

رایلی-تیلور، را شناسایی کردند و نشان دادند که افزایش سرعت جریان منجر به تغییر مکانیزم شکست از نوع کششی به انفجاری می‌شود. مطالعات جوزف و همکاران [۷] تأثیر این ناپایداری‌ها بر تغییر شکل سطح قطرات را بررسی نمودند. همچنین نشان داد که لایه مرزی ویسکوز و فشار پویا در اطراف قطره نقش تعیین‌کننده‌ای در نوع شکست دارند.

پیلچ و اردمن [۸] مراحل شکست قطرات را مدل‌سازی کرده و تأثیر نیروهای آئروپینامیکی بر آن‌ها را مطالعه کردند. با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی مربوط به زمان شکست و تاریخچه سرعت، به پیش‌بینی اندازه حداکثر پایدار قطرات پس از گسست پرداختند. وایزبا و تاکایاما [۹] نشان دادند که تغییر شکل اولیه قطره، پیش از وقوع شکست، تأثیر مستقیمی بر نحوه تقسیم شدن آن دارد. همچنین نقش کشش سطحی و لزجت را در شکست قطرات بررسی نمود.

تحقیقات تنوفانوس و همکاران [۱۰-۱۳] رفتار قطرات در جریان‌های مافوق صوت را مطالعه کرده و نشان دادند که در این شرایط، نقش کشش سطحی و نیروی اینرسی به‌طور قابل‌توجهی در فرآیند شکست برجسته می‌شود. شارما و همکاران [۱۴] نیز با انجام آزمایش‌های کنترل‌شده دریافتند که شدت موج و نسبت چگالی مایع به گاز، عوامل کلیدی در تعیین نوع شکست هستند و وابستگی شکست قطرات به شدت موج و چگالی مایع را تحلیل کرده و پنج رژیم شکست مختلف را توصیف نمودند.

تاکایاما و ایگرا [۱۵] شبیه‌سازی عددی جریان پیرامون قطرات را آغاز کردند و با بررسی شکست قطرات استوانه‌ای در جریان‌های مافوق صوت، نقش شکل اولیه قطره را در شکست مشخص کردند. با بررسی شکست قطرات استوانه‌ای نشان دادند که این نوع هندسه، رفتار متفاوتی نسبت به قطرات کروی دارد، زیرا توزیع فشار و جریان داخلی در این دو ساختار کاملاً متمایز است. همچنین، لیو و همکاران [۱۶] با استفاده از شبیه‌سازی عددی نشان دادند که تنش‌های برشی در لایه مرزی قطره، تأثیر مستقیمی بر نحوه گسست دارند.

منگ و کولونیوس [۱۷] رابطه بین عدد وبر و رژیم‌های مختلف شکست را از طریق شبیه‌سازی عددی نشان دادند که بیانگر این است که افزایش شدت موج ضربه‌ای می‌تواند منجر به کاهش زمان شکست و افزایش میزان پاشش شود. در همین راستا، گوآن و همکاران [۱۸] نیز به بررسی جریان داخلی قطره تحت موج ضربه پرداختند و دریافتند که جریان‌های داخلی ناشی از فشار و تنش برشی، تأثیر بسزایی در فرآیند گسست دارند.

هندرسون [۱۹] و بن-دور [۲۰] به بررسی پدیده انکسار موج ضربه‌ای پرداختند و دریافتند که امواج ثانویه می‌توانند تغییر شکل و شکست قطره را تحت تأثیر قرار دهند. کرزسزکوسکی [۲۱] مکانیزم‌های مختلف گسست قطرات مایع را شناسایی و دسته‌بندی جامعی از انواع شکست شامل شکست کششی، لایه‌لایه شدن و گسست انفجاری ارائه داد و نقش چگالی، کشش سطحی، و لزجت را مشخص کرد.

ژلفاند [۲۲] از روش‌های تصویربرداری پرسرعت برای تحلیل فرآیند شکست استفاده نمود و نشان داد که سرعت نسبی بین مایع و گاز تأثیر مستقیمی بر مکانیزم شکست دارد. گویلدنچرو همکاران [۲۳] مطالعه‌ای روی شکست ثانویه قطرات انجام داده و مشخص کردند

که اندازه و تعداد قطرات ثانویه به شدت موج ضربه‌ای وابسته است علاوه بر این ناپایداری‌های کلوین-هلمهولتز و رایلی-تیلور را در شکست قطرات بررسی کردند

سمبین و همکاران [۲۴] نشان دادند که انتشار امواج داخلی در مایع، نقش مهمی در گسترش تغییر شکل دارد. همچنین، شن و لیو [۲۵] با استفاده از روش‌های تصویربرداری پرسرعت و تخلیه الکتریکی، تغییرات فشار داخلی و شکل‌گیری موج‌های ثانویه را تحلیل کرده‌اند و دریافتند که افزایش لزجت باعث کاهش نرخ گسست و افزایش تغییر شکل کششی می‌شود.

خو و همکاران [۲۶] بررسی کردند که موج ضربه‌ای تولید شده توسط تخلیه الکتریکی نانو ثانیه‌ای چگونه می‌تواند تأثیر شدیدی بر ساختارهای مایع داشته باشد. همچنین، پوپلاوسکی و همکاران [۲۷] به مطالعه برهم‌کنش موج ضربه‌ای با یک قطره آب از طریق ترکیب آزمایش و شبیه‌سازی عددی پرداخته و نشان دادند که موج ضربه‌ای متقارن در اطراف قطره گسترش یافته و باعث تغییر شکل سریع آن می‌شود.

رسانو و همکاران [۲۸] دریافتند که نرخ تغییر شکل قطره به شدت به شدت موج ضربه وابسته است. همچنین، هیوانگ و همکاران [۲۹] نشان دادند که تبخیر قطره می‌تواند نقش مهمی در تغییرات فاز و انتقال گرما در میدان جریان داشته باشد. مطالعه رفتار قطرات مایع تحت تأثیر موج ضربه به دلیل کاربردهای گسترده در حوزه‌های علمی و صنعتی، از جمله مهندسی احتراق، طراحی سیستم‌های پاشش سوخت، مدیریت مایعات در محیط‌های پرفشار، و شبیه‌سازی انفجارهای زیرآبی، از دیرباز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این مطالعات، پدیده‌هایی مانند تغییر شکل، شکست، و ایجاد ناپایداری‌های سطحی در قطرات بررسی شده است. این پدیده‌ها متأثر از عواملی نظیر کشش سطحی، لزجت، فشار موج ضربه، و نوع مایع هستند. سونگ و همکاران [۳۰] شکست فیلم مایع تحت تأثیر موج ضربه را به‌صورت تجربی بررسی کرده و نشان دادند که ضخامت و کشش سطحی فیلم بر نحوه گسستگی آن تأثیرگذار است. تریپتی و همکاران [۳۱] نیز تعامل موج ضربه‌ای با خوشه‌های قطره‌ای را بررسی کرده و دریافتند که اثرات بین‌سطحی و تغییرات فشار، نقش کلیدی در پایداری قطرات دارند.

بویک و پوپلاوسکی [۳۲] مشخص کردند که نوع شکست (stripping, shearing, bag breakup) به شدت موج و خصوصیات مایع بستگی دارد. زو و همکاران [۳۳] نشان دادند که چگالی و لزجت مایع بر نحوه گسترش و شکست قطره تأثیرگذار است. این یافته‌ها می‌توانند در مقایسه رفتار قطره آب و گازوئیل حائز اهمیت باشند، زیرا n-decane، ماده‌ای که در این پژوهش بررسی شده، ترکیبی مشابه گازوئیل دارد.

لیانگ و همکاران [۳۴] برهم‌کنش موج ضربه‌ای صفحه‌ای با قطره‌ای حاوی حفره بخار را بررسی کردند و دریافتند که حفره‌های بخار می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر میزان گسترش و شکست داشته باشند. همچنین، خیو و همکاران [۳۵] یک مدل بهبودیافته برای پیش‌بینی رفتار قطره در برابر موج ضربه ارائه دادند.

تحقیق خو و همکاران [۳۶] به بررسی پدیده‌های همگرایی موج در یک ستون آب دو بعدی تحت تأثیر امواج ضربه منحنی می‌پردازد. این پژوهش با استفاده از تحلیل نظری پرتو و شبیه‌سازی‌های عددی با

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma D}} \quad (۳)$$

تعریف می‌شود، به ترکیب اثرات لزجت و کشش سطحی در مقابل اینرسی می‌پردازد و برای توصیف رفتار قطرات در شرایط مختلف بسیار مفید است. افزایش عدد وبر نشان‌دهنده احتمال بالای شکست و تغییر شکل قطره است، در حالی که اعداد رینولدز و آنسرج اطلاعات بیشتری درباره جریان داخلی و ناپایداری‌های هیدرودینامیکی مانند کلون-هلمهولتز و رایلی-تیلور ارائه می‌دهند.

۲-۲- محاسبه تغییر فشار و عدد ماخ جریان در موج

ضربه‌ای ایجاد شده توسط تخلیه الکتریکی

تحلیل موج ضربه‌ای ایجاد شده توسط تخلیه الکتریکی به تخمین پارامترهای موج ضربه‌ای و استفاده از روابط تحلیلی وابسته است. در این روش، دو جنبه اصلی شامل تخمین تغییر فشار و محاسبه عدد ماخ جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روابط برای موج ضربه‌ای ضعیف (Weak Shock) که فشار ناشی از آن $(0.4 < \frac{\Delta P}{P} < 9)$ است، معتبر می‌باشند.

تغییر فشار ناشی از موج ضربه‌ای از رابطه زیر که برای امواج ضربه‌ای ضعیف تدوین شده، محاسبه می‌شود (جونز و پلوستر [۳۸]):

$$\frac{P_2 - P_1}{P_1} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \cdot \frac{0.4503}{\left[1 + 4.803 \cdot \left(\frac{r}{R_0}\right)^2\right]^{3/8} - 1} \quad (۴)$$

در این رابطه:

P_1 و P_2 به ترتیب فشار در جلوی موج (پیش از برخورد) و پشت موج (پس از برخورد) هستند.

γ نسبت گرمای ویژه (برای هوا ۱/۴) است.

r فاصله شعاعی از مرکز الکتروستات است که می‌تواند برابر فاصله بین دو الکتروتود (۵ تا ۱۰ میلی‌متر) در نظر گرفته شود.

R_0 شعاع اولیه موج ضربه‌ای، از رابطه زیر محاسبه می‌شود (جونز و پلوستر [۳۸]):

$$R_0 = \left[\frac{4E_0}{\gamma B P_0} \right]^{1/2} \quad (۵)$$

که در آن E_0 انرژی الکتریکی وارد شده به واحد طول فاصله الکتروتودها، P_0 فشار اولیه، و B ضریبی وابسته به خصوصیات محیط است.

انرژی الکتریکی E_0 باید به دقت اندازه‌گیری شود تا R_0 ، محاسبه گردد.

برای تخمین عدد ماخ (Ma)، از نسبت تغییر فشار محاسبه شده استفاده می‌شود. رابطه زیر برای محاسبه Ma به کار می‌رود (جونز و همکاران [۳۹]):

$$Ma = \left(\left(\frac{\Delta P}{P_1} \cdot \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right) + 1 \right)^{0.5} \quad (۶)$$

این رابطه نیز برای موج‌های ضربه‌ای ضعیف اعتبار دارد.

دقت بالا، چارچوب تحلیلی برای توصیف تکامل ساختارهای موج در ستون آب تحت ضربه ارائه کرده است. نتایج نشان می‌دهند که شکل و شدت موج ضربه ورودی تأثیر قابل توجهی بر محل نقطه کانونی و شدت فشار منفی ایجاد شده در داخل ستون دارند. به‌ویژه، یافته‌ها حاکی از آن است که بهینه‌سازی شکل‌های جبهه موج می‌تواند اثرات فشار منفی را تقویت یا کاهش دهد که این موضوع برای کاربردهایی مانند کنترل حفره و درمان‌های مبتنی بر اولتراسوند اهمیت دارد. تحقیق خیونگ و همکاران [۳۷] به بررسی تعامل ضربه و قطره‌ها با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی با دقت بالا و مدل نظری بهبود یافته می‌پردازد. در این مطالعه، فاز اولیه تعامل ضربه-قطره که در آن شکل قطره تغییر چندانی نمی‌کند، مورد توجه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که امواج منتقل شده در داخل قطره به دیواره‌های آن برخورد کرده و منجر به ایجاد نقاط فشار منفی و کاویته می‌شوند. همچنین، مدل بهبود یافته نشان می‌دهد که نقش ساقه ماخ در ایجاد اختلالات در ساختار داخلی قطره بسیار حیاتی است و این یافته‌ها با مشاهدات تجربی هماهنگی نزدیکی دارند.

پیشرفت‌های اخیر در فناوری تصویربرداری و تولید موج ضربه، امکان انجام مطالعات دقیق‌تری را فراهم کرده است. استفاده از تخلیه الکتریکی به عنوان روشی نوآورانه، تولید موج ضربه‌ای با جریان محدود را ممکن ساخته است که برای بررسی تغییرات موضعی در قطرات مناسب است. تحقیق حاضر با تمرکز بر مقایسه رفتار قطرات آب و گازوئیل تحت تأثیر موج ضربه، به تحلیل تفاوت‌های ناشی از کشش سطحی و لزجت می‌پردازد. این پژوهش، با بررسی تجربی، شناخت دقیق‌تری از دینامیک داخلی و مکانیسم‌های شکست قطرات ارائه می‌دهد و گامی مؤثر در تکمیل دانش موجود در این حوزه محسوب می‌شود.

۲- نظریه مسئله

۲-۱- اعداد بدون بعد

در بررسی تقابل موج ضربه با قطره، شکست و تغییر شکل قطره نتیجه تعادل و مقابله بین نیروی کشش سطحی و نیروی ناشی از موج ضربه است. این فرآیند به شدت تحت تأثیر خواص فیزیکی قطره مانند چگالی، لزجت، کشش سطحی و همچنین قدرت موج ضربه قرار دارد. برای تحلیل این پدیده‌ها، سه عدد بدون بعد کلیدی شامل عدد رینولدز (Re)، وبر (We) و عدد آنسرج (Oh) تعریف می‌شوند. عدد رینولدز (Re)، به صورت:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (۱)$$

تعریف شده و نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجت را مشخص می‌کند، که نقش مهمی در تعیین میزان جریان داخلی قطره و تغییر شکل آن دارد. عدد وبر (We) که به صورت:

$$We = \frac{\rho u^2 D}{\sigma} \quad (۲)$$

تعریف می‌شود، بیانگر نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی است و تأثیر قدرت موج و کشش سطحی قطره را نشان می‌دهد. عدد آنسرج (Oh) که به صورت:

۳- آزمایشات و بررسی تجربی

۳-۱- سیستم تولید موج ضربه‌ای

در این تحقیق، برای تولید موج ضربه‌ای از دستگاهی مبتنی بر تخلیه الکتریکی بین دو الکترود سوزنی شکل استفاده شد که به‌طور خاص طراحی و توسعه داده شده است. این سیستم مزایای متعددی نسبت به روش‌های مرسوم تولید موج ضربه‌ای دارد، از جمله اندازه کوچک، سهولت در استفاده، توانایی تولید طیف وسیعی از امواج ضربه‌ای، و بازتولیدپذیری بالا در آزمایش‌های مکرر.

ولتاژ DC اولیه در محدوده ۳ تا ۱۲ ولت توسط یک ترانسفورماتور ولتاژ بالا به ۲ تا ۱۵ کیلوولت افزایش یافت (جدول ۱). مدول تولید ولتاژ پالسی (USD 2.2002) به‌عنوان جزء اصلی این سیستم عمل می‌کرد و از طراحی مداری برای تولید سیگنال‌های تریگر بهره می‌برد. در هنگام تحریک، یک پالس ولتاژ بالا از الکترودها تخلیه شد. این مدول از روش افزایش ولتاژ DC استفاده کرده و در شرایط وقوع خود شکست ولتاژ بالا (overvoltage self-breakdown) کار می‌کرد. طراحی نوک‌سوزنی الکترودها باعث ایجاد موج انفجاری استوانه‌ای شکل در محیط شد.

موج ضربه ایجاد شده توسط تخلیه جرقه‌ای منفرد در بازه انرژی ۴ تا ۱۵ میلی‌ژول ثبت شد و مشخصات متفاوتی نشان داد. از تخلیه الکتریکی با پالس نانو ثانیه‌ای برای ایجاد جرقه بین دو الکترود که در فاصله ۵ میلی‌متری از یکدیگر قرار داشتند، استفاده شد. پالس‌ها دارای ولتاژ قله تا ۱۵ کیلوولت و طول پالس ۵ تا ۱۰ میلی‌ثانیه بودند. اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در طی تخلیه الکتریکی با استفاده از دو پروب ولتاژ بالا (Tektronix P6015A) و یک آمپر سنج جریان (Magnetlab CT-D1.0) انجام گرفت. این اندازه‌گیری‌ها برای محاسبه انرژی الکتریکی ذخیره‌شده در تخلیه استفاده شدند که در محدوده ۴ تا ۲۰ میلی‌ژول متغیر بود.

۳-۲- فرآیند آزمایش

در آزمایش‌ها، قطره‌ای از آب با قطر ۲ تا ۳ میلی‌متر در فاصله ۱۰ برابر قطر الکترودها و در راستای عمود بر محور تخلیه الکتریکی قرار داده شد. پس از برخورد موج ضربه‌ای به قطره، تغییر شکل آن به کمک عکس‌برداری با دوربین‌های پرسرعت ثبت شد. برای این منظور، از دو نوع دوربین استفاده گردید:

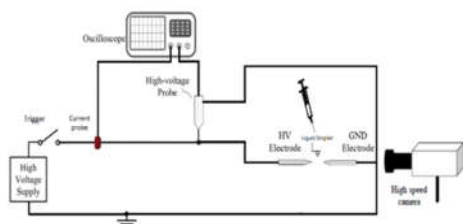
دوربین پرسرعت HAS-D73: این دوربین با نرخ ۲۰۰۰ فریم بر ثانیه و رزولوشن ۱/۳ مگاپیکسل (۱۰۲۸×۱۲۸۰) توانایی ثبت تا ۱۵۰۰ فریم بر ثانیه با سرعت شاتر حداقل ۱ میکروثانیه را داشت.

دوربین دیجیتال CANON EOS 700D: این دوربین با حسگر CMOS و رزولوشن ۱۸ مگاپیکسل برای عکس‌برداری با کیفیت بالا استفاده شد. سرعت شاتر این دوربین بین ۱/۴۰۰۰ تا ۳۰ ثانیه قابل تنظیم بود و امکان تصویربرداری پیوسته با نرخ ۵ فریم بر ثانیه را داشت.

جهت تحلیل حرکت داخلی قطره، از دانه‌های رنگی طلایی به‌عنوان نشانگر استفاده شد. با پردازش تصاویر ثبت‌شده در محیط MATLAB، تغییرات شکل، شکست، و جابجایی قطره تحلیل گردید. ابعاد قطره پیش و پس از برخورد موج ضربه‌ای، بر اساس تعداد

پیکسل‌های تصاویر محاسبه شد. نتایج نشان داد که موج ضربه‌ای تولید شده با عدد ماخ ۱ تا ۱/۲ به‌طور قابل‌توجهی بر روی قطره تأثیر گذاشته و تغییرات دینامیکی مهمی ایجاد کرده است.

این روش نه تنها در شرایط استاندارد فشار و دما بازتولیدپذیری بالایی داشت، بلکه امکان تحلیل دقیق ویژگی‌های موج ضربه‌ای و تعامل آن با قطره را فراهم کرد.



شکل ۱- تصویر تجهیزات آزمایش

۴- نتایج

تعامل موج ضربه با قطره را می‌توان از دو جنبه مختلف مورد بررسی قرار داد. نخست، تأثیر موج ضربه‌ای ناشی از برخورد با قطره که موجب فرآیند انکسار موج می‌شود. این انکسار، تغییر ساختار موج ضربه و تغییر میدان جریان پیرامون قطره را به همراه دارد. تغییرات جریان اطراف قطره، به‌ویژه در نواحی بالادست و پایین‌دست، به دلیل انحراف موج و ایجاد نواحی فشار بالا و پایین، نقش مهمی در پایداری و تغییر شکل قطره ایفا می‌کند. به‌علاوه، تغییر در میدان جریان، فرآیند انتقال حرارت و جرم را در ناحیه مرزی تقویت می‌کند.

جنبه دوم به موج انتقالی داخل قطره مربوط می‌شود که تحت تأثیر تفاوت در سرعت صوت در مایع قرار دارد. این موج انتقالی می‌تواند با ایجاد جت جریان داخلی و تشکیل گردابه‌ها (ورتکس) در مایع، به تغییرات دینامیکی داخل قطره منجر شود. این رفتار دینامیکی که ناشی از بازتاب‌ها و رفت‌وبرگشت‌های موج در داخل قطره است، باعث پدیده‌هایی چون تلو تلو خوردن قطره می‌شود. چنین تغییراتی در دینامیک داخلی قطره نه تنها ساختار داخلی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه نقش کلیدی در انتقال انرژی و تغییر شکل آن ایفا می‌کند.

در این تحقیق، تأثیر موج ضربه بر قطره‌های مایع (آب و گازوئیل) که از میله سوزن آویزان شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفت. قطره‌ها در شرایط ایستا به سوزن متصل شده و موج ضربه با شدت مشخص به آنها برخورد کرد. برخورد موج ضربه به قطره باعث ایجاد تغییرات پیچیده در ساختار و شکل آن شد.

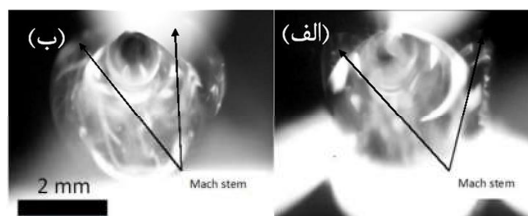
بر اساس اندازه‌گیری انرژی الکتریکی ذخیره‌شده و تخلیه‌شده در سیستم، عدد ماخ تولید شده ۱/۰۶ محاسبه گردید. با توجه به این مقدار، با استفاده از روابط هیدرودینامیکی و معادلات ضربه، می‌توان سرعت موج ضربه و همچنین سرعت جریان هوای پشت موج ضربه را تعیین کرد. به طور خاص، از روابط ۴-۶ برای محاسبات ماخ جریان استفاده شده است که ارتباط مستقیم میان ماخ جریان و سرعت‌های مربوطه را فراهم می‌کند.

جدول ۱- نتایج هیدرو دینامیکی موج ضربه جریان

M_1	M_2	P_2/P_1	ρ_2/ρ_1	T_2/T_1	$V_s (m/s)$	$V_g (m/s)$
۱.۰۶	۰.۹۴۴	۱.۱۶۹۱	۱.۱۰۰۹	۱.۰۳	۳۶۸.۰۲	۳۳.۷۴

در مراحل اولیه، برخورد موج به سطح قطره موجب ایجاد ناپایداری‌های هیدرو دینامیکی از نوع Kelvin-Helmholtz و Rayleigh-Taylor شد. این ناپایداری‌ها منجر به انتشار امواج سطحی در قطره و ایجاد آشفتگی‌های داخلی شدند. همچنین، امواج انعکاسی و عبوری از قطره باعث تقویت تغییر شکل سطح و تولید الگوهای پیچیده جریان داخلی شدند.

یکی از ویژگی‌های برجسته مشاهده شده، تشکیل Mach Stem در انتهای قطره بود که به دلیل تداخل امواج ضربه عبوری و انعکاسی در ناحیه جلویی قطره ایجاد شد و به تشکیل یک نقطه سه گانه (Triple Point) انجامید. این ساختارها باعث تمرکز فشار در بخش‌هایی از سطح قطره شده و ناپایداری‌های کلون-هلمهولتز و رایلی-تیلور را تقویت کردند. در نتیجه، تغییرات شدیدی در سطح و داخل قطره رخ داد و در مواردی، جت‌های مایع از لبه‌های قطره خارج شدند. تحلیل این رفتارها با استفاده از اعداد بدون بعد وبر و آنسرج، بینشی عمیق‌تر از تأثیر خواص فیزیکی مایعات ارائه می‌دهد.

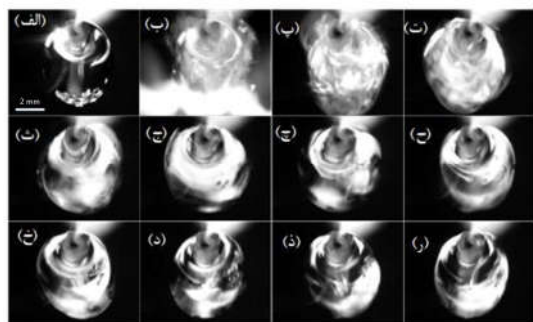


شکل ۲- شکل گیری امواج انعکاسی و Mach stem و نقطه سه گانه. شکل الف- قطره آب و شکل ب- قطره گازوئیل

در شکل ۲ مشاهده شد که قطره آب به دلیل کشش سطحی بالا و آنسرج پایین، ساختار Mach Stem و نقطه سه گانه را واضح‌تر نشان می‌دهد و انتشار امواج انعکاسی و عبوری در سطح آن متقارن‌تر است؛ بنابراین آشفتگی داخلی کمتر بوده و ناپایداری رایلی-تیلور با سرعت کمتری رشد می‌کند، که بیانگر پایداری بالاتر آب در برابر موج ضربه است. در مقابل، قطره گازوئیل با کشش سطحی کمتر و آنسرج بالاتر، سریع‌تر تغییر شکل داده و فشار ناشی از تداخل امواج موجب رشد سریع ناپایداری کلون-هلمهولتز، تشکیل جت‌های مایع و آشفتگی داخلی بیشتر شد. این رفتار نشان‌دهنده حساسیت بالاتر گازوئیل به نیروهای برشی و عدد وبر بالاتر آن است، در حالی که آب با وبر و آنسرج پایین‌تر پایداری بیشتری در برابر شکست و تغییرات دینامیکی دارد. این تفاوت‌ها نقش مهم خواص فیزیکی مایعات در واکنش به موج ضربه را برجسته می‌کنند.

برای بررسی تأثیر موج ضربه بر جریان داخلی قطره، دانه‌های رنگی به داخل قطرات آب و گازوئیل وارد شدند. پیش از برخورد موج، دانه‌ها در سکون قرار داشتند و هیچ جریانی در داخل قطره مشاهده نمی‌شد که نشان‌دهنده وضعیت پایدار اولیه بود. با برخورد موج، جریان‌های داخلی هر دو مایع به‌طور قابل‌توجهی تغییر کردند. در شکل ۳، پس از

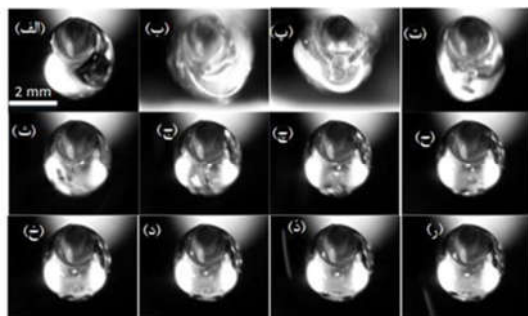
برخورد موج از پایین به قطره آب، دانه‌ها به سرعت وارد تلاطم شده و حرکات پیچیده‌ای شامل چرخش و جابجایی غیرخطی را آغاز کردند. این رفتار نشان‌دهنده شکل‌گیری جریان‌های داخلی ناشی از تغییرات ناگهانی فشار و گرادیان سرعت است. همچنین کل قطره به‌طور ملایم حول نقطه تعلیق خود چرخید و حالت نوسانی و تلاطم پیدا کرد.



شکل ۳- قطره آب حاوی رنگدانه و قطر قطره 4.5mm و $Oh_{W-4.5} = 0.0018$ و $We_{W-4.5} = 83.71$

مشاهدات مشابهی در مورد برخورد موج ضربه از پایین به قطره گازوئیل ثبت شد که در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این قطره نیز موج ضربه باعث ایجاد تلاطم در محتویات داخلی شد و دانه‌های رنگی حرکت پیچیده‌ای را آغاز کردند. با این حال، به دلیل تفاوت در خواص فیزیکی مانند لزجت و کشش سطحی، رفتار جریان داخلی در گازوئیل با آب متفاوت بود. چرخش کلی قطره گازوئیل آرام‌تر و دامنه آشفتگی‌های داخلی کمتر بود، که این تفاوت‌ها نشان‌دهنده حساسیت میدان جریان داخلی به خواص سیال است.

پدیده‌های مشاهده شده، از جمله چرخش و آشفتگی محتویات داخلی، به تأثیر مستقیم فشار موج ضربه بر دینامیک داخلی قطره و ارتباط آن با ناپایداری‌های Kelvin-Helmholtz و Rayleigh-Taylor اشاره دارند. این تحلیل‌ها به درک بهتر تأثیر موج ضربه بر ساختارهای داخلی قطرات مختلف کمک می‌کنند.



شکل ۴- قطره گازوئیل حاوی رنگدانه و قطر قطره 3.8mm و $Oh_{D-3.8} = 0.0142$ و $We_{D-3.8} = 203$.

شکل ۵ روند برخورد موج ضربه از سمت راست با قطرات آب و گازوئیل را نشان می‌دهد. در قطره آب، به دلیل عدد وبر پایین‌تر و کشش سطحی بالاتر، تغییر شکل تدریجی بوده و قطره به تدریج به فرم دوکی تبدیل شد؛ ساختار کلی حفظ گردید و ناپایداری رایلی-تیلور

رشد آرام‌تری داشت. در مقابل، قطره گازوئیل با وبر بالاتر و کشش سطحی کمتر، به سرعت دچار شکست سطحی و پراکندگی شد که بیانگر حساسیت بیشتر آن به نیروهای برشی و نقش کلیدی عدد آنسرج بالا در ناپایداری هیدرودینامیکی است.

در شکل ۶، زمانی که موج از پایین به قطرات برخورد کرد، قطره آب به دلیل کشش سطحی و چسبندگی بیشتر، تغییرات محدودتری داشت و سریع‌تر به حالت تعادل بازگشت. اما قطره گازوئیل نوسانات و پیچش‌های داخلی شدیدتری نشان داد و بخشی از آن از نقطه تعلیق جدا شد. جریان‌های داخلی گازوئیل نامنظم‌تر بوده و مدت‌زمان بیشتری برای بازگشت به تعادل نیاز داشتند ابعاد قطره نیز اثرگذار بود: قطره‌های بزرگ‌تر به دلیل سطح تماس بیشتر، آشفتگی داخلی و ناپایداری‌های Kelvin-Helmholtz و Rayleigh-Taylor شدیدتری داشتند، در حالی که قطرات کوچک‌تر رفتار ملایم‌تری نشان دادند. همچنین پدیده کاویتاسیون در قطرات بزرگ‌تر بارزتر بود؛ رشد و فروپاشی سریع حباب‌ها موجب آشفتگی داخلی و شکست شدیدتر شد. علاوه بر این، جدایش ذرات سطحی و تبخیر ناشی از کاهش فشار در اثر موج ضربه، به‌ویژه در قطرات گازوئیل، مشهود بود.

در شکل ۶، زمانی که موج از پایین به قطرات برخورد کرد، قطره آب به دلیل کشش سطحی و چسبندگی بیشتر، تغییرات محدودتری

داشت و سریع‌تر به حالت تعادل بازگشت. اما قطره گازوئیل نوسانات و پیچش‌های داخلی شدیدتری نشان داد و بخشی از آن از نقطه تعلیق جدا شد. جریان‌های داخلی گازوئیل نامنظم‌تر بوده و مدت‌زمان بیشتری برای بازگشت به تعادل نیاز داشتند.

ابعاد قطره نیز اثرگذار بود: قطره‌های بزرگ‌تر به دلیل سطح تماس بیشتر، آشفتگی داخلی و ناپایداری‌های Kelvin-Helmholtz و Rayleigh-Taylor شدیدتری داشتند، در حالی که قطرات کوچک‌تر رفتار ملایم‌تری نشان دادند. همچنین پدیده کاویتاسیون در قطرات بزرگ‌تر بارزتر بود؛ رشد و فروپاشی سریع حباب‌ها موجب آشفتگی داخلی و شکست شدیدتر شد. علاوه بر این، جدایش ذرات سطحی و تبخیر ناشی از کاهش فشار در اثر موج ضربه، به‌ویژه در قطرات گازوئیل، مشهود بود.

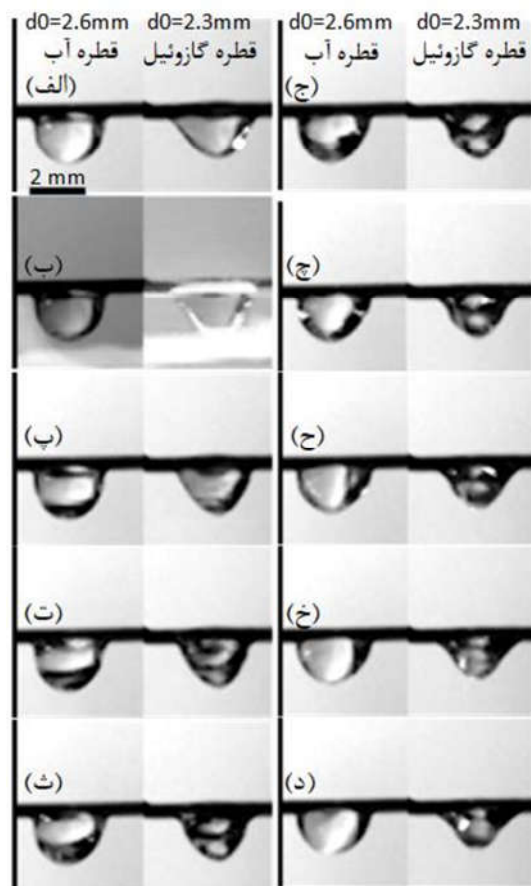
در مجموع، مقایسه رفتار قطرات نشان داد که کشش سطحی کمتر و لزجت بالاتر گازوئیل و Oh و We بالاتر منجر به تغییر شکل سریع‌تر، ناپایداری‌های سطحی قوی‌تر، پراکندگی ذرات و آشفتگی داخلی بیشتر می‌شود. در مقابل، آب به دلیل وبر و آنسرج پایین‌تر پایداری بیشتری در برابر موج ضربه دارد.



شکل ۵- گامهای مختلف تعامل قطره با موج ضربه با عدد ماخ ۰/۰۶. تعامل موج ضربه برخوردکننده از سمت راست به قطره. دو ستون سمت راست مربوط به قطره آب و دو ستون سمت چپ قطره گازوئیل می‌باشد. گامهای متوالی پس از برخورد موج ضربه. $Oh_{D-3.6} = We_{D-3.6} = 192.87$ و $Oh_{W-4.45} = We_{W-4.45} = 82.78$ و $Oh_{W-4.2} = 0.0018$ و $We_{W-4.2} = 78.13$ و $Oh_{D-4} = 0.0139$ و $We_{D-4} = 214.3$ و 0.0146 و 0.0018

مشاهده می‌شود.

قطره‌های بزرگ‌تر به دلیل We و Oh بالاتر تغییر شکل سطحی گسترده‌تر، آشفته‌گی داخلی بیشتر و جدا شدن ذرات سطحی نشان می‌دهند. همچنین کاهش فشار لحظه‌ای و کاویتاسیون در قطرات بزرگ‌تر آشفته‌گی داخلی و اثرات مکانیکی شدیدی ایجاد می‌کند. قطره‌های کوچک‌تر به دلیل نسبت بالاتر سطح به حجم و نیروی کشش سطحی کمتر، نسبت به نیروهای اینرسی حساس‌تر بوده و سریع‌تر دچار فروپاشی می‌شوند. ناپایداری‌های کلین-هلمهولتز، ناشی از اختلاف



شکل ۶- رفتار آب و گازوئیل. موج ضربه که از پایین برخورد می‌کند. $We_{D-2.3} = 0.0023$ و $Oh_{W-2.6} = 0.0023$ و $We_{W-2.6} = 48.34$ و $Oh_{W-2.3} = 0.0183$ و 123.22

سرعت بین گاز و مایع، و رایلی-تیلور، ناشی از اختلاف چگالی، همزمان روی سطح قطره ظاهر می‌شوند و شدت آن‌ها با We و ابعاد قطره افزایش می‌یابد.

در مجموع، تغییرات فشار داخلی، کاویتاسیون، جدا شدن ذرات و آشفته‌گی‌های داخلی تحت تأثیر مستقیم We و Oh هستند و قطره گازوئیل به دلیل کشش سطحی کمتر و لزجت بالاتر، تغییر شکل سریع‌تر و ناپایداری‌های سطحی شدیدتری نشان می‌دهد که موجب پراکندگی بیشتر ذرات و تشدید جریان‌های داخلی می‌شود. این نتایج

بررسی زمانی تغییر شکل قطرات نشان داد که خواص فیزیکی مایع نقشی اساسی در پاسخ دینامیکی به موج ضربه‌ای دارند. این نتایج بر اهمیت تحلیل دقیق‌تر اندرکنش موج ضربه با مایعات مختلف و نقش پارامترهای We و Oh در انتقال انرژی تأکید دارند.

زمان مشخصه t_0 می‌تواند به‌صورت ترکیبی از خواص فیزیکی مایع نظیر چگالی (ρ)، تنش سطحی (σ)، و قطر اولیه قطره (d_0) بیان شود. در بسیاری از مطالعات مرتبط، زمان مشخصه به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$t_0 = \sqrt{\frac{\rho d_0^3}{\sigma}} \quad (7)$$

این رابطه نشان می‌دهد که مواد با چگالی و تنش سطحی بالاتر، زمان مشخصه بیشتری دارند و به همین دلیل در مقیاس بی‌بعدی زمان، واکنش کندتری نشان می‌دهند.

جدول ۲- مقایسه خواص فیزیکی آب و گازوئیل

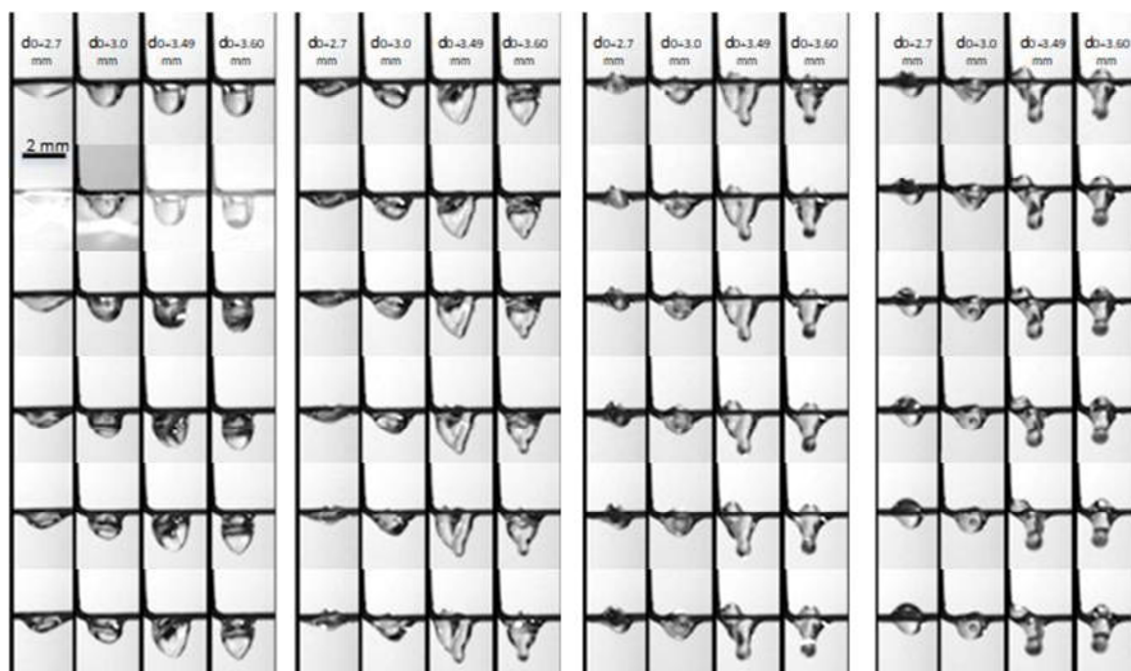
خواص فیزیکی	آب	گازوئیل
چگالی (kg/m^3)	۱۰۰۰	۸۲۰
کشش سطحی (N/m)	۰/۰۷۲	۰/۰۲۸
لزجت ($mPa.s$)	۰/۸۹	۳/۰

آب با چگالی و تنش سطحی بالاتر نسبت به گازوئیل زمان مشخصه طولانی‌تری دارد و برای آغاز تغییر شکل نیاز به زمان بیشتری دارد. ضرایب امپدانس صوتی هوا و مایع نیز در انتقال انرژی موج ضربه‌ای به قطره مؤثر هستند؛ گازوئیل به دلیل چگالی کمتر و تنش سطحی پایین‌تر، انرژی بیشتری جذب کرده و سریع‌تر وارد مراحل تغییر شکل می‌شود، که با آشفته‌گی‌های داخلی، نوسانات سطحی و پرتاب ذرات قابل مشاهده است. تحلیل بر اساس زمان بی‌بعد نشان می‌دهد که زمان بی‌بعد کمتر در گازوئیل شروع سریع‌تر تغییر شکل را نسبت به آب نشان می‌دهد و این تفاوت نقش مهمی در پایداری و رفتار قطره در برابر موج ضربه دارد. هر قطره در حالت تعادل دارای فشار داخلی ناشی از برآیند فشار مایع و کشش سطحی است که با اندازه و خواص فیزیکی آن مرتبط بوده و شکل قطره را حفظ می‌کند. برخورد موج ضربه موجب انکسار موج، تغییر فشار داخلی و آشفته‌گی‌های هیدرودینامیکی شده و می‌تواند فرآیند شکست قطره را آغاز کند. در این تحقیق، اثر ابعاد قطره گازوئیل بر پاسخ به موج ضربه با تحلیل اعداد بی‌بعد ویر (We) و آنسرج (Oh) بررسی شده است.

شکل ۷ نتایج مراحل تغییر شکل قطره‌ها با قطره‌های مختلف نشان می‌دهد که افزایش ابعاد قطره موجب افزایش عدد ویر و تأثیر قابل‌توجه بر دینامیک تغییر شکل می‌شود. در قطره‌های بزرگ‌تر، مقادیر بالاتر We اثر نیروهای آیرودینامیکی و برشی را افزایش داده و نوسانات و آشفته‌گی ناشی از موج ضربه‌ای تشدید می‌شود. ناپایداری‌های سطحی کلین-هلمهولتز و رایلی-تیلور در قطره‌های بزرگ‌تر واضح‌تر هستند، در حالی که در قطره‌های کوچک‌تر به دلیل غلبه نیروی کشش سطحی این ناپایداری‌ها کاهش می‌یابند. عدد آنسرج (Oh) نیز جریان‌های داخلی و تلاطم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در قطره‌های با Oh بالاتر، حرکت مایع داخلی و گاهی انتقال آن به بالای قطره یا میله آویزان شدن

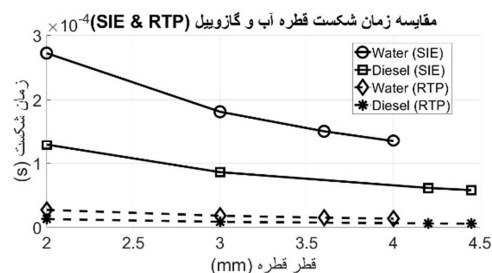
نقش اساسی We و Oh در تحلیل پایداری سطحی، انتقال انرژی داخلی و رفتار دینامیکی قطرات تحت موج ضربه‌ای را نشان می‌دهند. در شکل ۸ دو قطره گازوئیل با قطرهای متفاوت $(2/2)$ و $(3/0)$ میلی‌متر) تحت تأثیر موج ضربه بررسی شده‌اند. قطره کوچک‌تر به دلیل نسبت بالاتر سطح به حجم، نیروی کشش سطحی کمتری نسبت به نیروی اینرسی تجربه می‌کند و این امر موجب می‌شود تا اثر موج ضربه بر آن شدیدتر باشد. بر اساس عدد وبر (We)، که بیانگر نسبت نیروی اینرسی به کشش سطحی است، قطره کوچک‌تر به دلیل عدد وبر بالاتر پایداری کمتری نشان داده و سریع‌تر دچار فروپاشی می‌شود. در مقابل، قطره بزرگ‌تر به دلیل نیروی کشش سطحی غالب، رفتار پایداری از خود نشان داده و فرآیند تجزیه آن کندتر است. با برخورد موج ضربه به قطرات، ناپایداری‌های کلوین-هلمهولتز و رایلی-تیلور به صورت همزمان روی سطح آنها ظاهر می‌شوند. ناپایداری کلوین-هلمهولتز که ناشی از اختلاف سرعت بین گاز اطراف و مایع داخل قطره است، به ایجاد گرداب‌ها و آشفتگی‌هایی روی سطح قطره منجر می‌شود. شدت این ناپایداری به عدد وبر بستگی دارد؛ در قطرات کوچک‌تر، به دلیل عدد وبر پایین‌تر (که بیانگر نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی است)، نیروی کشش سطحی تأثیر کمتری دارد و ناپایداری سریع‌تر و شدیدتر گسترش می‌یابد. در همین حال، ناپایداری رایلی-تیلور که از اختلاف چگالی بین گاز و مایع ناشی می‌شود، باعث اعوجاج‌های سطحی می‌گردد. این اثر در قطرات بزرگ‌تر به دلیل عدد وبر بالاتر و نیروی کشش سطحی بیشتر، آرام‌تر و با شدت کمتری ظاهر می‌شود. فشار داخلی قطرات نیز تحت تأثیر عدد آنسرج قرار دارد، که بیانگر نسبت نیروهای لزجت به نیروی اینرسی است. در قطرات کوچک‌تر که معمولاً عدد آنسرج کمتری دارند، بازتاب امواج درونی می‌تواند به کاهش فشار در برخی نواحی منجر شود و شرایط ایجاد کاویتاسیون را فراهم

کند. این کاهش فشار به تشکیل حباب‌های کاویتاسیونی در داخل قطره منجر شده و پایداری مایع را کاهش می‌دهد، که در نهایت سرعت فروپاشی را افزایش می‌دهد. در مقابل، قطرات بزرگ‌تر با عدد آنسرج بالاتر به دلیل مقاومت لزجت بیشتر و فشار داخلی بالاتر، در برابر امواج انعکاسی و کاهش فشار مقاوم‌تر بوده و رفتار پایداری نشان می‌دهند. در مجموع، قطره کوچک‌تر به دلیل عدد وبر پایین‌تر (نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی) و تأثیرات قوی‌تر ناپایداری‌های کلوین-هلمهولتز و رایلی-تیلور، سریع‌تر و با شدت بیشتری فروپاشیده است. در مقابل، قطره بزرگ‌تر به دلیل نیروی کشش سطحی غالب و مقاومت بیشتر در برابر کاهش فشار، تجزیه‌ای کندتر و پایداری را تجربه کرده است. این مقایسه نشان می‌دهد که پارامترهای فیزیکی مانند قطر اولیه، کشش سطحی، عدد وبر، و عدد رینولدز تأثیر عمده‌ای بر رفتار دینامیکی قطرات گازوئیل در معرض موج ضربه دارند. ناپایداری‌های کلوین-هلمهولتز و رایلی-تیلور به طور مشخص روی رفتار دینامیکی این دو ماده تأثیرگذار هستند. در قطره گازوئیل، عدد وبر بالاتر به دلیل کشش سطحی پایین‌تر، توسعه سریع‌تر ناپایداری کلوین-هلمهولتز را تسهیل کرده و باعث تشکیل گرداب‌های قوی روی سطح قطره می‌شود. این پدیده در قطره آب به دلیل عدد وبر پایین‌تر و مقاومت ناشی از کشش سطحی بالا محدودتر است. از طرف دیگر، ناپایداری رایلی-تیلور ناشی از اختلاف چگالی، در هر دو ماده ظاهر می‌شود، اما در گازوئیل به دلیل چگالی کمتر و عدد رینولدز پایین‌تر، نقش قوی‌تری در فروپاشی قطره دارد. فشار داخلی قطره نیز به شدت به عدد آنسرج وابسته است، که نشان‌دهنده نسبت نیروی لزجت به نیروی اینرسی است. در قطره آب، عدد اوهنوسرج بالاتر همراه با کشش سطحی قوی‌تر، فشار



شکل ۷- تعامل ۴ قطره گازوئیل در ابعاد مختلف و موج ضربه برخورد کننده از پایین. $We_{D-2.7} = 144.65$ و $Oh_{D-2.7} = 0.0169$ و $We_{D-3} = 160.73$ و $Oh_{D-3} = 0.016$ و $We_{D-3.49} = 186.98$ و $Oh_{D-3.49} = 0.0149$ و $We_{D-3.6} = 192.87$ و $Oh_{D-3.6} = 0.0146$

می‌دهند که با افزایش قطر اولیه، زمان شکست کاهش می‌یابد؛ این رفتار ناشی از کاهش فشار داخلی قطره (مطابق قانون لاپلاس) و کاهش عدد آنسرج است، به طوری که قطرات کوچک‌تر سریع‌تر فروپاشی می‌کنند. در معیار SIE، زمان شکست آب کوتاه‌تر از گازوئیل است زیرا کشش سطحی بالای آب عدد وبر پایین‌تر ایجاد کرده و مقاومت در برابر انرژی موج ضربه را افزایش می‌دهد، اما فرایند شکست را سریع‌تر می‌کند. در معیار RTP، گازوئیل زمان شکست بیشتری دارد که به چگالی کمتر و عدد رینولدز پایین آن برمی‌گردد و رشد ناپایداری رایلی-تیلور را کند می‌کند. به طور کلی، زمان شکست تحت SIE طولانی‌تر از RTP است زیرا SIE وابسته به رشد ناپایداری‌ها و جریان داخلی است، در حالی که RTP بیشتر با اثر فوری انرژی موج ضربه مرتبط است. همچنین، در قطرات بزرگ‌تر، شیب منحنی‌ها کاهش می‌یابد، به این معنا که افزایش قطر و عدد وبر اثر کمتری بر زمان شکست دارد و نیروهای خارجی و معیار ناپایداری نقش اصلی را ایفا می‌کنند. در مجموع، اندازه قطره و خواص فیزیکی مانند کشش سطحی، چگالی و اعداد بی‌بعد Oh ، We و Re تعیین‌کننده روند زمان شکست هستند؛ آب با کشش سطحی و چگالی بالاتر مقاومت بیشتری در برابر ناپایداری SIE نشان می‌دهد اما تحت RTP سریع‌تر فروپاشی می‌کند، در حالی که گازوئیل رفتار متفاوتی دارد.



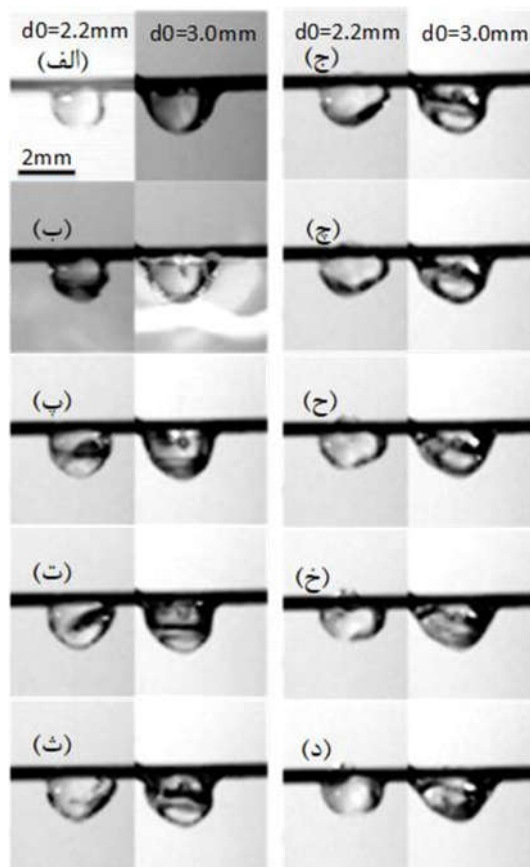
شکل ۹- زمان شکست قطره آب و گازوئیل برای جریان با ماخ ۱.۰۶

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که رفتار قطرات آب و گازوئیل در برابر موج ضربه با عدد ماخ ۱.۰۶ تحت تأثیر خواص فیزیکی و اعداد بدون بعدی چون وبر (We) و آنسرج (Oh) تفاوت‌های چشمگیری دارد. قطرات آب، به دلیل چگالی و کشش سطحی بالاتر، عمدتاً دچار ناپایداری رایلی-تیلور شده و شکست آن‌ها کندتر و تدریجی است. در مقابل، گازوئیل با کشش سطحی کمتر و لزجت بالاتر، سریع‌تر به ناپایداری کلوین-هلمهولتز واکنش نشان داده و گرداب‌ها و آشفتگی‌های شدیدتری روی سطح قطره شکل می‌گیرد.

بررسی اعداد بدون بعد نشان داد که قطرات با $We > 100$ تحت غلبه نیروهای اینرسی شکست شدیدی را تجربه می‌کنند، در حالی که قطرات کوچک‌تر با $We < 10$ رفتار لزج‌تر و تغییر شکل آرام‌تری دارند. لزجت بالاتر گازوئیل (Oh) بیشتر (مقاومت داخلی را افزایش داده اما به توسعه سریع‌تر آشفتگی سطحی و شکست زودهنگام منجر می‌شود، در حالی که در آب، کشش سطحی بالا مانع توسعه سریع این آشفتگی‌ها می‌گردد.

داخلی بالاتری ایجاد کرده و مانع کاهش سریع فشار درون قطره و وقوع کاویتاسیون می‌شود. در مقابل، قطره گازوئیل با عدد آنسرج پایین‌تر و فشار داخلی کمتر، تحت تأثیر امواج انعکاسی مستعد کاهش فشار و تشکیل حباب‌های کاویتاسیونی است. این حباب‌ها پایداری داخلی قطره را کاهش داده و فروپاشی آن را تسریع می‌کنند.



شکل ۸- رفتار دو قطره گازوئیل. با قطرهای متفاوت با موج ضربه که از پایین برخورد می‌کند. $Oh_{D-2.2} = 0.0023$ و $We_{D-2.2} = 48.37$ و $Oh_{D-2.2} = 0.0183$ و $We_{D-3} = 123.22$

در نتیجه، قطرات گازوئیل به دلیل کشش سطحی پایین‌تر، عدد وبر بالاتر (نشان‌دهنده نسبت نیروی اینرسی به کشش سطحی)، و حساسیت بیشتر به ناپایداری‌های کلوین-هلمهولتز و رایلی-تیلور، سریع‌تر از قطرات آب فروپاشیده و تجزیه می‌شوند. از سوی دیگر، قطرات آب با کشش سطحی بالاتر و عدد آنسرج بیشتر، مقاومت بیشتری در برابر فروپاشی نشان می‌دهند. این مقایسه نشان می‌دهد که خواص فیزیکی مانند کشش سطحی، فشار داخلی، و پارامترهای دینامیکی مانند اعداد وبر، آنسرج، و رینولدز تأثیر عمده‌ای بر رفتار دینامیکی قطرات در برابر موج ضربه دارند. تحلیل فوق بر اهمیت نقش این عوامل در تعیین سرعت و شدت فروپاشی قطرات و تفاوت‌های مواد مختلف تأکید دارد.

در شکل ۹ نتایج محاسبات زمان شکست قطرات آب و گازوئیل بر اساس معیارهای SIE و RTP نشان داده شده است. منحنی‌ها نشان

- [21] Krzeczowski SA. Measurement of liquid droplet disintegration mechanisms. *International Journal of multiphase flow*. 1980 Jun 1;6(3):227-39.
- [22] Gelfand BE. Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag. *Progress in energy and combustion science*. 1996 Jan 1;22(3):201-65.
- [23] Guildenbecher DR, López-Rivera C, Sojka PE. Secondary atomization. *Experiments in Fluids*. 2009 Mar;46(3):371-402.
- [24] Sembian S, Liverts M, Tillmark N, Apazidis N. Plane shock wave interaction with a cylindrical water column. *Physics of Fluids*. 2016 May 1;28(5).
- [25] Shen S, Li J, Tang C, Liu J, Ma X, Fan W. The viscous effect on the transient droplet deformation process under the action of shock wave. *Atomization and Sprays*. 2019;29(2).

برهم‌کنش موج ضربه با قطرات موجب شکل‌گیری جریان‌های داخلی پیچیده، توربولانس و گردابه‌ها شد که نقشی کلیدی در تشدید ناپایداری‌ها و فروپاشی قطره ایفا می‌کنند. همچنین امکان وقوع کاویتاسیون و فروپاشی سریع حباب‌ها در داخل قطره مشاهده شد که خود پایداری قطره را کاهش و فروپاشی را تسریع می‌کند. در مجموع، نتایج نشان دادند که ناپایداری‌های رایلی-تیلور و کلون-هلمهولتز مکانیزم‌های اصلی شکست قطره هستند و تفاوت در خواص فیزیکی و اعداد بدون‌بعد تعیین‌کننده نوع و شدت واکنش قطره به موج ضربه‌اند. این یافته‌ها برای بهینه‌سازی فرآیندهایی چون پاشش سوخت و تحلیل جریان‌های چندفازی اهمیت کاربردی دارند.

۶- مراجع

- [1] Jones DL. Intermediate strength blast wave. *The Physics of Fluids*. 1968 Aug 1;11(8):1664-7.
- [2] Plooster MN. Shock waves from line sources. Boulder, CO, USA: National Center for Atmospheric Research; 1968 Nov.
- [3] Engel OG. Fragmentation of water drops in the zone behind and air shock. *J. Res. Matn. Bur. Stand.* 1958;69:245.
- [4] Hanson AR, Domich EG, Adams HS. Shock tube investigation of the breakup of drops by air blasts. *Physics of Fluids*. 1963 Aug;6(8):1070-80.
- [5] Hinze JO. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. *AIChE journal*. 1955 Sep;1(3):289-95.
- [6] Nicholls JA, Ranger AA. Aerodynamic shattering of liquid drops. *Aiaa Journal*. 1969 Feb;7(2):285-90.
- [7] Joseph DD, Belanger J, Beavers GS. Breakup of a liquid drop suddenly exposed to a high-speed airstream. *International Journal of Multiphase Flow*. 1999 Sep 1;25(6-7):1263-303.
- [8] Pilch M, Erdman CA. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop. *International journal of multiphase flow*. 1987 Nov 1;13(6):741-57.
- [9] Wierzbna A, Takayama K. Experimental investigation of the aerodynamic breakup of liquid drops. *AIAA journal*. 1988 Nov;26(11):1329-35.
- [10] Theofanous TG, Li GJ, Dinh TN. Aerobreakup in rarefied supersonic gas flows. *J. Fluids Eng.*. 2004 Jul 1;126(4):516-27.
- [11] Theofanous TG, Li GJ. On the physics of aerobreakup. *Physics of fluids*. 2008 May 1;20(5).
- [12] Theofanous TG. Aerobreakup of Newtonian and viscoelastic liquids. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2011 Jan 21;43(1):661-90.
- [13] Theofanous TG, Mitkin VV, Ng CL, Chang CH, Deng X, Sushchikh S. The physics of aerobreakup. II. Viscous liquids. *Physics of Fluids*. 2012 Feb 1;24(2).
- [14] Sharma S, Singh AP, Rao SS, Kumar A, Basu S. Shock induced aerobreakup of a droplet. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021 Dec;929:A27.
- [15] Igra D, Takayama K. Investigation of aerodynamic breakup of a cylindrical water droplet. *Atomization and Sprays*. 2001;11(2).
- [16] Liu N, Wang Z, Sun M, Wang H, Wang B. Numerical simulation of liquid droplet breakup in supersonic flows. *Acta Astronautica*. 2018 Apr 1;145:116-30.
- [17] Meng JC, Colonius T. The Effects of Shock Strength on Droplet Breakup. In *International Symposium on Shock Waves 2013 Jul 14 (pp. 1535-1540)*. Cham: Springer International Publishing.
- [18] Guan B, Liu Y, Wen CY, Shen H. Numerical study on liquid droplet internal flow under shock impact. *AIAA journal*. 2018 Sep;56(9):3382-7.
- [19] Henderson LF. On the refraction of shock waves. *Journal of Fluid Mechanics*. 1989 Jan;198:365-86.
- [20] Ben-Dor G, Ben-Dor G. Shock wave reflection phenomena. Berlin: Springer; 2007 Apr.