

رسالة محمد



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

بررسی تجربی برخورد ذرات کروی به سطح مشترک گاز- مایع

نگارنده: مریم رضانی

اساتید راهنما:

دکتر محسن نظری

دکتر محمد محسن شاه مردان

خرداد ۱۳۹۷

شماره: ۱۱۴ / ۲۹۷ / ۳
تاریخ: ۹۷ / ۴ / ۱۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۲) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه
دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم **مریم رضائی** با شماره دانشجویی **۹۴۰۸۴۷۴** رشته **مهندسی مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی** تحت عنوان **بررسی تجربی برخورد ذرات کروی به سطح مشترک گاز-مایع** که در تاریخ **۹۷/۰۳/۲۲** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می-گردد:

قبول (با درجه:) <input checked="" type="checkbox"/>	مردود <input type="checkbox"/>
نظري <input type="checkbox"/>	عملي <input checked="" type="checkbox"/>

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
	استادیار	دکتر محمد ضامن	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر محمود نوروزی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر احمد نظری	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

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

پدر و مادر عزیزم که لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و

تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز آنهاست.

تشکر و قدردانی

ستایش و سپاس اولاً مخصوص خداوندی است که منطق را فطرتاً در وجود آدمی نهاد.
و طیفه خود می دانم از راهمبانی استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر محسن نظری که
در به ثمر رسیدن این پایان نامه از هیچ کلمی دریغ نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته
باشم نیز از جناب آقای دکتر محمد محسن شاه مردان که شایسته سپاس و تجلیل اند،
به واسطه تلاش ایشان که بر پیشرفت علمی اینجانب تأثیرگذار بودند، سپاسگزارم.

تعهد نامه

اینجانب **مریم رضائی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی** دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بررسی تجربی برخورد ذرات کروی با سطح مشترک گاز - مایع** 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 صنعتی 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 صنعتی 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 ذرات جامد با سطح مشترک گاز - مایع کاربرد وسیعی در صنعت دارد و اخیراً مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. یکی از کاربرهای مهم این فیزیک، جداسازی ذرات ارزشمند از ناخالصی‌ها در صنایع معدنی است. فیلم فلوتاسیون یک روش برای جداسازی ذرات معدنی آب‌گریز از ذرات آب‌دوست است. در پژوهش حاضر، به منظور شبیه‌سازی این روش، برخورد ذرات آب‌گریز کروی با سطح مشترک هوا - مایع، مورد مطالعه قرار گرفت. هدف پژوهش حاضر، بدست آوردن سرعت بحرانی برخورد است که ذره آب‌گریز روی سطح مایع شناور می‌ماند طوریکه در سرعت‌های بالاتر از سرعت بحرانی، به طور کامل در مایع نفوذ می‌کند. برای پیش‌بینی سرعت بحرانی، یک مدل ریاضی بر اساس موازنه انرژی ارائه شده است. ذرات از جنس تفلون در قطرهای ۳ تا ۵ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند. از آب مقطر و محلول پلیمری باگر به عنوان سیال آزمایش استفاده شد. با استفاده از یک دوربین پرسرعت ۴۵۰۰ فرم در ثانیه، سقوط ذرات در مایع عکس‌برداری شده است.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها دو رژیم شناوری و نفوذ را نشان می‌دهد. سرعت‌های بحرانی برای همه اندازه‌های ذره محاسبه گردید و پس از پردازش تصاویر متوالی، چگونگی حرکت ذره درون سیال به‌دست آمد. برای اولین بار ماکزیمم عمق نفوذ، عمق برگشتی، ارتفاع برگشتی و عمق شکست برای هر ذره تعیین شد و از مقایسه آن‌ها مشخص شد که در سرعت‌های بحرانی و نزدیک آن نفوذ ذره با نوساناتی همراه است و هرچه سرعت از مقدار بحرانی بیشتر شود تعداد نوسانات کاهش یافته تا اینکه در سرعت‌های بالاتر، ذره بدون هیچ نوسانی از سطح مایع جدا می‌شود. وابستگی ماکزیمم عمق نفوذ به ارتفاع سقوط مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش ارتفاع سقوط، ماکزیمم عمق نفوذ نیز افزایش می‌یابد. همچنین به بررسی تاثیر اندازه ذرات بر سرعت بحرانی پرداخته شد و مشاهده شد که با افزایش اندازه ذرات، سرعت بحرانی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، تغییرات سرعت ذره و سرعت خط تماس سه فازی طی نفوذ در سیال در شرایط بحرانی رسم شد و با اندازه‌گیری شتاب حرکت ذره،

تغییرات نیروی وارد بر ذره در حین نفوذ تحلیل شد. مدل ریاضی توسعه داده شده با مشاهدات آزمایش مقایسه شد و مشخص شد که در محدوده مدلسازی با مقادیر داده‌های بدست آمده همخوانی خوبی دارد.

کلمات کلیدی: برخورد ذره، سرعت بحرانی، حفره، زاویه تماس، جریان چند فاز، نفوذ،

شناوری

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه و تاریخچه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۱-۱- مکانیزم برخورد	۲
۱-۱-۲- خاصیت ترشوندگی ذره	۳
۱-۱-۳- معرفی سیالات ویسکوالاستیک	۶
۱-۲- کاربردها	۸
۱-۳- مروری بر تحقیقات گذشته	۱۳
۱-۴- معرفی تحقیق حاضر	۲۱
۲- فصل دوم: تجهیزات و روش آزمایش	۲۳
۲-۱- تجهیزات آزمایش	۲۴
۲-۱-۱- دوربین پرسرعت	۲۴
۲-۱-۲- سیستم نورپردازی	۲۵
۲-۱-۳- پمپ خلاء	۲۵
۲-۱-۴- ذرات مورد استفاده	۲۶
۲-۱-۵- سیالات مورد استفاده	۲۶
۲-۱-۶- همزن هاتپلیت	۲۷
۲-۱-۷- ترازو	۲۸
۲-۱-۸- دستگاه کشش سطحی	۲۹
۲-۱-۹- دستگاه ویسکومتر استوانه‌ای	۳۰
۲-۱-۱۰- دستگاه رئومتر	۳۱
۲-۲- تستهای رئومتری	۳۲
۲-۲-۱- تست ویسکوزیته	۳۲
۲-۲-۲- زمان رهایی از تنش	۳۲

۳۳	۳-۲- مجموعه آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش
۳۵	۴-۲- خلاصه ای از شرایط آزمایش
۳۶	۵-۲- پردازش تصاویر
۳۹	۳- فصل سوم: مدل ریاضی
۴۰	۱-۳- موازنه انرژی
۴۱	۱-۱-۳- تغییرات انرژی مایع
۴۵	۲-۳- کار در معادله انرژی
۴۵	۱-۲-۳- درگ سیال
۴۶	۲-۲-۳- شناوری
۴۸	۳-۲-۳- کشش سطحی
۴۸	۳-۳- ترکیب معادلات
۵۱	۴- فصل چهارم: نتایج و بحث
۵۲	۱-۴- مشاهدات آزمایش
۶۵	۲-۴- تحلیل سرعت ذره در شرایط بحرانی
۷۴	۳-۴- تحلیل مدل ریاضی
۷۶	۴-۴- تحلیل رفتار نفوذ ذرات در سرعت برخورد یکسان
۸۳	۵-۴- تحلیل نیروی وارد بر ذره در شرایط بحرانی
۸۷	۵- فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۸	۱-۵- نتیجه گیری
۸۹	۲-۵- پیشنهادات
۹۱	پیوست الف: محاسبه زمان رهایی از تنش سیال باگر
۹۵	پیوست ب: محاسبه خطای مطلق، تکرارپذیری و عدم قطعیت
۹۷	۶- مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ مکانیزم برخورد ذره کروی به سطح مشترک گاز - مایع ۳
- شکل ۲-۱ اندازه‌گیری زاویه تماس استاتیک ذرات کروی [۳] ۴
- شکل ۳-۱ زاویه تماس استاتیک قطرات آب روی ذره کروی از جنس تفلون [۳] ۵
- شکل ۴-۱ زاویه تماس پیشرو قطرات آب روی سطح ذره کروی از جنس تفلون [۳] ۶
- شکل ۵-۱ دیاگرام پیپکین [۶] ۸
- شکل ۶-۱ تصفیه کننده ونتوری ۹
- شکل ۷-۱ فرایند خشک کردن با اسپری ۱۲
- شکل ۸-۱ هندسه سطح مشترک (مسطح یا منحنی) [۲۱] ۱۴
- شکل ۹-۱ چسبیدن قطره روی ذره پس از برخورد [۸] ۱۵
- شکل ۱۰-۱ برگشت قطره از سطح ذره پس از برخورد [۸] ۱۶
- شکل ۱۱-۱ فروپاشی ذره پس از برخورد با سطح ذره [۸] ۱۶
- شکل ۱۲-۱ پخش شدن قطره حول ذره پس از برخورد [۲۵] ۱۷
- شکل ۱۳-۱ تشکیل قطرات ثانویه حول ذره پس از برخورد [۲۵] ۱۸
- شکل ۱۴-۱ تشکیل دنباله مخروطی شکل پس از برخورد [۲۵] ۱۸
- شکل ۱۵-۱ برخورد ذره به قطره با اندازه بزرگتر الف) نفوذ جزئی ذره درون قطره ب) نفوذ کامل ذره درون قطره ج) نفوذ کامل ذره درون قطره و برخورد به سطح داخلی قطره و برگشت به عقب [۹] ۱۹

- شکل ۱-۲ دوربین سرعت بالا (PCO.Dimax S/4500 frames per second) ۲۴
- شکل ۲-۲ پروژکتور ۲۰۰۰ وات شرکت UNIMAT ۲۵
- شکل ۳-۲ پمپ خلاء شرکت به مدل C55JXHRL-4205 ۲۶
- شکل ۴-۲ ذرات کروی از جنس تفلون (PTFE) ۲۶
- شکل ۵-۲ همزن هات پلیت ۲۸
- شکل ۶-۲ ترازوی شرکت RADWAG مدل PS 510/C/1 ۲۹
- شکل ۷-۲ دستگاه تست کشش سطحی مایع و گاز (IFT) شرکت Datis Energy ۳۰
- شکل ۸-۲ دستگاه ویسکومتر شرکت BROOKFIELD مدل DV-E /LV ۳۱
- شکل ۹-۲ دستگاه رئومتر MCR300 ساخت شرکت Anton Paar ۳۱
- شکل ۱۰-۲ تغییرات لزجت بر حسب نرخ برش با گر ۱۰۰ [۳۰] ۳۲
- شکل ۱۱-۲ (الف) طرح شماتیک تجهیزات آزمایش مورد استفاده جهت مشاهده برخورد ذرات با سطح مشترک هوا - آب. ا- دوربین پر سرعت ۴۵۰۰ فرم بر ثانیه ب-نازل آزادساز ذره ج- ذره تفلونی د-ظرف کریستالی حاوی مایع ه- مکانیزم تنظیم ارتفاع و- سیستم نورپردازی ز- صفحه پخش نور ح-پمپ خلاء. (ب) تجهیزات در آزمایشگاه. ۳۵
- شکل ۱-۳ برخورد ذره با سرعت بحرانی به سطح مشترک گاز - مایع ۴۰
- شکل ۲-۳ انحنای کویتی در بیشترین عمق نفوذ ذره در شرایط بحرانی ۴۲
- شکل ۳-۳ حجم کنترل طی برخورد ذره بین حالت ابتدایی و انتهایی ۴۲
- شکل ۴-۳ حجم غوطه‌وری ذره در سیال ۴۷
- شکل ۵-۳ ثابت‌های بی‌بعد در لحظه ماکزیمم عمق نفوذ ذره در شرایط بحرانی ۴۹

- شکل ۱-۴ عکس‌های متوالی برخورد ذرات کروی از جنس تفلون در اندازه‌های ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر با سطح مشترک هوا - آب و انواع رژیم‌های برخورد ۵۵
- شکل ۲-۴ عکس‌های متوالی برخورد ذرات کروی از جنس تفلون در اندازه‌های ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر با سطح مشترک هوا - سیال باگر و انواع رژیم‌های برخورد ۵۶
- شکل ۳-۴ حرکت ذرات کروی طی نفوذ درون آب مقطر در شرایط بحرانی ۵۹
- شکل ۴-۴ حرکت ذرات کروی طی نفوذ درون سیال باگر در شرایط بحرانی ۵۹
- شکل ۵-۴ پارامترهای نفوذ طی نوسان ذرات ۶۰
- شکل ۶-۴ تغییرات ماکزیمم عمق نفوذ در شرایط بحرانی برای سه اندازه ذرات ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر در آب مقطر و سیال باگر ۶۳
- شکل ۷-۴ تغییرات ماکزیمم عمق نفوذ با ارتفاع سقوط برای ذرات تفلونی ۶۴
- شکل ۸-۴ تغییرات عمق نرمالیزه شده (x_m/d) در برابر عدد فرود (Fr) برای سقوط ذرات در آب مقطر ۶۴
- شکل ۹-۴ تغییرات عمق نرمالیزه شده (x_m/d) در برابر عدد فرود الاستیک (Fe) برای سقوط ذرات در سیال باگر ۶۵
- شکل ۱۰-۴ تغییرات مکان خط تماس سه فازی روی ذره (x_{TPCL}) بر حسب مکان نقطه سکون ذره (x) در آب مقطر در شرایط بحرانی ۶۶
- شکل ۱۱-۴ تغییرات مکان خط تماس سه فازی روی ذره (x_{TPCL}) بر حسب مکان نقطه سکون ذره (x) در سیال باگر در شرایط بحرانی ۶۶
- شکل ۱۲-۴ شعاع حفره و عمق نفوذ ذره در شرایط بحرانی برای قطر ۳ میلی‌متر ۶۷
- شکل ۱۳-۴ مکان خط تماس سه فازی روی ذره به قطر ۴ میلی‌متر (x_{TPCL}) بر حسب مکان نقطه

سکون ذره (x) ۶۸

شکل ۱۴-۴ تغییرات سرعت ذرات تفلون (vp) برحسب مکان نقطه سکون (x) در شرایط بحرانی در آب مقطر ۷۰

شکل ۱۵-۴ تغییرات سرعت ذرات تفلون (vp) برحسب مکان نقطه سکون (x) در شرایط بحرانی در سیال باگر ۷۰

شکل ۱۶-۴ تغییرات سرعت خط تماس سه فازی روی ذره (v_{TPCL}) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط بحرانی برای ذرات تفلون در آب مقطر ۷۲

شکل ۱۷-۴ تغییرات سرعت خط تماس سه فازی روی ذره (v_{TPCL}) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط بحرانی برای ذرات تفلون در سیال باگر ۷۲

شکل ۱۸-۴ تغییرات سرعت نسبی ذرات تفلونی (v_{rel}) برحسب مکان نقطه سکون (x) در شرایط بحرانی در آب مقطر ۷۳

شکل ۱۹-۴ تغییرات سرعت نسبی ذرات تفلونی (v_{rel}) برحسب مکان نقطه سکون (x) در شرایط بحرانی در سیال باگر ۷۳

شکل ۲۰-۴ مقایسه مدل ریاضی و داده‌های آزمایشگاهی مربوط به تغییرات سرعت بحرانی با قطر ذره ۷۶

شکل ۲۱-۴ حرکت ذرات کروی با سرعت برخورد یکسان $v_I = 1/3 \text{ m/s}$ بر حسب زمان ۷۸

شکل ۲۲-۴ تغییرات مکان خط تماس سه فازی روی ذره (x_{TPCL}) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در آب مقطر در شرایط سرعت برخورد یکسان $(1/3 \text{ m/s})$ ۷۹

شکل ۲۳-۴ تغییرات مکان خط تماس سه فازی روی ذره (x_{TPCL}) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در سیال باگر در شرایط سرعت برخورد یکسان $(1/3 \text{ m/s})$ ۷۹

- شکل ۴-۲۴ تغییرات سرعت ذرات تفلونی (v_p) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط سرعت برخورد یکسان ($1/3 \text{ m/s}$) در آب مقطر ۸۰
- شکل ۴-۲۵ تغییرات سرعت ذرات تفلونی (v_p) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط سرعت برخورد یکسان ($1/3 \text{ m/s}$) در سیال باگر ۸۱
- شکل ۴-۲۶ تغییرات سرعت خط تماس سه فاز روی ذرات تفلونی (v_{TPCL}) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط سرعت برخورد یکسان ($1/3 \text{ m/s}$) در آب مقطر ۸۲
- شکل ۴-۲۷ تغییرات سرعت خط تماس سه فاز روی ذرات تفلونی (v_{TPCL}) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط سرعت برخورد یکسان ($1/3 \text{ m/s}$) در سیال باگر ۸۲
- شکل ۴-۲۸: تغییرات نیروهای مقاومتی وارد بر ذره طی نفوذ درون آب و سیال باگر در شرایط یحرانی. الف) قطر ۳ میلی متر ب) قطر ۴ میلی متر ج) قطر ۵ میلی متر ۸۵

فهرست علائم و اختصارات

ثابت بی بعد	a
ثابت بی بعد	b
ضریب درگ	C_D
عدد موئینگی	Ca
عدد دבורا	De
قطر ذره، m	d
تغییرات انرژی سیستم بین حالت اولیه و حالت نهایی، $kg.m^2/s^2$	ΔE
تغییرات انرژی فاز گاز بین حالت اولیه و حالت نهایی، $kg.m^2/s^2$	ΔE_g
تغییرات انرژی مایع بین حالت اولیه و حالت نهایی، $kg.m^2/s^2$	ΔE_l
تغییرات انرژی ذره بین حالت اولیه و نهایی، $kg.m^2/s^2$	ΔE_p
مجموع نیروهای مقاومتی، N	F_{RES}
نیروی درگ، N	F_D
نیروی شناوری، N	F_B
نیروی کشش سطحی، N	F_S
نیروی کپیلاری، N	F_C
عدد فرود	Fr
عدد فرود الاستیک	Fe
مدول الاستیک $Pa.s$	G
ارتفاع حفره، m	H_o

افزایش سطح سیال، m	ΔH
ارتفاع سقوط، m	h
ارتفاع سقوط بحرانی، m	h_c
ارتفاع برگشتی، m	h_R
جرم ذره، kg	m
تغییرات انرژی پتانسیل مایع، $kg.m^2/s^2$	ΔPE_I
تغییر حرارت سیستم بین حالت اولیه و حالت نهایی، $kg.m^2/s^2$	Q
شعاع حجم کنترل، m	R
عدد رینولدز	Re
شعاع حفره، m	r_c
شعاع خط تماس، m	r_{tpcl}
سرعت بحرانی برخورد ذره، m/s	v_c
سرعت ذره، m/s	v_p
سرعت برخورد ذره، m/s	v_I
سرعت خط تماس سه فازی روی ذره، m/s	v_{tpcl}
اختلاف سرعت ذره و خط تماس، m/s	$V_{rel} = v_p - v_{tpcl}$
حجم اولیه سیال درون حجم کنترل، m^3	V_1
حجم نهایی سیال درون حجم کنترل، m^3	V_2
حجم غوطه‌وری، m^3	V_s
مکان ذره، m	x
ماکزیمم عمق نفوذ ذره، m	x_m
عمق برگشتی، m	x_R
مکان خط تماس سه فازی، m	x_{Tpcl}
کل کار مربوط به نیروهای مقاوم، $kg.m^2/s^2$	W

کار نیروی شناوری، $kg.m^2/s^2$	W_B
کارنیروی درگ، $kg.m^2/s^2$	W_D
کار نیروی کشش سطحی، $kg.m^2/s^2$	W_S
عمق ترشوندگی، m	z
عمق شکست، m	z_p
لزجت آب، $N.s/m^2$	μ
لزجت سیال باگر در نرخ برش صفر، $N.s/m^2$	η_0
زاویه شیب سطح مشترک، °	β
زاویه تماس، °	θ
زاویه تماس پیشرو، °	θ_a
زاویه تماس پسرو، °	θ_r
چگالی سیال، kg/m^3	ρ_l
چگالی ذره، kg/m^3	ρ_p
چگالی آب، kg/m^3	ρ_w
چگالی باگر، kg/m^3	ρ_b
زمان رهایی از تنش، s	λ
نرخ برش جریان، $1/s$	$\dot{\gamma}$
کشش سطحی، N/m	σ_{gl}

فصل اول: مقدمہ و تاریخچه

۱-۱-۱- مقدمه

درک برخورد ذرات جامد با سطح مشترک گاز - مایع، کلید طراحی‌های بهینه و موفق بسیاری از کارهای مهندسی است که اخیراً مورد توجه بسیاری از مطالعات علمی بوده است. دلیل کاربرد وسیع این موضوع در صنعت، وجود پارامترهای مختلف در این مسئله است. بیشتر مطالعات انجام‌شده روی این پدیده بر ناحیه بالا یا پایین سطح سیال متمرکز است. به بیان دیگر وقتی یک ذره جامد با سرعت بالا درون سطح مسطح سیالی سقوط می‌کند، یک اتفاق شایع، ایجاد جت بلندی^۱ از سیال است که به سمت بالا حرکت می‌کند سطح و یا بسته به پارامترهای مؤثر سیال ممکن است حفره‌ای از گاز^۲ درون سیال تشکیل شود [۱، ۲]. در پژوهش روی برخورد ذرات جامد کروی به سطح مسطح سیال نیوتنی و غیرنیوتنی تمرکز شده است.

۱-۱-۱-۱- مکانیزم برخورد

انرژی جنبشی یک ذره کروی در حین نفوذ درون سطح مایع، صرف نیروهای مقاومتی می‌شود. در شکل ۱-۱ این نیروهای مقاومتی در حین نفوذ ذره درون سطح مسطح سیال نشان داده شده است که عبارتند از: نیروی درگ (F_D)، نیروی شناوری (F_B) و نیروی کشش سطحی (F_S). مؤلفه عمودی کشش سطحی است که در سیستم‌های سه فازی نیروی کپیلاری^۳ نام دارد. در حین حرکت ذره به سمت پایین، شکل سطح مشترک تغییر می‌کند و یک مرز مشترک سه فاز به شعاع r_{tpcl} روی سطح ذره تشکیل می‌شود که خط تماس سه فازی^۴ ($TPCL$) نام دارد. این خط تماس طی حرکت ذره، روی سطح جابجا می‌شود و داری سرعتی متغییر (v_{tpcl}) است که با سرعت حرکت ذره (v_p) متفاوت است. β زاویه شیب سطح مشترک است و زاویه بین خط مماس بر ذره در نقطه تماس و خط مماس بر سطح

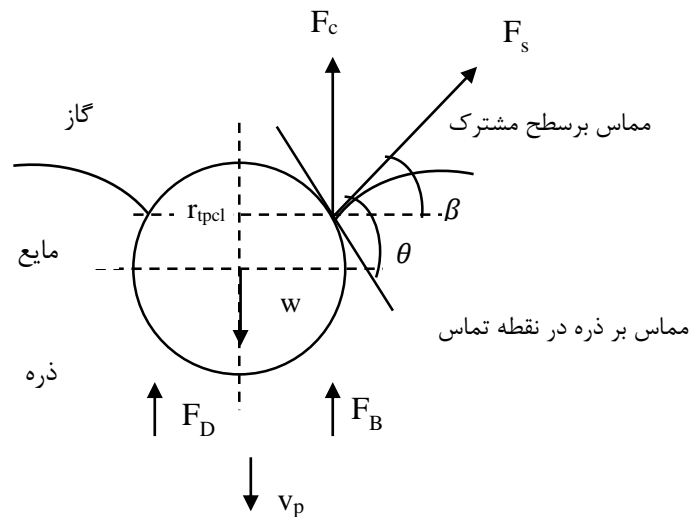
¹ Splash

² Cavity

³ Capillary force

⁴ Three phase contact line

مشترک، زاویه تماس θ نامیده می‌شود. هنگامی که خط تماس سه فاز در حال حرکت است، زاویه تماس ایجادشده، زاویه تماس دینامیک نامیده می‌شود.



شکل ۱-۱ مکانیزم برخورد ذره کروی به سطح مشترک گاز - مایع

۱-۱-۲- خاصیت ترشوندگی ذره

برای ارزیابی خاصیت ترشوندگی ذرات در تماس با سیالات مختلف باید زاویه تماس آن‌ها با سیال مورد نظر اندازه‌گیری شود. هنگامی که بین یک سطح جامد و یک مایع فصل مشترکی ایجاد می‌شود، زاویه بین سطح مایع و محیط بیرونی سطح جامد به عنوان زاویه تماس (θ) شناخته می‌شود. زاویه تماس در واقع مقیاسی از ترشوندگی سطح جامد توسط مایع است. در شرایط ترشدن کامل سطح (پخش شدن مایع روی سطح جامد)، زاویه تماس 0° است و اصطلاحاً سطح جامد بسیار آب‌دوست^۲ است. در صورتی که زاویه تماس بین 0° و 90° باشد، سطح جامد قابلیت ترشوندگی دارد و در شرایطی که این زاویه بیش از 90° باشد، ترشوندگی سطح بسیار کم است و سطح جامد آب‌گریز^۳ است. در مواردی که میزان آب‌گریزی بسیار زیاد است، زاویه تماس به حد تئوری خود، 180° میل

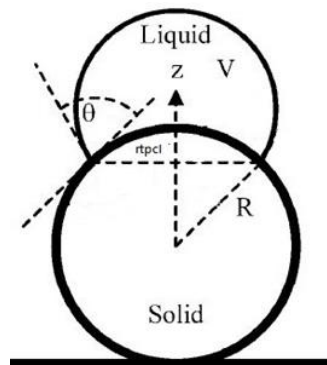
¹ Contact angle

² Superhydrophile

³ Hydrophobe

می‌کند! ضمناً زاویه تماس به دو صورت استاتیک و دینامیک می‌تواند باشد.

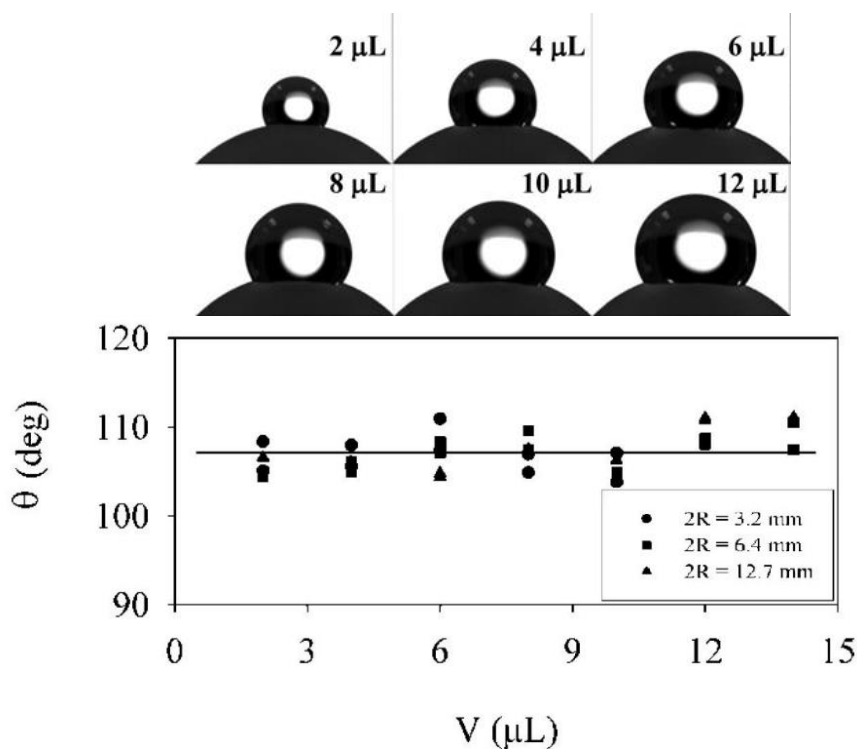
زاویه تماس استاتیک در شرایطی اندازه‌گیری می‌شود که قطره روی سطح قرار گرفته و مرز سه‌فازی جابجا نمی‌شود و در حین اندازه‌گیری، زاویه بین جامد و مایع ثابت است. به طور معمول برای اندازه‌گیری زاویه تماس استاتیک بین یک ذره کروی و سیال، همانطور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، یک قطره از سیال با استفاده از یک پمپ سرنگی دقت بالا به طور متقارن روی سطح ذره قرار داده می‌شود و در حالت پایدار زاویه ای که سطح قطره با خط مماس بر ذره در نقطه تماس ایجاد می‌کند، همان زاویه تماس است. در شکل ۱-۳ داده‌های مربوط به زاویه تماس استاتیک برای حجم‌های مختلف قطرات آب ($2\mu l$, $4\mu l$, $6\mu l$..) روی سطح ذرات کروی از جنس تفلون (PTFE)^۲ در سه قطر مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشخص است میانگین مقادیر زاویه تماس استاتیک برای همه قطره‌ها در حدود $\theta = 108^\circ$ است.



شکل ۱-۲ اندازه‌گیری زاویه تماس استاتیک ذرات کروی [۳]

¹ superhydrophobe

² Polytetrafluoroethylene



شکل ۳-۱ زاویه تماس استاتیک قطرات آب روی ذره کروی از جنس تفلون [۳]

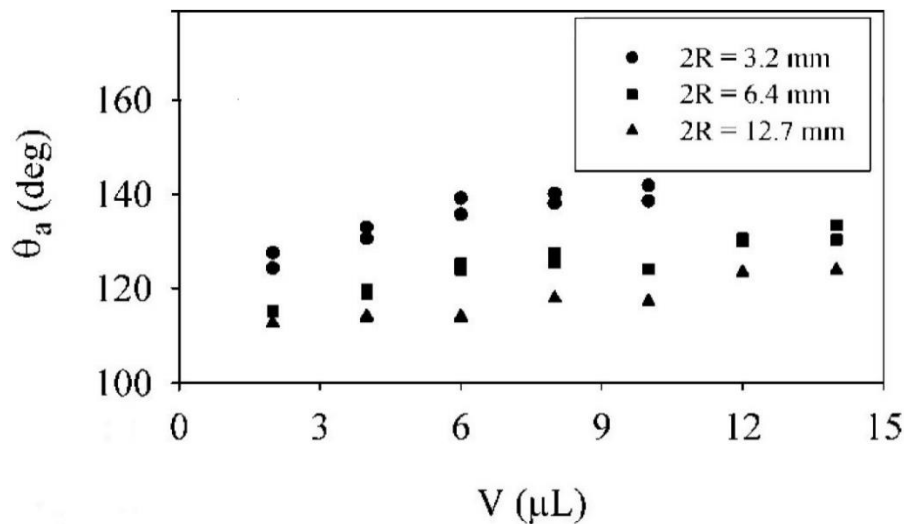
زاویه تماس دینامیک در شرایطی اندازه‌گیری می‌شود که زاویه تماس در حال افزایش و یا کاهش است. یعنی هنگامی که خط تماس سه فاز در حال حرکت است، زاویه تماس ایجادشده، زاویه تماس دینامیک^۱ نامیده می‌شود. به زاویه‌ای که در اثر افزایش حجم قطره ایجاد می‌شود، زاویه تماس پیشرو^۲ و به زاویه‌ای که در اثر کاهش حجم ایجاد می‌شود، زاویه تماس پسرو^۳ گفته می‌شود. برای اندازه‌گیری زاویه تماس دینامیک، ابتدا یک قطره روی سطح ذره قرار می‌گیرد، آنگاه با استفاده از یک لوله باریک مقداری مایع به قطره اضافه می‌شود، در این حالت حجم قطره و زاویه تماس افزایش می‌یابد که زاویه تماس پیشرو (θ_a) نامیده می‌شود. به همین ترتیب اگر حجم قطره به تدریج کاهش یابد، به آن زاویه تماس پسرو (θ_r) گفته می‌شود. معمولاً تست‌ها چند مرتبه تکرار می‌شوند و در پایان

¹ Dynamic contact angle

² Advancing contact angle

³ Receding contact angle

یک محدوده از زوایای تماس پیشرو و پسرو بدست می‌آید. در شکل ۴-۱ داده‌های مربوط به زوایای تماس پیشرو برای حجم‌های مختلف قطرات آب ($2\mu l$, $4\mu l$, $6\mu l$, ..) روی سطح ذرات کروی از جنس تفلون (PTFE) در سه قطر مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش حجم قطره مقدار زاویه تماس نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۱ زاویه تماس پیشرو قطرات آب روی سطح ذره کروی از جنس تفلون [۳]

۳-۱-۱- معرفی سیالات ویسکوالاستیک

در سیالات نیوتنی، تنش با سرعت تغییر شکل به صورت خطی متناسب است. سیال غیرنیوتنی را می‌توان سیالی که فاقد رفتار نیوتنی است، تعریف نمود. به طور کلی سیالات غیرنیوتنی به انواع متعددی دسته بندی می‌شوند که یکی از انواع آنها سیالات ویسکوالاستیک می‌باشند. سیالات ویسکوالاستیک موادی هستند که هر دو رفتار الاستیک و ویسکوز را با هم نشان می‌دهند. در سیالات ویسکوالاستیک، کاهش تنش برشی در نرخ برش صفر دارای بازه زمانی یا به عبارت دیگر دارای زمان رهایی از تنش^۱ می‌باشد.

¹ Relaxation time

معمولاً برای بررسی جریان سیال ویسکوالاستیک، از دو عدد بی‌بعد دبورا^۱ و وایزنبرگ^۲ استفاده می‌شود. عدد دبورا، به صورت نسبت زمان رهایی از تنش به زمان مشخصه جریان تعریف می‌شود که در رابطه (۱-۱) نشان داده شده است. بنابراین، برای یک زمان مشخصه معین، عدد دبورا در گازها و مایعات نیوتنی عدد بسیار کوچک و در جامدات الاستیک عدد بسیار بزرگی است. نسبت نیروی ناشی از خاصیت الاستیک جامد به نیروی حاصل از ویسکوزیته سیال را نیز به صورت عدد وایزنبرگ نمایش می‌دهند که در رابطه (۲-۱) نشان داده شده است [۴، ۵].

$$De = \lambda\omega = \frac{\lambda}{T} \quad (1-1)$$

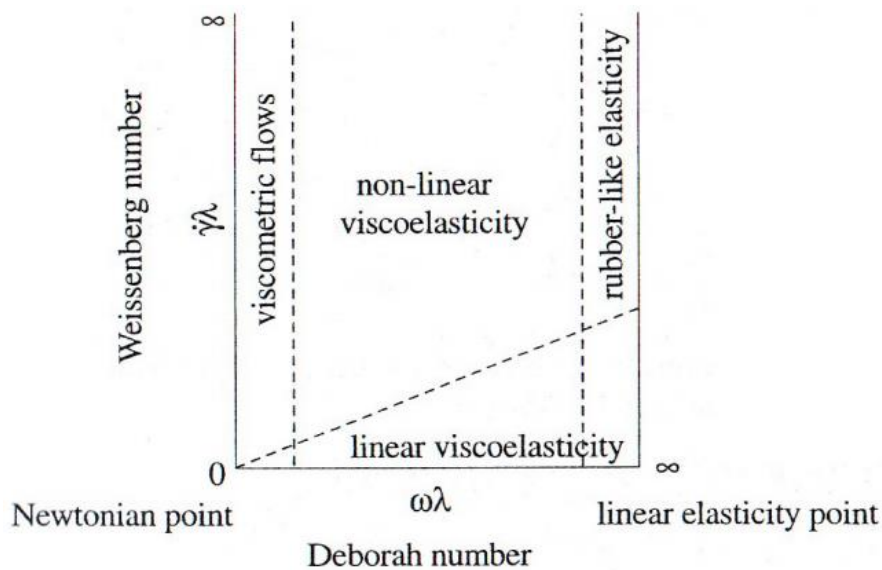
$$Wi = \lambda\dot{\gamma} \quad (2-1)$$

که در آن، λ زمان رهایی از تنش سیال، T زمان مشخصه جریان، ω فرکانس مشخصه جریان و $\dot{\gamma}$ نرخ برش جریان می‌باشد. معمولاً برای تعیین وضعیت ویسکوالاستیک یک ماده از دیاگرام پیپکین^۳ استفاده می‌شود. در شکل ۱-۵ این دیاگرام نشان داده شده است، که برای یک ماده در یک جریان مشخص به کار می‌رود. همانطور که در شکل مشخص است برای اعداد De و Wi صفر، ماده رفتار نیوتنی دارد، زمانی که De به بی‌نهایت میل کند، ماده یک جامد الاستیک خواهد بود و در ناحیه میانی بین این دو مقدار، ماده دارای رفتار ویسکوالاستیک است. طوریکه به ازای اعداد Wi کوچک، مدل‌های ویسکوالاستیک خطی و به ازای اعداد Wi بزرگ، مدل‌های ویسکوالاستیک غیر خطی برای ماده صدق می‌کنند. از طرفی، در ناحیه میانی برای اعداد De کوچک، ماده رفتار ویسکومتریکی و در اعداد De بزرگ، ماده رفتار شبه پلاستیک از خود نشان می‌دهد [۶].

¹ Deborah

² Weissenberg

³ Pipkin's Diagram



شکل ۱-۵ دیاگرام پیپکین [۶]

۱-۲- کاربردها

از مهم‌ترین کاربردهای موضوع سقوط ذرات در سیال می‌توان به جداسازی گردوغبار از گازها، برخورد و نشست ذرات گردوغبار به سطح آزاد سیال، تبخیر قطره در تماس با ذرات کاتالیزور (FCC) [۷-۹]، برخورد ذرات خیلی کوچک با قطره در سیستم اسپری درایر^۲ [۱۰]، نفوذ ذرات سرامیکی در قطره آلومینیوم مذاب [۱۱]، رنگ کردن ذرات، تعیین ظرفیت تحمل بار مایع در برابر مجموعه مختلفی از سطوح جامد، حرکت اشیاء ریز روی سطوح مایع [۱۲]، شستشو دهنده‌های هوا^۳، بازیابی مواد معدنی ارزشمند با استفاده از فلوتاسیون معدنی^۴ [۱۳] و... اشاره کرد. برای آشنایی بیشتر در ادامه به توضیح برخی از کاربردهای مهم این موضوع پرداخته شده است.

جداسازی گردوغبار از گازها: یکی از معمول‌ترین روش‌ها برای جداسازی ذرات جامد از

گازهای آلوده، تصفیه‌کننده و نتوری^۵ است. که براساس مکانیسم برخورد ذرات غبار با قطرات آب عمل

¹ Fluid catalytic craking

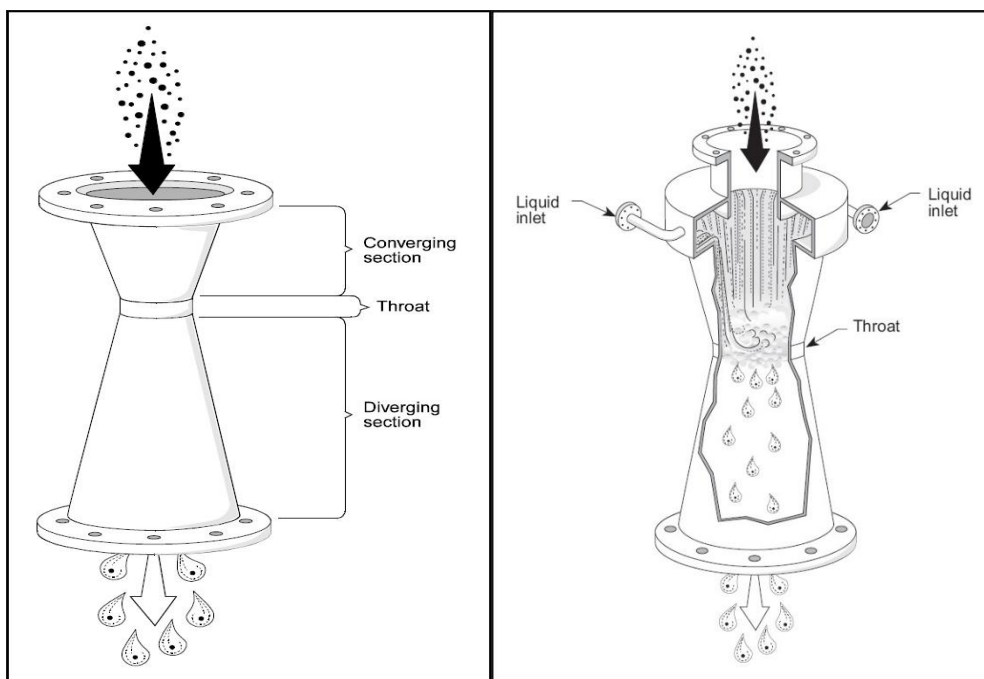
² Spray dryer

³ Wet scrubber

⁴ Mineral flotation

⁵ Venturi scrubber

می‌کند. تصفیه‌کننده ونتوری شامل سه بخش است (شکل ۱-۶). یک بخش همگرا، یک بخش گلویی و یک بخش واگرا. جریان گاز حاوی ذرات به بخش همگرا وارد می‌شود و به دلیل کاهش سطح در قسمت گلویی، سرعت گاز افزایش می‌یابد. گاز ورودی، مایع را از دیواره‌های آن برش می‌دهد و تعداد زیادی از قطرات بسیار کوچک را تولید می‌کند. تفاوت در سرعت و فشار بعد از انقباض باعث می‌شود ذرات و آب با یکدیگر مخلوط شده و ترکیب گردند. کاهش سرعت در قسمت انبساطی دهانه اجازه می‌دهد که قطرات آب حاوی ذرات از جریان گاز خارج شوند. راندمان جداسازی تصفیه‌کننده ونتوری برای ذرات بسیار کوچک، بالای ۹۹٪ است.



شکل ۱-۶ تصفیه کننده ونتوری

سیستم اسپری درایر: خشک کردن با اسپری یکی از فرایندهای خشک کردن محصولات دارویی با ویژگی‌های مطلوب محصول نهایی می‌باشد که امروزه کاربرد زیادی در تحقیقات آزمایشگاهی و همچنین عرصه صنعت پیدا کرده است. این فرایند برای خشک کردن محتوای مایع، با قابلیت کنترل دقیق روی خصوصیات پودر حاصل و ایجاد شرایط مطلوب برای نیازهای متفاوت

داروسازی به کار گرفته می‌شود. امروزه محصولات خشک شده با اسپری به سبب یکنواختی و خصوصیات مطلوب پودر، جایگاه ویژه‌ای در دارورسانی پیدا کرده است. این روش علاوه بر خشک کردن، امکان انجام چندین فرایند مختلف داروسازی در یک مرحله واحد را مقدور می‌سازد و همچنین به عنوان روشی مناسب برای خشک کردن مواد بیولوژیکی حساس به حرارت، مانند آنزیم‌ها و پروتئین‌های دارویی، با حداقل از دست دادن فعالیت، بهبود محلولیت آبی دارو مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. فرایند خشک کردن با اسپری شامل پنج مرحله است [۱۴].

۱. **تغلیظ:** محتوای اسپری عموماً قبل از عرضه به اسپری خشک‌کن، تا حد امکان تغلیظ می‌شود.

۲. **ریزسازی^۱:** مرحله ذره‌سازی یا اسپری کردن، ایجاد شرایط مطلوب برای تبخیر و تبدیل به یک محصول خشک شده با ویژگی‌های مورد نظر است.

۳. **تماس قطرات با هوا:** در محفظه، ذرات مایع در تماس با گاز داغ قرار گرفته و در نتیجه بیش از ۹۵ درصد از رطوبت موجود در قطرات، طی چند ثانیه تبخیر می‌گردد.

۴. **خشک شدن قطرات:** رطوبت در طی دو مرحله از روی قطرات تبخیر می‌گردد. در مرحله اول، رطوبت کافی روی قطره برای جایگزینی مایع تبخیرشده از سطح وجود دارد و تبخیر با سرعت ثابتی صورت می‌گیرد. مرحله دوم زمانی آغاز می‌شود که دیگر رطوبت به اندازه کافی در سطح قطره برای حفظ شرایط اشباع وجود ندارد و باعث تشکیل پوسته خشک در سطح می‌گردد. از این پس، تبخیر بستگی به انتشار رطوبت از طریق پوسته دارد.

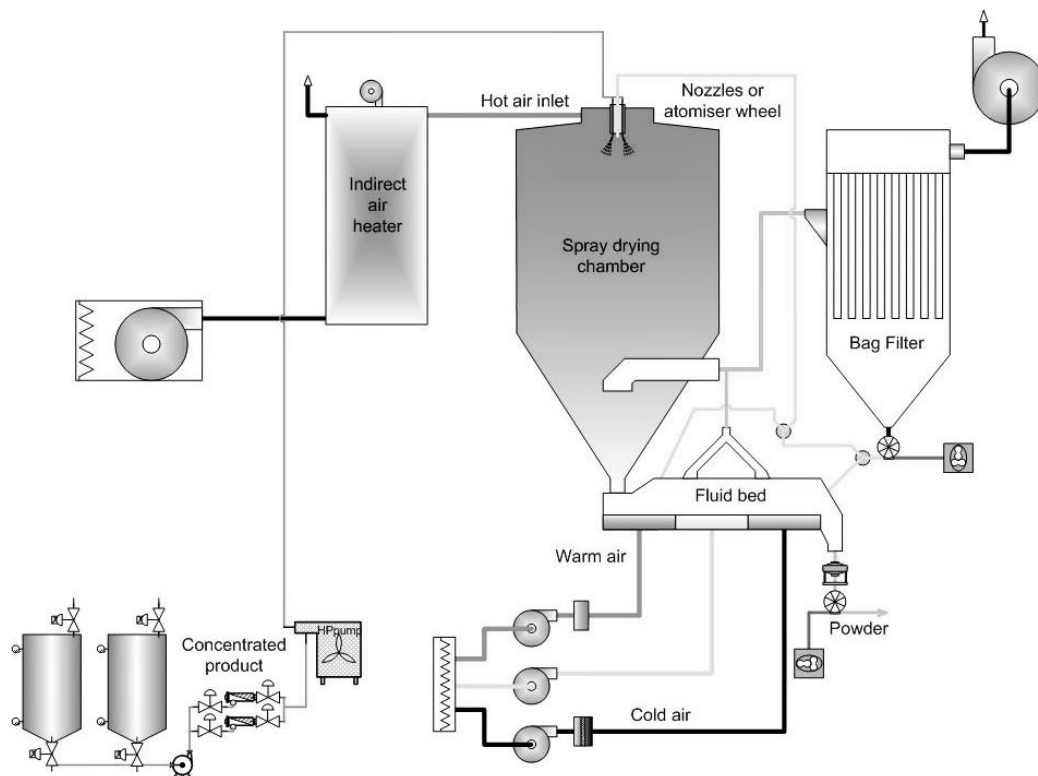
۵. **جداسازی:** در مرحله جداسازی نهایی از سایکلون‌ها^۲، فیلترهای کیسه‌ای و رسوب

¹ Atomization

² cyclones

دهنده‌های الکترواستاتیک استفاده می‌شود.

هنگامی که مایع اسپری گردید، باید در تماس نزدیک با گاز داغ در داخل محفظه خشک‌کن قرار گیرد. گاز داغ داخل محفظه، توسط سیستم پخش هوا، که جریان یکسانی را به تمام نقاط محفظه می‌رساند، تأمین می‌گردد. برای درک کامل ویژگی‌های پودر خشک شده با اسپری، نیاز به بررسی طرز کار و مکانیزم خشک شدن درون یک قطره است. به طور معمول، تعداد زیادی ذره بسیار کوچک معلق در یک مایع وجود دارد. خشک شدن ذرات در دو مرحله صورت می‌گیرد. به عبارتی، وقتی که قطره برای اولین بار در معرض گاز داغ قرار می‌گیرد، تبخیر به سرعت اتفاق می‌افتد. مواد حل شده در مایع، تمایل به تشکیل یک پوسته نازک در سطح ذره را دارند. اگرچه، تبخیر باعث می‌گردد ذرات کاملاً خنک نگه داشته شوند، لیکن، همچنانکه غلظت مایع کاهش می‌یابد ذرات شروع به گرم شدن می‌کنند. پس از آن تبخیر با سرعتی که مایع بتواند به سطح ذره انتشار یابد صورت می‌پذیرد. این مرحله از فرایند، خشک کردن درجه یک محدود به سرعت انتشار نامیده می‌شود. خوشبختانه، مرحله دوم در قسمت سرد خشک‌کن که در آن گاز خشک‌کننده در دمای نزدیک به دمای خروجی از خشک‌کن است رخ می‌دهد. در نتیجه دمای مواد هرگز از دمای خروجی هوای خشک‌کن بالاتر نمی‌رود، اگرچه دمای ورودی خشک‌کن ممکن است بطور قابل توجهی بالاتر باشد. پودر خشک شده نهایی در دمای حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر از درجه حرارت هوای خروجی خواهد بود. زمان تماس هوای داغ و قطرات اسپری شده فقط چند ثانیه است که در طی آن ذرات خشک شده و دمای هوا به سرعت پایین می‌آید. از آنجایی که ذرات خشک شده هرگز به دمای هوای خشک‌کننده نمی‌رسد، به این ترتیب خشک کردن مؤثر مواد حساس به حرارت را بدون تجزیه حرارتی آنها، فراهم می‌سازد.



شکل ۷-۱ فرایند خشک کردن با اسپری

فلوتاسیون معدنی: فلوتاسیون یکی از رایج‌ترین روش‌های پرعیارسازی مواد معدنی آسیاب شده است. در این روش می‌توان با استفاده از خواص آب‌گریزی مواد معدنی برای جداسازی آن‌ها از ناخالصی‌ها استفاده کرد. به این ترتیب که مواد معدنی ارزشمند را آب‌گریز کرد و آن‌ها را با حباب‌هایی که در سلول فلوتاسیون به وجود می‌آیند، گیر انداخت. این حباب‌ها به سطح آب می‌آیند و یک لایه کف تشکیل می‌دهند که در انتها این کف را از محلول جدا می‌کنند. عملکرد فلوتاسیون به چند عامل مهم بستگی دارد؛ اول اینکه لازم است ذرات آب‌گریز با استفاده از کلکتورهایی به سمت حباب‌ها منتقل شوند تا به سطح حباب - مایع بچسبند. دوم اینکه برای تولید حباب‌ها و برخوردشان با ذرات، نیاز به ایجاد اغتشاش است که در سلول‌های مکانیکی با همزن، در ستون‌ها با حباب‌ساز و در سلول جیمسون با ایجاد خلاء تولید می‌شود. اغتشاش ایجاد شده از یک طرف باعث چسبیدن ذرات آب‌گریز به حباب‌ها می‌شود و از طرف دیگر عامل جدا شدن ذرات چسبیده به حباب نیز است، بنابراین لازم است که این اغتشاش از یک مقدار بحرانی، کمتر باشد تا باعث جدایش ذرات از حباب‌ها نگردد

[۱۵-۱۸]. به منظور عدم وابستگی فرایند به اغتشاش یک روش دیگر به نام فیلم فلوتاسیون^۱ [۱۹، ۲۰] وجود دارد که در آن همه ذرات ابتدا در فاز گاز هستند و از یک ارتفاع مشخص به سطح مشترک گاز - مایع برخورد می‌کنند تا ذرات آب‌گریز روی سطح مایع باقی بمانند و سایر ذرات به طور کامل در مایع نفوذ کنند. فلوتاسیون تنها روش فرآوری است که به طور همزمان از سه فاز جامد، مایع و گاز بهره می‌برد. این سه فاز به نوبه خود سه فصل مشترک جامد/مایع، جامد/گاز و مایع/گاز را تشکیل می‌دهند.

- فاز گاز: متداول‌ترین گاز، هوا می‌باشد.
- فاز مایع: فاز مایع همیشه یک محلول آبی است زیرا آب مایعی ارزان، قابل دسترس و قابل بازیافت می‌باشد.
- فاز جامد: فاز جامد از کانی‌های مختلف تشکیل شده است. شناخت ویژگی‌های بلورشناسی و کانی‌شناسی این فاز بسیار مهم است.

۱-۳- مروری بر تحقیقات گذشته

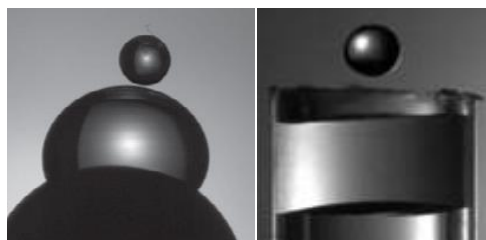
برخورد ذرات با سطح مشترک گاز - مایع در بسیاری از کارهای صنعتی وجود دارد. معمولاً هدف از این مطالعات یافتن رژیم‌های مختلف برخورد است. تعیین اینکه ذره پس از رهایی از یک ارتفاع مشخص در حین برخورد به سطح مایع چه پدیده‌ای را تجربه می‌کند، در برخی کاربردها اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه شرایط مسئله ممکن است ذره یا درون مایع نفوذ کند یا پس از نوسان کوتاهی روی سطح شناور بماند و یا اینکه پس از برخورد با سطح به سمت عقب برگردد. به طور کلی خروجی‌های مشاهده شده به پارامترهای زیر وابسته‌اند.

- هندسه سطح مشترک
- شکل ذره

¹ Film flotation

- جنس ذره
- اندازه ذره
- نوع سیال
- سرعت برخورد

در همه این برخوردها که درگیر سطح مشترک چندفازی‌اند، دو هندسه مجزا برای سطح مشترک می‌تواند وجود داشته باشد (شکل ۸-۱)؛ سطح مشترک مسطح^۱ و سطح مشترک منحنی^۲ [۹]. با توجه به هندسه مسئله و جنس ذرات، خروجی‌های مختلفی مشاهده می‌شود.



شکل ۸-۱ هندسه سطح مشترک (مسطح یا منحنی) [۲۱]

برخی مطالعات درباره برخورد ذرات استوانه‌ای [۲۲] و کروی [۱۲، ۲۳، ۲۴] روی سطح مشترک مسطح انجام شده است. به طور کلی برای ذرات کروی آب‌دوست در برخورد با سطح مسطح مایع دو رژیم شناوری^۳ و نفوذ^۴ و برای ذرات آب‌گریز رژیم‌های نوسانی^۵، برگشتی^۶ و نفوذ مشاهده شدند.

¹ Planar interface

² Droplet

³ Floating

⁴ Sinking

⁵ Oscillation

⁶ Bouncing

مطالعات برخورد ذرات با سطوح مسطح بیشتر روی مواردی مانند رنگ کردن ذرات، تعیین ظرفیت تحمل بار مایع در برابر مجموعه مختلفی از سطوح جامد، خواص فیزیکی مایع مربوط به موارد بیولوژیکی مانند راه رفتن حشرات روی مایع و بازیابی مواد معدنی ارزشمند از مواد ناخالص با استفاده از فلوتاسیون معدنی تمرکز داشته‌اند.

مطالعات کمی درباره برخورد ذرات با سطوح منحنی انجام شده است که بیشتر این مطالعات روی مواردی مانند جداسازی گردوغبار از گازها، تبخیر قطره در تماس با ذرات کاتالیزور (FCC)، برخورد ذرات خیلی کوچک از خروجی بخار با قطره در سیستم اسپری درایر و نفوذ ذرات سرامیکی در قطره آلومینیوم مذاب تمرکز داشته‌اند. برخوردهای پیچیده بین ذره و قطره، با توجه به نسبت اندازه‌ها (بین ذره و قطره) به سه حالت عمومی تقسیم‌بندی می‌شوند.

حالت اول: اندازه قطره کوچک‌تر از اندازه ذره باشد. در این حالت سه رژیم مختلف در نتایج مشاهده شده است.

۱. چسبیدن قطره بر روی ذره^۱ (شکل ۹-۱)

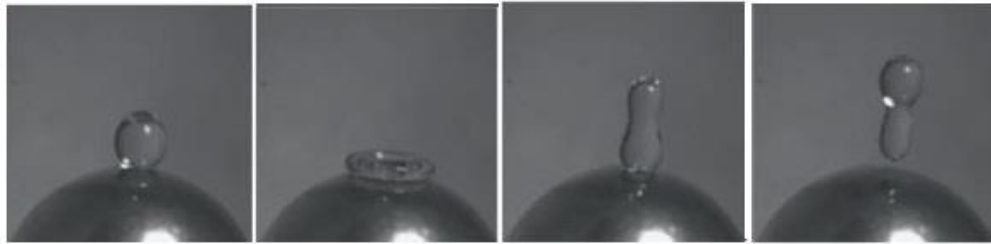


شکل ۹-۱ چسبیدن قطره روی ذره پس از برخورد [۸]

۲. برگشتن قطره از سطح ذره^۲ (شکل ۱۰-۱)

¹ Sticking or deposition

² Rebounding



شکل ۱۰-۱ برگشت قطره از سطح ذره پس از برخورد [۸]

۳. فروپاشی قطره پس از برخورد^۱ (شکل ۱۱-۱)



شکل ۱۱-۱ فروپاشی ذره پس از برخورد با سطح ذره [۸]

این دینامیک‌های برخورد برهم‌کنش نیروهای اینرسی، کشش سطحی و ویسکوز هستند که با گروه اعداد بی‌بعدی مانند رینولدز^۲، وبر^۳، کیپیلاری^۴ و اونسورگ^۵ بیان می‌شوند [۸، ۲۴]:

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu}, \text{We} = \frac{\rho v^2 d}{\sigma}, \text{Ca} = \frac{\mu v}{\sigma}, \text{Oh} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d}}$$

که در آن d ، ρ ، μ ، σ به ترتیب قطر، چگالی، ویسکوزیته و کشش سطحی قطره و v سرعت نسبی قطره و ذره است. در اعداد وبر کم، نیروی کشش سطحی بر نیروی اینرسی غلبه می‌کند که منجر به

¹ Splashing

² Reynolds number

³ Weber number

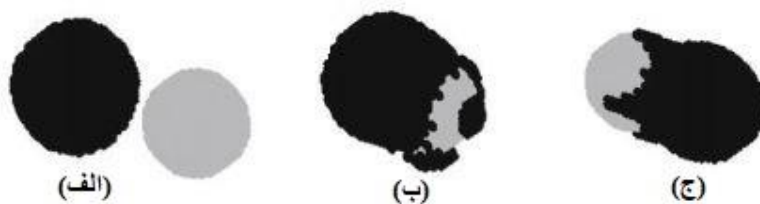
⁴ Capillary number

⁵ Ohnesorge number

چسبیدن قطره روی سطح ذره می‌شود. همچنین وقتی سطح ذره آب‌گریز باشد (سطح انرژی کم)، قطره برای ذخیره نیروی کشش سطحی، پس از برخورد به عقب برمی‌گردد.

حالت دوم: قطره و ذره تقریباً هم اندازه باشند. در این حالت نیز سه رژیم خروجی به عنوان تابعی از زاویه برخورد و عدد وبر مشاهده شده است که اخیراً در یکی از مطالعات [۲۵] این سه خروجی با روش شبیه‌سازی شبکه بولتزمن به اثبات رسیده است. برای اعداد وبر بزرگ، نتایج می‌تواند به سه حالت زیر خلاصه شود:

۱. پخش شدن قطره حول ذره مانند یک فیلم نازک^۱ (شکل ۱-۱۲)

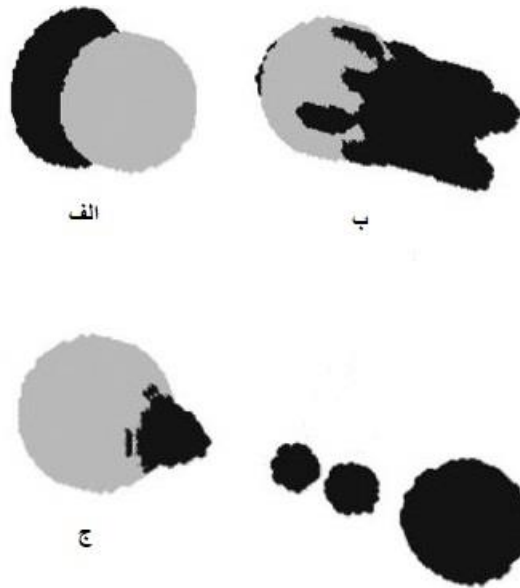


شکل ۱-۱۲ پخش شدن قطره حول ذره پس از برخورد [۲۵]

۲. قسمتی از قطره روی ذره پخش و مابقی به صورت قطره دوم ظاهر شود^۲ (شکل ۱-۱۳)

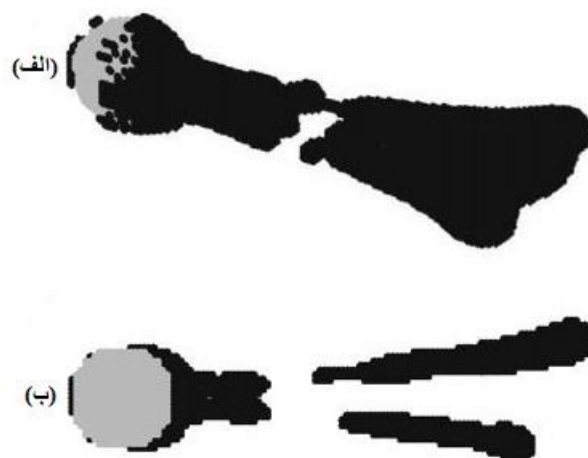
¹ Deposition and coalescence

² Ripping and coating



شکل ۱۳-۱ تشکیل قطرات ثانویه حول ذره پس از برخورد [۲۵]

۳. تبدیل قطره به دنباله‌ای مخروطی شکل که به قطرات دیگری شکسته می‌شود^۱ (شکل ۱۴-۱)



شکل ۱۴-۱ تشکیل دنباله مخروطی شکل پس از برخورد [۲۵]

حالت سوم: اندازه قطره بزرگ‌تر از اندازه ذره باشد (شکل ۱۵-۱). این حالت که به آن کم پرداخته شده و مطالعات تجربی کمی در دسترس است [۹، ۲۶]، چهار رژیم خروجی دارد.

¹ Skirt scattering

۱. برگشتن ذره از سطح مشترک^۱
۲. نفوذ جزئی ذره در سطح مشترک به همراه حرکت نوسانی^۲
۳. نفوذ کامل ذره در سطح مشترک گاز - مایع بدون خروج از سطح مشترک مایع - گاز^۳
۴. نفوذ کامل ذره از هر دو سطح مشترک^۴



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱-۱۵ برخورد ذره به قطره با اندازه بزرگتر الف) نفوذ جزئی ذره درون قطره ب) نفوذ کامل ذره درون قطره ج) نفوذ کامل ذره درون قطره و برخورد به سطح داخلی قطره و برگشت به عقب [۹]

سه رژیم اول در اعداد وبر پایین و رژیم چهارم در اعداد وبر بالا اتفاق می افتد. رژیم اول معمولاً وقتی اتفاق می افتد که ذره فوق آب‌گریز (زاویه تماس بزرگتر از ۱۵۰ درجه)، به یک مایع با ویسکوزیته

¹ Rebounding

² Penetration

³ Capture and retention

⁴ Complete penetration

بالا و چگال‌تر از ذره برخورد کند. علت این است که مؤلفه نیروی کپیلاری ناشی از تغییر شکل سطح مشترک در خلاف جهت حرکت ذره عمل می‌کند و می‌تواند اینرسی ذره را متعادل کند. این پدیده منجر به شناوری اجسام جامد چگال‌تر از آب می‌شود. ولا و همکاران^۱ [۱۲] نشان دادند که با افزایش زاویه تماس، یعنی افزایش آب‌گریزی سطح ذره، سطح مایع ذرات با چگالی بالاتر را می‌تواند پس بزند. در کارهای بعد، لی و کیم^۲ [۲۴] به طور تجربی برخورد ذرات فوق آب‌گریز با محدوده شعاع ۱ mm - ۰/۶۷، با سطح منحنی هوا - آب را بررسی کردند و نشان دادند که این ذرات با نسبت‌های چگالی مختلف (نسبت چگالی ذره به چگالی آب) و سرعت‌های مختلف برخورد، می‌توانند رفتار مختلفی را نشان دهند. آنها مشاهده کردند که در سرعت برخورد ۱/۲۳ m/s، ذره روی سطح نوسان دارد طوری که این نوسان بعد از مدت کوتاهی از بین می‌رود^۳ و در سرعت برخورد ۱/۸۴ m/s، ذره به طور کامل از سطح مایع پس زده می‌شود^۴. همچنین در سرعت برخورد ۱/۹۳ m/s، ذره در سطح مشترک نفوذ می‌کند^۵. آنها همچنین گزارش کردند که با افزایش تدریجی ویسکوزیته مایع، احتمال رفتار برگشتی ذره افزایش می‌یابد. در رژیم‌های دوم و سوم، اینرسی ذره در حین نفوذ در قطره برای غلبه بر نیروهای مقاومتی به طور کامل تلف می‌شود. در رژیم سوم، ممکن است حبابی به دنبال ذره تشکیل شود. در رژیم چهارم که نفوذ کامل ذره را بیان می‌کند، به این معنی است که ذره برای غلبه بر همه نیروهای مقاومتی درون قطره، اینرسی کافی دارد. در این رژیم نیز ممکن است حبابی روی سطح ذره تشکیل شود. همچنین هنگامیکه اینرسی برخورد ذره زیاد و ویسکوزیته قطره کم باشد، ممکن است قطره اولیه به چندین قطره جدید تجزیه شود. یک مشخصه جالب دیگر که در رژیم چهارم مشاهده شده و مورد مطالعه قرار گرفته است، جرم دنباله مایع متصل به ذره است. تعیین جرم دنباله مایع اغلب در

¹ Vella et al

² Lee & Kim

³ Damped oscillation

⁴ Complete bouncing off

⁵ Sinking

مسائل انتقال حرارت و جرم اهمیت ویژه دارد. دابروسکی و همکاران^۱ [۲۶] جرم دنباله مایع را بدون توجه به مکانیزم فیزیکی این پدیده با استفاده از اعداد بی بعد مربوطه، به طور تجربی تعیین کردند. گاک و گرادن^۲ [۲۵] با استفاده از روش شبیه‌سازی شبکه بولتزمن رفتار دنباله مایع را در برخوردهای با سرعت نسبی بالا نشان دادند.

لی و همکاران [۲۳] به بررسی برخورد ذرات فوق آب‌گریز در آب پرداختند و در آن تأثیر ویسکوزیته را بر رژیم‌های برخورد مطالعه کردند و دریافتند که برای ذرات کروی فوق آب‌گریز اگر ویسکوزیته سیال از مقدار بحرانی 3 mpa.s فراتر رود، رژیم برگشتی اتفاق نمی‌افتد و فقط دو رژیم نوسانی و نفوذ مشاهده می‌شود. اوزا و موری [۲۷] شرایط بحرانی یک ذره آب‌گریز با چگالی کمتر از مایع را مطالعه کردند. ایوانس و همکاران [۱۳، ۲۱] رفتار نفوذ یک ذره کروی آب‌دوست را بررسی کردند و در آن سرعت بحرانی ذره را در برخورد با سطح مشترک سیالات مختلف با هوا بدست آوردند. همچنین، دینامیک حرکت یک ذره کروی آب‌دوست در برخورد با فیلم معلق مایع مطالعه شده است. لیو و همکاران [۲۸، ۲۹] برای شبیه‌سازی تأثیر محیط ذره بر سرعت بحرانی، تأثیر حجم فاز مایع را روی حرکت ذره مطالعه ارتفاع بحرانی ربایش ذره را در فلوتاسیون بررسی کردند.

۱-۴- معرفی تحقیق حاضر

در تحقیق حاضر برخورد ذرات کروی با سطح سیال در سرعت‌های پایین مورد بررسی قرار گرفته است. اهمیت این موضوع را می‌توان در صنایع معدنی برای جداسازی ذرات معدنی ارزشمند، در صنایع داروسازی برای خشک‌کردن محتوی مایع و در صنایع تصفیه گازها و... مشاهده نمود. به منظور شبیه‌سازی برخورد ذرات آب‌گریز با سطح مایع در فیلم فلوتاسیون، رفتار نفوذ ذرات کروی از جنس تفلون در برخورد با سطح مشترک هوا و سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی مورد آزمایش و مطالعه قرار گرفت. با استفاده از یک دوربین پرسرعت، حرکت ذره نیز عکس‌برداری می‌شود. با پردازش تصاویر

¹ Dubrovsky et al

² Gac & Gradon

متوالی، رژیم‌های برخورد، چگونگی حرکت ذره در سیالات، بیشترین عمق نفوذ در سیال، تغییرات سرعت ذره (v_p) و سرعت خط تماس سه فازی (v_{TPCL})¹ بدست آمد و از یک مدل ریاضی براساس موازنه انرژی برای پیش‌بینی سرعت بحرانی ذره استفاده شد. هدف از این مطالعه، بدست آوردن یک سرعت بحرانی است که ذره آب‌گریز در آن روی سطح باقی می‌ماند طوریکه در سرعت‌های بالاتر از سرعت بحرانی ذره در مایع نفوذ می‌کند. با پردازش تصاویر متوالی، چگونگی حرکت ذره درون سیال بدست آمد. همچنین به عنوان نوآوری کار، برای اولین بار ماکزیمم عمق نفوذ (x_m)، عمق برگشتی (x_R)، ارتفاع برگشتی ($h_R = x_m - x_R$) و عمق شکست (z_p) برای هر ذره تعیین شد و مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در سرعت‌های بحرانی و نزدیک آن حرکت ذرات در داخل سیال با نوساناتی همراه است و مکان بیشترین عمق نفوذ ذره با مکان گسیختگی ذره از سطح سیال² متفاوت است. هرچه سرعت از مقدار بحرانی بیشتر شود، تعداد نوسانات کاهش یافته تا اینکه در سرعت‌های بالاتر، ذره بدون هیچ نوسانی از سطح مایع جدا می‌شود؛ برای حالتیکه اختلاف سرعت برخورد ذره با سرعت بحرانی بیشتر شود، مقادیر x_m ، x_R و z_p تقریباً یکسان می‌باشند. نشان داده شد که مدل ریاضی با مشاهدات آزمایش همخوانی خوبی دارد و همچنین به بررسی تأثیر اندازه ذرات بر سرعت بحرانی پرداخته شد و مشخص شد که سرعت بحرانی برخورد با افزایش قطر ذره، کاهش می‌یابد. در نهایت نیروی وارد بر ذره طی نفوذ درون سیال در شرایط بحرانی تحلیل شد.

¹ Velocity of three phase contact line

² Pinch off

فصل دوم: تجہیزات و روش آزمایش

در این بخش تجهیزات مورد استفاده، مواد اولیه آزمایش و چگونگی ساخت سیال باگر بیان می‌شود، سپس مکانیزم آزمایش سقوط ذره در سیال مورد بررسی قرار می‌گیرد و در انتها خلاصه‌ای از شرایط آزمایش ارائه می‌شود.

۱-۳- تجهیزات آزمایش

در قسمت آزمایشگاهی از تجهیزات مختلفی استفاده شده که در این بخش به اجمال به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود و نحوه کارکرد و دلیل استفاده از آنها تشریح می‌شود.

۱-۱-۳- دوربین پرسرعت

برای ثبت شکل‌ها و نحوه حرکت ذرات در حال سقوط از مکانیزم عکس‌برداری با دوربین سرعت بالا (PCO.Dimax S/4500 frames per second) استفاده می‌شود. دوربین پرسرعت مورد استفاده قابلیت ذخیره حداکثر ۴۵۰۰ عکس در هر ۱ ثانیه را دارا می‌باشد که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. اگر سرعت عکس‌برداری را افزایش دهیم، عکس‌های ذخیره شده کیفیت مطلوب خود را از دست خواهند داد و به دلیل افزایش سرعت ذخیره کردن عکس‌ها، به نور پردازی بیشتری نیاز پیدا خواهیم کرد. در آزمایشات انجام شده سرعت عکس‌برداری ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه انتخاب شده است.



شکل ۱-۳ دوربین سرعت بالا (PCO.Dimax)

۳-۱-۲- سیستم نورپردازی

برای عکس برداری با کیفیت بالا نیاز به نور پردازی مناسب داریم. به منظور نورپردازی از ۲ پروژکتور ۲۰۰۰ وات شرکت UNIMAT استفاده شده است که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. هر کدام از این پروژکتورها توانایی تأمین ۲۰۰۰ وات انرژی را دارند ولی برای آزمایش انجام شده، میزان نورپردازی هر کدام از پروژکتورها روی ۱۰۰۰ وات تنظیم شده است. نحوه نورپردازی به این شکل بود که هر دو پروژکتور به یک صفحه دیفیوزر تابیده می شوند.



شکل ۳-۲ پروژکتور ۲۰۰۰ وات شرکت UNIMAT

۳-۱-۳- پمپ خلاء

برای ایجاد مکش در مکانیزم آزادساز ذره از پمپ خلاء استفاده شد. برای قرارگیری ذره در نازل آزادساز نیاز است با استفاده از پمپ خلاء درون نازل مکش ایجاد شود و از آنجایی که قطر خروجی نازل از ذرات مورد استفاده در آزمایش کمتر انتخاب شد، ذرات درون نازل طراحی شده، ثابت می مانند و پس از خاموش شدن پمپ (حذف مکش) درون سیال سقوط می کنند. در آزمایشها از پمپ خلاء محصول شرکت Emerson و مدل C55JXHRL-4205 استفاده شد (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳ پمپ خلاء شرکت به مدل C55JXHRL-4205

۳-۱-۴- ذرات مورد استفاده

ذرات مورد استفاده در تست‌ها کروی، از جنس تفلون (PTFE) در اندازه‌های ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر می‌باشند که در شکل ۳-۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۴ ذرات کروی از جنس تفلون (PTFE)

۳-۱-۵- سیالات مورد استفاده

سیالات مورد استفاده در این مطالعه، دودسته هستند:

۱- سیال نیوتنی (آب مقطر)

۲- سیال غیرنیوتنی (محلول پلیمری باگر): باگر مایعی ویسکوالاستیک است که لزجت ثابتی

دارد. اغلب مایعات ویسکوالاستیک، مخلوط‌ها یا محلول‌های پلیمری هستند که ذاتاً رقیق شونده‌اند. یعنی لزجت با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد و این کاهش مقدار قابل توجهی دارد. با این وجود باگرها محلول‌های پلیمری رقیقی هستند و تا حدی رقیق‌اند که تغییرات لزجت نسبت به نرخ برش قابل صرف‌نظر است.

طرز تهیه محلول پلیمری باگر: سیال باگر مورد استفاده در این مطالعه از ترکیب محلول آب دیونیزه و گلیسیرین با نسبت حجمی ۴:۱ و پلیمر پلی‌اکریل‌آمید با نسبت جرمی ۰.۰۱/۰ (۱۰۰ ppm) تولید شده است. این سیال شامل دو قسمت حلال نیوتنی (آب دیونیزه و گلیسیرین) و قسمت حل شونده پلیمری (پلی‌اکریل‌آمید) است. پلی‌اکریل‌آمید پلیمری قابل انحلال در آب است که جرم مولکولی آن 5×10^6 گرم بر مول گزارش شده است. فرمول شیمیایی این پلیمر در دما و فشار استاندارد، $C_{35}H_{49}O_{29}$ می‌باشد و ماده‌ای سفید رنگ، بلوری جامد و بی‌بو است.

در تمام آزمایش‌ها، برای ساخت محلول پلیمری، ابتدا مقدار کمی از پودر پلی‌اکریل‌آمید (به اندازه درصد جرمی مورد نظر) به آب مقطر افزوده می‌شود. پس از اطمینان از حل شدن کامل پودر پلیمر در آب و همگن بودن آن، به آرامی گلیسیرین به آن اضافه می‌گردد. افزودن اندکی پلی‌اکریل‌آمید به آب، موجب اندکی تغییر در لزجت و ایجاد خاصیت کشسانی می‌گردد. گلیسیرین و آب به راحتی در یکدیگر حل می‌شوند. از گلیسیرین به عنوان عامل تنظیم لزجت استفاده می‌گردد. این نکته قابل توجه است که چنانچه ماده پلیمری به خوبی در آب حل نشده باشد، تشخیص آن کار ساده‌ای نیست اما با افزودن گلیسیرین ناهمگنی‌ها به صورت رگه در محلول نمایان خواهند شد.

۳-۱-۶- همزن هات‌پلیت

هات‌پلیت، دستگاهی است که با یک همزن مغناطیسی می‌تواند در حالیکه مایع درون ظرف را گرم می‌کند، آن را هم بزند. این دستگاه دارای یک صفحه آلومینیومی برای انتقال حرارت به سیال است. صفحه کنترل دارای دو ولوم می‌باشد. یکی از آن‌ها مربوط به دمای صفحه حرارت دهنده است که

معمولاً تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد را حرارت می‌دهد و با ولوم دیگر می‌توان سرعت چرخش سیستم مغناطیسی دستگاه را تنظیم نمود. معمولاً در حالت کلی همزن ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه می‌زند. برای آزمایش‌های گوناگون دما و سرعت چرخش به صورت مستقل قابل تنظیم می‌باشد. به منظور مخلوط نمودن مایعات از مگنت داخل ظرف و بدون ارتباط مکانیکی استفاده می‌شود. طرز کار دستگاه بدین صورت است که در زیر صفحه اصلی یک آهنربا وجود دارد که توسط یک موتور به حرکت در می‌آید و با جابجا شدن قطب‌های آهنربا و قرار گرفتن قطب‌های همنام و دفع یکدیگر مگنت داخل بشر به حرکت در می‌آید. در شکل ۳-۵ همزن مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۳-۵ همزن هات پلنت

۳-۱-۷- ترازو

برای نمونه‌برداری‌ها و همچنین اندازه‌گیری جرم ذرات، ترازوی شرکت RADWAG مدل PS 510/C/1 با دقت ۰/۰۰۱ مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶ ترازوی شرکت RADWAG مدل PS 510/C/1

۳-۱-۸- دستگاه کشش سطحی

نیروی کشش سطحی یکی از مهم‌ترین نیروهای وارد بر ذره در حال نفوذ به سیال است. در میان روش‌های آزمایشگاهی روش قطره معلق از دقت بالایی برخوردار است. در این روش بین کشش سطحی سیال و یک پارامتر هندسی (قطر نازل) رابطه‌ای برقرار است که با استفاده از آن می‌توان مقدار دقیقی از اندازه کشش سطحی را تخمین زد. کشش سطحی سیالات مورد استفاده توسط دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی مایع و گاز (IFT) شرکت Datis Energy اندازه‌گیری شده است.

روش کار دستگاه به این صورت است که، سیال محیط در یک محفظه قرار داده می‌شود. البته اگر کشش سطحی نسبت به هوا مورد نظر باشد نیاز به محفظه نیست. سیال آزمایش با یک حجم مشخص در سرنگی ریخته می‌شود. سرنگ دارای نازل‌هایی با قطرهای مختلف می‌باشد که قطر نازل استفاده شده در تست کشش سطحی ۰/۱۲۹ سانتی‌متر می‌باشد. پس از عکس برداری از قطره مورد نظر، محاسبات لازم برای ضریب شکل و به دست آوردن کشش سطحی توسط نرم افزار انجام خواهد گرفت. چگالی قطره، چگالی سیال محیط و قطر نازل از جمله اطلاعاتی است که برای بدست آوردن کشش سطحی مورد نیاز است. در شکل ۳-۷ دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۳-۷ دستگاه تست کشش سطحی مایع و گاز (IFT)

۳-۱-۹- دستگاه ویسکومتر استوانه‌ای

برای محاسبه لزجت سیال نیوتنی، از دستگاه ویسکومتر شرکت BROOKFIELD مدل DV-E /LV استفاده شده است (شکل ۳-۸). در این نوع ویسکومترها، یک سیلندر درون استوانه دیگری قرار گرفته است. سیال در فضای محصور بین این دو استوانه ریخته می‌شود و یکی از استوانه‌ها با سرعت زاویه ای معینی چرخانده می‌شود، آنگاه گشتاور ایجاد شده روی استوانه چرخان یا استوانه ثابت اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین رابطه گشتاور و سرعت زاویه‌ای به دست می‌آید. اما از طرفی تنش وارده از طرف سیال (τ) بر روی دیواره استوانه‌ها با گشتاور رابطه مستقیم داشته و نرخ برش ($\dot{\gamma}$) نیز با سرعت درون استوانه متناسب است. در نهایت از روی این روابط، ارتباط تنش و سرعت برش به دست می‌آید و با توجه به رابطه زیر، ویسکوزیته در نرخ برش‌های مختلف به دست می‌آید:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$



شکل ۳-۸ دستگاه ویسکومتر شرکت BROOKFIELD مدل DV-E /LV

۳-۱-۱۰-۱- دستگاه رئومتر

برای اندازه‌گیری خواص رئومتری سیال غیرنیوتنی در این تحقیق، از دستگاه رئومتر MCR300 ساخت شرکت Anton Paar استفاده شده است. تمام آزمایش‌های رئومتری در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است. در شکل ۳-۹ دستگاه رئومتر نشان داده شده است.



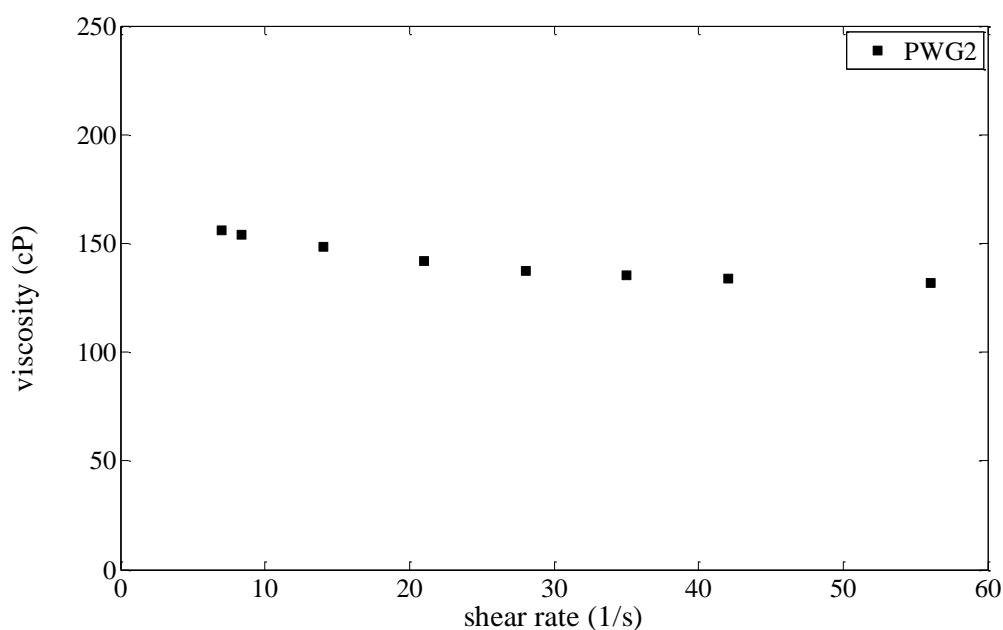
شکل ۳-۹ دستگاه رئومتر MCR300

۳-۲- تست‌های رئومتری

مجموعه آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری خواص ویسکوالاستیک به تست‌های رئومتری معروف هستند. این آزمایش‌ها منجر به شناسایی خواص اصلی سیال می‌شوند.

۳-۲-۱- تست ویسکوزیته

در شکل ۳-۱۰ تغییرات لزجت در برابر نرخ برش برای سیال باگر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش نرخ برش تغییرات جزئی در لزجت بوجود می‌آید و تقریباً در نرخ برش‌های مختلف، لزجت ثابت می‌ماند. همانطور که در آزمون لزجت نشان داده شده است، لزجت این سیال ۱۵۵ سانتی پواز بدست آمد که در شرایط استاندارد دما و فشار اندازه‌گیری شده است.



شکل ۳-۱۰ تغییرات لزجت بر حسب نرخ برش باگر ۱۰۰ [۳۰]

۳-۲-۲- زمان‌های از تنش^۱

زمان‌های از تنش، فاصله زمانی بین تنش اعمالی و تغییر شکل حاصل از آن است. یکی از راه‌های تخمین زمان‌های از تنش بررسی نتایج G' و G'' براساس مدل ماکسول است. مدول‌های G' و G''

¹ Relaxation time

مدول‌های مادی هستند که از آزمون نوسان حاصل می‌شوند. به این صورت که، با ترسیم نمودار تغییرات مدول‌های G' و G'' بر حسب فرکانس اعمالی، اولین نقطه برخورد این مدول‌ها بر حسب فرکانس برابر با عکس زمان رهایی از تنش اول $\frac{1}{\lambda}$ می‌باشد. اما برای حالتی که مدول‌های G' ، G'' هیچ نقطه تلاقی نداشته باشند باید با استفاده از روابط مربوطه مقدار میانگین زمان رهایی از تنش را بدست آوریم که در نحوه استخراج این روابط در پیوست الف بیان شده است.

۳-۳- معرفی دستگاه و روش انجام آزمایش

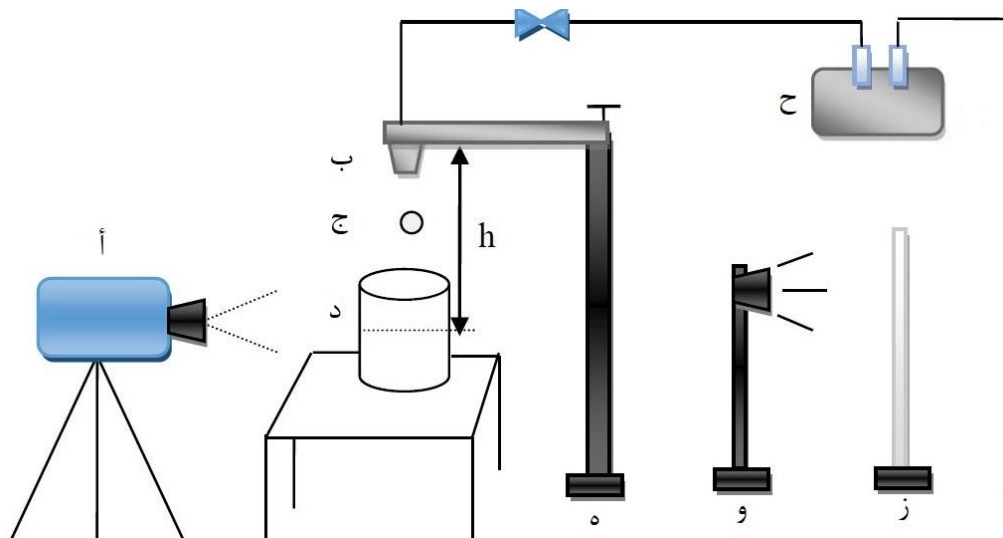
در شکل ۳-۱۱ تجهیزات آزمایش نشان داده شده است که شامل یک دوربین پرسرعت (PCO DIMAXS1) با قابلیت عکس‌برداری ۴۵۰۰ فرم در هر ثانیه (أ)، یک نازل آزاد ساز ذره (ب)، ذرات آزمایش (ج)، یک ظرف کریستالی شفاف پر از مایع (د)، یک مکانیزم تنظیم ارتفاع با قابلیت حرکت در راستای عمودی (ه)، یک سیستم نورپردازی (و)، صفحه پخش نور (ز) و یک پمپ خلاء (ح) است. به منظور نورپردازی از دو پروژکتور استفاده شده است که هر کدام از این پروژکتورها توانایی تأمین ۲۰۰۰ وات انرژی را دارند. ذرات، کروی از جنس تفلون (PTFE) در اندازه‌های ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند. از آب مقطر و سیال باگر به عنوان سیال آزمایش استفاده شد. برای اطمینان از تراز بودن دستگاه آزمایشگاه تمامی تجهیزات با استفاده از یک دستگاه تراز یاب، تنظیم شدند.

مراحل آزمایش به این صورت است که در هر تست ابتدا برای تعیین ارتفاع قرارگیری نازل که در واقع همان ارتفاع سقوط ذره است، از مکانیزم تغییر ارتفاع استفاده شد که این مکانیزم قابلیت حرکت در راستای عمودی را داراست. به این ترتیب که با توجه به ارتفاع سقوط مورد نظر در هر تست، فاصله خروجی نازل تا سطح سیال تنظیم ارتفاع شد. سپس برای اینکه ذره درون نازل ثابت شود، پمپ و نازل با استفاده از یک رابط به هم متصل شدند. طوریکه با روشن شدن پمپ، از آنجایی که قطر خروجی نازل از ذرات مورد استفاده در آزمایش کمی کمتر انتخاب شد، در اثر مکش ایجاد

شده، ذره درون نازل ثابت می ماند و به خروجی نازل متصل می شود. سپس با خاموش شدن پمپ ذره از ارتفاع تعیین شده رها شده و درون ظرف مایع سقوط می کند. در حین سقوط، برای آشکار سازی مسیر حرکت ذره درون سیال، دو پروژکتور به یک صفحه دیفیوزر تابیده شدند و نورپردازی مستقیم صورت نگرفت^۱. آنگاه برخورد ذره با سطح سیال و مسیر حرکت آن درون سیال با استفاده از دوربین پرسرعت (PCO DIMAX S1) با سرعت عکس برداری ۱۰۰۰ فرم در ثانیه ضبط شد. این مراحل برای هر ذره با تغییر ارتفاع آزادسازی، تکرار شد به این ترتیب که پس از هر بار سقوط ذره، ارتفاع نازل برای سقوط بعدی کاهش پیدا کرد تا اینکه ارتفاع بحرانی (سرعت بحرانی) برای هر کدام از اندازه ذرات بدست آمد. برای ارتفاع های بیشتر از ارتفاع بحرانی، ذره درون مایع به طور کامل نفوذ می کند. تا اینکه در ارتفاع بحرانی روی سطح شناور می ماند. با بررسی عکس ها در حالت بحرانی، سرعت بحرانی، سرعت خط تماس سه فازی، چگونگی نفوذ ذره و شکل حفره سطح آزاد بدست می آید.

برای تعیین شرایط بحرانی هر کدام از ذرات هر تست حداقل سه بار تکرار شده است و اختلاف مقادیر اندازه گیری شده در هر تکرار بسیار ناچیز و در حدود ۰/۰۰۱ بوده است. مقدار میانگین داده ها برای تکرارهای مختلف محاسبه شد و پس از اطمینان از درصد خطای ناچیز، از نزدیک ترین مقدار به مقدار میانگین برای محاسبات استفاده گردید.

¹ Backlighting



(الف)



(ب)

شکل ۳-۱۱ (الف) طرح شماتیک تجهیزات آزمایش مورد استفاده جهت مشاهده برخورد ذرات با سطح مشترک هوا - آب. ا- دوربین پر سرعت ۴۵۰۰ فرم بر ثانیه ب-نازل آزادساز ذره ج- ذره تفلونی د-ظرف کریستالی حاوی مایع ه- مکانیزم تنظیم ارتفاع و- سیستم نورپردازی ز- صفحه پخش نور ح-پمپ خلاء. (ب) تجهیزات در آزمایشگاه.

۳-۴- خلاصه ای از شرایط آزمایش

برای محاسبه چگالی ذره، جرم آن با استفاده از ترازوی با دقت $0/001$ گرم اندازه گیری شد. محدوده مجاز ویسکومتر استفاده شده برای اندازه گیری ویسکوزیته سیال نیوتنی، $1-2000000$ سانتی پواز است. در جدول ۳-۱ مقادیر پارامترهای اندازه گیری شده نشان داده شده است.

جدول ۳-۱ خلاصه‌ای از شرایط آزمایش

آزمایش	$d(mm)$	$m (gr)$	$\rho_p (kg/m^3)$	نوع سیال	$\rho_l(kg/m^3)$	$\mu \eta_0 (mpa.s)$	$\sigma_{gl} (mN/m)$
۱	۳	۰/۰۱۹۸	۱۳۸۶/۴۱				
۲	۴	۰/۰۴۶۷	۱۳۹۳/۶۰	آب مقطر	۱۰۰۰/۷	۱/۰۰۲	۷۲
۳	۵	۰/۰۸۸۸	۱۳۶۱/۳۴				
۴	۳	۰/۰۱۹۸	۱۳۸۶/۴۱				
۵	۴	۰/۰۴۶۷	۱۳۹۳/۶۰	باگر ۱۰۰	۱۲۱۴/۵	۱۵۵	۵۷
۶	۵	۰/۰۸۸۸	۱۳۶۱/۳۴				

۳-۵- پردازش تصاویر

برای دریافت یک تصویر بهبود یافته و یا برای استخراج برخی از اطلاعات مفید از تصاویر ضبط شده، از پردازش تصویر استفاده می‌شود که روشی برای تبدیل یک تصویر به صورت دیجیتال و انجام برخی عملیات بر روی آن است. پردازش تصویر اساساً شامل سه مرحله است. مرحله اول، گرفتن تصویر با اسکنرهای نوری یا با دوربین‌ها و حسگرهای دیجیتال، سپس تجزیه و تحلیل تصویر که شامل فشرده‌سازی اطلاعات، بهبود تصویر، تشخیص الگوها است و آخرین مرحله خروجی است که می‌تواند تصویر یا گزارشی باشد که از نتیجه تجزیه و تحلیل تصویر حاصل شده است.

در این پژوهش تصاویر متوالی سقوط و برخورد ذرات با استفاده از دوربین پرسرعت با کیفیت عکس‌برداری 1008×1008 پیکسل و سرعت 1000 فرم در ثانیه ضبط شد. به منظور استخراج اطلاعات مورد نیاز از تصاویر ضبط شده، با استفاده از نرم‌افزار متلب پردازش تصاویر انجام شد به این ترتیب که با استفاده از یک کد دستوری ساده تصاویر در نرم‌افزار اجرا شدند. سپس برای محاسبه مقادیر سرعت‌های برخورد، سرعت ذره در هنگام حرکت درون سیال و سرعت خط تماس سه فازی روی ذره، فواصل مورد نیاز مانند ارتفاع سقوط، مکان نقطه سکون ذره و مکان خط تماس سه فاز بر

روی تصاویر متوالی، بر حسب پیکسل اندازه‌گیری شد. برای تبدیل مقادیر اندازه‌گیری شده بر حسب پیکسل به واحد متریک، باید اندازه یکی از اجزای تصویر (مانند اندازه ذره یا اندازه نازل آزادساز) در حالت واقعی بر حسب متر بدست آید. به این ترتیب که قطر نازل آزادساز با استفاده از کولیس حدود $20/3 \text{ mm}$ اندازه‌گیری شد و با توجه به دقت هر تصویر^۱، یک مقدار بر حسب پیکسل برای قطر نازل بدست آمد. بنابراین هر فاصله پیکسلی در تصویر با استفاده از یک تناسب ریاضی، بر حسب واحد متریک قابل محاسبه خواهد بود.

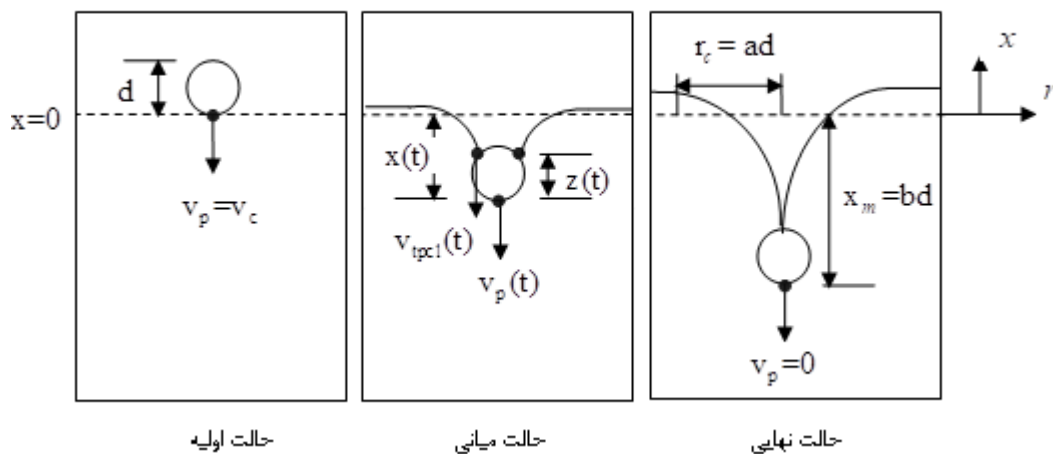
¹ Resolution

فصل سوم: مدل ریاضی

در این بخش یک مدل ریاضی بر پایه موازنه انرژی ارائه شده است که در آن به پیش‌بینی رفتار نفوذ ذره در سیال می‌پردازد.

۱-۴- موازنه انرژی

در شکل ۱-۴ ذره‌ای به قطر d با سرعت بحرانی v_c به سطح مشترک گاز - مایع برخورد می‌کند و پس از نفوذ درون مایع سرعتش به صفر می‌رسد. با استفاده از موازنه انرژی بین حالت ابتدایی و انتهایی رفتار نفوذ ذره را می‌توان پیش‌بینی نمود. به این ترتیب که برای سیستم سه فازی هوا، ذره و سیال روابط مربوط به تغییرات انرژی، کار و حرارت سیستم را از لحظه برخورد ذره به سطح تا بیشترین عمق نفوذ ارائه شده است و در نهایت رابطه‌ای برای پیش‌بینی سرعت بحرانی ذره بدست آمد.



شکل ۱-۴ برخورد ذره با سرعت بحرانی به سطح مشترک گاز - مایع

معادله انرژی را برای سیستم ذره، گاز و مایع بین حالت اولیه و حالت نهایی می‌نویسیم:

$$\Delta E = Q - W \quad (1-4)$$

در رابطه (۱-۴)، ΔE کل تغییرات انرژی، Q گرما و W کار است. برای سیستم آدیاباتیک $Q=0$

است.

$$\Delta E = -W \quad (2-4)$$

تغییرات انرژی کل برابر مجموع تغییرات انرژی ذره، گاز و مایع است و تغییرات انرژی ذره، گاز و مایع برابر مجموع تغییرات انرژی‌های جنبشی، پتانسیل و داخلی آنهاست.

$$\Delta E = \Delta E_p + \Delta E_g + \Delta E_l \quad (3-4)$$

با فرض اینکه دمای سیستم طی فرآیند ثابت بماند، تغییرات انرژی داخلی سیستم را صفر در نظر می‌گیریم. از طرفی سرعت ذره در حالت نهایی به صفر می‌رسد. بنابراین داریم:

$$\Delta E_p = -\frac{1}{2}mv_c^2 - mgbd \quad (4-4)$$

که در رابطه (4-4) m جرم ذره، v_c سرعت بحرانی برخورد، g شتاب گرانش، d قطر ذره و b ثابت بی‌بعدی است که تعیین کننده بیشترین عمقی (x_m) است که ذره درون سیال نفوذ می‌کند (شکل 4-1). همچنین فرض می‌شود که تغییری در انرژی فاز گاز رخ نمی‌دهد:

$$\Delta E_g = 0 \quad (5-4)$$

4-1-1- تغییرات انرژی مایع

به دلیل اندازه کوچک ذره و سرعت برخورد کم، از تغییر انرژی جنبشی مایع می‌توان صرف نظر کرد. بنابراین تغییرات انرژی مایع برابر تغییرات انرژی پتانسیل آن است.

$$\Delta E_l = \Delta PE_l \quad (6-4)$$

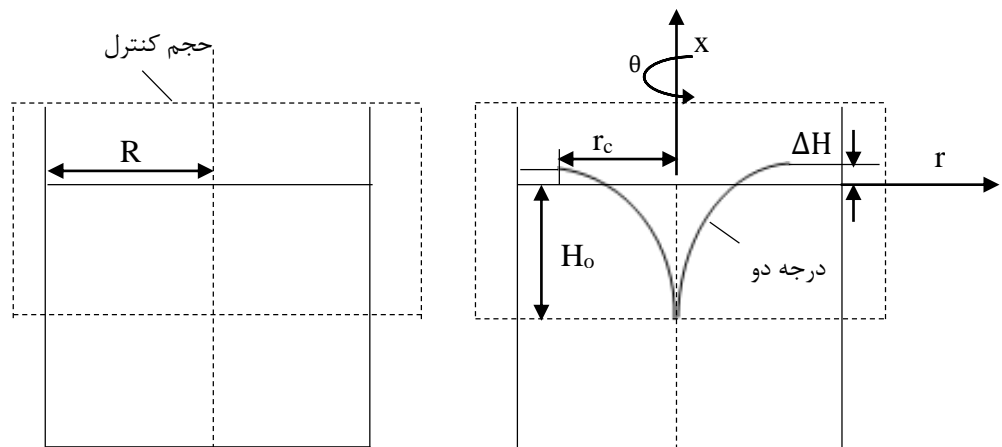
برای بدست آوردن تغییرات انرژی پتانسیل مایع، نفوذ ذره را در شرایط بحرانی در نظر می‌گیریم. شکل 4-2 تصویری از منحنی سطح مشترک گاز - مایع را در شرایط بحرانی برخورد ذره به سیال

نشان می‌دهد که در آن ذره با ماکزیمم عمق نفوذ رسیده و سرعتش صفر است.



شکل ۲-۴ انحناى کویتى در بیشترین عمق نفوذ ذره در شرایط بحرانی

انحنای حفره ایجاد شده را که از خط تماس سه فازی روی ذره تا سطح سیال ادامه دارد، می‌توان با یک منحنی درجه دو تقریب زد. در شکل ۳-۴ حالت ابتدایی و انتهایی حجم کنترل نشان داده شده است که می‌تواند برای موازنه جرم و انرژی پتانسیل مایع مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۳-۴ حجم کنترل طی برخورد ذره بین حالت ابتدایی و انتهایی

انحنای حفره را می‌توان به صورت معادله مرتبه دو (۷-۴) تقریب زد.

$$x + H_o = -\frac{H_o + \Delta H}{r_c^2} (r - r_c)^2 + (H_o + \Delta H) \quad (7-4)$$

یا

$$r^2 = r_c^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{x + H_o}{H_o + \Delta H}} \right)^2 \quad (8-4)$$

موازنه جرم مایع:

— حجم مایع درون حجم کنترل در حالت اولیه:

$$V_1 = \int_{-H_o}^0 \int_0^{2\pi} \int_0^R r dr d\theta dx = \pi R^2 H_o \quad (9-4)$$

— حجم مایع درون حجم کنترل در حالت نهایی:

$$V_2 = \int_{-H_o}^{\Delta H} \int_0^{2\pi} \int_0^R r dr d\theta dx - \int_{-H_o}^{\Delta H} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_c} r dr d\theta dx = \pi \left(R^2 - \frac{1}{6} r_c^2 \right) (H_o + \Delta H) \quad (10-4)$$

با فرض اینکه مایع تراکم‌ناپذیر باشد، حجم مایع در حالت ابتدایی و انتهایی برابر است. بنابراین:

$$V_1 = V_2 \Rightarrow \Delta H = \frac{r_c^2 H_o}{6R^2 - r_c^2} \quad (11-4)$$

تغییرات انرژی پتانسیل مایع:

انرژی پتانسیل مایع در حالت اولیه (قبل از اینکه ذره به سطح مایع برخورد کند):

$$PE_1 = \rho_l g \int_{-H_o}^0 \pi R^2 x dx = -\frac{\pi R^2 H_o^2 \rho_l g}{2} \quad (12-4)$$

انرژی پتانسیل مایع در حالت نهایی (در نقطه ای که سرعت ذره به صفر می‌رسد):

$$PE_2 = \rho_l g \int_{-H_o}^0 \pi (R^2 - r^2) x dx$$

$$= \frac{1}{30} \pi \rho_l g (H_o + \Delta H) [15R^2 (\Delta H - H_o) + r_c^2 (H_o - 4\Delta H)] \quad (13-4)$$

بنابراین برای تغییرات انرژی پتانسیل مایع بین حالت اولیه و نهایی داریم:

$$\Delta PE_1 = PE_2 - PE_1 \quad (14-4)$$

$$\Delta PE_1 = \frac{\pi \rho_l g}{(6R^2 - r_c^2)^2} \left[R^2 r_c^2 H_o^2 (6R^2 - r_c^2) + \frac{1}{2} R^2 r_c^4 H_o^2 \right.$$

$$\left. - \frac{2}{15} r_c^2 H_o^2 (6R^2 - r_c^2)^2 - \frac{4}{15} r_c^4 H_o^2 (6R^2 - r_c^2) - \frac{2}{15} r_c^6 H_o^2 \right] \quad (15-4)$$

به دلیل اینکه شعاع حجم کنترل بیشتر از شعاع حفره است ($R \gg r_c$)، رابطه (۱۵-۴) را می‌توان

به صورت زیر خلاصه کرد:

$$\Delta PE_1 = \frac{1}{30} \pi \rho_l g r_c^2 H_o^2 \quad (16-4)$$

۲-۴- کار در معادله انرژی

W در معادله (۲-۴) از مجموع کار مربوط به نیروهای درگ، شناوری و کشش سطحی بدست می‌آید.

$$W = W_D + W_B + W_S \quad (۱۷-۴)$$

۱-۲-۴- درگ سیال

کار مربوط به درگ سیال، با انتگرال گیری نیروی درگ حول مسیری که ذره طی میکند، بدست می‌آید.

$$W_D = -\frac{1}{2} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \rho_l \int_0^{bd} |v_p - v_{TPCL}|^2 C_D dx \quad (۱۸-۴)$$

که در آن C_D ضریب درگ، x فاصله نقطه سکون ذره تا سطح اولیه سیال (عمق نفوذ ذره)، v_p سرعت نقطه سکون ذره و v_{TPCL} سرعت حرکت مرز مشترک سه فاز روی ذره است که سرعت خط تماس سه فازی نام دارد و $v_p - v_{TPCL}$ اختلاف سرعت ذره و سرعت خط تماس سه فازی است. ضریب درگ ذره طی نفوذ متغیر است و اطلاعی از ضریب درگ ذره ای که به طور جزئی غوطه‌ور است، نداریم. اما با توجه به اینکه در این مطالعه عدد رینولدز ذره از $۰/۳$ بیشتر است، می‌توان از مقدار ضریب درگ غوطه‌وری کامل ذره استفاده کرد [۳۱].

ضریب درگ سیال نیوتنی:

$$C_D = 18.5 / \text{Re}^{0.6}, \text{Re} = \frac{\rho_w d |v_p - v_{TPCL}|}{\mu} \quad (۱۹-۴)$$

ضریب درگ سیال غیرنیوتنی:

برای یک سیال ایده‌ال الاستیک مانند سیال باگر، خواص ویسکومتریکی تقریباً مستقل از نرخ تغییر شکل است و تغییرات ضریب درگ روی ذره کرووی با چگالی بزرگتر از سیال ($\frac{\rho_p}{\rho_b} > 1$) تنها ناشی از تاثیرات الاستیک سیال است. برای سیالاتی مانند باگر که از مدل اولدرویید - بی^۱ پیروی می‌کنند [۳۲] ضریب درگ می‌تواند به صورت رابطه (۲۰-۴) بیان شود [۳۳].

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \left[1 - \frac{1}{2275} \left(\frac{401}{11} - \frac{39\eta_s}{\eta_0} \right) \left(1 - \frac{\eta_s}{\eta_0} \right) De^2 \right] \quad (20-4)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_b d |v_p - v_{TPCL}|}{\eta_0}, De = \frac{\lambda |v_p - v_{TPCL}|}{d}$$

که در آن η_0 ویسکوزیته سیال در نرخ برش صفر، η_s ویسکوزیته حلال، ρ_b چگالی سیال باگر و λ زمان رهایی از تنش سیال است.

۲-۲-۴- شناوری

با انتگرال‌گیری نیروی شناوری (F_B) برای ذره ای که به طور جزئی وارد مایع قرار دارد، حول مسیری که ذره طی می‌کند، می‌توان کار نیروی شناوری را بدست آورد.

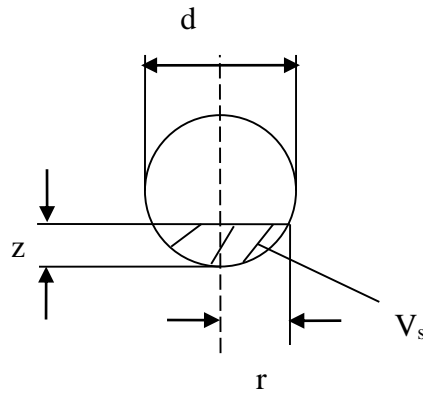
$$W_B = \int_0^{-bd} -F_B dx \quad (21-4)$$

$$F_B = \rho_l g V_s \quad (22-4)$$

که در آن V_s حجم قسمتی از ذره است که درون سیال غوطه ور می‌باشد. در شکل ۴-۴ حجم

¹ Oldroyd-B

غوطه وری نشان داده شده است.



شکل ۴-۴ حجم غوطه‌وری ذره در سیال

$$V_s = -\frac{1}{6}\pi z (3r^2 + z^2)$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2} + z\right)^2} \quad (23-4)$$

$$V_s = \pi z^2 \left(\frac{d}{2} + \frac{z}{3}\right)$$

که در آن r شعاع ترشوندگی و z عمق ترشوندگی ذره در سیال است. با ترکیب معادلات (۲۲-۴) و (۲۳-۴) و جایگذاری در رابطه (۲۱-۴) داریم؛

$$W_B = -\pi \rho_l g \int_0^{-bd} z^2 \left(\frac{d}{2} + \frac{z}{3}\right) dx \quad (24-4)$$

همانطور که گفته شد x فاصله نقطه سکون ذره تا سطح اولیه سیال است و x_{TPCL} فاصله خط تماس سه فازی روی ذره تا سطح اولیه سیال است. از اندازه‌گیری‌ها رابطه‌ای برای عمق ترشوندگی ذره درون سیال بدست آمد که در فصل بعد ارائه خواهد شد.

$$z = x - x_{TPCL} \quad (25-4)$$

۳-۲-۴- کشش سطحی

کار مربوط به کشش سطحی با انتگرال گیری نیروی کشش سطحی (F_s) حول مسیری که ذره طی می کند، بدست می آید.

$$W_s = \int_0^{-bd} -F_s dx \quad (26-4)$$

که در آن برای نیروی کشش سطحی از رابطه ای که در [۳۴] مطرح شد، استفاده می شود.

یعنی؛

$$F_s = \pi d \sigma_{gl} \left(\frac{-2z}{d} - 1 - \cos \theta_a \right) \quad (27-4)$$

که θ_a زاویه تماس پیشروی و σ_{gl} کشش سطحی آب در دمای ۲۹۳ کلوین است.

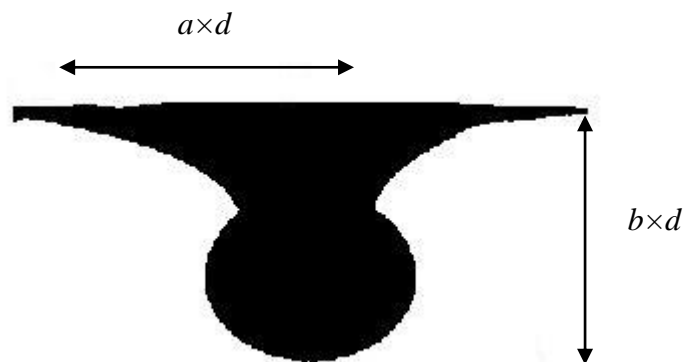
۳-۴- ترکیب معادلات

با قرار دادن روابط کار و انرژی در معادله (۲) داریم؛

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} m v_c^2 + m g b d \\ &= - \int_0^{-bd} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \frac{1}{2} \rho_l |v_p - v_{TPCL}|^2 C_D dx - \int_0^{-bd} \pi d \sigma_{gl} \left(\frac{-2z}{d} - 1 - \cos \theta_a \right) dx \\ & - \int_0^{-bd} \rho_l g \pi z^2 \left(\frac{d}{2} + \frac{z}{3} \right) dx + \frac{1}{30} \pi \rho_l g (ad)^2 [(b-1)d]^2 \end{aligned} \quad (28-4)$$

که در آن a ثابت بی بعدی است که تعیین کننده عرض حفره است. معادله (۲۸-۴) می تواند برای

بدست آوردن سرعت بحرانی برای یک سیستم ذره و سیال مشخص، مورد استفاده قرار گیرد. برای حل این معادله a ، b و θ_a مجهولند. a و b به طور مستقیم از بررسی تصویر حفره در لحظه‌ای که ذره در ماکزیمم عمق نفوذ قرار گرفته است، بدست می‌آید. همانطور که در شکل ۴-۵ نشان داده شده است، در لحظه ماکزیمم عمق نفوذ در شرایط بحرانی برخورد، فاصله سطح اولیه سیال تا نقطه سکون ذره $b \times d$ و شعاع حفره ایجاد شده در این شرایط $a \times d$ در نظر گرفته شده است. بنابراین a و b مستقیم از مشاهدات آزمایش بدست می‌آید. θ_a نیز از برازش معادله (۴-۲۸) با مقادیر سرعت بحرانی اندازه‌گیری شده از مشاهدات بدست می‌آید به این ترتیب که برای همه ذرات آزمایش، با جایگذاری داده‌های اندازه‌گیری شده از مشاهدات در معادله (۴-۲۸)، یک زاویه تماس پیشروی به ازای هر تست بدست می‌آید.



شکل ۴-۵ ثابت‌های بی‌بعد در لحظه ماکزیمم عمق نفوذ ذره در شرایط بحرانی

فصل چہارم: نتائج و بحث

در این فصل نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی و مدلسازی ریاضی مربوط به برخورد ذرات به سطح مشترک گاز - مایع ارائه می‌شوند تا تأثیر پارامترهای مختلف در رژیم‌های برخورد مورد مطالعه قرار گیرند. در قسمت آزمایشگاهی سقوط ذرات کرووی از جنس تفلون با اندازه‌های متفاوت در آب و سیال غیرنیوتنی باگر مورد بررسی قرار گرفت. در مدلسازی ریاضی که در فصل ۳ به طور مفصل بیان شد، رفتار نفوذ ذرات با استفاده از موازنه انرژی سیستم سه فازی مسئله برای هردو سیال نیوتنی و غیرنیوتنی، مورد مطالعه قرار گرفت. در این فصل ابتدا به مقایسه نتایج آزمایشگاهی سیال نیوتنی و غیر نیوتنی پرداخته می‌شود و همچنین هم‌خوانی این نتایج با مدل ریاضی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۱- مشاهدات آزمایش

با فرض اینکه ذره‌ای از ارتفاع مشخص h به سطح مشترک گاز - مایع برخورد کند، انرژی پتانسیل آن در ارتفاع h ، برابر با انرژی جنبشی آن در سطح سیال است. بنابراین سرعت برخورد ذره به سطح با استفاده از رابطه $V_I = \sqrt{2gh}$ محاسبه می‌شود. با بررسی عکس‌ها، ارتفاع سقوط در هر تست قابل اندازه‌گیری است. بنابراین سرعت برخورد نیز محاسبه خواهد شد. بیشترین سرعت برخوردی که در آن ذره بتواند روی سطح شناور بماند، سرعت بحرانی ذره است. در آزمایش‌ها با تغییر سرعت برخورد برای هر ذره، سرعت بحرانی بدست می‌آید به این ترتیب که با کاهش ارتفاع آزادسازی، اولین سرعتی که در آن ذره روی سطح مایع شناور بماند، سرعت بحرانی و ارتفاع معادل آن نیز ارتفاع بحرانی است. بنابراین اگر سرعت برخورد کمتر از مقدار سرعت بحرانی مورد نیاز برای غلبه بر کشش سطحی باشد، حتی اگر ذره چگال‌تر از مایع باشد، شناور باقی می‌ماند. در این مطالعه برای ذره آب‌گریز تفلون دو رژیم برخورد مشاهده شد. در سرعت‌های کمتر از سرعت بحرانی، ذره پس از نوسان کوتاهی روی سطح مایع شناور ماند و در سرعت‌های بیشتر از سرعت بحرانی، به طور کامل درون مایع نفوذ کرد. آزمایش‌ها برای هر کدام از قطرها سه مرتبه تکرار شد که در انتها مقدار سرعت بحرانی برای سقوط ذرات کرووی از جنس تفلون در هر دو سیال آزمایش بدست آمد. سرعت‌های بحرانی برای قطرهای

مختلف ذره، در آب مقطر (شکل ۱-۵) و در سیال باگر (شکل ۲-۵) بدست آمدند. نشان داده شده است که با افزایش قطر ذره، مقدار سرعت بحرانی کاهش می‌یابد.

در جدول ۱-۵ مقادیر خطا و درصد تکرارپذیری و عدم قطعیت برای داده‌های مربوط به سرعت بحرانی ذرات محاسبه شده است. روابط مربوط به محاسبه این مقادیر در پیوست ب ارائه شده است. هر آزمایش در شرایط یکسان و با نمونه‌های یکسان، سه مرتبه تکرار شد. مقادیر میانگین برای تکرارها محاسبه گردید و از نزدیک ترین مقدار به مقدار میانگین در محاسبات مدلسازی استفاده شد.

جدول ۱-۵ خطای مطلق و تکرارپذیری داده‌های مربوط به سرعت بحرانی

عدم قطعیت	تکرارپذیری	خطای مطلق	مقدار انتخابی برای محاسبات	مقدار میانگین	تکرار سوم	تکرار دوم	تکرار اول	d(mm)	نوع سیال	آزمایش
σ_E	Repeatability	Error	v_c	v_c	v_c	v_c	v_c	v_c		
۰/۰۰۵۵	۲/۲٪	۰/۰۰۹۵	۰/۴۳۸۹	۰/۴۳۸۷	۰/۴۲۹۰	۰/۴۴۸۲	۰/۴۳۸۹	۳	آب مقطر	۱
۰/۰۰۶۳	۵/۴٪	۰/۰۱۵	۰/۲۹۵۲	۰/۲۹۴۵	۰/۳۱	۰/۲۹۵۲	۰/۲۷۸۳	۴	آب مقطر	۲
۰/۰۰۳۶	۳/۶٪	۰/۰۰۶	۰/۱۸۳۷	۰/۱۸۳۰	۰/۱۸۹۰	۰/۱۷۶۳	۰/۱۸۳۷	۵	آب مقطر	۳
۰/۰۰۹۹	۲/۲٪	۰/۰۱۶۸	۰/۷۸۴۰	۰/۷۸۳۲	۰/۷۸۴۰	۰/۷۶۵۶	۰/۸	۳	باگر	۴
۰/۰۱۵۶	۴/۵٪	۰/۰۲۵۲	۰/۶۰۱۲	۰/۶	۰/۵۷۲۴	۰/۶۲۶۴	۰/۶۰۱۲	۴	باگر	۵
۰/۰۰۳۷	۱/۱٪	۰/۰۰۶۲	۰/۵۷۲۲	۰/۵۷۱۸	۰/۵۷۸۰	۰/۵۷۲۲	۰/۵۶۵۲	۵	باگر	۶

شرایط بحرانی برخورد ذرات تفلونی به قطره‌های ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر با آب مقطر در شکل ۵-۱ و سیال باگر در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، همگی ذرات با اختلاف سرعت ناچیز از حالت بحرانی درون سیال نفوذ کردند. به طور کلی، دینامیک برخورد ذرات صلب کروی و چگونگی تشکیل حفره تابعی از اندازه، چگالی و سرعت برخورد ذره است. ذرات در حین نفوذ درون سیال یک حفره از هوا ایجاد می‌کنند که این حفره مقداری هوا را حمل می‌کند سپس ذره به حرکت خود ادامه می‌دهد و در نهایت از سطح جدا شده و با یک سرعت کمتر به حالت پایدار می‌رسد (رژیم نفوذ) و یا اینکه در شرایط بحرانی با نوساناتی در حرکت روبرو می‌شود و سپس روی سطح سیال شناور می‌ماند (رژیم شناوری).



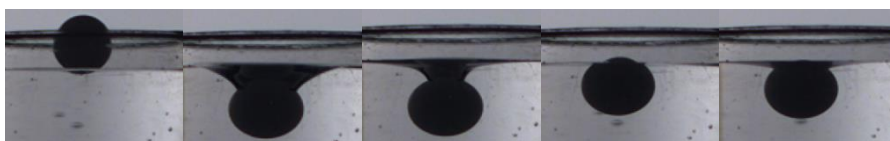
الف) نفوذ ($d = 3 \text{ mm}, v_l = 0.4390 \text{ m/s}$)



ب) شناوری ($d = 3 \text{ mm}, v_c = 0.4389 \text{ m/s}$)



ج) نفوذ ($d = 4 \text{ mm}, v_l = 0.2983 \text{ m/s}$)



د) شناوری ($d = 4 \text{ mm}, v_c = 0.2952 \text{ m/s}$)



ه) نفوذ ($d = 5 \text{ mm}, v_l = 0.2 \text{ m/s}$)



و) شناوری ($d = 5 \text{ mm}, v_c = 0.1837 \text{ m/s}$)

شکل ۱-۵ عکس‌های متوالی برخورد ذرات کروی از جنس تفلون در اندازه‌های ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر با سطح مشترک هوا - آب و انواع رژیم‌های برخورد



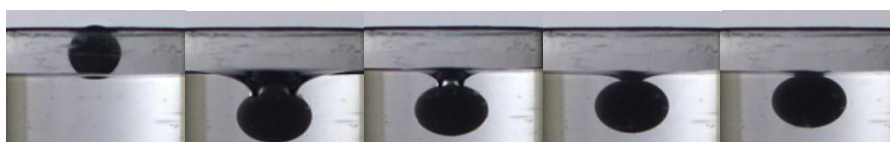
الف) نفوذ ($d = 3 \text{ mm}$, $v_l = 0.7905 \text{ m/s}$)



ب) شناوری ($d = 3 \text{ mm}$, $v_c = 0.7840 \text{ m/s}$)



ج) نفوذ ($d = 4 \text{ mm}$, $v_l = 0.6050 \text{ m/s}$)



د) شناوری ($d = 4 \text{ mm}$, $v_c = 0.6012 \text{ m/s}$)



ه) نفوذ ($d = 5 \text{ mm}$, $v_l = 0.5782 \text{ m/s}$)



و) شناوری ($d = 5 \text{ mm}$, $v_c = 0.5722 \text{ m/s}$)

شکل ۵-۲ عکس‌های متوالی برخورد ذرات کروی از جنس تفلون در اندازه‌های ۳، ۴ و ۵ mm با سطح مشترک هوا - سیال باگ و انواع رژیم‌های برخورد

معمولاً برای بررسی برخورد جسم جامد در سیالات برهم‌کنش نیروهای اینرسی، ویسکوز، کشش سطحی، گرانش و الاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرند. گروه اعداد بی بعد استاندارد برای سنجش رفتار نفوذ ذره در سیال رینولدز، کپیلاری و فرود^۱ می‌باشند [۱، ۳۵، ۳۶]. عدد فرود برای سنجش نفوذ ذره در سیال باگر، به دلیل خاصیت الاستیک آن، مناسب نیست. بنابراین برای ارزیابی میزان نفوذ ذره در سیال باگر از عدد فرود الاستیک استفاده شد که در رابطه (۱-۵) تعریف شده است.

$$\text{Re} = \frac{\rho_l v_l d}{\mu}, \text{Ca} = \frac{\mu v_l}{\sigma_{gl}}, \text{Fr} = \frac{v_l^2}{gd} \quad (1-5)$$

$$\text{Fe} = \frac{\Delta\rho v_l^2}{G} = \text{Fr} \frac{\Delta\rho gd}{G}, G = \frac{\eta_0}{\lambda}$$

که در آن $\Delta\rho$ اختلاف چگالی ذره و سیال باگر ($\Delta\rho = \rho_p - \rho_b$)، G مدول الاستیک، η_0 ویسکوزیته و λ زمان رهایی از تنش سیال باگر مورد استفاده است. در واقع عدد فرود الاستیک مربع عدد ماخ الاستیک^۲ است، که عدد ماخ الاستیک به صورت نسبت سرعت سیال v_l به سرعت موج الاستیک $\sqrt{\frac{G}{\rho_b}}$ تعریف می‌شود [۳۷]. در رابطه (۳-۵)، اعداد بی‌بعد بوند^۳، وبر و ماخ الاستیک ارائه شده است که نشان می‌دهد، اعداد رینولدز، کپیلاری، فرود و فرود الاستیک برای سنجش حرکت ذره درون سیال کفایت می‌کنند.

¹ Froud number

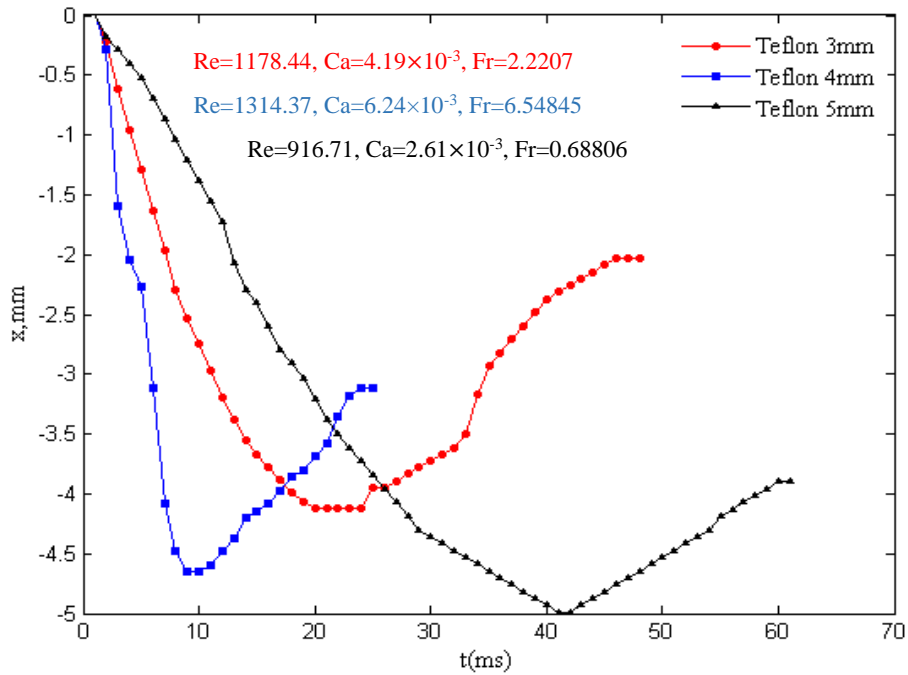
² Joseph's elastic Mach number

³ Bond number

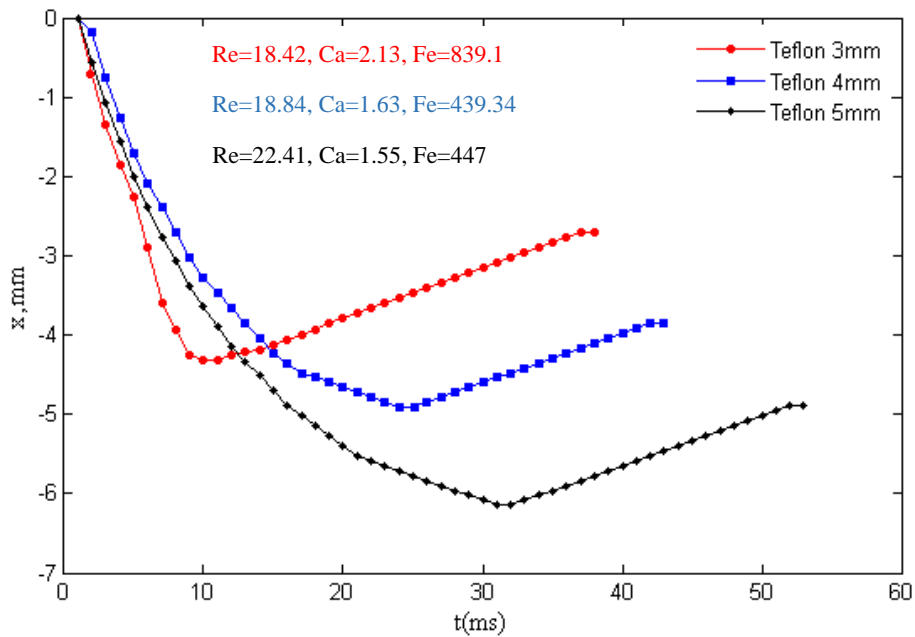
$$Bo = \frac{Re \cdot Ca}{Fr}, We = Re \cdot Ca$$

$$Ma = \frac{v_l}{\sqrt{\frac{G}{\rho_b}}} = \sqrt{Fe} \quad (2-5)$$

شکل ۳-۵ و شکل ۴-۵ مکان نقطه سکون ذره یا همان عمق نفوذ بر حسب زمان طی حرکت ذره درون هر دو سیال در شرایط بحرانی رسم شده است. مشاهده شده است که برای هر سه اندازه ذرات تفلونی در هر دو نوع سیال آب مقطر و باگر حرکت نوسانی وجود دارد. یعنی ذره به سطح سیال برخورد کرده و درحین نفوذ مجموع مقادیر نیروهای مقاومتی به تدریج افزایش می‌یابند و قبل از اینکه نیروهای مقاومتی باعث توقف حرکت ذره شوند، تا یک عمق مشخص به سمت پایین حرکت می‌کند و به یک تعادل ناپایدار می‌رسد. در واقع انرژی جنبشی اولیه ذره به انرژی پتانسیل ذره و سیال تبدیل می‌شود و با رسیدن به سرعت صفر تغییر جهت داده به سمت بالا حرکت می‌کند. یعنی انرژی پتانسیل مجدداً به انرژی جنبشی ذره تبدیل می‌شود. اگر ذره با سرعت بحرانی بر روی سطح سقوط کند، این نوسانات تکرار می‌شوند تا زمانیکه انرژی جنبشی اولیه به طور کامل تلف شود و در نهایت ذره روی سطح سیال ثابت می‌ماند. اما در شرایط غیر بحرانی ذره پس از یک یا چند نوسان بسیار کوتاه از سطح سیال جدا شده و به طور کامل نفوذ می‌کند.



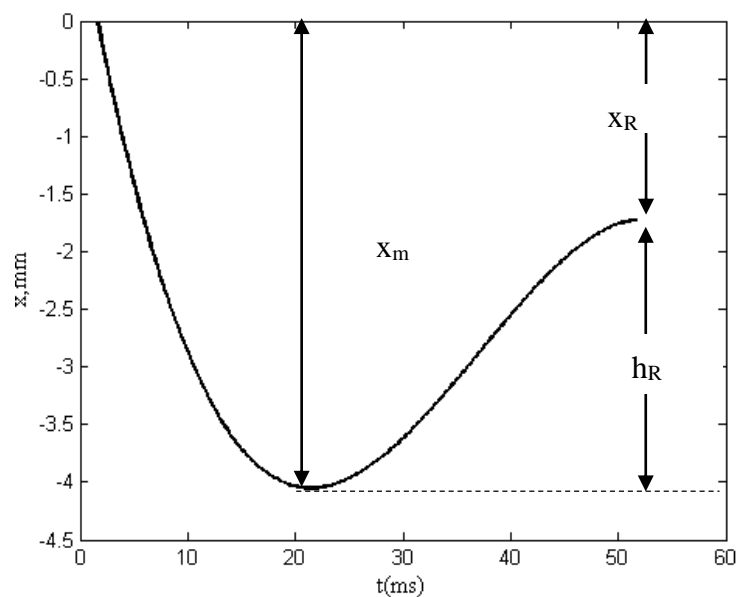
شکل ۳-۵ حرکت ذرات کروی طی نفوذ درون آب مقطر در شرایط بحرانی



شکل ۴-۵ حرکت ذرات کروی طی نفوذ درون سیال باگر در شرایط بحرانی

یکی از پارامتر مهم قابل بررسی ماکزیمم عمق نفوذ ذره (x_m) است که در واقع فاصله‌ای از سطح است که در آن ذره توسط نیروهای مقاومتی متوقف می‌شود و برای اولین بار سرعتش به صفر می‌رسد.

پارامتر مهم دیگر عمق برگشتی^۱ (x_R) است که در آن ذره در انتهای حرکت رو به بالا، سرعتش برای بار دوم صفر شده و در حال شروع به حرکت مجدد به سمت پایین است. اختلاف بیشترین عمق نفوذ ذره و عمق برگشتی آن، ارتفاع برگشتی^۲ (h_R) نام دارد که در واقع فاصله‌ای است که ذره در حرکت رو به بالا طی می‌کند (شکل ۵-۵). پارامتر مهم دیگر که تنها مربوط به شرایطی است که ذره به طور کامل در سیال نفوذ می‌کند، عمق شکست^۳ (z_p) است و در واقع مکانی است که ذره از سطح سیال به طور کامل جدا می‌شود و بدیهی است که در شرایط بحرانی شکست اتفاق نمی‌افتد. آزمایش‌ها نشان داد که هر چه سرعت برخورد ذره از شرایط بحرانی فاصله داشته باشد؛ یعنی حالتی که اختلاف سرعت برخورد ذره با سرعت بحرانی بیشتر شود، مقدار x_m ، x_R و z_p تقریباً برابر است که به این معنی است که فقط در سرعت‌های بحرانی و نزدیک بحرانی نوسانات قابل مشاهده است. در جدول ۲-۵ و جدول ۳-۵ مقادیر این پارامترها برای چندین برخورد مختلف نشان داده شده است.



شکل ۵-۵ پارامترهای نفوذ طی نوسان ذرات

-
- 1 Position of the first rebound
 - 2 The rebound height
 - 3 The position of pinch off

جدول ۲-۵ مقادیر داده‌های مربوط به پارامترهای نفوذ برای ذرات در سرعت‌های برخورد مختلف در آب مقطر

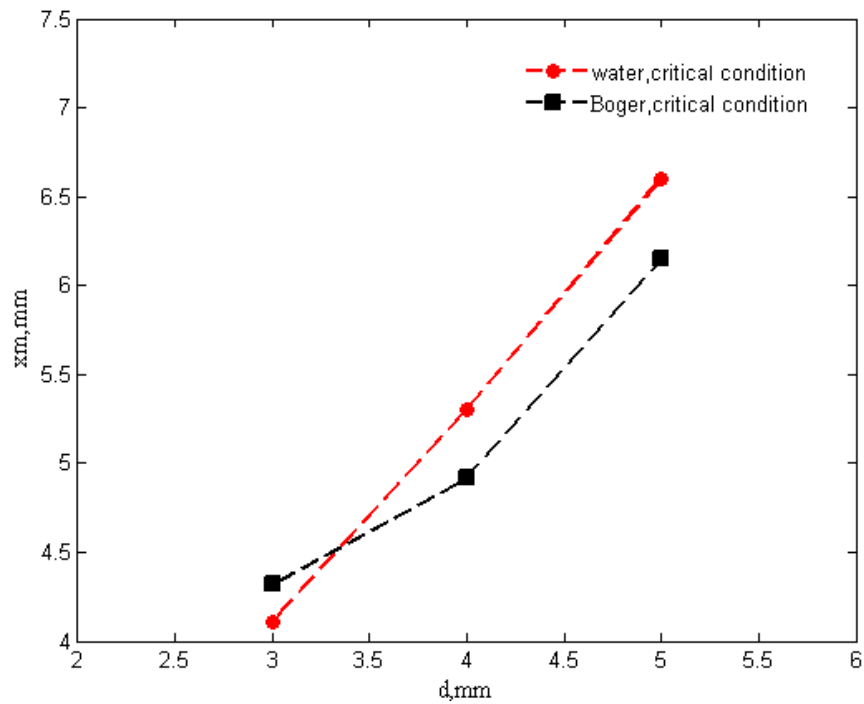
h _R (mm)	x _R (mm)	z _p (mm)	x _m (mm)	V _i (m/s)	h(mm)	شرایط	d(mm)	نوع سیال
۲/۰۸۸۴	۲/۰۳۰۲	-	۴/۱۱۸۶	۰/۴۳۸۹	۹/۸۱۸۴	بحرانی	۳	آب مقطر
۰/۸۴۶۰	۳/۴۳۹۰	۳/۷۷۸۰	۴/۲۸۵۰	۰/۴۳۹۰	۹/۸۲۴۱	نزدیک به بحرانی	۳	
۰	۶/۳۷	۶/۳۷	۶/۳۷	۰/۷۶۹۲	۳۰/۱۵۸	غیربحرانی	۳	
۰	۶/۶	۶/۶	۶/۶	۰/۹۳۹۶	۴۵	غیربحرانی	۳	
۱/۵۳	۳/۱۱۹۷	-	۴/۶۵۱۲	۰/۲۹۵۲	۴/۴۴۱۹	بحرانی	۴	آب مقطر
۰/۰۵	۵/۱۶	۵/۱۶	۵/۲۱	۰/۲۹۸۳	۴/۵۳۶۳	نزدیک به بحرانی	۴	
۰	۸/۳۰۷۶	۸/۳۰۷۶	۸/۳۰۷۶	۰/۶۹۵۵	۲۴/۶۶	غیربحرانی	۴	
۰	۸/۴۶۱۵	۸/۴۶۱۵	۸/۴۶۱۵	۱	۵۱/۴۶	غیربحرانی	۴	
۱/۲	۳/۸۹۹۴	-	۵/۱	۰/۱۸۳۷	۱/۷۲۰۳	بحرانی	۵	آب مقطر
۰/۰۴۸۹	۵/۶۶۱۱	۵/۶۶۱۱	۵/۷۱	۰/۲	۲/۰۵۸۵	نزدیک به بحرانی	۵	
۰	۶/۳۱۸۰	۶/۳۱۸۰	۶/۳۱۸۰	۰/۲۹۰۵	۴/۳۰۱۶	غیربحرانی	۵	
۰	۹/۷۷۲۷	۹/۷۷۲۷	۹/۷۷۲۷	۰/۶۱۰۵	۱۹	غیربحرانی	۵	

جدول ۳-۵ مقادیر داده‌های مربوط به پارامترهای نفوذ برای ذرات در سرعت‌های برخورد مختلف در سیال باگر

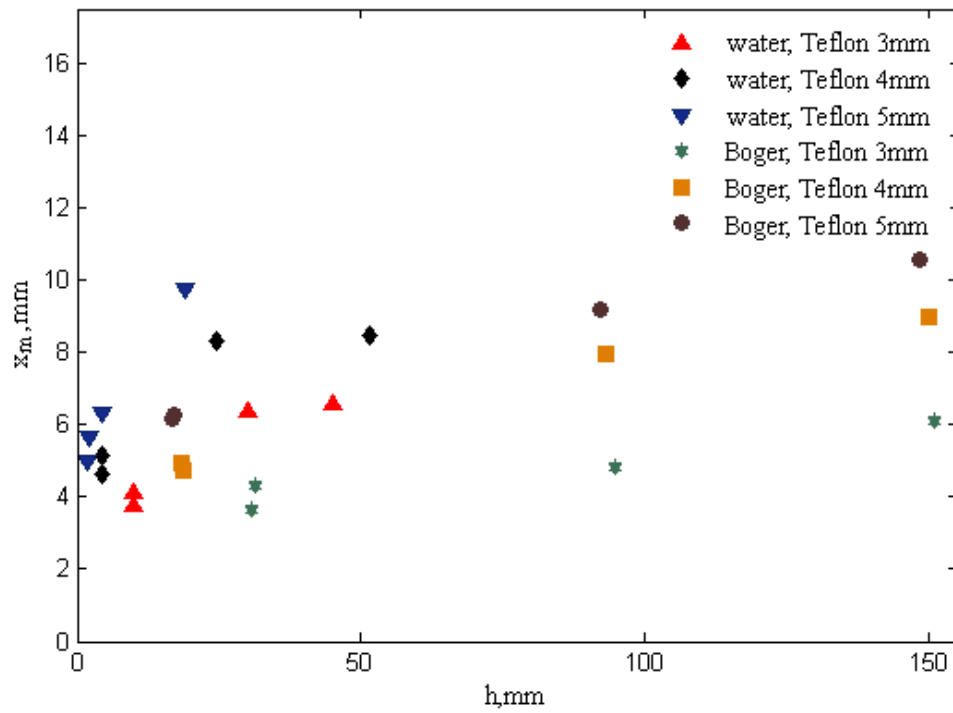
$h_R(\text{mm})$	$x_R(\text{mm})$	$z_p(\text{mm})$	$x_m(\text{mm})$	$V_i(\text{m/s})$	$h(\text{mm})$	شرایط	$d(\text{mm})$	نوع سیال
۱/۶۲	۲/۷	-	۴/۳۲	۰/۷۸۴۰	۳۱/۳۳	بحرانی	۳	باگر ۱۰۰
۰/۷۵۴	۳/۴۵۶۸	۳/۶۴۵۲	۴/۲۱۰۸	۰/۷۹۰۵	۳۱/۸۵	نزدیک به بحرانی	۳	
۰/۳۰۱۲	۴/۸۱۷۴	۴/۸۱۷۴	۵/۱۱۸۶	۱/۳۶۳۲	۹۴/۷۲	غیربحرانی	۳	
۰	۶/۱۲۵	۶/۱۲۵	۶/۱۲۵	۱/۷۲۱۲	۱۵۱	غیربحرانی	۳	
۱/۰۷۱۷	۳/۸۴۵۶	-	۴/۸۹۱۷	۰/۶۰۱۲	۱۸/۴۲۴۴	بحرانی	۴	باگر ۱۰۰
۰/۴۳۹۹	۴/۵۸۷۹	۴/۷۱۳۶	۵/۰۲۷۸	۰/۶۰۵۰	۱۸/۶۶	نزدیک به بحرانی	۴	
۰	۷/۹۶۱۷	۷/۹۶۱۷	۷/۹۶۱۷	۱/۳۵۲۱	۹۳/۱۸	غیربحرانی	۴	
۰	۹/۰۰۲	۹/۰۰۲	۹/۰۰۲	۱/۷۱۶۰	۱۵۰/۱	غیربحرانی	۴	
۱/۳۰۵۵	۴/۸۹۴۵	-	۶/۲	۰/۵۷۲۲	۱۶/۶۹۱	بحرانی	۵	باگر ۱۰۰
۰	۶/۲۶۵۴	۶/۲۶۵۴	۶/۲۶۵۴	۰/۵۷۸۲	۱۷/۰۴۱	نزدیک به بحرانی	۵	
۰	۹/۱۷۲۵	۹/۱۷۲۵	۹/۱۷۲۵	۱/۳۴۴۸	۹۲/۱۷۷	غیربحرانی	۵	
۰	۱۰/۵۹	۱۰/۵۹	۱۰/۵۹	۱/۷۰۶۹	۱۴۸/۵	غیربحرانی	۵	

به طور کلی ماکزیمم عمق نفوذ تابعی از قطر، چگالی و ارتفاع سقوط ذره است. در شکل ۵-۶ تغییرات ماکزیمم عمق نفوذ ذرات برحسب قطر تنها در شرایط بحرانی رسم شده است. در شکل ۵-۷ تغییرات ماکزیمم عمق نفوذ با ارتفاع سقوط برای ذرات تفلونی در اندازه‌های مختلف برای هر دو سیال آب مقطر و باگر رسم شده است. واضح است که با افزایش ارتفاع سقوط، ماکزیمم عمق نفوذ نیز افزایش می‌یابد زیرا که انرژی جنبشی بیشتر به ذره اجازه می‌دهد که مسیر طولانی‌تری را قبل از متوقف شدن توسط نیروهای مقاومتی طی کند. همانطور که در شکل نیز مشخص است، تغییرات x_m

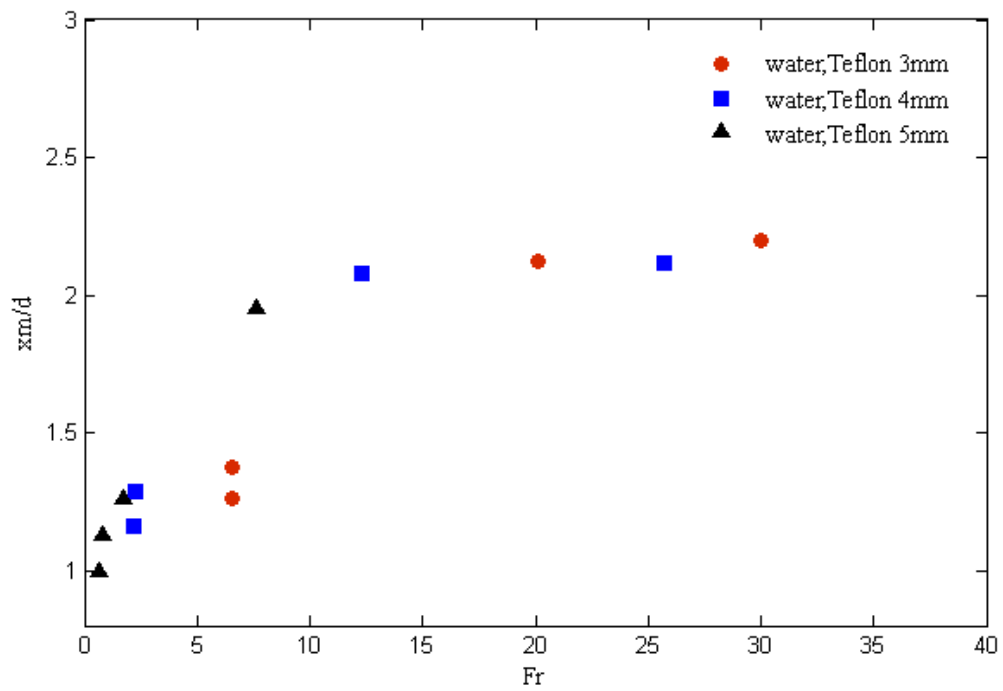
با h تقریباً خطی است. داده‌های مربوط به این تغییرات را به صورت عمق نرمالیزه شده (x_m/d) در برابر عدد فرود برای آب مقطر در شکل ۵-۸ و عدد فرود الاستیک برای سیال باگر در شکل ۵-۹ رسم شده است،



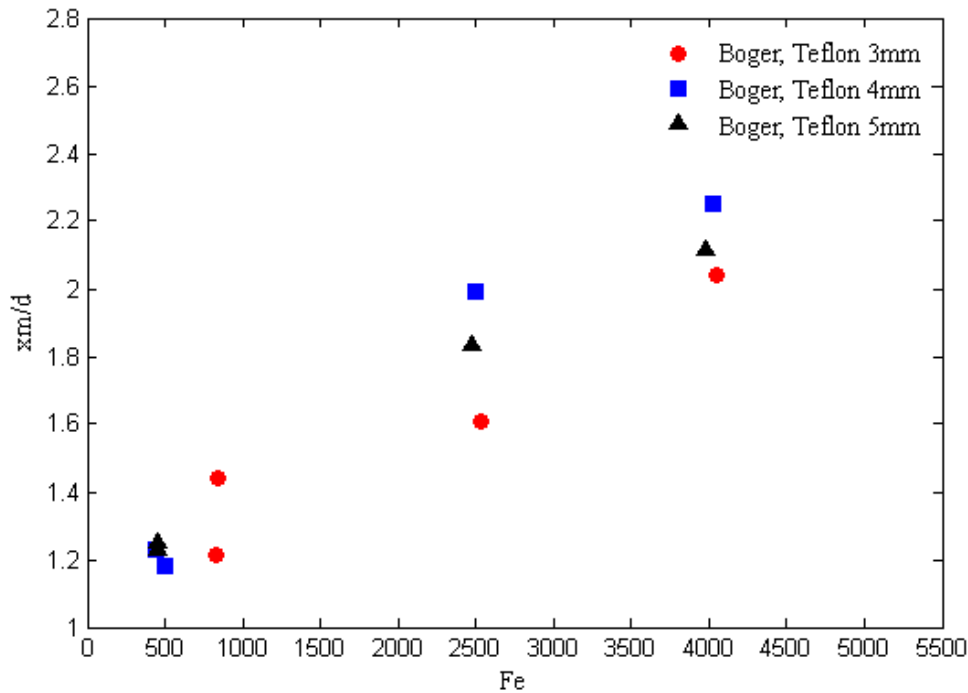
شکل ۵-۶ تغییرات ماکزیمم عمق نفوذ در شرایط بحرانی برای سه اندازه ذرات ۳، ۴ و ۵ mm در آب مقطر و سیال باگر



شکل ۷-۵ تغییرات ماکزیمم عمق نفوذ با ارتفاع سقوط برای ذرات تفلونی



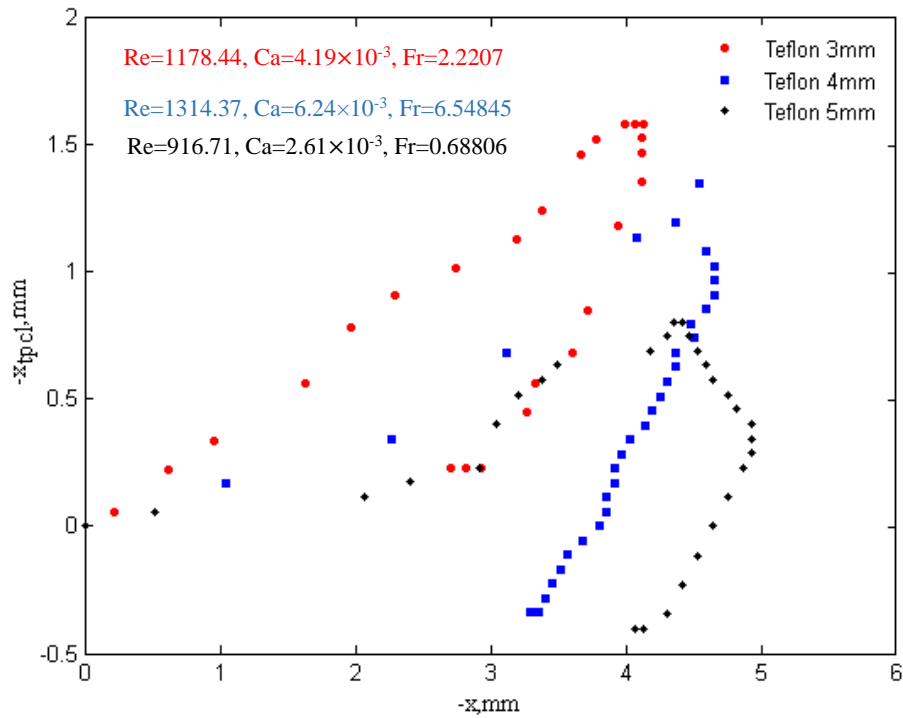
شکل ۸-۵ تغییرات عمق نرمالیزه شده (x_m/d) در برابر عدد فرود (Fr) برای سقوط ذرات در آب مقطر



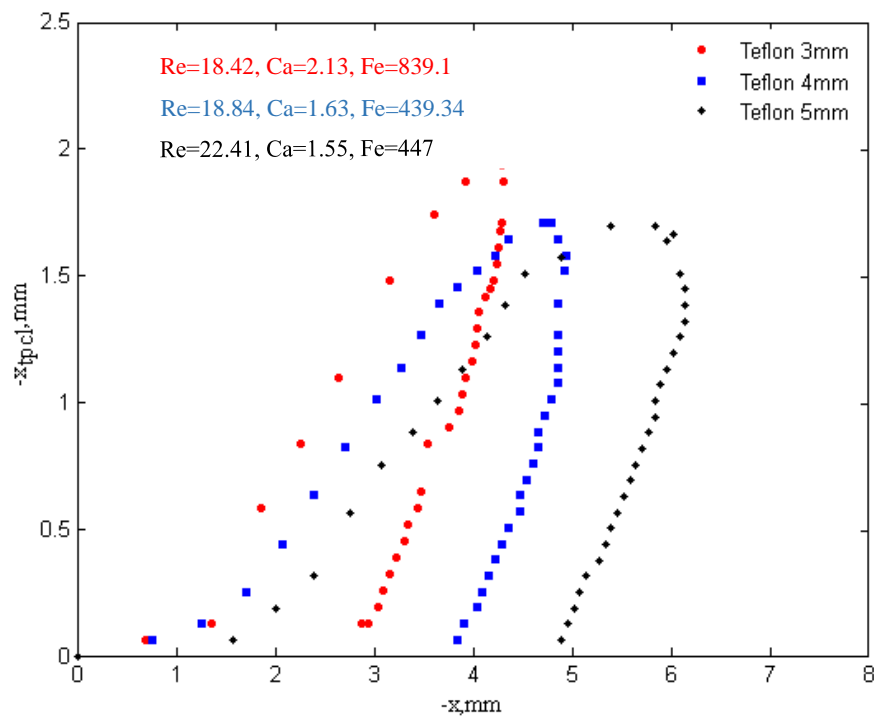
شکل ۵-۹ تغییرات عمق نرمالیزه شده (x_m/d) در برابر عدد فرود الاستیک (Fe) برای سقوط ذرات در سیال باگر

۵-۲- تحلیل سرعت ذره در شرایط بحرانی

در حالتی که ذره با سرعت بحرانی به سطح سیال برخورد کند، برای محاسبه سرعت حرکت ذره و سرعت خط تماس سه فازی روی ذره درون سیال، ابتدا باید مقادیر x ، x_{tpcl} طی حرکت ذره از پردازش تصاویر متوالی اندازه‌گیری شود، که برای بدست آوردن x ، فاصله سطح اولیه سیال تا نقطه سکون ذره برای همه عکس‌های متوالی از لحظه برخورد به سطح تا انتهای اولین نوسان با استفاده از نرم‌افزار متلب اندازه‌گیری شد و برای بدست آوردن مقادیر x_{tpcl} نیز به همین روش فاصله سطح اولیه سیال تا محل خط تماس سه فازی روی ذره اندازه‌گیری شد که در شکل ۵-۱۰ و شکل ۵-۱۱ مقادیر این داده‌ها برای برخورد ذرات تفلونی در سیال آب مقطر و باگر نشان داده شده است. همانطور که از شکل‌ها مشخص است، در شرایط بحرانی در نوسان اول از حرکت ذرات، تغییرات مکان خط تماس با مکان نقطه سکون ذره در حرکت رو به پایین، یعنی از لحظه برخورد ذره به سطح ($x=x_{tpcl}=0$) تا لحظه صفر شدن سرعت ($x=x_m$)، صعودی و در حرکت رو به بالا نزولی است.

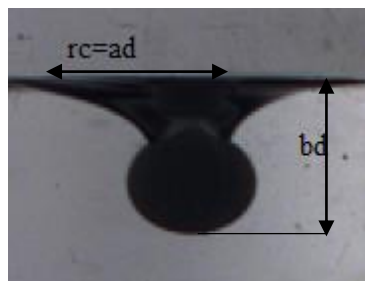


شکل ۱۰-۵ تغییرات مکان خط تماس سه فاز روی ذره (XTPCL) برحسب مکان نقطه سکون ذره (X) در آب مقطر در شرایط بحرانی



شکل ۱۱-۵ تغییرات مکان خط تماس سه فاز روی ذره (XTPCL) برحسب مکان نقطه سکون ذره (X) در سیال باگر در شرایط بحرانی

در شکل ۵-۱۲ تصویر ذره تفلونی به قطر 3 mm در آب تحت شرایط بحرانی نشان داده شده است که در آن سرعت ذره در انتها به صفر رسیده و زمان شروع حرکت آن به سمت بالا است. با استفاده از نرم افزار متلب، همانطور که در شکل نشان داده شده است، عرض حفره ($a \times d$) و ماکزیمم عمق نفوذ ($b \times d$) ذره از روی هر عکس بر حسب پیکسل اندازه گیری شدند و با توجه به دقت تصاویر مربوط به هر کدام از تست ها بر حسب میلی متر محاسبه شدند. آنگاه با توجه به قطر مشخص ذره در هر تست، مقادیر a و b محاسبه گردید. این مقادیر برای هر سه قطر ذرات آزمایش در آب مقطر و سیال باگر مطابق جدول ۵-۴ بدست آمد.



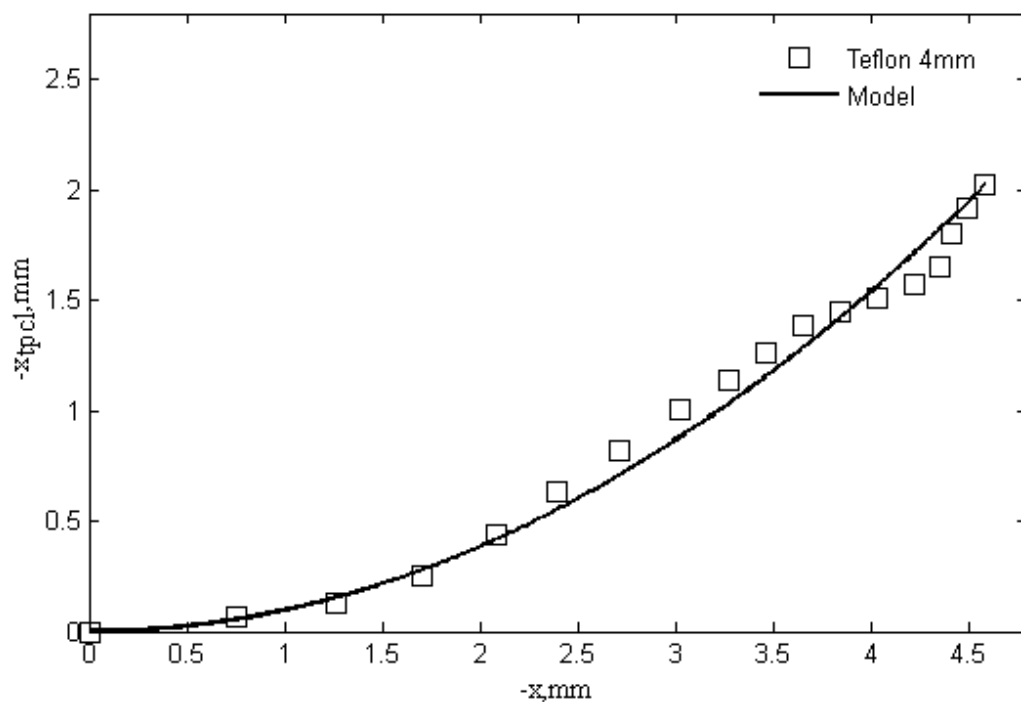
شکل ۵-۱۲ شعاع حفره و عمق نفوذ ذره در شرایط بحرانی برای قطر 3 mm

جدول ۵-۴ مقادیر ثابت های بی بعد از مشاهدات آزمایش برای هر سه قطر ذره در آب مقطر و سیال باگر

b	a	$b \times d$ (pixel)	$a \times d$ (pixel)	Resolution (pixel/mm)	$d(\text{mm})$	سیال	آزمایش
۱/۳۷	۱/۱۷	۷۳	۶۲/۵	۱۷/۷۲	۳	آب مقطر	۱
۱/۱۶	۱/۲۴	۸۲	۸۷/۴	۱۷/۶۲	۴	آب مقطر	۲
۱/۰۲	۱/۰۴	۸۹	۹۰/۶	۱۷/۴۳	۵	آب مقطر	۳
۱/۴۴	۱/۹۸	۶۷	۹۲/۵	۱۵/۵۴	۳	باگر ۱۰۰	۴
۱/۲۴	۱/۳۷	۷۸	۸۷	۱۵/۸۶	۴	باگر ۱۰۰	۵
۱/۴	۱/۵۳	۱۱۱/۵	۱۲۲	۱۵/۹۳	۵	باگر ۱۰۰	۶

در شکل ۱۳-۵ منحنی داده‌های مربوط به x و x_{tpcl} به عنوان نمونه برای ذره به قطر 4 mm نشان داده شده است که این منحنی را در محدوده حرکت رو به پایین ذره در اولین نوسان (از لحظه‌ی برخورد به سطح تا بیشترین عمق نفوذ) می‌توان با معادله درجه دو رابطه (۳-۵) تقریب زد. که صحت این تقریب، برای سایر اندازه ذرات نیز در هر دو نوع سیال مورد بررسی، سنجیده شده است که انطباق خوبی با مدل وجود دارد.

$$x_{tpcl} = -\frac{b-1}{b} \frac{1}{bd} x^2 \quad (3-5)$$



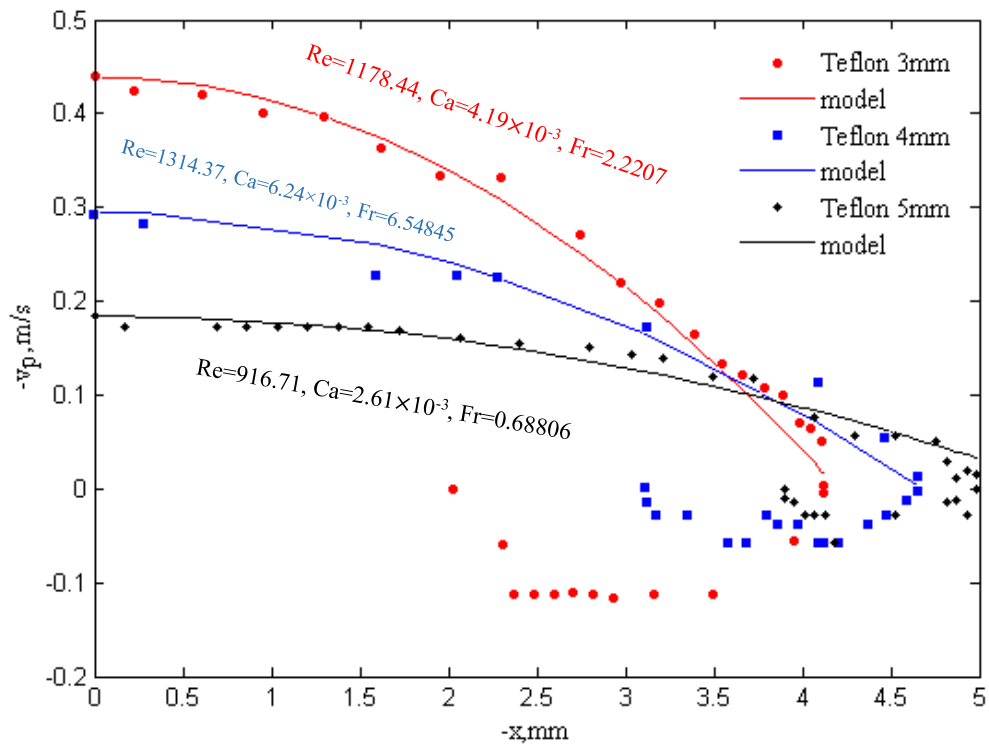
شکل ۱۳-۵ مکان خط تماس سه فازی روی ذره به قطر 4 mm (x_{TPCL}) بر حسب مکان نقطه سکون ذره (x)

برای محاسبه سرعت ذره و سرعت خط تماس سه فازی علاوه بر مقادیر x و x_{tpcl} فاصله زمانی حرکت ذره بین دو عکس متوالی نیز مورد نیاز است که با دانستن سرعت عکس‌برداری دوربین طی سقوط (1000 fps) قابل محاسبه است، یعنی جابجایی ذره در فاصله زمانی بین دو عکس متوالی

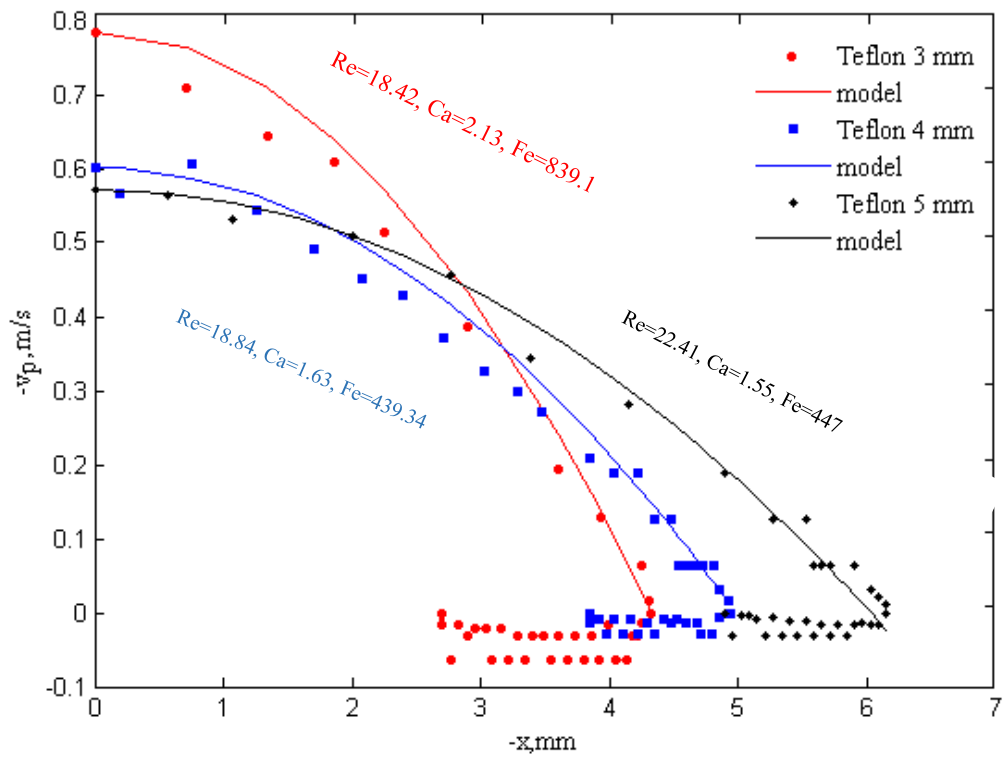
(۱۸/۰۰۰) بدست آمد. در شکل ۵-۱۴ و شکل ۵-۱۵ تغییرات سرعت ذرات تفلونی به عنوان تابعی از x پس از برخورد به سطح آب مقطر و سیال باگر در سرعت بحرانی، نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در شرایط بحرانی ذره پس از سقوط از یک ارتفاع مشخص روی سطح سیال، در حین حرکت به سمت پایین سرعتش به تدریج کاهش می‌یابد تا اینکه به دلیل افزایش نیروهای مقاومتی یعنی درگ، شناوری و کپیلاری، سرعتش به صفر می‌رسد و بعد از یک تعادل ناپایدار، رو به بالا حرکت کرده و تا یک ارتفاع مشخص پیش می‌رود تا در نهایت نیروی گرانش، ذره را دوباره به سمت پایین هدایت می‌کند.

یک تفاوت مشاهده شده بین آب مقطر و سیال باگر در چگونگی سرعت ذره طی حرکت است. در سیال باگر به دلیل خاصیت الاستیک سیال سرعت حرکت ذره، با نوساناتی همراه است. سرعت ذره یک برهم‌کنش پیچیده‌ای از نیروهای درگ، شناوری و کشش سطحی است و تعیین مدل تئوری این نیروها دشوار است. سرعت ذره از هنگام برخورد به سطح تا بیشترین عمق نفوذ آن درون سیال، یعنی فقط حرکت رو به پایین ذره طی اولین نوسان، طبق رابطه (۵-۴) با یک منحنی درجه دو تقریب زده شد. و در شکل ۵-۱۴ و شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است که برای هر سه اندازه ذرات، مدل پیش‌بینی شده اختلاف چندانی با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها ندارد.

$$v_p(x) = v_c \left[1 - \frac{1}{a^2} \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right] \quad (۴-۵)$$



شکل ۱۴-۵ تغییرات سرعت ذرات تفلون (v_p) برحسب مکان نقطه سکون (x) در شرایط بحرانی در آب مقطر



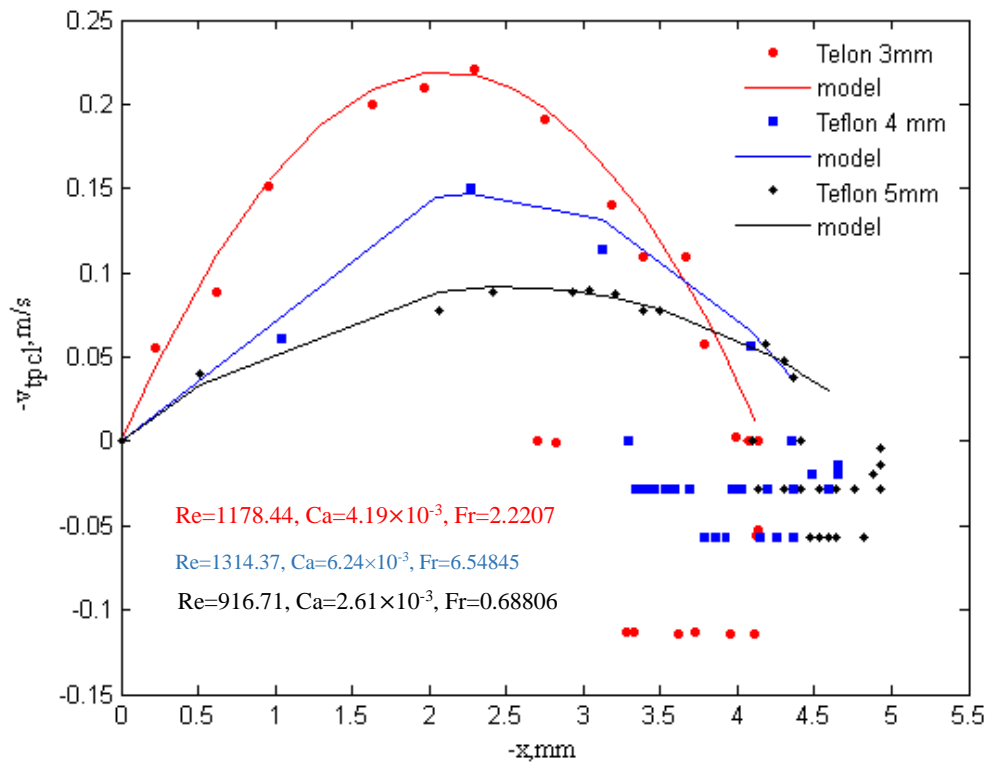
شکل ۱۵-۵ تغییرات سرعت ذرات تفلون (v_p) برحسب مکان نقطه سکون (x) در شرایط بحرانی در سیال باگر

در شکل ۵-۱۶ و شکل ۵-۱۷ داده‌های مربوط به سرعت خط تماس سه فازی برای برخورد ذرات در آب مقطر و سیال باگر نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، از لحظه برخورد تا رسیدن به ماکزیمم عمق نفوذ، سرعت حرکت خط تماس بر خلاف سرعت ذره که دائم در حال کاهش است، ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد و در حین حرکت ذره به سمت بالا مشابه تغییرات سرعت ذره، مقدار سرعت خط تماس نیز افزایش و بعد از رسیدن به یک مقدار ماکزیمم مجدداً کاهش می‌یابد تا در نهایت به صفر برسد. این پدیده برای هر سه اندازه ذره و درون هر دو نوع سیال مشاهده شده است. منحنی داده‌های مربوط به اختلاف سرعت ذره و سرعت خط تماس نیز در شکل ۵-۱۸ و شکل ۵-۱۹ رسم شده است که مشاهده شد این داده‌ها را می‌توان با رابطه (۵-۵) تقریب زد.

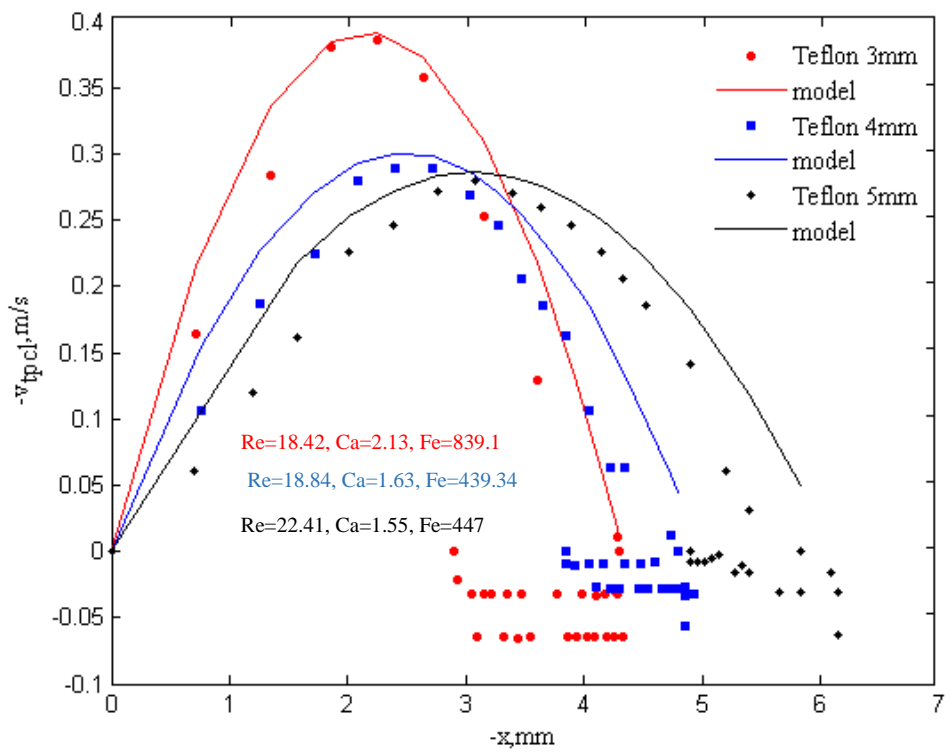
$$v_{rel} = v_p - v_{tpcl} = v_c \left[\frac{1}{b^2} \left(\frac{x}{d} \right)^2 + \frac{2}{b} \left(\frac{x}{d} \right) + 1 \right] \quad (5-5)$$

با ترکیب روابط (۴-۵) و (۵-۵)، معادله‌ای برای سرعت خط تماس سه فازی بدست می‌آید که برای همگی ذرات در شکل ۵-۱۶ و شکل ۵-۱۷ رسم شده است و می‌توان مشاهده نمود در محدوده مدلسازی، هم‌خوانی قابل قبولی با داده‌های آزمایش دارد.

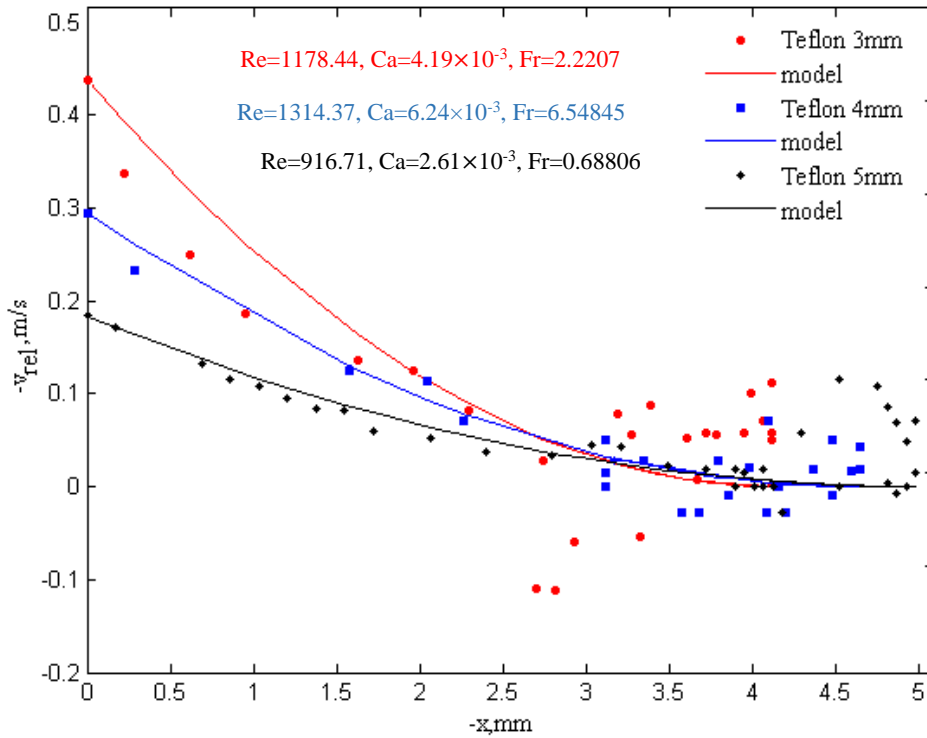
$$v_{TPCL} = -2v_c \left[\frac{1}{b^2} \left(\frac{x}{d} \right)^2 + \frac{1}{b} \left(\frac{x}{d} \right) \right] \quad (6-5)$$



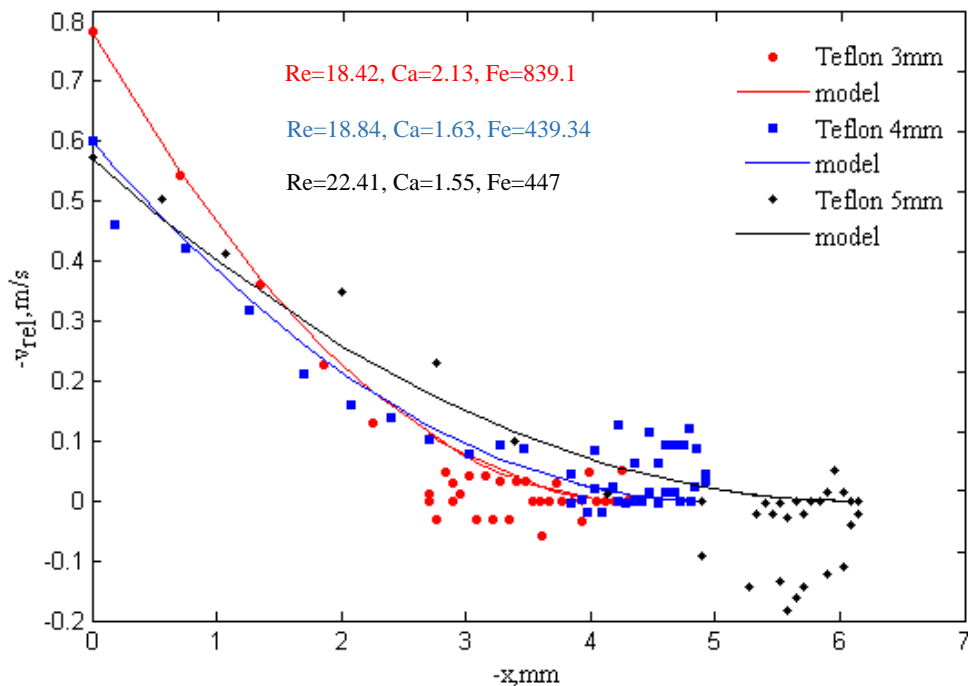
شکل ۵-۱۶ تغییرات سرعت خط تماس سه فازی روی ذره (VTPCL) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط بحرانی برای ذرات تفلون در آب مقطر



شکل ۵-۱۷ تغییرات سرعت خط تماس سه فازی روی ذره (VTPCL) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط بحرانی برای ذرات تفلون در سیال باگر



شکل ۱۸-۵ تغییرات سرعت نسبی ذرات تفلونی (v_{rel}) برحسب مکان نقطه سکون (x) در شرایط بحرانی در آب مقطر



شکل ۱۹-۵ تغییرات سرعت نسبی ذرات تفلونی (v_{rel}) برحسب مکان نقطه سکون (x) در شرایط بحرانی در سیال باگر

۵-۳- تحلیل مدل ریاضی

در فصل ۳ مدل ریاضی به طور تفصیلی ارائه شد. پس از تحلیل موازنه انرژی برای حرکت ذره از لحظه برخورد به سطح سیال تا بیشترین عمق نفوذ، معادله‌ای برای سرعت بحرانی ذره، طبق رابطه (۴-۲۸) بدست آمد. برای محاسبه کار نیروی درگ در رابطه (۴-۱۸)، باید معادله مربوط به مقدار $v-v_{tpcl}$ را که از مشاهدات طبق رابطه (۵-۵) بدست آمد، جایگذاری کنیم، سپس با انتگرال‌گیری کار نیروی درگ بدست می‌آید. از طرفی با ترکیب معادلات (۴-۲۵) و (۵-۳)، رابطه‌ای برای عمق ترشوندگی ذره طبق معادله (۵-۷) بدست می‌آید که با جایگذاری آن در معادله (۴-۲۸) و سپس انتگرال‌گیری، کار نیروهای کشش سطحی و شناوری نیز قابل محاسبه خواهد بود.

$$z = \left(1 + \frac{b-1}{b} \frac{x}{bd} \right) x \quad (۷-۵)$$

بنابراین رابطه نهایی برای سرعت بحرانی ذره پس از انتگرال‌گیری و ساده‌سازی به صورت معادله (۵-۸) خواهد بود.

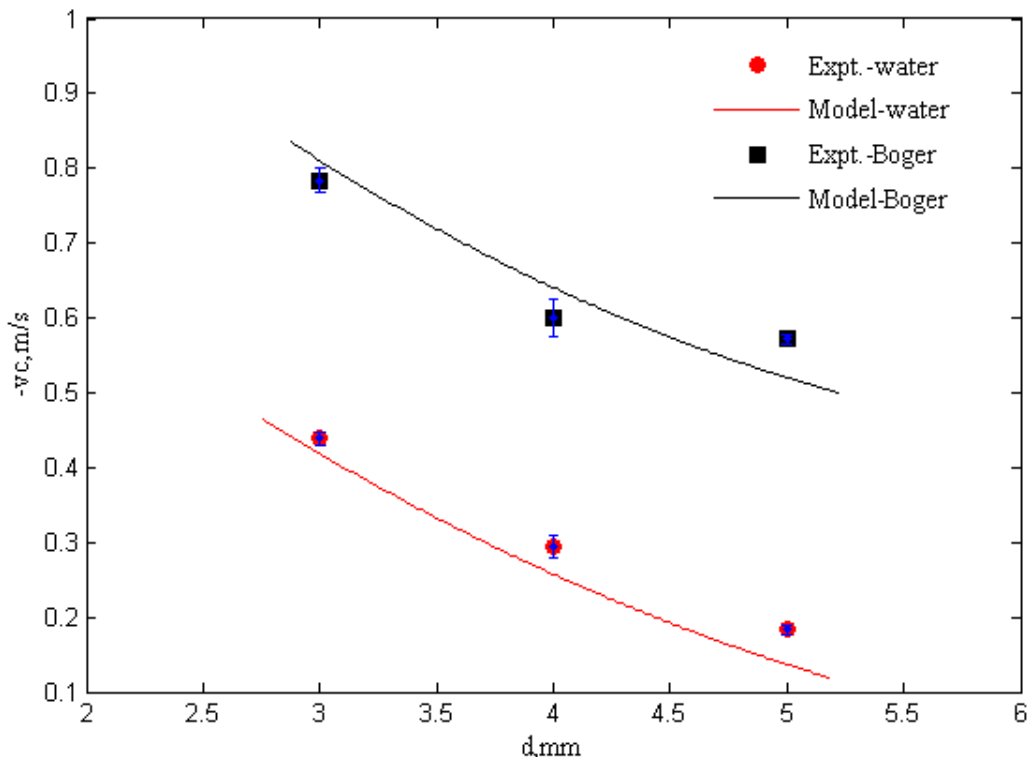
$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} m v_c^2 + m g b d \\ & = - \int_0^{-bd} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \frac{1}{2} \rho_l \left| v_c \left[\frac{1}{b^2} \left(\frac{x}{d} \right)^2 + \frac{2}{b} \left(\frac{x}{d} \right) + 1 \right] \right|^2 C_D dx - \int_0^{-bd} \pi d \sigma_{gl} \left(\frac{-2 \left(1 + \frac{b-1}{b} \frac{x}{bd} \right) x}{d} - 1 - \cos \theta_a \right) dx \\ & - \frac{1}{420} \pi \rho_l g b d^4 [11(2+b) + b^2(3-b)] + \frac{1}{30} \pi \rho_l g (ad)^2 [(b-1)d]^2 \end{aligned} \quad (۸-۵)$$

این معادله داری سه مجهول است و برای حل آن نیاز به مقادیر a ، b و θ_a است. مقادیر a و b برای هر کدام از تست‌ها با بررسی عکس مربوط به لحظه‌ای که ذره دارای ماکزیمم عمق نفوذ است، طبق جدول ۴-۵ بدست آمد و θ_a نیز از برازش معادله با مقادیر سرعت بحرانی اندازه‌گیری شده از مشاهدات مطابق جدول ۵-۵ بدست می‌آید.

جدول ۵-۵ مقادیر زوایای تماس پیشرو برای ذرات آزمایش

آزمایش	سیال	$d(mm)$	$v_c (m/s)$	θ_a
۱	آب مقطر	۳	۰/۴۳۸۹	۱۳۰/۹۹
۲	آب مقطر	۴	۰/۲۹۵۲	۱۳۴/۲۳
۳	آب مقطر	۵	۰/۱۸۳۷	۱۳۵/۵۳
۴	باگر ۱۰۰	۳	۰/۷۸۴	۱۴۹/۹۶
۵	باگر ۱۰۰	۴	۰/۶۰۱۲	۱۵۴/۲۸
۶	باگر ۱۰۰	۵	۰/۵۷۲۲	۱۵۸

برای سنجش صحت مدل پیش‌بینی شده، معادله (۵-۸) به همراه داده‌های مربوط به تغییرات سرعت بحرانی با اندازه ذرات در شکل ۵-۲۰ رسم شده است. همانطور که از شکل مشخص است، سرعت بحرانی با افزایش قطر ذرات، کاهش می‌یابد. یعنی ذرات بزرگتر انرژی جنبشی کمتری برای شناوری نیاز دارند. همچنین مشاهده شده است، داده‌ها با مدل ریاضی پیش‌بینی شده هم‌خوانی قابل قبولی دارند.



شکل ۵-۲۰ مقایسه مدل ریاضی و داده‌های آزمایشگاهی مربوط به تغییرات سرعت بحرانی با قطر ذره

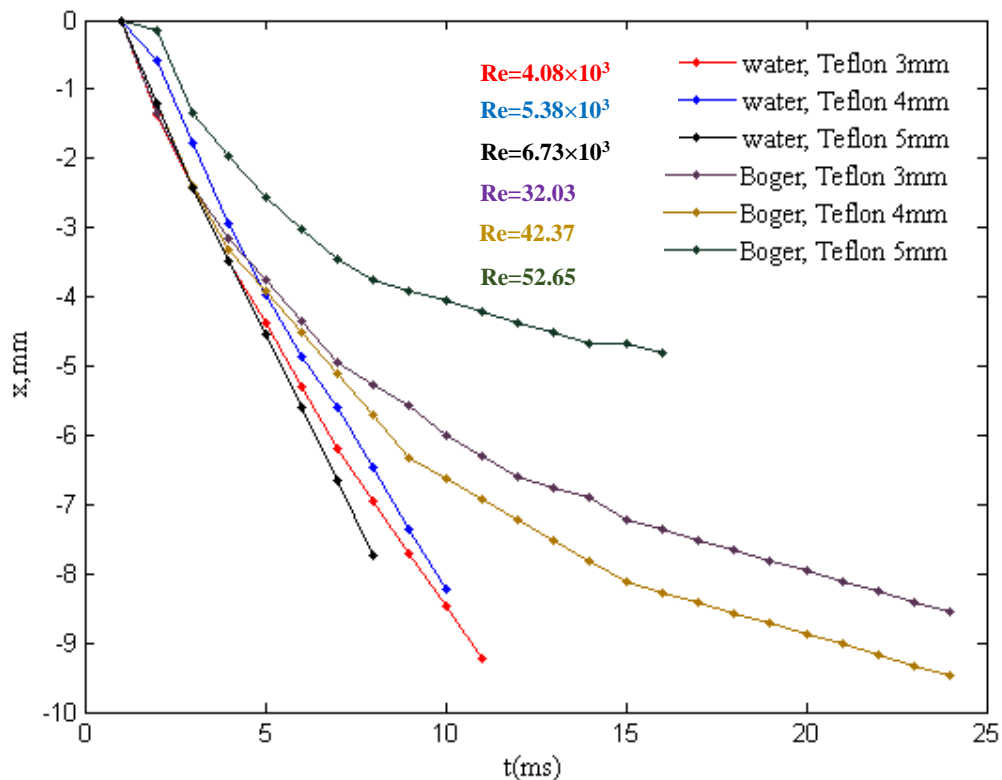
۵-۴- تحلیل رفتار نفوذ ذرات در سرعت برخورد یکسان

در این بخش برای مقایسه رفتار نفوذ ذرات با حالت بحرانی، سقوط همگی ذرات را از ارتفاع بیشتر از ارتفاع بحرانی مورد بررسی قرار دادیم. اگر همه ذرات از یک ارتفاع یکسان روی سطح سیال سقوط کنند و سرعت برخورد بیشتر از سرعت بحرانی باشد، به طور کامل درون سیال نفوذ خواهند کرد. برای تحلیل نفوذ ذرات در سرعت برخورد یکسان همه ذرات از ارتفاع حدود $92\text{--}94\text{mm}$ رها شدند. در جدول ۵-۶ شرایط برخورد نشان داده شده است. با توجه به اعداد بی بعد مربوط به هر کدام از برخوردها مشخص است که در هنگام نفوذ ذرات در آب مقطر به دلیل رینولدر بالا و کپیلاری بسیار کم، نیروی اینرسی حاکم بر جریان است و کشش سطحی سیال نسبت به نیروی ویسکوز تأثیر بیشتری روی حرکت ذره دارد. در حالیکه در هنگام نفوذ ذرات در سیال باگر تأثیر نیروی ویسکوز بیشتر از کشش سطحی سیال است. در شکل ۵-۲۱ عمق نفوذ ذرات بر حسب زمان طی حرکت درون

هر دو نوع سیال رسم شده است. همانطور که مشخص است برای هر سه اندازه ذرات تفلونی در هر دو سیال آب مقطر و باگر هیچگونه نوسانی مشاهده نشده است. و ذرات پس از جدا شدن از سطح سیال به نفوذ خود ادامه می دهند.

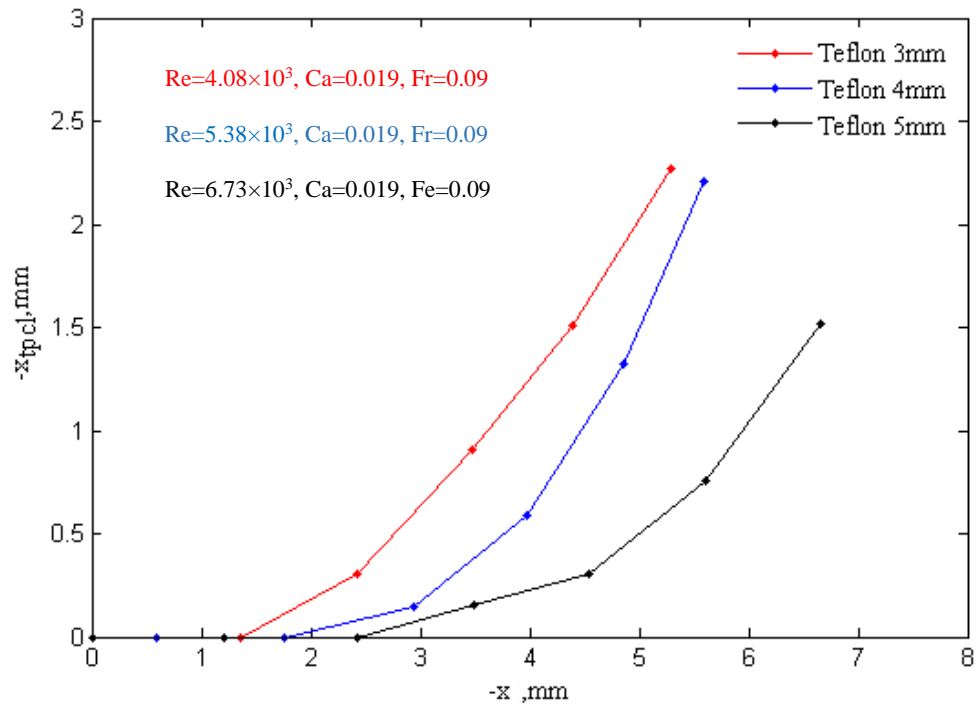
جدول ۵-۶ شرایط غیر بحرانی سقوط ذرات از ارتفاع یکسان

Fe	Fr	Ca	Re	$v_p (m/s)$	$h(mm)$	$d(mm)$	سیال
-	۰/۰۹	۰/۰۱۹	$۴/۰۸ \times 10^3$	۱/۳۶۳	۹۴/۷۴	۳	آب مقطر
-	۰/۰۹	۰/۰۱۹	$۵/۳۸ \times 10^3$	۱/۳۴۸	۹۲/۷۲	۴	آب مقطر
-	۰/۰۹	۰/۰۱۹	$۶/۷۳ \times 10^3$	۱/۳۴۸	۹۲/۷۲	۵	آب مقطر
$۲/۵۳ \times 10^3$	-	۳/۷	۳۲/۰۳	۱/۳۶۳	۹۴/۷۲	۳	باگر ۱۰۰
$۲/۵۳ \times 10^3$	-	۳/۷	۴۲/۳۷	۱/۳۵۲	۹۳/۱۸	۴	باگر ۱۰۰
$۲/۵۳ \times 10^3$	-	۳/۷	۵۲/۶۵	۱/۳۴۴	۹۲/۱۷	۵	باگر ۱۰۰

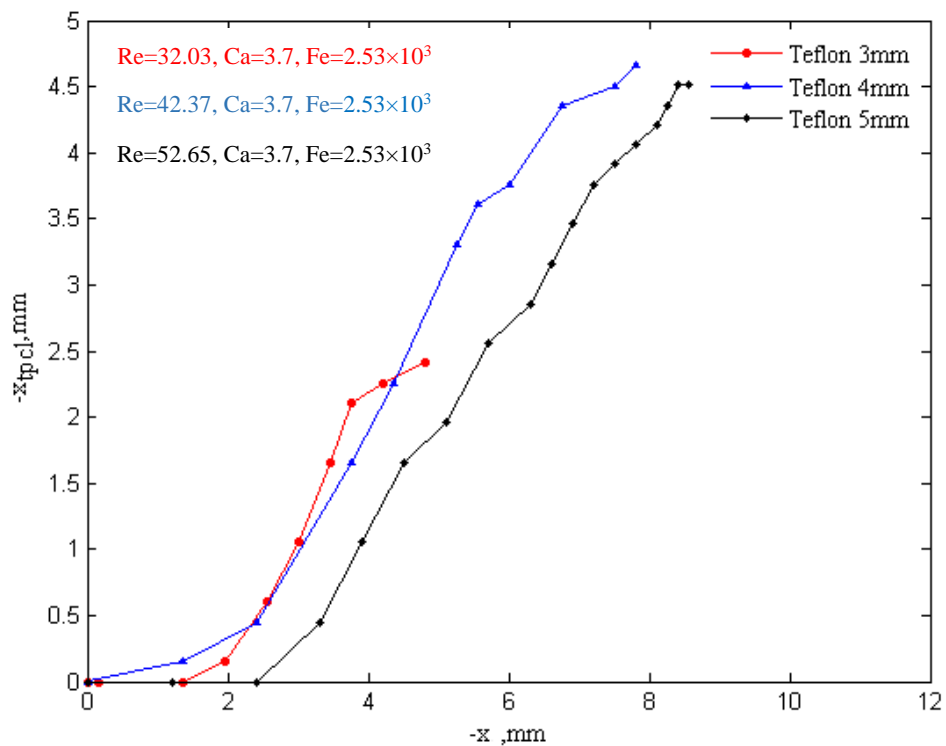


شکل ۵-۲۱ حرکت ذرات کروی با سرعت برخورد یکسان $v_I = 1/3 \text{ m/s}$ بر حسب زمان

همانند آنچه که برای شرایط بحرانی انجام شد، مقادیر x ، x_{tpcl} طی حرکت ذره از پردازش تصاویر متوالی اندازه‌گیری شد. در شکل ۵-۲۲ و شکل ۵-۲۳ مقادیر این داده‌ها برای برخورد ذرات تفلونی در سیال آب مقطر و باگر نشان داده شده است. نقطه انتهایی منحنی‌ها نشان‌دهنده مکان جدایش ذرات از سطح سیال یا همان عمق شکست است.

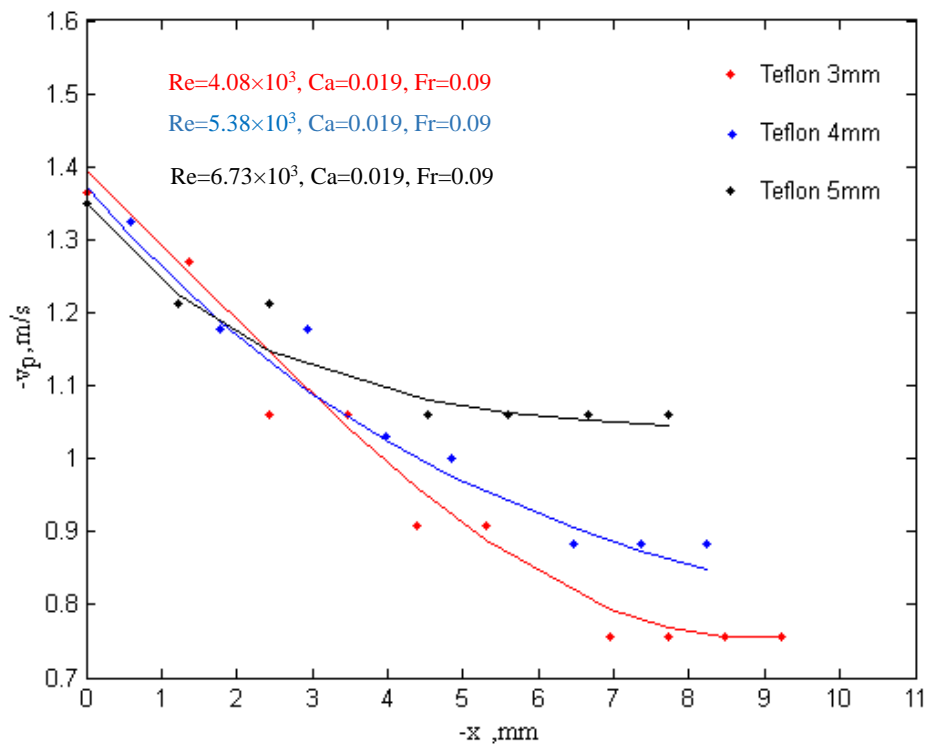


شکل ۵-۲۲ تغییرات مکان خط تماس سه فازی روی ذره (XTPCL) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در آب مقطر در شرایط سرعت برخورد یکسان (۱/۳ m/s)

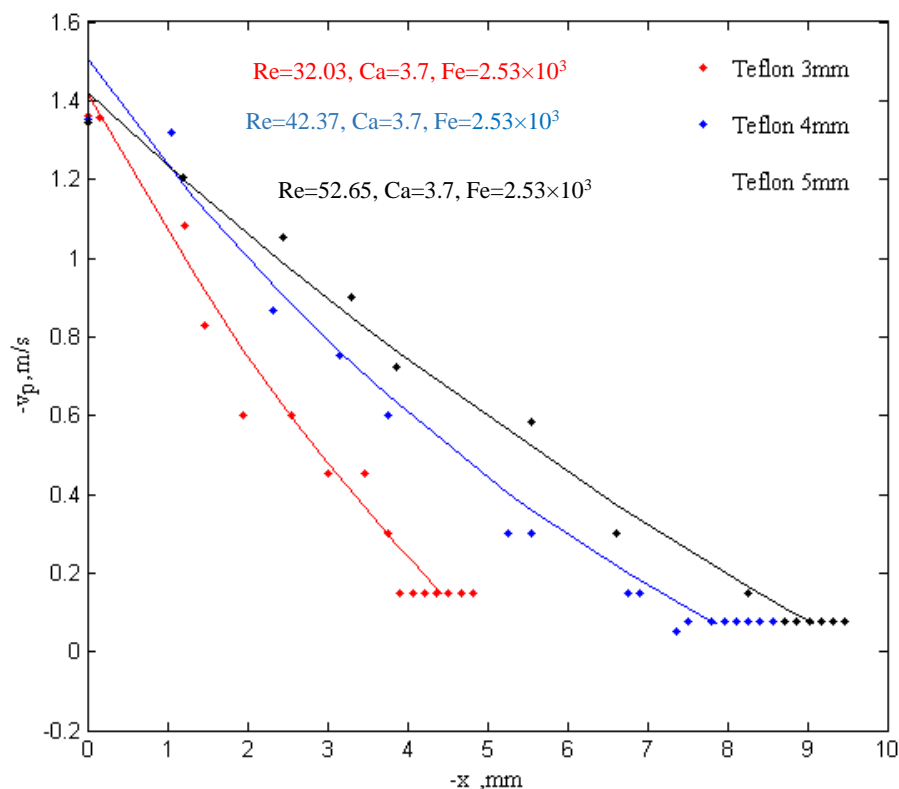


شکل ۵-۲۳ تغییرات مکان خط تماس سه فازی روی ذره (XTPCL) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در سیال باگر در شرایط سرعت برخورد یکسان (۱/۳ m/s)

همانطور که قبلاً اشاره شد، در حالتی که اختلاف سرعت برخورد ذره با سرعت بحرانی بیشتر شود، مقدار x_m ، x_R و z_p تقریباً برابر است و به این معنی که در سرعت‌های خیلی بیشتر از بحرانی، نوسانی مشاهده نمی‌شود. در شکل ۵-۲۴ و شکل ۵-۲۵ تغییرات سرعت ذرات نشان داده شده است. در حین نفوذ سرعت ذرات کاهش یافته تا اینکه پس از جدا شدن از سطح سیال با یک سرعت یکنواخت به نفوذ خود ادامه می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، همگی ذرات با سرعت حدود m/s 0.75 به سطح برخورد کردند و پس از جدا شدن از سطح، در آب مقطر با سرعت یکنواخت m/s 0.75 برای قطر 3 mm ، m/s 0.9 برای قطر 4 mm و m/s 1.1 برای قطر 5 mm و در سیال با گر با سرعت یکنواخت حدود m/s 0.2 - 0.1 به نفوذ خود ادامه دادند.

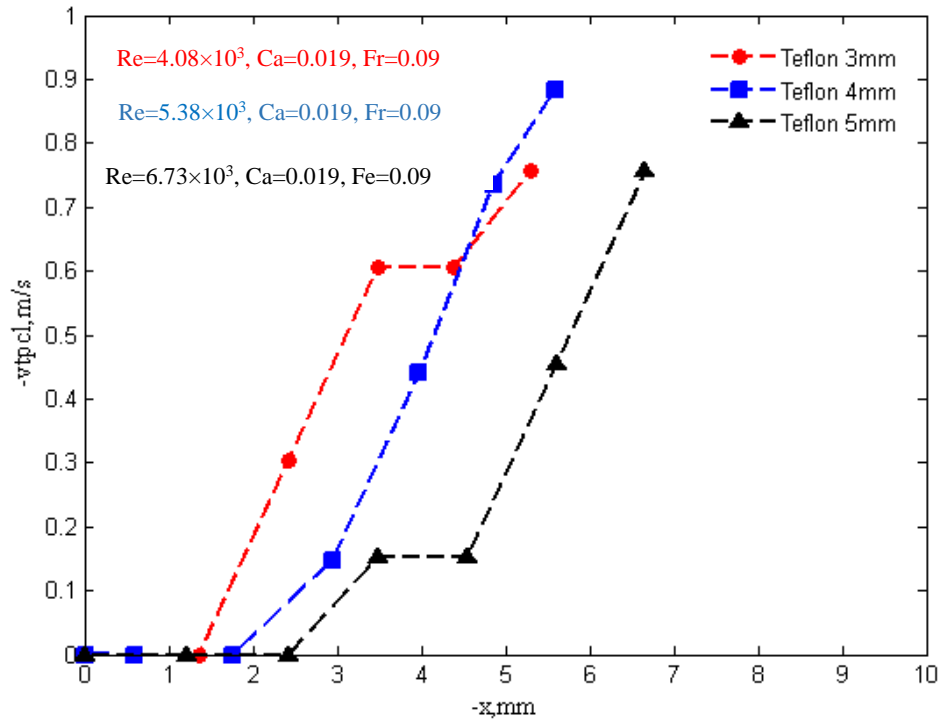


شکل ۵-۲۴ تغییرات سرعت ذرات تفلونی (v_p) بر حسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط سرعت برخورد یکسان (m/s $1/3$) در آب مقطر

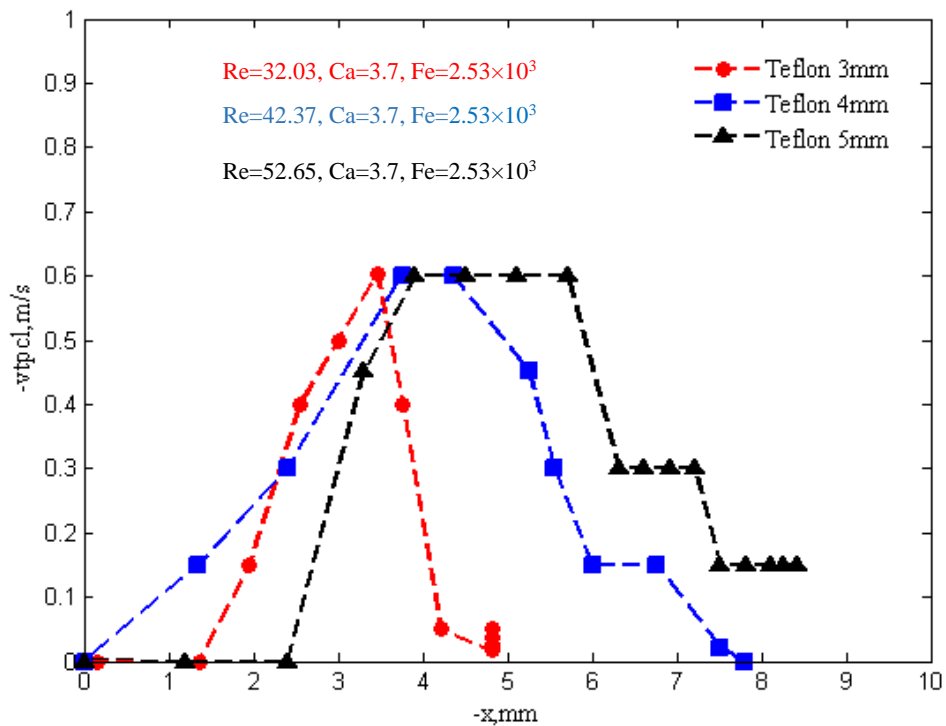


شکل ۵-۲۵ تغییرات سرعت ذرات تفلونی (v_p) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط سرعت برخورد یکسان ($1/3 \text{ m/s}$) در سیال باگر

یک تفاوت نفوذ ذرات در شرایط غیر بحرانی بین آب مقطر و سیال باگر این است که سرعت خط تماس سه فازی ذرات در آب مقطر از لحظه برخورد تا لحظه شکست و جدا شدن از سطح، به طور مداوم افزایش می‌یابد تا اینکه در انتهای مسیر قبل از شکست، دارای یک سرعت مشخص است. در شکل ۵-۲۶ نشان داده شده است که برای آب مقطر سرعت خط تماس سه فازی در آستانه شکست برای ذره با قطر 3 mm ، 0.175 m/s ، قطر 4 mm ، 0.188 m/s و قطر 5 mm ، 0.176 m/s بدست آمده است. این در حالیست که در سیال باگر همانطور که در شکل ۵-۲۷ نشان داده شده است، سرعت خط تماس سه فازی برای همگی ذرات از لحظه برخورد تا لحظه شکست و جدایی ذره از سطح سیال، ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد تا اینکه در نهایت در آستانه شکست به نزدیک صفر می‌رسد.



شکل ۲۶-۵ تغییرات سرعت خط تماس سه فازی روی ذرات تفلونی (VTPCL) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط سرعت برخورد یکسان ($1/3 \text{ m/s}$) در آب مقطر

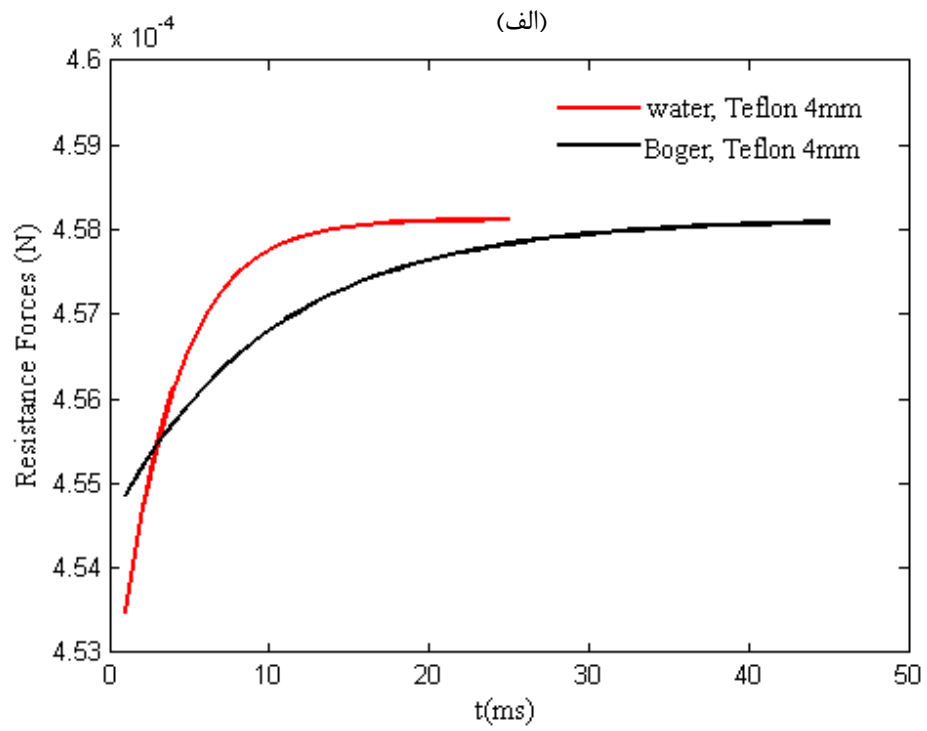
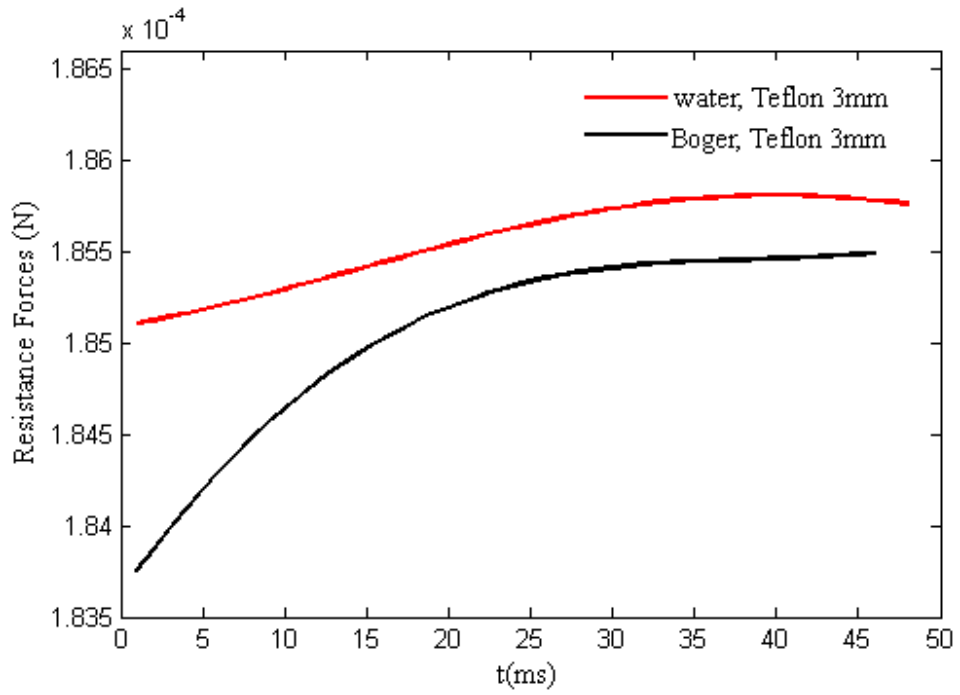


شکل ۲۷-۵ تغییرات سرعت خط تماس سه فازی روی ذرات تفلونی (VTPCL) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط سرعت برخورد یکسان ($1/3 \text{ m/s}$) در سیال باگر

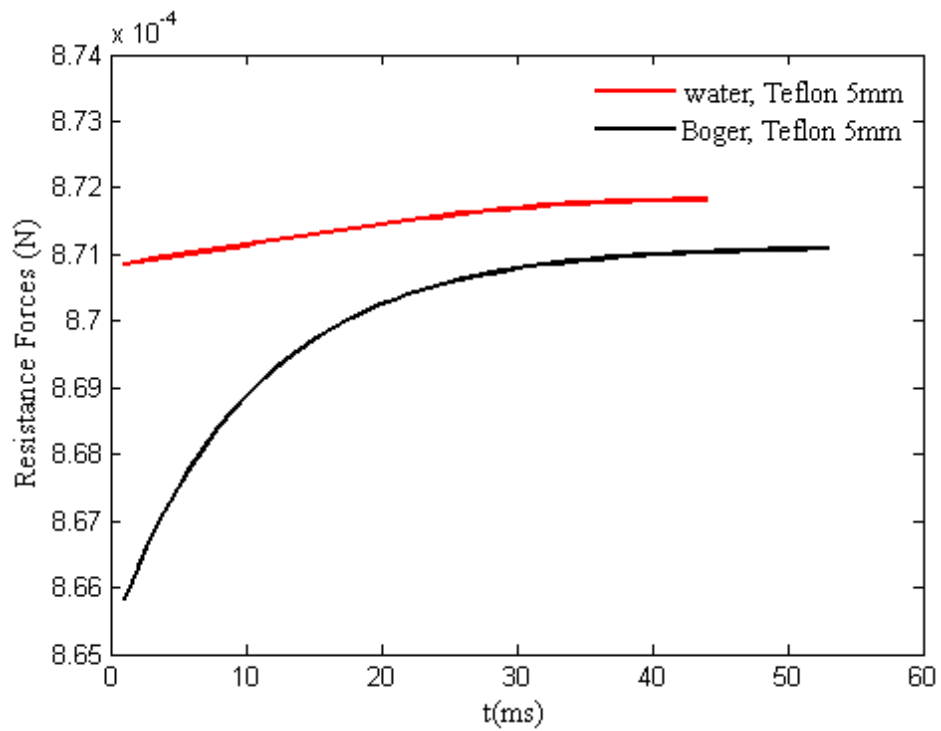
۵-۵- تحلیل نیروی وارد بر ذره در شرایط بحرانی

در این قسمت نیروهای مقاومتی وارد بر ذره طی نفوذ، در شرایط بحرانی مورد بررسی قرار می‌گیرند. همانطور که گفته شد، از لحظه شروع برخورد ذره به سطح سیال تا بیشترین عمق نفوذ کل نیروهای وارد بر ذره شامل نیروی وزن در جهت حرکت و نیروهای درگ، شناوری و کشش سطحی سیال در خلاف جهت حرکت هستند. برای بررسی حرکت ذرات، ابتدا لازم است سرعت سیال در محل ذره مشخص باشد که در بخش ۵-۲- به طور مفصل ارائه گردید. آنگاه با توجه به فاصله زمانی بین عکس‌های متوالی شتاب حرکت ذره قابل محاسبه است. همچنین با توجه به هم‌خوانی مدل ریاضی پیش‌بینی شده با سرعت‌های اندازه‌گیری شده، می‌توان از مشتق‌گیری سرعت نسبت به زمان، تغییرات شتاب حرکت ذره را در زمان‌های مختلف محاسبه نمود. بنابراین با توجه به مشخص بودن وزن ذرات، طبق رابطه (۵-۹) می‌توان تغییرات مجموع نیروهای مقاومتی را محاسبه نمود. شکل ۵-۲۸ تغییرات نیروهای مقاوم وارد بر ذره طی نفوذ درون هر دو سیال در شرایط بحرانی رسم شده است. همانطور که از منحنی‌ها مشخص است، با نفوذ ذره درون سیال به دلیل افزایش حجم غوطه‌وری ذره، مجموع نیروهای مقاوم در برابر حرکت به تدریج افزایش می‌یابد. به همین دلیل سرعت نفوذ ذره به تدریج کاهش می‌یابد تا اینکه در بیشترین عمق نفوذ این نیروها با نیروی وزن ذره بالانس می‌شود که در این لحظه در فاصله زمانی کوتاهی سرعت به صفر می‌رسد. در این حالت به دلیل اینکه بیشتر انرژی ذره به دلیل غلبه بر این نیروها تلف شده است، نفوذ کامل اتفاق نمی‌افتد و پس از چندین نوسان میرا، روی سطح سیال شناور می‌ماند.

$$\vec{W} - \sum \vec{F}_{RES} = m \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (۵-۹)$$
$$\sum \vec{F}_{RES} = \vec{F}_D + \vec{F}_B + \vec{F}_S$$



(ب)



(ج)

شکل ۵-۲۸: تغییرات نیروهای مقاومتی وارد بر ذره طی نفوذ درون آب و سیال باگر در شرایط یحرانی. الف) قطر ۳ mm ب) قطر ۴ mm ج) قطر ۵ mm

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار نفوذ ذرات کروی آب‌گریز از جنس تفلون در برخورد با سطح مشترک هوا - آب و هوا - باگر مطالعه شد. از مشاهدات و داده‌ها مشخص شد که برخورد این ذرات دو رژیم شناوری و نفوذ دارد. به طور کلی دینامیک برخورد ذرات صلب کروی و چگونگی تشکیل حفره تابعی از اندازه، چگالی و سرعت برخورد ذره است. ذرات در حین نفوذ درون سیال یک حفره از هوا ایجاد می‌کنند که مقداری هوا را حمل می‌کند سپس ذره به حرکت خود ادامه می‌دهد و در نهایت یا از سطح جدا شده و در یک سرعت کمتر به یک حالت پایدار سرعت می‌رسد (رژیم نفوذ) و یا اینکه در شرایط بحرانی با نوساناتی در حرکت روبرو می‌شود و سپس روی سطح سیال شناور می‌ماند (رژیم شناوری). همچنین مشاهده شد برای ذرات آب‌گریز، مانند آنچه که قبلاً برای ذرات آب‌دوست مشاهده شده بود، در یک سیستم مشخص ذره، سیال و هوا، اگر سرعت برخورد ذره به سطح مایع از مقدار بحرانی کمتر باشد، حتی اگر ذره چگال‌تر از مایع باشد، درون آن نفوذ نمی‌کند که به علت نیروی کشش سطحی و شناوری وارد بر ذره است. مقدار سرعت بحرانی برای ذره کروی از جنس تفلون بدست آمد که مشخص شد سرعت بحرانی برخورد با افزایش قطر ذره، کاهش می‌یابد.

با پردازش تصاویر متوالی چگونگی حرکت ذره درون سیال بدست آمد و برای اولین بار ماکزیمم عمق نفوذ (x_m)، عمق برگشتی (x_R)، ارتفاع برگشتی ($h_R = x_m - x_R$) و عمق شکست (z_p) برای هر ذره تعیین شد و مورد مقایسه قرار گرفت و مشخص شد که در سرعت‌های بحرانی و نزدیک آن حرکت ذرات با نوساناتی همراه است و هرچه سرعت از مقدار بحرانی بیشتر شود تعداد نوسانات کاهش یافته تا اینکه در سرعت‌های بالاتر، ذره بدون هیچ نوسانی از سطح مایع جدا می‌شود؛ یعنی حالتی که اختلاف سرعت برخورد ذره با سرعت بحرانی بیشتر شود، مقادیر x_m ، x_R و z_p تقریباً یکسان هستند. تغییرات ماکزیمم عمق نفوذ با ارتفاع سقوط برای ذرات تفلونی در اندازه‌های مختلف برای سیالات آب مقطر و باگر رسم شد و مشاهده شد که با افزایش ارتفاع سقوط، ماکزیمم عمق نفوذ نیز افزایش

می‌یابد زیرا که انرژی جنبشی بیشتر به ذره اجازه می‌دهد که مسیر طولانی‌تری را قبل از متوقف شدن توسط نیروهای مقاومتی طی کند.

تغییرات سرعت ذرات (v_p) و سرعت خط تماس سه فازی روی ذره (v_{TPCL}) بر حسب مکان نقطه سکون (x) در شرایط بحرانی رسم شد و مشاهده شد که سرعت ذره از یک مقدار بحرانی تا رسیدن به صفر در بیشترین عمق نفوذ (x_m) کاهش می‌یابد و سپس با شروع حرکت به سمت بالا که به معنی مقدار منفی برای سرعت است، دوباره افزایش یافته تا در انتها پس از نوسان کوتاهی روی سطح سیال ساکن می‌ماند. سرعت خط تماس سه فازی روی ذره از صفر تا یک مقدار بیشینه افزایش یافته و دوباره به صفر می‌رسد و با شروع حرکت ذره به سمت بالا این روند تکرار می‌شود. نشان داده شد که می‌توان سرعت ذره (v_p) و همچنین سرعت ذره نسبت به خط تماس سه فازی (v_{rel}) را با معادلات درجه دو مدل‌سازی کرد طوریکه با مجموعه داده‌های آزمایش هم‌خوانی داشته باشد و سپس با ترکیب معادلات، رابطه‌ای برای سرعت خط تماس سه فازی روی ذره (v_{TPCL}) بدست آورد. از طرفی برای مقایسه رفتار نفوذ ذرات در شرایط غیربحرانی، برخورد همگی ذرات از ارتفاع یکسان و بیشتر از ارتفاع بحرانی نیز مورد آزمایش قرار گرفت و چگونگی نفوذ ذرات، تغییرات سرعت ذرات و سرعت خط تماس بدست آمد. در نهایت تغییرات نیروهای وارد بر ذره طی نفوذ تحت شرایط بحرانی تحلیل شد و نشان داده شد که طی حرکت ذره از سطح اولیه سیال تا بیشترین عمق نفوذ، مجموع نیروهای مقاومتی افزایش یافته تا اینکه در ماکزیمم عمق نفوذ با نیروی وزن بالانس می‌شود.

۶-۲- پیشنهادات

می‌توان برای ادامه تحقیق در زمینه سقوط ذرات، موضوعات زیر را بررسی نمود:

— بررسی تجربی برخورد ذرات هیدروفوب با اندازه‌های مختلف در سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی در رینولدزهای بالاتر.

— بررسی تجربی برخورد ذرات در سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی با سطح مشترک منحنی مایع -

گاز.

— بررسی تجربی برخورد ذرات غیر کروی در سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی در رینولدزهای مختلف.

— بررسی عددی تأثیر هندسه سطح مشترک مایع - گاز در رژیم‌های مختلف برخورد.

— بررسی عددی برخورد ذرات و مطالعه چگونگی تشکیل کویتی در سیالات غیرنیوتنی.

پیوست الف: محاسبه زمان رهایی از تنش سیال باگر

الف-۱- تست نوسان:

تست نوسان یکی از معروفترین تستهای سیالات ویسکوالاستیک است. در این تست ماده تحت یک تنش نوسانی قرار گرفته و تغییر شکل ماده مورد بررسی قرار می‌گیرد. انتظار می‌رود که تغییر شکل و تنش هم فرکانس باشند اما یک اختلاف فاز به اندازه δ در آنها مطابق رابطه (الف-۲) مشاهده می‌شود:

$$\tau = \tau_0 \cos \omega t \quad (\text{الف-۱})$$

$$\gamma = \gamma_0 \cos(\omega t - \delta) \quad (\text{الف-۲})$$

در این تست مقدار γ_0 بسیار کوچک لحاظ شده است تا از تغییر شکل‌های بزرگ اجتناب گردد. بدین منظور طبق روابط (الف-۳) و (الف-۴) از تنش و برش مختلط استفاده شده است که قسمت حقیقی آن تنش و برش هستند:

$$\tau^* = G^* \gamma^* \quad (\text{الف-۳})$$

$$\tau^* = \eta^* \dot{\gamma}^* \quad (\text{الف-۴})$$

همچنین G^* دارای یک بخش حقیقی و یک بخش موهومی است:

$$G^* = G' + iG'' \quad (\text{الف-۵})$$

که در رابطه (الف-۵)، G'' معرف بخش سیال ماده (ویسکوز) و G' معرف بخش جامد ماده

(الاستیک) است. براساس مدل سازی جامد داریم:

$$G^* = \frac{\tau^*}{\gamma^*} = \frac{\tau e^{i\omega t}}{\gamma e^{i(\omega t - \delta)}} \quad (\text{الف-۶})$$

در رابطه (الف-۶) خود اختلاف فاز می تواند تابع فرکانس باشد. می توان نوشت:

$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad (\text{الف-۷})$$

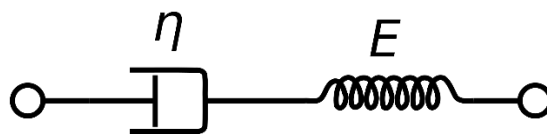
$$G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad (\text{الف-۸})$$

از تقسیم دو رابطه اخیر داریم:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (\text{الف-۹})$$

الف-۲- مدل ماکسول:

یکی از بهترین مدل ها برای تفسیر نتایج تست نوسان مدل ماکسول است. این مدل از یک فنر و دمپر سری مطابق شکل الف-۱ تشکیل شده است.



شکل الف-۱: مدل ماکسول

مدل ماکسول بصورت رابطه (الف-۱۰) بیان می شود:

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = \eta \dot{\gamma} \quad (\text{الف-۱۰})$$

با جایگذاری روابط (الف-۱) و (الف-۲) در رابطه ماکسول، رابطه زیر بدست می آید:

$$\tau_0 \cos \omega t - \lambda \tau_0 \sin \omega t = \eta \dot{\gamma} \quad (\text{الف-۱۱})$$

با توجه به فرضیات داریم:

$$\gamma_0 = \frac{\lambda \tau_0}{\eta \cos \theta} \quad \& \quad \tan \delta = \frac{1}{\lambda \omega} \quad (\text{الف-۱۲})$$

در نتایج آزمایشگاهی، برای مکانی که دو نمودار یکدیگر را قطع می‌کنند مدول‌های مادی برابر هستند ($G'' = G'$) در نتیجه داریم از رابطه (الف-۹) خواهیم داشت:

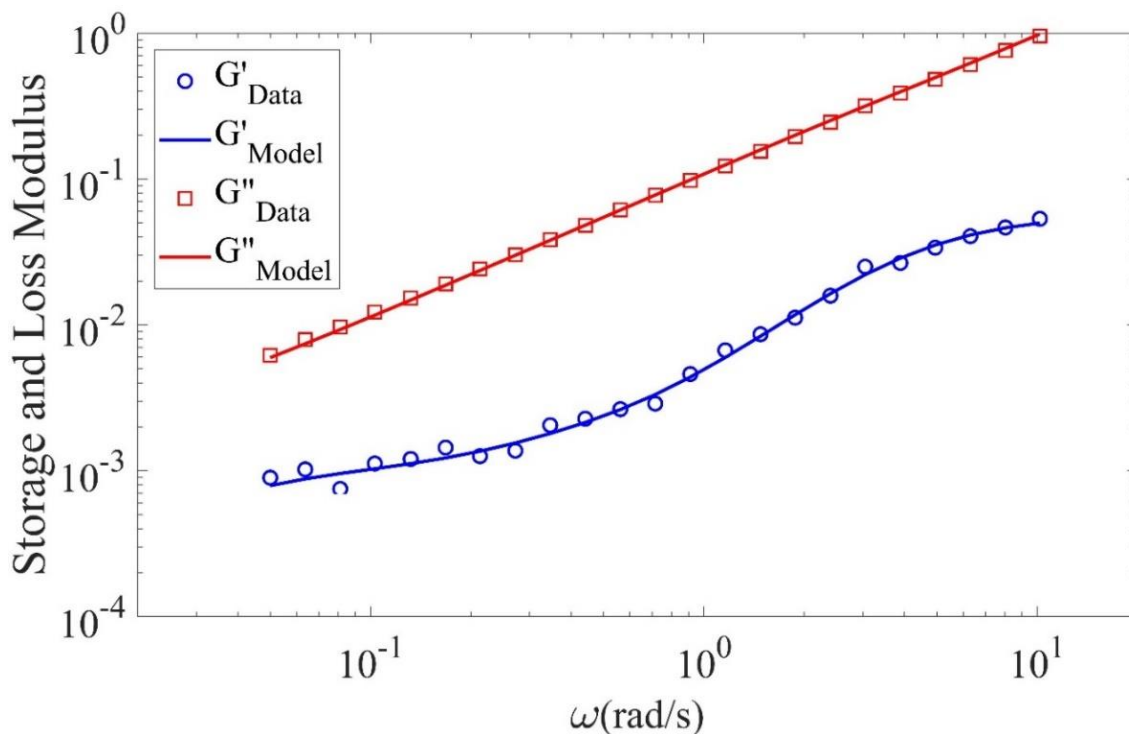
$$\tan \delta = \frac{1}{\lambda \omega} = 1 \rightarrow \omega = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{الف-۱۳})$$

برای حالتی که مدول‌های G' ، G'' هیچ نقطه تلاقی نداشته باشند از روابط (الف-۱۴) و (الف-۱۵) استفاده می‌شود:

$$G' = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \lambda_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (\text{الف-۱۴})$$

$$G'' = \eta_s \omega + \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (\text{الف-۱۵})$$

روابط (الف-۱۴) و (الف-۱۵)، G' و G'' را به n مولفه تجزیه می‌کنند که هر مولفه با یک زمان رهایی از تنش λ_i و یک ضریب لزجت η_i برای هر مود، تا زمانی که به یک برآزش خوب برای داده‌های آزمایشگاهی برسد افزایش می‌یابد. در مطالعه حاضر مدول‌های G' ، G'' همانطور که در شکل الف-۲ مشاهده می‌شود، نقطه تلاقی ندارند که با استفاده از روابط (الف-۱۴) و (الف-۱۵) طیفی از مقادیر رهایی از تنش مطابق جدول الف-۱ بدست می‌آید.



شکل الف- ۲: رفتار مدولهای G' و G'' برای سیال ویسکوالاستیک [۳۰]

جدول الف- ۱: طیف زمان رهایی از تنش و ویسکوزیته محلول پلیمری باگر ۱۰۰ [۳۰]

شماره مود	λ_i [s]	η_i [Pa.s]
۰	۰	$\eta_s = ۰.۰۳۱۹$
۱	۰.۰۰۰۷۰۸۸	۰.۰۶۲۵
۲	۰.۲۴۶۹	۰.۰۱۳۱
۳	۱۰.۲۱۱۷	۰.۰۰۲۵
۴	۹۹۳۱۱	۰.۰۱۵۱

با جایگذاری مقادیر λ_i و η_i مربوط به چهار مود بدست آمده در رابطه (الف- ۱۶) زمان تخمینی

رهایی از تنش متوسط سیال تعیین می‌شود که برای سیال باگر مورد آزمایش که حاوی ترکیب ۱:۴

آب و گلیسرین و ۰.۰۱٪ پلیمر می‌باشد، زمان رهایی از تنش $\lambda = ۱/۲۳$ s محاسبه شد. از طرفی

ویسکوزیته برای مود $\lambda_0 = 0$ ، مربوط به حلال است و همانطور که در جدول الف- ۱ نشان داده شده

است، مقدار لزجت حلال نیوتنی $\eta_s = 0.0319 \text{ Pa.s}$ بدست آمد.

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \eta_i \lambda_i}{\sum \eta_i} \quad (\text{الف-۱۶})$$

پیوست ب: محاسبه خطای مطلق، تکرارپذیری و عدم قطعیت

ب-۱- خطای مطلق:

اگر اندازه‌گیری یک کمیت مشخص چندین مرتبه تکرار شود، مقدار واقعی کمیت به مقدار میانگین آنها نزدیک است. اختلاف بزرگترین مقدار اندازه‌گیری شده با مقدار میانگین، خطای مطلق تعریف می‌شود.

ب-۲- تکرارپذیری:

منظور از تکرارپذیری، دقت بدست آمده در شرایط، روش‌ها و تجهیزات یکسان است. تکرارپذیری به صورت رابطه تعریف می‌شود.

$$R = \frac{\text{مقدار میانگین} - \text{حداکثر انحراف از مقدار واقعی}}{100} \times 100 \quad (\text{ب-۱})$$

ب-۳- عدم قطعیت:

عدم قطعیت تجربی به معنی مقدار احتمالی خطا می‌باشد و نشان می‌دهد که تا چه حد اندازه-

گیری به مقدار واقعی نزدیک است. برای محاسبه عدم قطعیت باید ابتدا انحراف معیار^۱ محاسبه گردد. انحراف معیار، 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. انحراف معیار، طبق رابطه (ب-۱) برابر با ریشه دوم واریانس است.

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

در نهایت اندازه‌گیری عدم قطعیت برای کمیت x_i است. در n بار تکرار آزمایش از رابطه (ب-۲) محاسبه می‌شود:

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

^۱Standard deviation

مرجع

- [1] G. Birkhoff and E. Zarantonello, "Jets, Wakes, and Cavities (Series in Applied Mathematics and Mechanics, vol. 2)," ed: Academic Press, New York, 1957.
- [2] A. Worthington, "A Study of Splashes, Longman's Green, and Co," *Inc., London*, 1908.
- [3] C. Extrand and S. I. Moon, "Contact angles on spherical surfaces," *Langmuir*, vol. 24, pp. 9470-9473, 2008.
- [4] R. B. Bird, R. Armstrong, and O. Hassager, "Fluid Mechanics, Dynamics of Polymeric Liquids, Vol. 1," ed: Wiley, New York, 1987.
- [5] R. I. Tanner, *Engineering rheology* vol. 52: OUP Oxford, 2000.
- [6] A. Pipkin, "Lectures on Viscoelastic Theory, 2-nd Ed," ed: Springer, New York, 1986.
- [7] Y. Ge and L.-S. Fan, "Droplet–particle collision mechanics with film-boiling evaporation," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 573, pp. 311-337, 2007.
- [8] S. Mitra, M. J. Sathe, E. Doroodchi, R. Utikar, M. K. Shah, V. Pareek, *et al.*, "Droplet impact dynamics on a spherical particle," *Chemical Engineering Science*, vol. 100, pp. 105-119, 2013.
- [9] S. Mitra, E. Doroodchi, V. Pareek, J. B. Joshi, and G. M. Evans, "Collision behaviour of a smaller particle into a larger stationary droplet," *Advanced Powder Technology*, vol. 26, pp. 280-295, 2015.
- [10] M. van der Hoeven, "Particle-droplet collisions in spray drying," 2008.
- [11] Y. Wu, J. Zhang, and E. J. Lavernia, "Modeling of the incorporation of ceramic particulates in metallic droplets during spray atomization and coinjection," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 25, pp. 135-147, 1994.
- [12] D. Vella, D.-G. Lee, and H.-Y. Kim, "The load supported by small floating objects," *Langmuir*, vol. 22, pp. 5979-5981, 2006.
- [13] D. Liu, Q. He, and G. Evans, "Penetration behaviour of individual hydrophilic particle at a gas–liquid interface," *Advanced Powder Technology*, vol. 21, pp. 401-411, 2010.
- [14] K. Adibkia, M. Barzegar-Jalali, Y. Javadzadeh, and H. Maheri-Esfanjani, "A review on the methods and applications of spray drying technology," *Pharmaceutical Sciences*, vol. 18, pp. 119-32, 2012.
- [15] H. Schulze, "New theoretical and experimental investigations on stability of bubble/particle aggregates in flotation: a theory on the upper particle size of floatability," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 4, pp. 241-259, 1977.
- [16] J. Drzymala, "Characterization of materials by Hallimond tube flotation. Part 2: maximum size of floating particles and contact angle," *International journal of mineral processing*, vol. 42, pp. 153-167, 1994.
- [17] B. Shahbazi, B. Rezai, and S. J. Koleini, "The effect of hydrodynamic parameters on probability of bubble–particle collision and attachment," *Minerals Engineering*, vol. 22, pp. 57-63, 2009.

- [18] S. Fosu, W. Skinner, and M. Zanin, "Detachment of coarse composite sphalerite particles from bubbles in flotation: Influence of xanthate collector type and concentration," *Minerals Engineering*, vol. 71, pp. 73-84, 2015.
- [19] H. Bradford, "Method of saving floating materials in ore-separation," ed: Google Patents, 1886.
- [20] D. N. Tran, C. P. Whitby, D. Fornasiero, and J. Ralston, "Selective separation of very fine particles at a planar air–water interface," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 94, pp. 35-42, 2010.
- [21] S. Mitra, E. Doroodchi, G. M. Evans, V. Pareek, and J. B. Joshi, "Interaction dynamics of a spherical particle with a suspended liquid film," *AIChE Journal*, vol. 62, pp. 295-314, 2016.
- [22] D. Vella, D.-G. Lee, and H.-Y. Kim, "Sinking of a horizontal cylinder," *Langmuir*, vol. 22, pp. 2972-2974, 2006.
- [23] D.-G. Lee and H.-Y. Kim, "Impact of a superhydrophobic sphere onto water," *Langmuir*, vol. 24, pp. 142-145, 2008.
- [24] D.-G. Lee and H.-Y. Kim, "Sinking of small sphere at low Reynolds number through interface," *Physics of Fluids*, vol. 23, p. 072104, 2011.
- [25] J. M. Gac and L. Gradoń, "Lattice-Boltzmann modeling of collisions between droplets and particles," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 441, pp. 831-836, 2014.
- [26] V. Dubrovsky, A. Podvysotsky, and A. Shraiber, "Particle interaction in three-phase polydisperse flows," *International journal of multiphase flow*, vol. 18, pp. 337-352, 1992.
- [27] Y. OZAWA and K. MORI, "Critical condition for penetration of solid particle into liquid metal," *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 23, pp. 769-774, 1983.
- [28] D. Liu, Q. He, and G. Evans, "Capture of impacting particles on a confined gas–liquid interface," *Minerals Engineering*, vol. 55, pp. 138-146, 2014.
- [29] D. Liu, G. Evans, and Q. He, "Critical fall height for particle capture in film flotation: Importance of three phase contact line velocity and dynamic contact angle," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 114, pp. 52-59, 2016.
- [30] M. N. a. M. M. S. Samira Mandani, "An experimental investigation on impact process of Boger drops onto solid surfaces," *Korea-Australia Rheology Journal*, May 2018).
- [31] R. Thakur, C. Vial, K. Nigam, E. Nauman, and G. Djelveh, "Static mixers in the process industries—a review," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 81, pp. 787-826, 2003.
- [32] M. Mackay and D. Boger, "Rheological measurement," *A. A. Collyer, DW Clegg, Eds*, pp. 595-634, 1998.
- [33] R. B. Bird, R. C. Armstrong, and O. Hassager, "Dynamics of polymeric liquids. Vol. 1: Fluid mechanics," 1987.
- [34] T. Engh, "Si Deoxidation of Steel by Injection of Slags with Low SiO₂ Activity," *Scand. J. Metall.*, vol. 1, pp. 103-114, 1972.

- [35] J. Glasheen and T. McMahon, "Vertical water entry of disks at low Froude numbers," *Physics of Fluids*, vol. 8, pp. 2078-2083, 1996.
- [36] S. Gaudet, "Numerical simulation of circular disks entering the free surface of a fluid," *Physics of Fluids*, vol. 10, pp. 2489-2499, 1998.
- [37] D. D. Joseph and J. C. Saut, "Short-wave instabilities and ill-posed initial-value problems," *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, vol. 1, pp. 191-227, 1990.

Abstract

The impact of solid particles has a wide application in the industry and has recently been the subject of many scientific studies. One of the most important applications of this topic is in the mineral industry. Film flotation is a process for separating hydrophobic mineral materials from hydrophilic. In this study, for simulation of this process, the impact of spherical hydrophobic particles on an air-liquid interface was experimented. The aim is to obtain a critical impact velocity in which the hydrophobic particle remains on the liquid surface so that it penetrates completely at higher velocities than the critical velocity. A mathematical model was developed based on energy balance to predict the critical velocity. The Teflon particles of diameter 3-5mm were used. Distilled water and booger fluid were used as the fluids in experiments. Particle fall into the fluid were captured by using a high speed video camera with the rate of 4500 fps. . For Teflon spherical hydrophobic particles two floatation and penetration regimes were observed from experiments. After processing of sequential images, the motion of a particle inside the fluid was obtained and for the first time, the maximum penetration depth, rebound depth, rebound height and the pinch off depth were determined for each particle and It was found that, at critical velocities and near them, particle penetration is associated with oscillations, and at higher velocities than the critical, the number of oscillations decreases, so that the particle gets separated from the liquid surface without any oscillations. The Dependence of maximum penetration depth on drop height was studied and it was found that with increasing drop height, the maximum penetration depth also increases. Also, the effect of particle size on critical velocity was investigated and it was observed that with increasing particle size the critical velocity decreases. In addition, the particle velocity and the velocity of the three-phase contact line were plotted at critical conditions. The developed mathematical model was compared with the experimental observations, and it was found that in the modeling range, there is good agreement with the values of the obtained data.

Keyword: Particle impact, Critical velocity, Cavity, Contact angle, Multiphase flow, Penetration, Flotation



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

**Experimental study of impacting a spherical hydrophobic
particle on an air – liquid interface**

By: Maryam Ramezani

Supervisors:

Dr. Mohsen Nazari

Dr. Mohammad mohsen shahmardan

12 Jun 2018