معادله $3-14$ به برآورد اثر خنک‌کننده می‌پردازیم. شکل $3-12$ مقایسه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط مون و همکاران [۲۲]، با نتایج آزمایشگاهی حاضر را نشان می‌دهد. مون و همکاران [۲۲]، عدد وبر $82/3$ و دمای سطح 80 درجه‌ی سانتی‌گراد را برای بررسی‌های خود در نظر گرفتند و میزان اثر خنک‌کننده را مطابق معادله بیان شده در معادله $3-14$ محاسبه نمودند. مقدار $\mathcal{E}(t)$ با گذشت زمان برای هر دو نمودار افزایش می‌یابد. تفاوت ناچیزی که در طول نمودار اثر خنک‌کننده بر حسب زمان بی‌بعد مشاهده می‌شود به

دلیل تفاوت اندکی است که در عدد وبر دو بررسی آزمایشگاهی وجود دارد. همانطور که مشاهده می‌شود نمودار حاصل از نتایج آزمایشگاهی حاضر بسیار شبیه به نتایجی می‌باشد که توسط مون و همکاران [۲۲] محاسبه شده است. بنابراین نتایج آزمایشگاهی حاضر جواب مطلوبی از رفتار برخورد قطره به سطح و برآورد اثر خنک کننده را به ما می‌دهند.

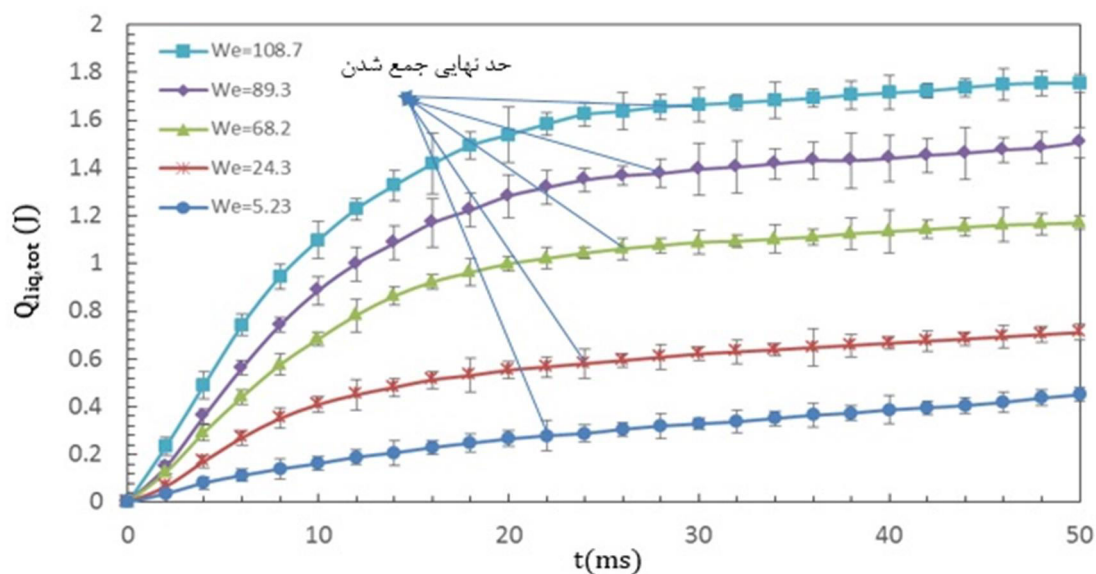


شکل ۳-۱۲: مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاضر با بررسی های پیشین برای مقادیر اثر خنک کننده ی برخورد قطره ی آب با سطح مسی با دمای ۷۹/۸ درجه ی سانتی گراد.

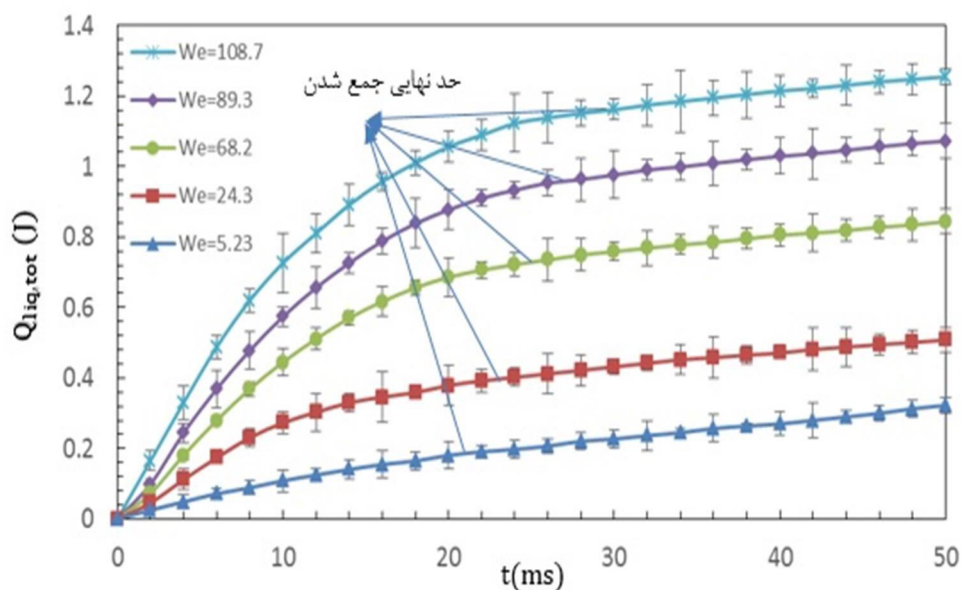
۳-۹- بررسی انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره ی آب بعد از برخورد بر روی سطح

هنگامی که قطره ی آب با دمای ۲۴/۳ درجه سانتی گراد و به قطر ۳/۳۶ میلی متر و اعداد وبر ۵/۲۳، ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ با سطح مسی با دماهای ۶۵ و ۷۹/۸ درجه ی سانتی گراد برخورد می کند، مقداری از انرژی حرارتی از سطح مسی به قطره ی آب منتقل می شود. میزان انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره ی آب طبق معادله ۳-۹ بیان می گردد. شکل های ۳-۱۳ و ۳-۱۴ مقادیر انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره را در طول مدت زمان ۵۰ میلی ثانیه را نشان می دهند. طبق شکل ۳-۱۱ میزان شارحرارتی قطره در زمان های پخش و جمع شدن بیشتر از زمان های دیگر می باشد. در

زمان‌های پخش و جمع شدن قطره که طبق شکل‌های ۳-۱۳ و ۳-۱۴ به ترتیب برای دماهای سطح ۷۹/۸ و ۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد برای نمودارها با اعداد وبر ۵/۲۳، ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ از صفر میلی‌ثانیه شروع می‌شود و تا ۲۹ میلی‌ثانیه ادامه می‌یابد، افزایش قابل ملاحظه‌ای در انرژی حرارتی کل مشاهده می‌گردد که به دلیل شار حرارتی و مساحت تماس بیشتر در این بازه زمانی می‌باشد. همچنین انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره بعد از رسیدن به ماکزیمم جمع شدن، افزایش قابل توجهی نخواهد داشت. زیرا طبق شکل ۳-۱۱ شار حرارتی بین مایع و سطح جامد به سرعت با زمان کاهش می‌یابد و بعد از زمان ماکزیمم جمع شدن مقادیر کمی را دارا می‌باشد. همچنین طبق معادله ۳-۹ انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره به مساحت سطح تماس قطره و سطح برخورد بستگی دارد و از آنجایی که مساحت سطح تماس نیز به قطر تماس بین مایع و سطح مسی بستگی دارد، با توجه به شکل‌های ۳-۴ و ۳-۵ که به ترتیب قطر تماس بی‌بعد برحسب زمان را برای دماهای ثابت ۷۹/۸ و ۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد در وبرهای مختلف نشان می‌دهند، قطر تماس بی‌بعد بعد از رسیدن به ماکزیمم جمع شدن برای وبرهای مختلف تقریباً مشابه می‌باشند. همچنین ماکزیمم قطر جمع شدن برای اعداد وبر ۵/۲۳، ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ در دمای ۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد در محدوده‌ی بین ۱/۱۸ و ۱/۴۷ است. همچنین برای دمای ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد و برای اعداد وبر ذکر شده، ماکزیمم قطر جمع شدن بین ۱/۰۵ و ۱/۲۹ است. همانطور که مشاهده می‌شود برای دو حالت نامبرده تغییر قابل توجهی در ماکزیمم قطر جمع شدن مشاهده نمی‌گردد. به همین دلیل انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره نیز بعد از ماکزیمم جمع شدن تغییر قابل توجهی نخواهد داشت.



شکل ۳-۱۳: مقادیر انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره آب در هنگام برخورد روی سطح مسی با دمای ۷۹/۸ درجه سانتی‌گراد و اعداد وبر مختلف.

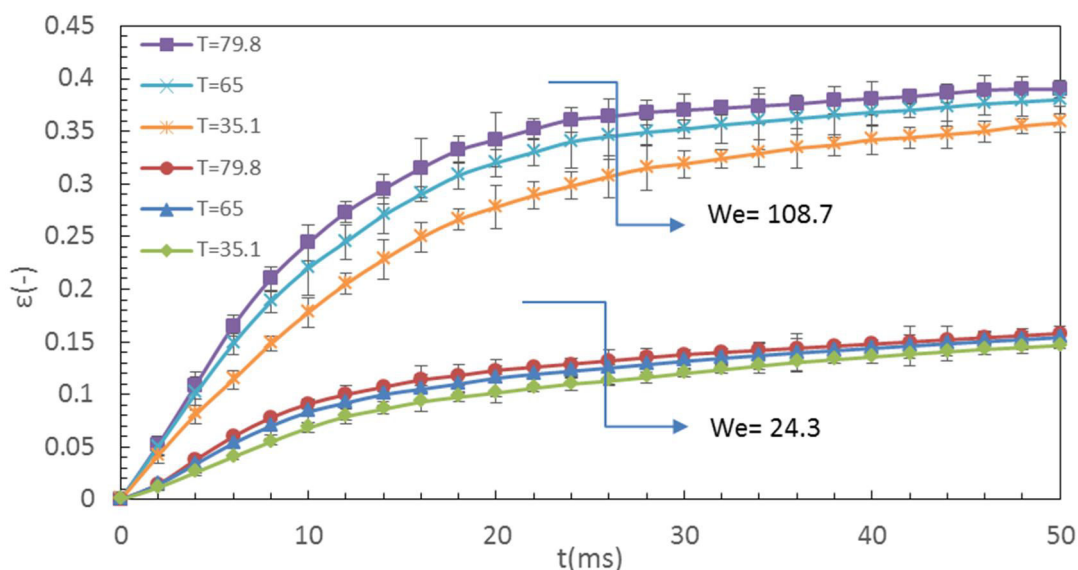


شکل ۳-۱۴: مقادیر انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره آب در هنگام برخورد روی سطح مسی با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و اعداد وبر مختلف.

۳-۱۰- بررسی نتایج آزمایشگاهی اثر خنک‌کننده

قطره‌ی آب با دمای ۲۴/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد در اعداد وبر ثابت ۲۴/۳ و ۱۰۸/۷ بر روی سطح مسی با دماهای مختلف ۳۵/۱، ۶۵ و ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد برخورد می‌کند. شکل ۳-۱۵ اثر خنک‌کننده را بر حسب زمان برای این دو حالت نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳-۱۵ مشاهده می‌شود

میزان اثر خنک کننده تا قبل از رسیدن به زمان ماکزیمم پخش شوندگی برای دماهای متفاوت تفاوت چندانی باهم ندارند اما در لحظه‌ی رسیدن به ماکزیمم پخش شوندگی میزان اثر خنک کننده در یک عدد و بر ثابت و دماهای متفاوت اندکی متفاوت می‌باشد. هر چه مقدار دما در این حالت افزایش یابد اثر خنک کننده‌ی مربوطه نیز اندکی بیشتر خواهد بود. زمانی که قطره وارد مرحله‌ی جمع شدن می‌شود مطابق شکل ۳-۱۵ تفاوت بین نمودارهای اثر خنک کننده با دماهای مختلف بیشتر خواهد شد. برای مثال مطابق شکل ۳-۱۵ در عدد و بر ثابت $24/3$ میزان اثر خنک کننده برای دماهای سطح $35/1$ ، 65 و $79/8$ در لحظه‌ی رسیدن به ماکزیمم پخش شوندگی به ترتیب $0/0408$ ، $0/0536$ و $0/06$ می‌باشند. در حالیکه میزان اثر خنک کننده در لحظه‌ی رسیدن به ماکزیمم جمع شدن به ترتیب برای دماهای نامبرده $0/0975$ ، $0/1192$ و $0/129$ می‌باشند. همچنین مطابق شکل ۳-۱۵ در عدد و بر ثابت $108/7$ میزان اثر خنک کننده برای دماهای سطح $35/1$ ، 65 و $79/8$ درجه‌ی سانتی-گراد در لحظه‌ی رسیدن به ماکزیمم پخش شوندگی به ترتیب $0/114$ ، $0/148$ و $0/165$ می‌باشند. در حالیکه میزان اثر خنک کننده در لحظه‌ی رسیدن به ماکزیمم جمع شدن برای دماهای ذکر شده به ترتیب $0/298$ ، $0/349$ و $0/37$ می‌باشند. زیرا طبق معادله‌ی ۳-۱۴ اثر خنک کننده به قطر تماس بین سطح مسی و قطره‌ی آب بستگی دارد. با در نظر گیری این موضوع و با توجه به نتایج شکل‌های ۳-۸ و ۳-۹ که به ترتیب میزان پخش شوندگی قطره‌ی آب روی سطح مسی را بر حسب زمان در دماهای متفاوت نشان می‌دهند، مشاهده می‌شود قطرهای تماس بی‌بعد تا قبل از رسیدن به ماکزیمم پخش شدن تفاوت چندانی باهم ندارند اما در لحظه‌ی رسیدن به ماکزیمم پخش شدن تفاوت اندکی مشاهده می‌شود که هرچه مقدار دمای سطح بیشتر باشد میزان پخش شوندگی در لحظه‌ی رسیدن به ماکزیمم پخش شوندگی بیشتر خواهد بود. هنگامی که قطره وارد مرحله‌ی جمع شدن می‌شود، تفاوت بین قطرهای تماس بی‌بعد برای نمودارهای با دماهای متفاوت قابل توجه می‌باشد. همچنین هر چه مقدار اختلاف دماها بیشتر باشد اختلاف بین این نمودارها در مرحله‌ی جمع شدن نیز بیشتر مشاهده می‌گردد.



شکل ۳-۱۵: مقادیر اثر خنک کننده برای برخورد قطره‌ی آب با سطح مسی با اعداد وبر ثابت ۲۴/۳، ۱۰۸/۷ و دماهای مختلف سطح.

۳-۱۱- بررسی اثرات حرارتی برخورد قطره‌ی آب با سطح مسی گرم

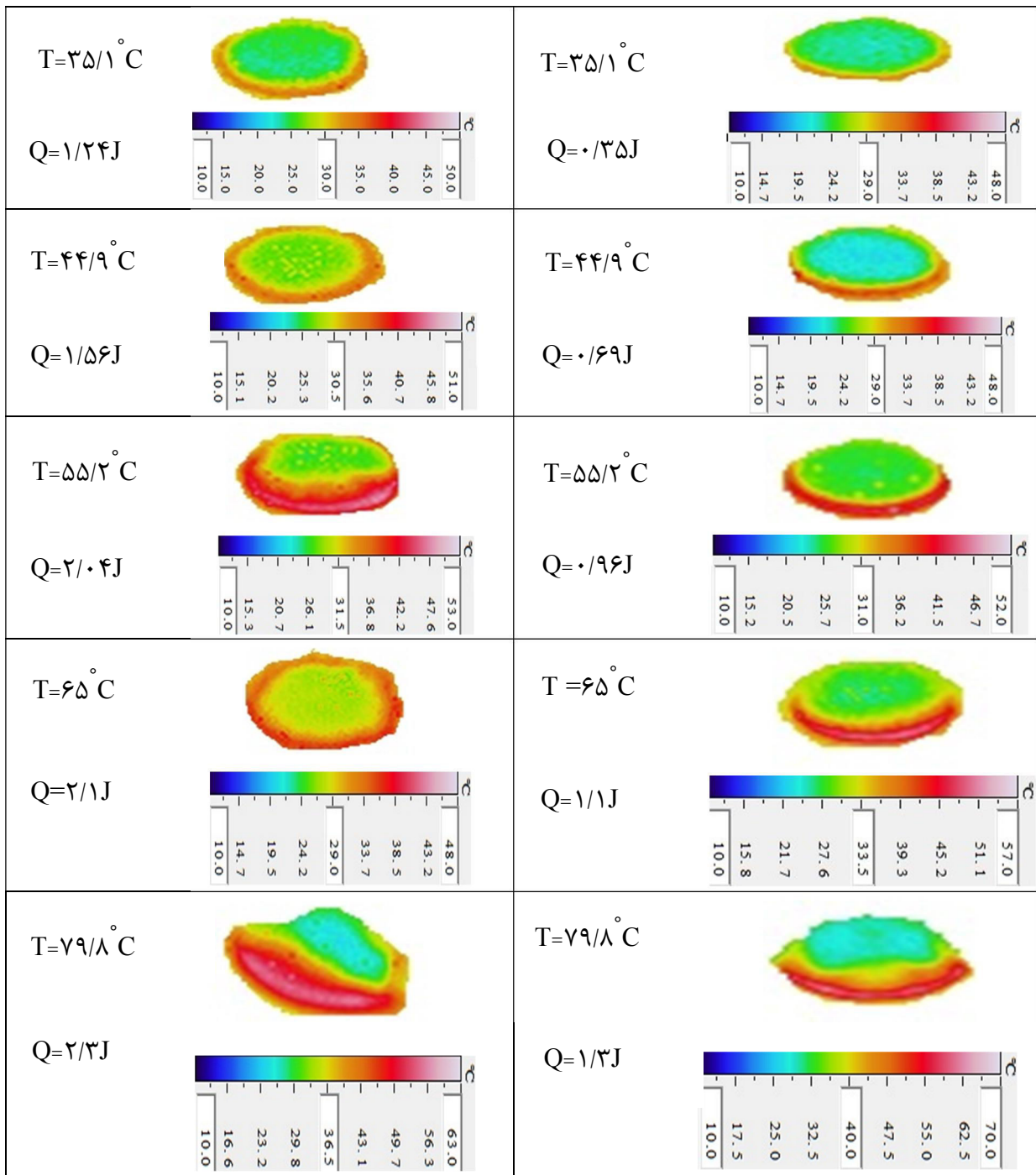
قطره‌ی آب با دمای ۲۴/۳ درجه‌ی سانتی‌گراد، قطر اولیه‌ی ۳/۳۶ میلی‌متر به سطح مسی با دماهای مختلف برخورد می‌کند. شکل‌های ۱۶-۳ (الف)، ۱۶-۳ (ب)، ۱۷-۳ (الف) و ۱۷-۳ (ب) تصاویر حرارتی ثبت شده از فرایند برخورد قطره‌ی آب با سطح مسی به ترتیب با اعداد وبر ۲۴/۳، ۶۸/۲، ۸۹/۳ و ۱۰۸/۷ را نشان می‌دهند. این تصاویر در زمان حدود ۱۲۵ میلی‌ثانیه سپری شده از لحظه‌ی برخورد قطره‌ی آب روی سطح مسی با دماهای مختلف ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲، ۶۵ و ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، در یک عدد وبر ثابت هر چه میزان دمای سطح بیشتر شود با توجه به بیشتر شدن گرمای جذب شده توسط قطره از سطح مسی، میزان مساحت نواحی از قطره که دارای دمای بیشتری می‌باشد افزایش می‌یابد. این امر نشان دهنده‌ی افزایش دمای قطره‌ی آب می‌باشد. همچنین نواحی از قطره‌ی آب با بیشترین دما بصورت نوارهای قرمز رنگی روی شکل‌ها مشاهده می‌گردد، که در دماهای بالای سطح مسی این نوارهای قرمز رنگ بیشتر مشاهده می‌شوند. با توجه به شکل‌های ۱۶-۳ (الف)، ۱۶-۳ (ب)، ۱۷-۳ (الف) و ۱۷-۳ (ب)

میزان گرمای جذب شده توسط قطره از سطح مسی برای تصاویر حرارتی ثبت شده برای شکل ۳-۱۶ (الف) با عدد وبر ۲۴/۳ و دماهای سطح ۳۵/۱، ۴۴/۹، ۵۵/۲، ۶۵ و ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد به ترتیب ۰/۳۵، ۰/۶۹، ۰/۹۶، ۱/۱ و ۱/۳ ژول، شکل ۳-۱۶ (ب) با عدد وبر ۶۸/۲ و دماهای ذکر شده به ترتیب ۱/۲۴، ۱/۵۶، ۲/۰۴، ۲/۱ و ۲/۳ ژول، شکل ۳-۱۷ (الف) با عدد وبر ۸۹/۳ و دماهای ذکر شده به ترتیب ۱/۷۴، ۲/۰۳، ۲/۳۶، ۲/۵۸ و ۳/۰۱ ژول و برای شکل ۳-۱۷ (ب) با عدد وبر ۱۰۸/۷ و دماهای ذکر شده به ترتیب ۲/۲۶، ۲/۵۵، ۲/۸۴، ۳/۱۵ و ۳/۶۵ ژول می‌باشند. همچنین با در نظر گیری یک دمای ثابت برای سطح مسی و اعداد وبر مختلف مشاهده می‌شود هر چه میزان اعداد وبر افزایش یابد میزان گرمای جذب شده توسط قطره از سطح مسی نیز افزایش می‌یابد. این امر بیانگر این موضوع می‌باشد که با افزایش سرعت برخورد قطره هنگامی که قطره روی سطح مسی با دمای ثابت برخورد می‌کند میزان گرمای جذب شده توسط قطره از سطح افزایش می‌یابد. همچنین اگر بصورت شعاعی از مرکز قطره به سمت لبه‌های قطره حرکت کنیم، قطره شامل نوارهای رنگی با دماهای متفاوتی می‌باشد و مشاهده می‌کنیم که نوارهای رنگی با بیشترین دما در لبه‌های قطره مشاهده می‌شوند و نواحی مربوط به مرکز قطره و اطراف آن دارای دماهای کمتری می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت میزان شار حرارتی و گرمای جذب شده توسط قطره از سطح مسی در لبه‌های قطره بیشتر می‌باشد. همچنین بیشترین شار حرارتی و گرمای جذب شده در مرز مایع و جامد اتفاق می‌افتد. با توجه به شکل‌های ۳-۱۳ و ۳-۱۴، میزان انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره طی مدت زمان ۵۰ میلی-ثانیه با در نظرگیری عدد وبر ثابت ۱۰۸/۷، دماهای سطح ۶۵ و ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد، به ترتیب ۱/۲۵ و ۱/۷۳ ژول می‌باشند. همچنین میزان انرژی حرارتی کل جذب شده توسط قطره در مدت زمان ۱۲۵ میلی‌ثانیه با در نظرگیری عدد وبر ثابت ۱۰۸/۷، دماهای سطح ۶۵ و ۷۹/۸ درجه‌ی سانتی‌گراد، به ترتیب ۳/۱۵ و ۳/۶۵ ژول می‌باشند. که این مقادیر طی مدت زمان ۱۲۵ میلی‌ثانیه با داشتن میزان جرم قطره، گرمای ویژه‌ی قطره، دمای قطره قبل و پس از برخورد با سطح که با استفاده از دوربین حرارتی بدست آمده است، محاسبه شدند. با مقایسه‌ی مقادیر انرژی حرارتی کل محاسبه شده به

کمک دوربین حرارتی و مقادیر بدست آمده از شکل‌های ۱۳-۳ و ۱۴-۳ مطابقت مطلوبی بین نتایج مشاهده می‌شود.

ب: $We = 68/2$

الف: $We = 24/3$

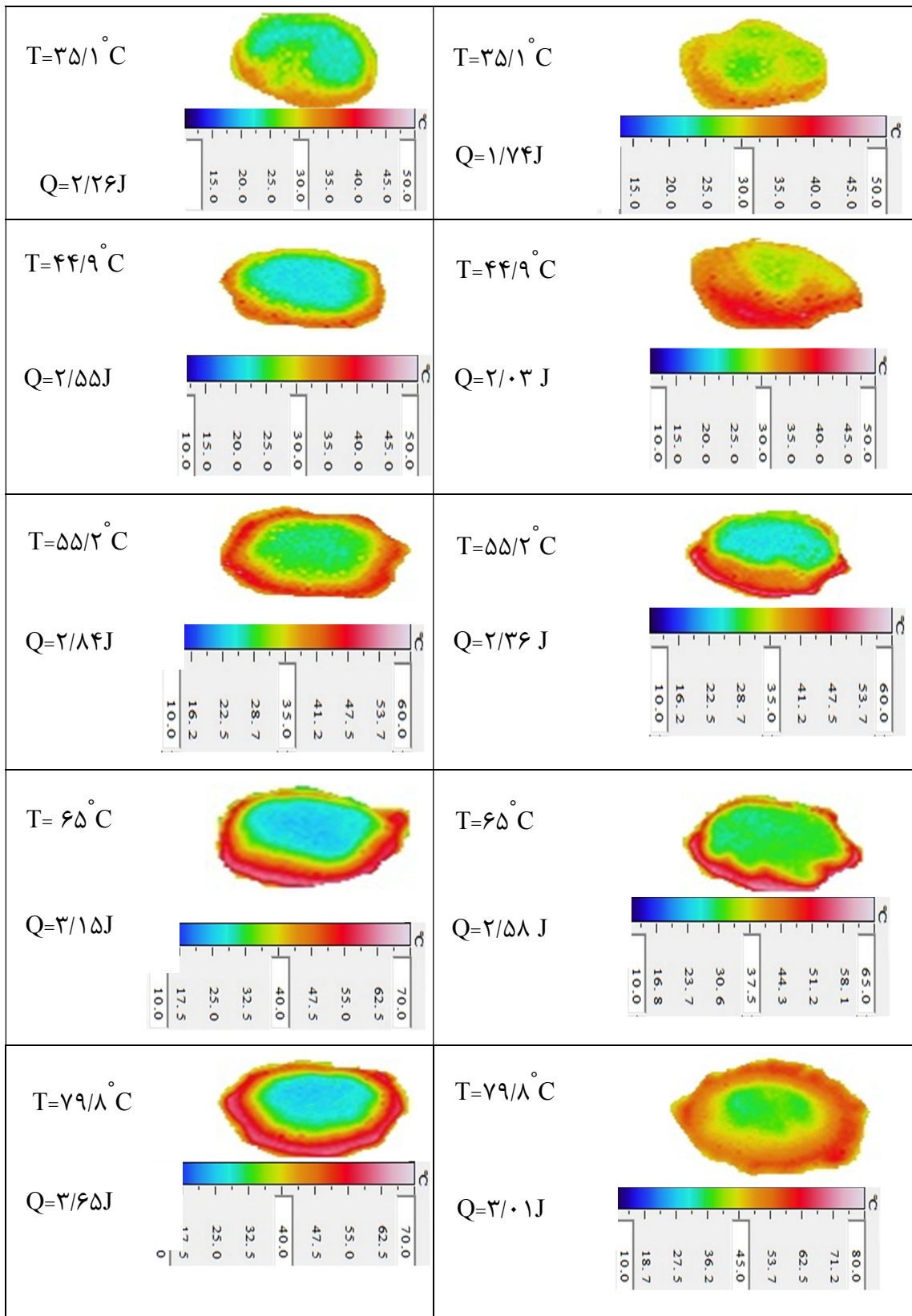


شکل ۳-۱۶: تصاویر حرارتی ثبت شده از برخورد قطره آب با سطح مسی در اعداد وبر $68/2$ ، $24/3$ ، زمان 125 میلی-

ثانیه و دماهای مختلف سطح.

الف: $We = 89/3$

ب: $We = 108/7$



شکل ۳-۱۷: تصاویر حرارتی برخورد قطره‌ی آب با سطح در اعداد وبر $89/3$ ، $108/7$ ، زمان 125 میلی ثانیه.

۳-۱۲- تکرار کردن آزمایشات انجام شده به منظور دستیابی به نتایج صحیح تر

از آنجایی که در بررسی های آزمایشگاهی امکان خطا و اشتباه در حین آزمایش وجود دارد و یا اینکه شرایط مطلوب در تمام زمان ها ایجاد نمی گردد به منظور دستیابی به نتایج صحیح تر سعی نموده ایم هر تست مشخص را حداقل سه مرتبه تکرار کرده و در نهایت نتایج مورد نظر از تمامی مراحل را استخراج نموده، و با میانگین گیری نتایج استخراج شده و با داشتن میزان انحراف مقادیر در مراحل انجام شده نسبت به هم، در نهایت نمودار مورد نظر خود را رسم نموده ایم. میزان انحراف بوسیله نشانه های انحراف در تمامی نقاط نمودارهای رسم شده مشاهده می گردد. نقاطی که میزان انحراف آنها صفر بوده نشان دهنده ی برابری مقادیر بدست آمده در تمامی مراحل برای آن نقطه مورد نظر بوده است. در پایان مشاهده نموده ایم با تکرار آزمایشات علاوه بر دستیابی به نتایج مطلوب، می توان به خطاهای آزمایش در هر مرحله پی برد و در آزمایشات پیش رو این خطاها را به حداقل رساند.

فصل چهارم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در بررسی آزمایشگاهی حاضر، برخورد قطره‌ی آب بر روی سطح مسی با دماهای مختلف را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌ایم. همچنین برای تاثیر پارامتر سرعت بر روی فرایند پخش و جمع شدن قطره بر روی سطح، از عدد بی بعد ویر استفاده نموده‌ایم. در پایان با تحلیل داده‌های بدست آمده از آزمایشات مکرر به نتایج زیر دست یافته‌ایم:

- ۱) مشاهده می‌شود قطره‌های تماسی بی بعد در یک دمای ثابت برای سطح، با افزایش عدد ویر افزایش می‌یابند، در حالیکه زمان رسیدن به ماکزیمم پخش شوندگی با افزایش عدد ویر، کاهش می‌یابد.
- ۲) در عدد ویر ثابت با افزایش دما، ماکزیمم قطر پخش شدن اندکی افزایش می‌یابد، در حالیکه ماکزیمم قطر جمع شدن به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش ویسکوزیته لایه نازک مایع روی سطح گرم می‌باشد.
- ۳) در یک عدد ویر ثابت هر چه میزان دمای سطح مسی افزایش یابد، ماکزیمم ارتفاع بی بعد قطره که در لحظه ماکزیمم قطر جمع شدن قطره اتفاق می‌افتد افزایش می‌یابد.
- ۴) هنگامی که قطره‌ی آب با سطح مسی گرم برخورد می‌کند، ماکزیمم مقدار شار حرارتی در لحظات اولیه‌ی برخورد صورت می‌گیرد و با گذشت زمان از مقدار شار حرارتی کاسته خواهد شد. همچنین با افزایش دمای اولیه‌ی سطح، مقدار شار حرارتی نیز افزایش می‌یابد.
- ۵) میزان شار حرارتی و گرمای جذب شده توسط قطره از سطح مسی در لبه‌های قطره بیشتر می‌باشد. همچنین بیشترین شار حرارتی و گرمای جذب شده در مرز مایع و جامد اتفاق می‌افتد.

۶-۲- پیشنهادات

- ۱) استفاده از سطح شیب‌دار به منظور سطح برخورد
- ۲) استفاده از سیالات نیوتنی به غیر از آب به عنوان سیال برخورد کننده با سطح
- ۳) استفاده از سیالات غیر نیوتنی به عنوان سیال برخورد کننده با سطح
- ۴) استفاده از سطوح آب گریز و آب دوست به عنوان سطح برخورد
- ۵) استفاده از دوربین حرارتی فریم بالا و هماهنگ با دوربین پرسرعت به منظور ثبت تصاویر حرارتی قطره در کنار تصاویر ثبت شده با دوربین پر سرعت، به منظور تحلیل حرارتی و دمایی قطره در حین برخورد با سطح گرم
- ۶) بررسی سقوط دو قطره بر روی سطح و برخورد با یکدیگر
- ۷) در نظر گیری دمای سطح، بالای دمای اشباع

پیوست‌ها

پیوست الف-۱- جسم نیم نامتناهی

یکی از شکل‌های هندسی ساده‌ی دیگر، که برای آن حل‌های تحلیلی وجود دارد، جسم نیم-نامتناهی است. این جسم در دو امتداد تا بی‌نهایت امتداد دارد. بنابراین، برای نمایش آن، از یک سطح مستوی استفاده می‌شود. اگر شرایط این سطح ناگهان تغییر کند، رسانش گذرای یک بعدی در آن روی می‌دهد. برای تعیین توزیع دما در نزدیک سطح زمین یا در تیغه‌های ضخیم، (فرض جسم نیم‌نامتناهی برای تیغه‌های ضخیم یک فرض منطقی است، زیرا در مرحله‌ی گذرای اولیه نقاطی از تیغه که در فاصله‌ی دور از سطح تیغه قرار دارند تحت تاثیر تغییر شرایط سطح تیغه قرار نمی‌گیرند). از جسم ایده‌آل نیم نامتناهی می‌توان استفاده کرد.

برای تحلیل رسانش گذرا در جسم نیم‌نامتناهی، از معادله‌ی $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$ استفاده می‌شود. شرط مرزی چنین است:

$$T(x \rightarrow \infty, t) = T_i \quad (\text{الف-۱})$$

شرط اولیه نیز با معادله‌ی $T(x, 0) = T_i$ بیان می‌شود. برای سه حالت، حل‌های تحلیلی وجود دارد. این حالت‌ها عبارتند از: دمای ثابت در سطح، شار گرمای ثابت در سطح و انتقال گرمای جابه‌جایی در سطح.

برای حالت (۱)، متغیر تشابه $\eta \equiv \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}$ را نظر می‌گیریم و می‌نویسیم:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{\sqrt{4\alpha t}} \frac{\partial T}{\partial \eta} \quad (\text{الف-۲})$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{d}{d\eta} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right] \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{4\alpha t} \frac{d^2 T}{d\eta^2} \quad (\text{الف-۳})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{x}{2t(4\alpha t)^{\frac{1}{2}}} \frac{\partial T}{\partial \eta} \quad (\text{الف-۴})$$

از جایگذاری $\frac{\partial T}{\partial t}$ و $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ در معادله $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$ معادله‌ی گرما به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{d^2 T}{d\eta^2} = -2\eta \frac{\partial T}{\partial \eta} \quad (\text{الف-۵})$$

برای $x = 0$ ، متناظر با $\eta = 0$ ، شرط مرزی در سطح چنین است:

$$T(\eta = 0) = T_s \quad (\text{الف-۶})$$

برای $x \rightarrow \infty$ ، متناظر با $\eta \rightarrow \infty$ ، شرط مرزی داخلی چنین است:

$$T(\eta \rightarrow \infty) = T_i \quad (\text{الف-۷})$$

رابطه‌ی الف-۷، شرط اولیه را نیز نشان می‌دهد. (شرط اولیه مربوط به لحظه‌ی $t = 0$ است.

$t = 0$ نیز متناظر با $\eta \rightarrow \infty$ است).

ملاحظه می‌شود که معادله‌ی گرمای تبدیل‌یافته و همچنین شرایط اولیه و مرزی به x و t بستگی

ندارند. برای تعیین تابع $T(\eta)$ ، معادله‌ی الف-۵ را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\frac{d\left(\frac{dT}{d\eta}\right)}{\left(\frac{dT}{d\eta}\right)} = -2\eta d\eta \quad (\text{الف-۸})$$

از این رابطه انتگرال می‌گیریم. نتیجه می‌شود:

$$\ln\left(\frac{dT}{d\eta}\right) = -\eta^2 + C'_1 \Rightarrow \frac{dT}{d\eta} = C_1 + \exp(-\eta^2) \quad (\text{الف-۹})$$

با انتگرال گیری مجدد، نتیجه می شود:

$$T = C_1 \int_0^\eta \exp(-u^2) du + C_2 \quad (\text{الف-۱۰})$$

در این رابطه، u یک متغیر ساختگی است. با اعمال شرط مرزی در معادله ی الف-۶، نتیجه می شود:

$$C_2 = T_s$$

بنابراین:

$$T = C_1 \int_0^\eta \exp(-u^2) du + T_s \quad (\text{الف-۱۱})$$

با توجه به معادله ی الف-۷:

$$T_i = C_1 \int_0^\infty \exp(-u^2) du + T_s \quad (\text{الف-۱۲})$$

پس از محاسبه ی این انتگرال نتیجه می شود:

$$C_1 = \frac{2(T_i - T_s)}{\pi^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{الف-۱۳})$$

بنابراین، توزیع دما چنین است:

$$\frac{T - T_s}{T_i - T_s} = \left(\frac{2}{\pi^{\frac{1}{2}}}\right) \int_0^\eta \exp(-u^2) du \equiv \text{erf} \eta \quad (\text{الف-۱۴})$$

در رابطه ی بالا، $\text{erf} \eta$ تابع خطای گاوسی است. وقتی $\eta \rightarrow \infty$ ، تابع خطا به سمت ۱ میل می کند.

بنابراین، در لحظه ی $t \neq 0$ ، دما در تمام نقطه جسم با دمای اولیه ی T_i تفاوت دارد و تدریجاً به T_s

نزدیک می شود. از نظر فیزیکی سرعت انتشار تغییرات دما، در جسم نیم نامتناهی نمی تواند بی نهایت

باشد. اما، این موضوع در قانون فوریه اهمیت ندارد، مگر برای مقیاس های بسیار کوچک زمانی. با

کاربرد قانون فوریه در $x = 0$ ، شار گرما در سطح بدست می آید:

$$q_s'' = -k \frac{\delta T}{\delta x} \Big|_{x=0} = -k(T_i - T_s) \frac{d(\operatorname{erf} \eta)}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \Big|_{\eta=0} \quad (\text{الف-۱۵})$$

$$= -k(T_s - T_i) \left(\frac{2}{\pi}\right) \exp(-\eta^2) (4\alpha t)^{-\frac{1}{2}} \Big|_{\eta=0} \quad (\text{الف-۱۶})$$

$$q_s'' = \frac{k(T_s - T_i)}{(\pi\alpha t)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{الف-۱۷})$$

نتایج در نظرگیری سه حالت مختلف برای سطح در زیر خلاصه شده است:

حالت (۱). دمای ثابت در سطح $T(0, t) = T_s$ ، در این حالت:

$$\frac{T(x, t) - T_s}{T_i - T_s} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (\text{الف-۱۸})$$

$$q_s''(t) = \frac{k(T_s - T_i)}{\sqrt{\pi\alpha t}} \quad (\text{الف-۱۹})$$

حالت (۲). شار گرمای ثابت در سطح $q_s'' = q_o''$ ، در این حالت:

$$T(x, t) - T_i = \frac{2q_o'' \left(\frac{\alpha t}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{k} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_o'' x}{k} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (\text{الف-۲۰})$$

حالت (۳). جابه‌جایی در سطح $-k \frac{\delta T}{\delta x} \Big|_{x=0} = h[T_\infty - T(0, t)]$ ، در این حالت:

$$\frac{T(x, t) - T_i}{T_\infty - T_i} = -\left[\exp\left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2\alpha t}{k^2}\right)\right] \operatorname{erfc}\left(\frac{h\sqrt{\alpha t}}{k}\right) \quad (\text{الف-۲۱})$$

در این رابطه، erfc تابع خطای متمم است. برای تابع دلخواه ω :

$$\operatorname{erfc} \omega = 1 - \operatorname{erf} \omega \quad (\text{الف-۲۲})$$

با تغییر ناگهانی دمای سطح (حالت ۱)، دمای نقاط داخل جسم تدریجاً به دمای سطح (T_s) نزدیک می‌شود، اما شیب دما در سطح و شار گرما در سطح بر حسب $t^{-0.5}$ کاهش می‌یابند. در حالت ۲ (شار گرمای ثابت در سطح)، طبق معادله‌ی الف-۲۰، دما در سطح بر حسب $t^{0.5}$ به‌طور یکنواخت افزایش می‌یابد. در حالت ۳ (جابجایی در سطح)، دما در سطح و در داخل جسم تدریجاً به دمای سیال (T_∞) نزدیک می‌شود. با نزدیک شدن T_s به T_∞ ، شار گرما در سطح $q_s''(t) = h[T_\infty - T_s(t)]$ کاهش می‌یابد.

هنگامی که دو جسم نیم‌نامتناهی با دماهای اولیه‌ی یکنواخت $T_{A,i}$ و $T_{B,i}$ ، از طرف سطوح آزاد خود تماس می‌گیرند. اگر مقاومت تماسی ناچیز باشد، هر دو سطح در لحظه‌ی تماس به دمای یکسان T_s می‌رسند ($T_{B,i} < T_s < T_{A,i}$). چون T_s با گذشت زمان تغییر نمی‌کند، تغییرات دما و شار گرما در سطح هر یک از اجسام به ترتیب، با معادله‌ی الف-۱۸ و الف-۱۹ بیان می‌شود.

برای تعیین دمای تعادل سطح تماس، موازنه‌ی انرژی در سطح را می‌نویسیم:

$$q_{s,A}'' = q_{s,B}'' \quad (\text{الف-۲۳})$$

جمله‌های $q_{s,B}''$ و $q_{s,A}''$ را از معادله‌ی الف-۱۹ محاسبه می‌کنیم و در رابطه‌ی بالا قرار می‌دهیم. با توجه به اینکه مختصه‌ی x برای $q_{s,A}''$ دارای علامت منفی است، نتیجه می‌شود:

$$\frac{-k_A(T_s - T_{A,i})}{(\pi\alpha_A t)^{\frac{1}{2}}} = \frac{k_B(T_s - T_{B,i})}{(\pi\alpha_B t)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{الف-۲۴})$$

$$T_s = \frac{(k\rho c)_A^{\frac{1}{2}} T_{A,i} + (k\rho c)_B^{\frac{1}{2}} T_{B,i}}{(k\rho c)_A^{\frac{1}{2}} + (k\rho c)_B^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{الف-۲۵})$$

در نتیجه:

اکنون اتحاد $m \equiv (k\rho c \frac{1}{2})$ را در نظر می‌گیریم. برای $m_A > m_B$ ، دمای T_S به $T_{A,i}$ نزدیک‌تر است. اگر $m_B > m_A$ ، دمای T_S به $T_{B,i}$ نزدیک‌تر خواهد بود.

پیوست ب-۱- روش‌های آماری

ب-۱-۱- تعاریف

- (۱) خطا^۱: تفاضل بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی یک کمیت.
- (۲) عدم قطعیت^۲: عدم قطعیت یعنی تخمین احتمالی خطا (از آنجایی که همواره مقدار دقیق خطا را نداریم خطا را با عدم قطعیت گزارش می‌دهیم).
- (۳) دقت^۳: درجه نزدیکی مقدار محاسبه شده از کمیت، به مقدار واقعی.
- (۴) صحت^۴: درجه نزدیکی داده‌ها در تکرارهای متوالی با شرایط یکسان.

ب-۱-۲- انواع خطاهای تجربی و منابع آن‌ها

ب-۱-۲-۱- خطای تصادفی^۵

از جمله عواملی که سبب بروز خطای تصادفی می‌شوند عبارتند از:

- (۱) نوسانات غیر قابل تشخیص در شرایط محیطی (مانند دما).
- (۲) عدم تنظیم اتصالات، سایش در اجزا.
- (۳) خطای خواندن.

¹ Error

² Uncertainty

³ Accuracy

⁴ Precision

⁵ Random Error

۴) تغییرات کوچک در موقعیت دستگاه اندازه‌گیری.

ب-۱-۲-۲- خطای سیستماتیک^۱

اندازه‌گیری که فاقد خطای سیستماتیک باشد، اندازه‌گیری معتبر نامیده می‌شود. از جمله عواملی که سبب بروز خطای سیستماتیک می‌شوند عبارتند از:

۱) کالیبره نبودن دستگاه اندازه‌گیری.

ب-۱-۳- سنجش خطا برای انواع ابزارهای اندازه‌گیری

۱. خطای اندازه‌گیری توسط وسیله‌های درجه‌بندی شده، نصف کمینه تقسیم‌بندی مقیاس آن وسیله است.

۲. خطای اندازه‌گیری توسط وسیله‌های رقمی (دیجیتال)، یک واحد از آخرین رقمی است که می‌خوانند.

ب-۱-۴- عدم قطعیت

عدم قطعیت یعنی تخمین احتمالی خطا (از آنجایی که همواره مقدار دقیق خطا را نداریم خطا را با عدم قطعیت گزارش می‌دهیم). عدم قطعیت نمود کمی کیفیت نتیجه اندازه‌گیری است. یعنی تا چه حد اندازه‌گیری، نشان دهنده‌ی مقدار واقعی مورد اندازه‌گیری شده است.

ب-۱-۴-۱- اندازه‌گیری عدم قطعیت

میانگین حسابی یا متوسط، نوعی سنجش گرایش به مرکز است و عبارت است از مجموع مقادیر موجود در مجموعه داده‌ها تقسیم بر تعداد آن‌ها. برای محاسبه میانگین حسابی از رابطه‌ی ب-۱-

^۱ Systematic error

استفاده می‌شود:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{ب-۱})$$

که در آن x_i مقدار داده‌ها و n تعداد تکرار یک آزمایش است.

در آمار، انحراف معیار^۱ یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌های نزدیک به صفر باشد، نشانه‌ی آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند. در حالی که انحراف معیار بزرگ، بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها است. انحراف معیار برابر با ریشه دوم واریانس است. محاسبه انحراف معیار از رابطه‌ی ب-۲ انجام می‌گردد:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{ب-۲})$$

در نهایت اندازه‌گیری عدم قطعیت برای کمیت x_i است. در n بار تکرار آزمایش از معادله ب-۳ محاسبه می‌شود:

$$\sigma_E = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{ب-۳})$$

ب-۱-۴-۲- آنالیز عدم قطعیت

عدم قطعیت متغیر x از رابطه‌ی ب-۴ محاسبه می‌گردد:

^۱Standard deviation

$$\sigma_x = \frac{a}{I} \quad (\text{ب-۴})$$

که در آن a دقت و I طول بازه تغییرات وسیله اندازه‌گیری x متغیر است.

اگر x, y, z, \dots متغیرها و $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \dots$ عدم قطعیت هر متغیر باشد عدم قطعیت تابع از $f = f(x, y, z, \dots)$ رابطه ب-۵ محاسبه می‌گردد:

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 \quad (\text{ب-۵})$$

روش آماری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، روشی است که در آن بتوان حدود اطمینان را در اطراف یک داده مشخص، نمایش داد. در هر آزمایش این فاصله‌ی اطمینان^۱ حدودی است که به احتمال زیاد واقعیت در آن وجود دارد. هر چقدر تعداد داده‌هایی که به دست می‌آوریم کمتر باشد این بازه وسیع‌تر بوده و به همان میزان نیز احتمال رسیدن به واقعیت کمتر است. در واقع وقتی تعداد داده‌ها (حجم نمونه) زیاد باشد با اطمینان بیشتری بیان خواهیم کرد عددی که به دست آورده‌ایم به واقعیت نزدیک است و فاصله‌ی اطمینان نیز کوچک‌تر خواهد بود. به منظور دست یافتن به فاصله اطمینان در مرحله اول باید مشخص کرد منظور از فاصله اطمینان چیست؟ یعنی در واقع چه حدی از فاصله اطمینان قابل قبول است؟ برای این منظور فاصله اطمینان در نظر گرفته شده در اکثر مطالعات برابر با ۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪ است. که به این معنی است، در صورتی که مطالعه مورد نظر ۱۰۰ بار تکرار شود در ۹۰، ۹۵ و ۹۹ بار آن همین محدوده بدست خواهد آمد. هر چه عدد مربوطه به فاصله اطمینان از ۱۰۰ فاصله می‌گیرد میزان دقت آن کاهش می‌یابد. به این معنی، احتمال اینکه شاخصی که با بازه اطمینان ۹۹٪ بیان شده به واقعیت نزدیک باشد، بیشتر از شاخصی است که با بازه اطمینان ۹۵٪ بیان می‌شود.

¹ Confidence Interval

ب-۱-۵- روش فاصله اطمینان

با توجه به معرفی پارامترهای آماری در بخش ب-۱-۴، فاصله اطمینان و حد بالا و پایین این فاصله، به صورت رابطه ب-۶ نمایش داده می‌شود:

$$\mu = \bar{x} \pm \left(B \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad (\text{ب-۶})$$

که در آن B ضریب تعمیم است. این پارامتر از جدول ب-۱ با ستون عمودی (تعداد تکرار آزمایش - ۱) و ستون افقی (میزان دقت محاسبات) انتخاب می‌شود.

جدول ب-ا: جدول تعیین ضریب تعمیم

t Table

cum. prob	t _{.50}	t _{.75}	t _{.80}	t _{.85}	t _{.90}	t _{.95}	t _{.975}	t _{.99}	t _{.995}	t _{.999}	t _{.9995}
one-tail	0.50	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
two-tails	1.00	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
df											
1	0.000	1.000	1.378	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.778	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.000	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.000	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.000	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.000	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.000	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.000	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.000	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.000	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.000	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.000	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.000	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.000	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.000	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.000	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.000	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.000	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.000	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.000	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.000	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.000	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	0.000	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.000	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
80	0.000	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
100	0.000	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
1000	0.000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300
Z	0.000	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291
	0%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99.8%	99.9%
	Confidence Level										

پیوست ج-۱- پردازش تصویر

ج-۱-۱- مقدمه ای بر پردازش تصویر

پردازش تصویر، یکی از علومی است که بسیار مورد توجه پژوهش‌گران و دانشمندان است، زیرا بشر بیش از هر نوع اطلاعاتی، به اطلاعات بینایی خود وابسته است. تصویر، بهتر از هر نوع اطلاعات دیگری می‌تواند به انسان در درک حوادث و اتفاقات مختلف یاری رساند.

ج-۱-۲- تصویر و تصویر دیجیتال

تصویر را می‌توان یک تابع دو بعدی به صورت $f(x, y)$ در نظر گرفت که x و y مختصات مکانی هر نقطه از تصویر هستند. برای نمایش تصویر در اندازه $M \times N$ ، از آرایه دو بعدی (ماتریس) با M سطر و N ستون استفاده می‌شود. مقدار تابع f در هر نقطه از مختصات تصویر، میزان روشنایی یا سطح خاکستری تصویر در آن نقطه است. در تصاویر دیجیتال، x ، y و سطح خاکستری (مقدار تابع f)، مقادیری محدود و گسسته می‌باشند، در حالی که در تصاویر آنالوگ، این مقادیر پیوسته هستند. پیکسل‌ها، عناصر تشکیل دهنده تصویر دیجیتال هستند که هر پیکسل، یک مختصات مکانی و یک سطح خاکستری دارد. اگر به هر پیکسل، k بیت اختصاص دهیم، هر پیکسل را می‌توان با 2^k سطح خاکستری نمایش داد که در این حالت، به آن تصویر k بیتی می‌گویند.

ج-۱-۳- نمونه برداری و کمی سازی تصویر

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، مفهوم دیجیتال برای تصاویر، به مقادیر گسسته موقعیت‌های مکانی هر نقطه از تصویر و چگالی رنگ آن اشاره دارد. برای تولید یک تصویر دیجیتال، نیاز است که فرایند آنالوگ به دیجیتال انجام شود. در این فرآیند، دو عمل نمونه‌گیری و کمی سازی انجام می‌گیرد. نمونه‌گیری، به این معنی است که محدوده کوچکی از مقادیر آنالوگ، به صورت یک مقدار منفرد بیان می‌شود. از این‌رو در این مرحله، نقاط گسسته‌ای از تصویر به دست می‌آیند که پیکسل نام دارند.

محدوده‌ای که در این مرحله برای نمونه‌گیری در نظر گرفته می‌شود، تفکیک پذیری یا رزولوشن^۱ تصویر را نشان می‌دهد. هر چه این بازه کوچک‌تر باشد، نمونه‌های بیشتری از تصویر گرفته می‌شوند و تفکیک‌پذیری تصویر بالاتر می‌رود. تصویری که رزولوشن آن بالا باشد، بیانگر جزئیات بیشتری از تصویر خواهد بود. بعد از هر مرحله نمونه‌گیری، باید فرآیند کمی‌سازی انجام شود. در این مرحله، به نقاط نمونه‌گیری شده که در واقع پیکسل‌های تصویر هستند، یک مقدار عددی نسبت داده می‌شود. این مقادیر عددی نسبت داده شده به هر پیکسل، به صورت سایه‌های خاکستری در تصویر نمایش داده می‌شوند. همچنین به تعداد بیت‌های اختصاص داده شده به هر نمونه، عمق بیتی^۲ تصویر می‌گویند.

ج - ۱-۴ - پردازش تصویر دیجیتال

هدف از پردازش تصویر، بهبود اطلاعات تصویری برای درک بهتر تصویر توسط انسان، یا ارائه بهتر آن برای درک یک ماشین است. همانطور که مشخص است، پردازش تصویر دیجیتال، انجام دادن پردازش دیجیتال روی تصویر دیجیتال است. عملیات پردازش تصویر را می‌توان در سه سطح دسته‌بندی کرد:

(۱) پردازش سطح پایین: این پردازش شامل پردازش‌های اولیه مانند، پیش‌پردازش‌هایی برای حذف نویز^۳، بهبود کنتراست^۴ تصویر و فیلتر کردن^۵ تصویر است. مشخصه این نوع پردازش این است که ورودی و خروجی آن تصویر می‌باشند.

(۲) پردازش سطح میانه: پردازش‌هایی که در این سطح انجام می‌گیرند، بعضی از اجزای تصویر و یا صفات بخش‌های مختلفی از تصویر را برجسته می‌کنند. شناسایی لبه^۶ و

¹ Resolution

² Bit Depth

³ Denoising

⁴ Contrast

⁵ Filtering

⁶ Edge detection

قطعه‌بندی تصویر^۱ دو نمونه از این دسته هستند. ویژگی این پردازش این است که

ورودی آن تصویر و خروجی آن، معمولا صفاتی از اشیاء موجود در تصویر است.

۳) پردازش سطح بالا: این روش‌ها مانند سیستم بینایی انسان، به درک روابط بین اشیاء

موجود در تصویر و تفسیر صحنه می‌پردازند.

ج-۱-۵- برخی از کاربردهای پردازش تصویر

پردازش تصویر دیجیتال، دانش جدیدی است که سابقه آن به پس از اختراع رایانه‌های دیجیتال باز

می‌گردد. این علم در چند دهه اخیر از هر دو جنبه نظری و عملی پیشرفت‌های چشمگیری داشته

است. سرعت این پیشرفت به اندازه‌ای بوده است که هم‌اکنون، به راحتی می‌توان نقش پردازش تصویر

دیجیتال را در بسیاری از علوم و صنایع مشاهده کرد. چند دسته مهم از کاربردهای پردازش تصویر

در ذیل مطرح شده‌اند:

۱) کاربردهای عکاسی مانند: بازسازی تصاویر قدیمی، بازسازی تصاویر خراب شده در اثر

نویز و بهبود ظاهر تصاویر معمولی.

۲) کاربردهای پزشکی مانند: تصاویر اشعه ایکس، سی تی اسکن^۲ و ام آر آی^۳.

۳) کاربردهای امنیتی مانند: تشخیص حرکت (در دزد گیرها)، تشخیص اثر انگشت،

تشخیص چهره و تشخیص امضاء.

۴) کاربردهای نظامی مانند: تشخیص و رهگیری خودکار اهداف در هوا و یا زمین.

۵) کاربردهای سنجش از راه دور: مانند ارتقا و تحلیل تصاویر هوایی و ماهواره‌ای.

۶) کاربردهای صنعتی مرتبط با خودکار سازی صنایع مانند: تفکیک محصولات مختلف بر

اساس شکل یا اندازه، آشکار سازی نواقص و یا شکستگی‌های موجود در محصولات،

¹ Image segmentation

² Ct-Scan

³ Mri

تعیین محل اشیاء و اجرای فرآیند تولید با استفاده از روبات‌ها و بینایی ماشین. علاوه بر آن، بسیاری از فعالیت‌های صنعتی و نیز آزمایش‌های شیمیایی و اتمی که برای انسان مضر و در مواردی غیر ممکن است را می‌توان با استفاده از دانش بینایی ماشین انجام داد.

۷) کاربردهای فشرده سازی تصویر مانند: ذخیره سازی، ارسال تصاویر با کیفیت بالا و در حجم کمتر از روی شبکه اینترنت و یا خط تلفن.

ج ۱-۶- انواع تصویر دیجیتال

تصویر دیجیتال می‌تواند در یکی از چهار نوع دودویی^۱، خاکستری^۲، رنگی و رنگی با شاخص^۳ باشد.

ج ۱-۶-۱- تصویر دودویی

در تصویر دودویی، هر پیکسل فقط دارای یکی از دو رنگ سیاه و یا سفید است. از این رو هر پیکسل، فقط یکی از دو مقدار صفر و یک را می‌تواند داشته باشد که به ترتیب، بیانگر رنگ سیاه و سفید است. در نتیجه هر پیکسل فقط به یک بیت حافظه برای ذخیره سازی نیاز دارد. در برخی از کاربردها که نمایش رنگ‌های مختلف برای تصویر اهمیت خاصی ندارد، می‌توان از تصاویر دودویی استفاده کرد تا فضای ذخیره سازی اندکی نیز اشغال شود. تصاویر متنی و اثر انگشت، دو نوع تصویر رایجی هستند که برای تهیه آن‌ها اغلب از مدل دودویی استفاده می‌شود.

ج ۱-۶-۲- تصویر خاکستری

در تصویر خاکستری، هر پیکسل می‌تواند یکی از ۲۵۶ مقدار از اعداد صحیح در محدوده $[0,255]$ و یا اعداد حقیقی در محدوده $[0,1]$ را داشته باشد. همان‌طور که مشخص است، هر پیکسل به هشت بیت برای ذخیره سازی نیاز دارد. در این نوع تصویر، رنگ‌ها به صورت سایه‌هایی از خاکستری نمایش داده

¹ Binary

² Gray

³ Index

می‌شوند. مقدار صفر، بیانگر رنگ سیاه و مقدار ۲۵۵، بیانگر رنگ سفید است و هر یک از سایر مقادیر، بیانگر یک رنگ خاکستری خاص می‌باشد. مشخص است که هر چه مقادیر پیکسل‌ها به صفر نزدیک‌تر باشند، رنگ آن پیکسل‌ها تیره‌تر و هر چه به ۲۵۵ نزدیک‌تر باشند، رنگشان روشن‌تر دیده می‌شوند.

ج - ۱-۶-۳- تصویر رنگی

طیف رنگی از ترکیب سه رنگ اصلی قرمز، سبز و آبی ایجاد می‌شود. در تصاویر رنگی دیجیتال نیز، رنگ‌های مختلف از ترکیب سه رنگ اصلی با میزان متفاوت ایجاد می‌شوند. بر این اساس تصاویر رنگی دیجیتال به تصاویر RGB^1 نیز معروف هستند. هر یک از رنگ‌های اصلی در محدوده صحیح 0 تا ۲۵۵ و یا حقیقی 0 تا 1 هستند، پس هر پیکسل، به سه بایت برای ذخیره سازی احتیاج دارد. هر تصویر رنگی از سه ماتریس در اندازه تصویر برای ترکیب سه رنگ قرمز، سبز و آبی استفاده می‌کند.

¹ Red Green Blue

مراجع

- [1] Strotos, G., et al., *Non-dimensionalisation parameters for predicting the cooling effectiveness of droplets impinging on moderate temperature solid surfaces*, in *International Journal of Thermal Sciences*. 2011. p. 698-711.
- [2] Chatzikyriakou, D., S. Walker, and G. Hewitt, *The contribution of non-wetting droplets to direct cooling of the fuel during PWR post-LOCA reflood*. *Nuclear Engineering and Design*, 2010. 240(10): p. 3108-3114.
- [3] Rein, M., *Interactions between drops and hot surfaces*, in *Drop-Surface Interactions*. 2002, Springer. p. 185-217.
- [4] Fujimoto, H., et al., *Photographic study of hydrodynamics of drops of aqueous polymersolution impinging on hot solid*. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015. 60: p. 66-74.
- [5] Strotos, G., et al., *Numerical investigation of the cooling effectiveness of a droplet impinging on a heated surface*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008. 51(19): p. 4728-4742.
- [6] BELTRAN, A.A., *Rain erosion at subsonic and supersonic speeds: an annotated bibliography*. 1962, Lockheed Missiles and Space co Sunnyvale Calif.
- [7] Pasandideh-Fard, M., S. Chandra, and J. Mostaghimi, *A three-dimensional model of droplet impact and solidification*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002. 45(11): p. 2229-2242.
- [8] Roisman, I.V., *Fast forced liquid film spreading on a substrate: flow, heat transfer and phase transition*. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010. 656: p. 189-204.
- [9] Bernardin, J.D., C.J. Stebbins, and I. Mudawar, *Mapping of impact and heat transfer regimes of water drops impinging on a polished surface*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997. 40(2): p. 247-267.
- [10] Takata, Y., et al., *The effects of the surface roughness on the dynamic behavior of the successive micrometric droplets impacting onto inclined hot surfaces*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016. 101: p. 1217-1226.
- [11] Jung, J., S. Jeong, and H. Kim, *Investigation of single-droplet/wall collision heat transfer characteristics using infrared thermometry*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016. 92: p. 774-783.
- [12] Zhao, Z., D. Poulikakos, and J. Fukai, *Heat transfer and fluid dynamics during the collision of a liquid droplet on a substrate—I. Modeling*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996. 39(13): p. 2771-2789.
- [13] Waldvogel, J. and D. Poulikakos, *Solidification phenomena in picoliter size solder droplet deposition on a composite substrate*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997. 40(2): p. 295-309.
- [14] Pasandideh-Fard, M., et al., *Deposition of tin droplets on a steel plate: simulations and experiments*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998. 41(19): p. 2929-2945.

- [15] Strotos, G., et al., *Numerical investigation of the cooling effectiveness of a droplet impinging on a heated surface*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008. 51(19): p. 4728-4742.
- [16] Pasandideh-Fard, M., et al., *Cooling effectiveness of a water drop impinging on a hot surface*. International journal of heat and fluid flow, 2001. 22(2): p. 201-210.
- [17] Tavangarrizi, M., M. Heiraninobari, Numerical simulation of drop impact with a solid surface. Sixth Annual Mechanical Engineering Conference and Third International Mechanical Engineering Conference of the Iranian Society of Mechanical Engineers ISME,1998.
- [18] Pasandideh-Fard, M., et al., *Cooling effectiveness of a water drop impinging on a hot surface*. International journal of heat and fluid flow, 2001. 22(2): p. 201-210.
- [19] Strotos, G., et al., *Numerical investigation on the evaporation of droplets depositing on heated surfaces at low Weber numbers*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008. 51(7): p. 1516-1529.
- [20] Strotos, G., et al., *Non-dimensionalisation parameters for predicting the cooling effectiveness of droplets impinging on moderate temperature solid surfaces*. International Journal of Thermal Sciences, 2011. 50(5): p. 698-711.
- [21] Strotos, G., et al., *Cooling effectiveness of droplets at low Weber numbers: Effect of temperature*. International Journal of Thermal Sciences, 2013. 72: p. 60-72.
- [22] Moon, J.H., M. Cho, and S.H. Lee, *Dynamic wetting and heat transfer characteristics of a liquid droplet impinging on heated textured surfaces*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016. 97: p. 308-317.
- [23] Liu, H., E.J. Lavernia, and R.H. Rangel, *Numerical simulation of substrate impact and freezing of droplets in plasma spray processes*. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993. 26(11): p. 1900.
- [24] Pasandideh-Fard, M., et al., *Capillary effects during droplet impact on a solid surface*. Physics of fluids, 1996. 8(3): p. 650-659.
- [25] Hirt, C.W. and B.D. Nichols, *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*. Journal of computational physics, 1981. 39(1): p. 201-225.
- [26] Pasandideh-Fard, M., S. Chandra, and J. Mostaghimi, *A three-dimensional model of droplet impact and solidification*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002. 45(11): p. 2229-2242.
- [27] Pasandideh-Fard, M., et al., *Splat shapes in a thermal spray coating process: simulations and experiments*. Journal of Thermal Spray Technology, 2002. 11(2): p. 206.
- [28] Roisman, I.V., R. Rioboo, and C. Tropea. *Normal impact of a liquid drop on a dry surface: model for spreading and receding*. in *Proceedings of the Royal*

Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2002. The Royal Society.

- [29] Ukiwe, C. and D.Y. Kwok, *On the maximum spreading diameter of impacting droplets on well-prepared solid surfaces*. *Langmuir*, 2005. 21(2): p. 666-673.
- [30] Asadi, S., M. Passandideh-Fard, and M. Moghiman, *Numerical and analytical model of the inclined impact of a droplet on a solid surface in a thermal spray coating process*. *Iranian Journal of Surface and Engineering*, 2008. 4: p. 1-14.
- [31] Strotos, G., et al., *Cooling effectiveness of droplets at low Weber numbers: Effect of temperature*. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013. 72: p. 60-72.
- [32] Josserand, C. and S. Zaleski, *Droplet splashing on a thin liquid film*. *Physics of fluids*, 2003. 15(6): p. 1650-1657.
- [33] Nikolopoulos, N., A. Theodorakakos, and G. Bergeles, *Three-dimensional numerical investigation of a droplet impinging normally onto a wall film*. *Journal of computational physics*, 2007. 225(1): p. 322-341.
- [34] Berberović, E., et al., *Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution*. *Physical Review E*, 2009. 79(3): p. 036306.
- [35] Ansari, M.R. and N. Samkhaniani, *Contact Angle Comparison of Droplet Impact on Solid Surface Using VOF*. *Modares Mechanical Engineering*, 2015. 15(3).
- [36] Castanet, G., T. Lienart, and F. Lemoine, *Dynamics and temperature of droplets impacting onto a heated wall*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009. 52(3): p. 670-679.
- [37] Bernardin, J.D., C.J. Stebbins, and I. Mudawar, *Mapping of impact and heat transfer regimes of water drops impinging on a polished surface*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997. 40(2): p. 247-267.
- [38] Lelong, F., et al. *Experimental study of heat transfer between droplets and wall in Leidenfrost regime*. in *7th Int. Conference on Multiphase Flow (ICMF), Tampa, FL USA*. 2010.
- [39] Dunand, P., et al., *Heat transfer of droplets impinging onto a wall above the Leidenfrost temperature*. *Comptes Rendus Mécanique*, 2013. 341(1-2): p. 75-87.
- [40] Chatzikyriakou, D., et al., *The measurement of heat transfer from hot surfaces to non-wetting droplets*. *International journal of heat and mass transfer*, 2011. 54(7): p. 1432-1440.
- [41] Chandra, S. and C. Avedisian. *On the collision of a droplet with a solid surface*. in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1991. The Royal Society.
- [42] Jung, J., S. Jeong, and H. Kim, *Investigation of single-droplet/wall collision heat transfer characteristics using infrared thermometry*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016. 92: p. 774-783.
- [43] Herbert, S., T. Gambaryan-Roisman, and P. Stephan, *Influence of the governing*

- dimensionless parameters on heat transfer during single drop impingement onto a hot wall.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013. 432: p. 57-63.
- [44] Ahn, H.S., J. Kim, and M.H. Kim, *Investigation of pool boiling critical heat flux enhancement on a modified surface through the dynamic wetting of water droplets.* Journal of Heat Transfer, 2012. 134(7): p. 071504.
- [45] Alizadeh, A., et al., *Temperature dependent droplet impact dynamics on flat and textured surfaces.* Applied physics letters, 2012. 100(11): p. 111601.
- [46] Negeed, E.-S.R., et al., *Effect of the surface roughness and oxidation layer on the dynamic behavior of micrometric single water droplets impacting onto heated surfaces.* International Journal of Thermal Sciences, 2013. 70: p. 65-82.
- [47] Tran, T., et al., *Drop impact on superheated surfaces.* Physical review letters, 2012. 108(3): p. 036101.
- [48] Tran, T., et al., *Droplet impact on superheated micro-structured surfaces.* Soft Matter, 2013. 9(12): p. 3272-3282.
- [49] Lagubeau, G., et al., *Leidenfrost on a ratchet.* Nature Physics, 2011. 7(5): p. 395-398.
- [50] Arnaldo del Cerro, D., et al., *Leidenfrost point reduction on micropatterned metallic surfaces.* Langmuir, 2012. 28(42): p. 15106-15110.
- [51] Gradeck, M., et al., *Heat transfer for Leidenfrost drops bouncing onto a hot surface.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2013. 47: p. 14-25.
- [52] Harvey, D., *The impact and rebound of a small water drop striking a hot surface.* 1967.
- [53] Wachters, L. and N. Westerling, *The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state.* Chemical Engineering Science, 1966. 21(11): p. 1047-1056.
- [54] Wachters, L., H. Bonne, and H. Van Nouhuis, *The heat transfer from a hot horizontal plate to sessile water drops in the spheroidal state.* Chemical Engineering Science, 1966. 21(10): p. 923-936.
- [55] Wachters, L., et al., *The heat transfer from a hot wall to impinging mist droplets in the spheroidal state.* Chemical Engineering Science, 1966. 21(12): p. 1231-1238.
- [56] Pedersen, C., *An experimental study of the dynamic behavior and heat transfer characteristics of water droplets impinging upon a heated surface.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 1970. 13(2): p. 369IN3373-372IN5381.
- [57] Yarin, A.L., *Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing....* Annu. Rev. Fluid Mech., 2006. 38: p. 159-192.
- [58] Fukai, J., et al., *Modeling of the deformation of a liquid droplet impinging upon a flat surface.* Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1993. 5(11): p. 2588-2599.

- [59] Šikalo, Š., et al., *Dynamic contact angle of spreading droplets: Experiments and simulations*. *Physics of Fluids*, 2005. 17(6): p. 062103.
- [60] Kunkelmann, C. and P. Stephan, *CFD simulation of boiling flows using the volume-of-fluid method within OpenFOAM*. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2009. 56(8): p. 631-646.
- [61] Kunkelmann, C. and P. Stephan, *Numerical simulation of the transient heat transfer during nucleate boiling of refrigerant HFE-7100*. *International Journal of Refrigeration*, 2010. 33(7): p. 1221-1228.
- [62] Herbert, S., et al., *Local heat transfer and phase change phenomena during single drop impingement on a hot surface*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013. 61: p. 605-614.
- [63] Bayer, I.S. and C.M. Megaridis, *Contact angle dynamics in droplets impacting on flat surfaces with different wetting characteristics*. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006. 558: p. 415-449.
- [64] Bussmann, M., J. Mostaghimi, and S. Chandra, *On a three-dimensional volume tracking model of droplet impact*. *Physics of Fluids*, 1999. 11(6): p. 1406-1417
- [65] Harlow, F.H. and J.P. Shannon, *The splash of a liquid drop*. *Journal of Applied Physics*, 1967. 38(10): p. 3855-3866.
- [66] Tsurutani, K., et al., *Numerical analysis of the deformation process of a droplet impinging upon a wall*. *JSME international journal. Ser. 2, Fluids engineering, heat transfer, power, combustion, thermophysical properties*, 1990. 33(3): p. 555-561.
- [67] Fukai, J., et al., *Wetting effects on the spreading of a liquid droplet colliding with a flat surface: experiment and modeling*. *Physics of Fluids*, 1995. 7(2): p. 236-247.
- [68] Bennett, T. and D. Poulikakos, *Splat-quench solidification: estimating the maximum spreading of a droplet impacting a solid surface*. *Journal of Materials Science*, 1993. 28(4): p. 963-970.
- [69] Madejski, J., *Solidification of droplets on a cold surface*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1976. 19(9): p. 1009-1013.
- [70] Asadi, S., F.M. Pasandideh, and M. Moghiman, *The effect of contact angle on droplet impact onto a solid surface*. 2009.
- [71] R. Krechetnikov and G. M. Homsy, "Crown-forming instability phenomena in the drop splash problem," *Journal of colloid and interface science*, vol. 331, no. 2, pp. 555-559, 2009.
- [72] T. Mao, D. Kuhn, and T. Honghi, "Spread and rebound of liquid droplets upon impact on flat surfaces," *Oceanographic Literature Review*, vol. 1, no. 45, pp. 205-206, 1998.
- [73] H. Carslaw and J. Jaeger, *Heat in solids*. Clarendon Press, Oxford, 1959.

- [74] T. L. Bergman and F. P. Incropera, *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
- [75] E. Berberović, I. V. Roisman, S. Jakirlić, and C. Tropea, "Inertia dominated flow and heat transfer in liquid drop spreading on a hot substrate," *International journal of heat and fluid flow*, vol. 32, no. 4, pp. 785-795, 2011.

Abstract

Drop impact with a solid surface is a phenomenon that occurs in nature. It has many industrial applications in the fields of modern engineering. In the present study, an experimental study is performed to analyze the behaviour of water impact on the copper surface by considering the thermal effects. The effects of effective parameters such as the surface type, the height of release, the impact velocity and the surface temperature on the droplet behavior during the spreading and receding are studied. The non-dimensional contact diameter, heat flux, the total thermal energy absorbed from the droplet and cooling effectiveness are also calculated. Water droplets at impact velocity of 0.352, 0.761, 1.272, 1.459 and 1.609 m/s are studied on the copper surface at different temperatures of 35.1°C, 44.9°C, 55.2°C, 65°C, and 79.8°C. The experimental study shows that increasing of the Weber number leads to an increase in the non-dimensional contact diameters. In this condition, the time to reach the maximum spreading diameter is decreased. Also, the heat flux is decreased with time and the related maximum value is observed at the early stage of droplet impact. The heat flux is also by increasing the initial surface temperature. It is also observed that for constant Weber number, by increasing the surface temperature, the maximum spreading diameter is increased. However, the maximum recoil diameter is decreased which is due to decrease in the liquid viscosity.

Keywords: Drop impact, solid surface, impact velocity, surface temperature.



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

**Experimental Investigation of Liquid Drop Impact on Solid Surface with
Thermal Effects**

By:

Sahar Arshtabar

Supervisors:

Dr. Mohsen Nazari

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan

February 2018