

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



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

مطالعه آزمایشگاهی سقوط جسم کروی در سیالات نیوتنی و

غیر نیوتنی

نگارنده: رضا قاسمی

استاد راهنما

دکتر محمود نوروزی

اساتید مشاور

دکتر پوریا اکبرزاده

دکتر محسن نظری

مهر ۱۳۹۹

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

که با تمام وجود برای آموزش و پیشرفت من زحمت کشیدند

زندگی و تمام داشته‌هایم را بدون آن‌ها، مستم

امیدوارم روزی بتوانم اندکی از فداکاری‌هایشان را جبران کنم.

تشکر و قدردانی:

در اینجا لازم میدانم از همه کسانی که این جانب را در امر انجام این پایان نامه یاری نموده اند به خصوص جناب آقای دکتر محمود نوروزی و جناب آقای دکتر پوریا اکبرزاده که همواره از راهنمایی و مشاوره های آن ها بهره مند بوده ام تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین لازم میدانم از همه دوستانی که در این مدت این جانب را یاری نموده اند، تشکر نمایم.

رضا قاسمی

مهر ۱۳۹۹

تعمدنامه

این جانب رضا قاسمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مطالعه آزمایشگاهی سقوط جسم کروی

در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی تحت راهنمایی دکتر محمود نوروزی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 می باشد و مقالات مستخرج بانام « 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 بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن ها) 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 اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . 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 نمی باشد.

چکیده

سقوط جسم در سیال به عنوان مسأله‌ای کلاسیک در مکانیک سیالات معرفی می‌شود که شکل‌گیری جت عمودی در مرکز سقوط را به دنبال دارد. بررسی حرکت جسم در سیال سابقه طولانی دارد که می‌تواند نشان دهنده اهمیت آن در مکانیک سیالات باشد. حرکت زیردریایی‌ها، ذرات سوسپانسیون در محیط سیال که در بسیاری از پروسه‌های صنعتی دیده می‌شود و حرکت اژدرها از جمله موارد مهم از حرکت جسم درون سیال به شمار می‌روند. در مطالعه آزمایشگاهی حاضر، سقوط گوی فولادی بر سطح آزاد مخزنی از سیال غیرنیوتنی باگر و نیز سیال نیوتنی مورد بررسی قرار گرفته است. در آزمایش‌های انجام شده اثر آب‌دوستی و آب‌گریزی سطح گوی فولادی با قطر ۵ میلی‌متر بر تغییرات جابه‌جایی، سرعت، شتاب، ضریب نیروی هیدرودینامیکی، شکل‌گیری کاواک و نقطه جدایش مطالعه شده است. نتایج حاکی از آن است که حجم کاواک حاصل از سقوط گوی‌های با سطح آب‌گریز بیشتر از مقدار متناظر در گوی‌های با سطح آب‌دوست بوده، و در نتیجه سطوح آب‌گریز نیروی پسای ناشی از شناوری بیشتری را تجربه می‌کنند. البته نیروهای ناشی از جرم اضافه‌شده و لزجت نیز در مقدار نیروی پسای کلی تاثیرگذار می‌باشند که موجب می‌شود در شرایط یکسان، پسای کلی گوی آب‌دوست نسبت به گوی آب‌گریز بیشتر باشد. همچنین، مقایسه‌های انجام شده در اعداد بی‌بعد رینولدز $1/7$ و موئینگی $4/24$ نشانگر این واقعیت است که در این اعداد بی‌بعد، فارغ از نوع آب‌دوستی و آب‌گریزی سطح گوی و در مقایسه با سیال نیوتنی، سیال غیرنیوتنی باگر نیروی پسای بیشتری را تجربه می‌نماید.

کلمات کلیدی: گوی فولادی، سطوح آب‌دوست و آب‌گریز، کاواک، نیروی پسا، رژیم برخورد

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ معرفی سیالات ویسکوالاستیک.....	۳
۱-۲-۱ سیال باگر.....	۶
۳-۱ مروری بر تحقیقات پیشین.....	۷
۱-۳-۱ سیالات نیوتنی.....	۷
۲-۳-۱ سیالات غیرنیوتنی.....	۱۲
۴-۱ تئوری برخورد و معادلات حاکم.....	۱۶
۱-۴-۱ نیروی کشش سطحی آب.....	۲۰
۲-۴-۱ ضریب نیروی هیدرودینامیکی.....	۲۰
۵-۱ معرفی تحقیق حاضر.....	۲۱
۶-۱ نوآوری و ضرورت انجام تحقیق.....	۲۱
۷-۱ جمع‌بندی.....	۲۲
فصل ۲: تجهیزات آزمایشگاه و روش کار.....	۲۳
۱-۲ مقدمه.....	۲۴
۲-۲ معرفی بخش‌های مختلف یک کاواک.....	۲۴
۳-۲ رژیم‌های برخورد.....	۲۶
۴-۲ ساخت سیالات مورد آزمایش.....	۲۷
۵-۲ آب‌دوستی و آب‌گریزی.....	۳۳

۳۵	 اندازه گیری زاویه تماس
۳۸	 ۶-۲ تجهیزات آزمایش
۳۸	 ۱-۶-۲ همزن هات پلیت
۳۹	 ۲-۶-۲ دوربین پرسرعت
۴۲	 ۳-۶-۲ ترازو با دقت بالا
۴۳	 ۴-۶-۲ ویسکومتر
۴۴	 ۵-۶-۲ رئومتر
۴۵	 ۶-۶-۲ دستگاه اندازه گیری کشش سطحی
۴۶	 ۷-۶-۲ آهنربای الکتریکی
۴۶	 ۸-۲ نحوه ی استقرار تجهیزات آزمایش
۴۸	 ۹-۲ پردازش تصویر
۵۱	فصل ۳: نتایج و تفسیر آن ها
۵۲	 ۱-۳ مقدمه
۵۲	 ۲-۳ اعداد بی بعد مورد مطالعه
۵۲	 ۱-۲-۳ عدد رینولدز
۵۳	 ۲-۲-۳ عدد وبر
۵۳	 ۳-۲-۳ عدد باند
۵۳	 ۴-۲-۳ عدد موئینگی
۵۳	 ۵-۲-۳ عدد وایزنبرگ
۵۴	 ۳-۳ نتایج سیال غیر نیوتنی
۵۴	 ۱-۳-۳ نتایج سقوط گوی ها از ارتفاع ۰/۵ سانتی متر
۵۹	 ۲-۳-۳ نتایج سقوط گوی ها از ارتفاع ۵۰ سانتی متر
۶۳	 ۳-۳-۳ نتایج سقوط گوی ها از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متر
۶۷	 ۴-۳ سیال نیوتنی

۶۷	۳-۴-۱ نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر.....
۷۱	۳-۴-۲ نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر.....
۷۵	۳-۴-۳ نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر.....
۷۹	۳-۵ مقایسه نتایج در محدوده اعداد بی‌بعد یکسان.....
۷۹	۳-۵-۱ نتایج مربوط به عدد رینولدز.....
۸۲	۳-۵-۲ نتایج مربوط به عدد موئینگی.....
۸۵	فصل ۴: نتیجه‌گیری و پیشنهاد.....
۸۶	۴-۱ بحث و نتیجه‌گیری.....
۸۷	۴-۲ پیشنهادها برای تحقیق آینده.....
۸۸	مراجع.....

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: خواص سیالات مورد استفاده در دمای $T=23\pm0.5^{\circ}$ ۳۱
- جدول ۲-۲: مقادیر λ_i و η_i برای سیال غیرنیوتنی ۳۲
- جدول ۳-۲: نتایج تست زاویه تماس ۳۷
- جدول ۱-۳: مقادیر اعداد بی بعد مربوط به ارتفاع سقوط 0.5 سانتی متر در سیال غیرنیوتنی ۵۴
- جدول ۲-۳: مقادیر اعداد بی بعد مربوط به ارتفاع سقوط 50 سانتی متر در سیال غیرنیوتنی ۵۹
- جدول ۳-۳: مقادیر اعداد بی بعد مربوط به ارتفاع سقوط 100 سانتی متر در سیال غیرنیوتنی ۶۳
- جدول ۴-۳: مقادیر اعداد بی بعد مربوط به ارتفاع سقوط 0.5 سانتی متر در سیال نیوتنی ۶۷
- جدول ۵-۳: مقادیر اعداد بی بعد مربوط به ارتفاع سقوط 50 سانتی متر در سیال نیوتنی ۷۱
- جدول ۶-۳: مقادیر اعداد بی بعد مربوط به ارتفاع سقوط 100 سانتی متر در سیال نیوتنی ۷۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: نمای شماتیک مولکول پلی اتیلن: (الف) خطی (پلی اتیلن سنگین)، (ب) شاخه دار (پلی اتیلن سبک) [۱] ۵
- شکل ۲-۱: تغییر آرایش مولکول پلیمری از حالت پایدار تصادفی به حالت جدید در اثر بارگذاری [۱] ۵
- شکل ۳-۱: تأثیر پلیمر در کاهش ارتفاع جت عمودی سیال [۲۷] ۱۲
- شکل ۴-۱: تغییر سطح صاف داخلی حفره به حالت سخت و زبر [۴۰] ۱۵
- شکل ۵-۱: نمودار تغییرات سرعت در پایین آمدن گوی در داخل سیال هیدروکسیل پروپیل [۴۱] ۱۶
- شکل ۱-۲: معرفی قسمت‌های مختلف کاواک ۲۵
- شکل ۲-۲: تشکیل پرده پاششی تاجی شکل در اثر برخورد گوی به سطح سیال $C6F14$ [۱۴] ۲۵
- شکل ۳-۲: (الف) سقوط گوی درون سیال در رژیم شبه استاتیک. (ب) سقوط گوی درون سیال در رژیم جدایش نیمه عمیق. (پ) سقوط گوی درون سیال در رژیم جدایش عمیق. (ت) سقوط گوی درون سیال در رژیم جدایش سطحی. ۲۶
- شکل ۴-۲: سیالات ساخته شده برای آزمایش ۲۷
- شکل ۵-۲: آب مقطر، گلیسرین و پلی آکریلامید ۲۸
- شکل ۶-۲: نمایی از پیوندهای مولکولی پلی آکریلامید ۲۹
- شکل ۷-۲: حالت پودر پلی آکریلامید ۲۹
- شکل ۸-۲: نمودار تغییرات لزجت بر حسب تغییرات نرخ برش ۳۰
- شکل ۹-۲: گوی‌های مورد استفاده در آزمایش ۳۳
- شکل ۱۰-۲: (الف) ورود یک گوی آب دوست به آب (ب) ورود یک گوی آب گریز به آب [۴۷] ۳۴

شکل ۲-۱۱: مقایسه شماتیک سطوحی که در تماس با آب خیس نمی‌شوند و سطوحی که در تماس با آب خیس می‌شوند [۱۲].....	۳۵
شکل ۲-۱۲: مقایسه رفتار سطح آب‌گریز و آب‌دوست هنگام ورود به آب [۴۸].....	۳۵
شکل ۲-۱۳: نمونه تصاویر اندازه‌گیری زاویه تماس. تصویر سمت چپ خام و تصویر سمت راست به کمک نرم‌افزار SPPF تحلیل شده‌اند.....	۳۶
شکل ۲-۱۴: همزن هات پلیت IKA Plate همراه با بشر، قرص مگنت و سیال پلیمری.....	۳۸
شکل ۲-۱۵: دوربین پرسرعت CMOS مدل pco.dimax S1.....	۴۰
شکل ۲-۱۶: تصویر تشکیل کاواک بعد از برخورد گوی آب‌دوست به سطح محلول سیال نیوتنی	۴۱
شکل ۲-۱۷: نرم‌افزار camware جهت کنترل دوربین.....	۴۱
شکل ۲-۱۸: لنز ماکرو VR Micro-Nikkor 105mm.....	۴۲
شکل ۲-۱۹: ترازو دیجیتال مدل GE 200.....	۴۳
شکل ۲-۲۰: ویسکومتر مدل DVE-LV ساخت شرکت Brook field.....	۴۴
شکل ۲-۲۱: ویسکومتر مدل MCR302 ساخت شرکت Anton Paar.....	۴۵
شکل ۲-۲۲: دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی تنسیومتر به روش ویل‌هلمی.....	۴۵
شکل ۲-۲۳: آهنربا الکتریکی.....	۴۶
شکل ۲-۲۴: جایگاه قرارگیری مخزن به همراه مخزن سیال.....	۴۷
شکل ۲-۲۵: نحوه استقرار تجهیزات برای تصویربرداری.....	۴۸
شکل ۲-۲۶: دریافت عکس‌ها و تشخیص پیکسل‌های سیاه‌وسفید توسط نرم‌افزار.....	۴۹
شکل ۲-۲۷: خروجی‌های نمودار مکان، سرعت و شتاب برحسب زمان توسط نرم‌افزار.....	۵۰
شکل ۳-۱: سقوط گوی آب‌دوست از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متری در سیال غیرنیوتنی و ایجاد رژیم شبه استاتیک.....	۵۵

شکل ۳-۲: سقوط گوی آب‌گریز از ارتفاع ۵/۰ سانتی‌متری در سیال غیرنیوتنی و ایجاد رژیم شبه

استاتیک ۵۶

شکل ۳-۳: نتایج سقوط گوی از ارتفاع ۵/۰ سانتی‌متری در سیال غیرنیوتنی: (الف) نمودار مکان

لحظه‌ای گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (ب) نمودار سرعت گوی‌های

آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (پ) نمودار سرعت گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و

آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (ت) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و

آب‌گریز ($S_{\phi o}$) ۵۸

شکل ۳-۴: پاشش ناشی از سقوط گوی آب‌دوست از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در سیال غیرنیوتنی ۶۰

شکل ۳-۵: کاواک تشکیل‌شده ناشی از سقوط گوی آب‌دوست از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در سیال

غیرنیوتنی ۶۰

شکل ۳-۶: کاواک تشکیل‌شده توسط گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز در لحظه شکل‌گیری نقطه

جدایش ۶۱

شکل ۳-۷: نتایج سقوط گوی از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری در سیال غیرنیوتنی: (الف) نمودار مکان

لحظه‌ای گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (ب) نمودار سرعت گوی‌های

آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (پ) نمودار شتاب گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$).

(ت) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$) ۶۲

شکل ۳-۸: پاشش ناشی از سقوط گوی از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر در سیال غیرنیوتنی ۶۴

شکل ۳-۹: کاواک تشکیل‌شده ناشی از سقوط گوی از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر در سیال غیرنیوتنی ... ۶۵

شکل ۳-۱۰: کاواک تشکیل‌شده توسط گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز در لحظه شکل‌گیری نقطه

جدایش ۶۵

شکل ۳-۱۱: نتایج سقوط گوی از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری در سیال غیرنیوتنی: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (ب) نمودار سرعت گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (پ) نمودار شتاب گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (ت) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$)..... ۶۶

شکل ۳-۱۲: سقوط گوی آب‌دوست از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متری در سیال نیوتنی و ایجاد رژیم شبه استاتیک..... ۶۸

شکل ۳-۱۳: سقوط گوی آب‌گریز از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متری در سیال نیوتنی و ایجاد رژیم شبه استاتیک..... ۶۹

شکل ۳-۱۴: نتایج سقوط گوی از ارتفاع ۰/۵ سانتی متری در سیال نیوتنی: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (ب) نمودار سرعت گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (پ) نمودار شتاب گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (ت) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$)..... ۷۰

شکل ۳-۱۵: پاشش ناشی از سقوط گوی آب‌دوست از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در سیال نیوتنی..... ۷۲

شکل ۳-۱۶: کاواک تشکیل‌شده ناشی از سقوط گوی آب‌دوست از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در سیال نیوتنی..... ۷۳

شکل ۳-۱۷: کاواک تشکیل‌شده توسط گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز در لحظه شکل‌گیری نقطه جدایش..... ۷۳

شکل ۳-۱۸: نتایج سقوط گوی از ارتفاع ۵۰ سانتی متری در سیال نیوتنی: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (ب) نمودار سرعت گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و

آب‌گریز (S_{pho}). (پ) نمودار سرعت گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). (پ) نمودار
ضریب نیروی هیدرودینامیکی آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). ۷۵

شکل ۳-۱۹: کاواک تشکیل‌شده ناشی از سقوط گوی آب‌دوست از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر در سیال
نیوتنی ۷۶

شکل ۳-۲۰: کاواک تشکیل‌شده ناشی از سقوط گوی آب‌گریز از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر در سیال
نیوتنی ۷۷

شکل ۳-۲۱: نتایج سقوط گوی از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری در سیال نیوتنی: (الف) نمودار مکان
لحظه‌ای گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). (ب) نمودار سرعت گوی‌های
آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). (پ) نمودار شتاب گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و
آب‌گریز (S_{pho}). (ت) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و
آب‌گریز (S_{pho}). ۷۸

شکل ۳-۲۲: نتایج سقوط گوی در عدد رینولدر $1/7$: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی
آب‌گریز (S_{pho}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ب) نمودار سرعت گوی آب‌گریز (S_{pho}) در سیال
نیوتنی و غیرنیوتنی. (پ) نمودار شتاب گوی آب‌گریز (S_{pho}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ت)
نمودار مکان لحظه‌ای گوی آب‌دوست (S_{phi}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ث) نمودار سرعت گوی
آب‌دوست (S_{phi}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ج) نمودار شتاب گوی آب‌دوست (S_{phi}) در سیال
نیوتنی و غیرنیوتنی. ۸۱

شکل ۳-۲۳: نتایج سقوط گوی در عدد رینولدر $1/7$: (الف) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی
آب‌گریز (S_{pho}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ب) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی
آب‌گریز (S_{phi}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. ۸۲

شکل ۳-۲۴: نتایج سقوط گوی در عدد موئینگی ۴/۲۴: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی
 آب‌گریز (S_pho) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ب) نمودار سرعت گوی آب‌گریز (S_pho) در سیال
 نیوتنی و غیرنیوتنی. (پ) نمودار شتاب گوی آب‌گریز (S_pho) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ت)
 نمودار مکان لحظه‌ای گوی آب‌دوست (S_phi) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ث) نمودار سرعت گوی
 آب‌دوست (S_phi) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ج) نمودار شتاب گوی آب‌دوست (S_phi) در سیال
 نیوتنی و غیرنیوتنی. ۸۳

شکل ۳-۲۵: نتایج سقوط گوی در عدد موئینگی ۴/۲۴: (الف) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی
 گوی آب‌گریز (S_pho) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ب) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی
 آب‌گریز (S_phi) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. ۸۴

فهرست علائم

m/s^2	شتاب لحظه‌ای گوی	a
بی‌بعد	عدد باند	Bo
بی‌بعد	عدد موئینگی	Ca
بی‌بعد	ضریب نیروی پسا	C_d
بی‌بعد	ضریب نیروی هیدرودینامیکی	C_F
m	قطر گوی	D
m	بیشترین قطر حفره	D_c
N	برآیند نیروهای مقاوم در برابر حرکت	F
N	نیروی جرم اضافه‌شده	F_{am}
N	نیروی شناوری	F_b
N	نیروی کشش سطحی	F_{st}
N	نیروی پسای لزجی	F_d
m/s^2	شتاب گرانش	g
$\frac{rad}{s} cp$	مدول صلبیت هم‌فاز	G'
$\frac{rad}{s} cp$	مدول صلبیت غیر هم‌فاز	G''
m	طول کاواک	L_c
m	ارتفاع سقوط گوی	h
Kg	جرم گوی	m
N	نیروی وزن	mg
m	جرم اضافه‌شده	m_a

بی بعد	عدد رینولدز	Re
m	شعاع گوی	R_0
s	زمان	t
$^{\circ}C$	دما	T
m/s	سرعت ورودی گوی به سیال	U
m/s	سرعت اولیه گوی	V_0
بی بعد	عدد وبر	We
بی بعد	عدد وایزنبرگ	Wi
$1/s$	نرخ برش	$\dot{\gamma}$
cp	لزجت دینامیکی	η
$degree$	زاویه تماس	θ
$degree$	میانگین زاویه تماس	θ_{ave}
s	زمان آسودگی از تنش	λ
s	زمان آسودگی از تنش متوسط	$\bar{\lambda}$
cp	لزجت (نیوتنی)	μ
m/s^3	چگالی	ρ
$m.N/m$	کشش سطحی	σ
Kg/ms^2	تنش برشی	τ_s
rad/s	فرکانس زاویه‌ای	ω

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ مقدمه

نقشی که از سیالات در زندگی روزمره و پدیده‌های طبیعی شاهد آن هستیم و این که به‌عنوان عاملی تأثیرگذار در پروسه‌های صنعتی می‌باشد بر کسی پوشیده نیست. در این میان با توجه به خواص ویژه‌ای که از سیالات غیرنیوتنی شاهد هستیم، می‌تواند کاربردهای ویژه و فراوانی در جریان‌های دوفازی (مایع-جامد، مایع-گاز) داشته باشد که این امر موجب شده است تلاش‌های فراوانی جهت شناخت ویژگی‌های این دسته از سیالات انجام شود. پدیده برخورد گوی بر سطح آزاد سیال از جمله مسائل بسیار پیچیده و جذاب در علم مکانیک سیالات بوده و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گردیده است، به‌طوری‌که امروزه مورد توجه بسیاری از پژوهشگران واقع شده است. برخورد گوی بر سطح آزاد سیال شامل برهم‌کنش چندین نیرو می‌باشد و از طرفی نتیجه‌ی برخورد، به‌شدت تحت تأثیر عواملی چون لزجت سیال، کشش سطحی، خواص رئولوژی و خصوصیات سطح گوی قرار دارد.

در این فصل ابتدا به معرفی سیالات ویسکوالاستیک و باگر پرداخته می‌شود و سپس مروری بر تحقیقات گذشته در خصوص پدیده‌ی سقوط گوی بر روی سطح آزاد سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی و مجموعه اتفاقاتی که پیرامون آن اتفاق می‌افتد، صورت می‌گیرد. به این ترتیب ضمن بیان تاریخچه‌ی تحقیقات پیشین، مراحل مختلف پدیده سقوط روی سطح سیال، رفتارهایی که سیال پس از برخورد از خود نشان می‌دهد و اهمیت تحقیق در این زمینه اشاره خواهد شد. سپس در ادامه، تحقیق حاضر معرفی شده و به بیان مشخصات کلی، اهداف و نوآوری پرداخته خواهد شد. در پایان نیز مروری اجمالی بر ساختار کلی تحقیق حاضر صورت می‌گیرد.

۱-۲ معرفی سیالات ویسکوالاستیک

سیال نیوتنی ماده‌ای است که در آن تنش برشی تنها تابعی خطی از نرخ برش است. حال سیال غیرنیوتنی را می‌توان به‌سادگی به‌صورت سیالی که فاقد رفتار نیوتنی است، تعریف نمود. در سیالات غیرنیوتنی رابطه میان تغییرات تنش برشی و نرخ برش خطی نبوده و در این طیف از سیالات در یک نرخ برش ثابت لزجت و تنش برشی نیز می‌تواند تابعی از زمان باشد. از این‌رو در سیالات غیرنیوتنی ضریبی ثابت مانند لزجت برای توصیف وضعیت تنش برشی معنا نخواهد داشت. خمیردندان، سوسپانسیون نشاسته‌ای، رنگ، خون، شامپو و ... مثال‌هایی از سیال غیرنیوتنی می‌باشند. بسیاری از جریان‌های سیالات غیرنیوتنی با مدل‌های معروفی از جمله گزیکز^۱، پی‌تی‌تی^۲ و فنه^۳ تحلیل می‌شوند. نکته قابل توجه برای تحلیل یک جریان غیرنیوتنی علاوه بر نوع سیال، به نوع مسیر حرکت جریان سیال هم بستگی دارد. مثلاً مدل‌های انتخابی برای تحلیل جریان یک نوع سیال بر روی سطح شیب‌دار نسبت به یک کانال می‌تواند متفاوت باشد. گاهی با تغییر نوع مسیر حرکت برای رسیدن به یک تحلیل مناسب‌تر باید مدل تحلیل هم عوض شود.

در سیالات غیرنیوتنی، تنش برشی رابطه‌ای خطی با نرخ برش ندارد اما در مورد سیالات نیوتنی مانند آب، هوا و مایعاتی با وزن‌های مولکولی پایین، لزجت (η) مقداری ثابت بوده و تنش برشی (τ_s) به‌طور مستقیم با نرخ برش ($\dot{\gamma}$) متناسب است:

$$\tau_s = \eta \dot{\gamma} \quad (1-1)$$

^۱ Giesekus

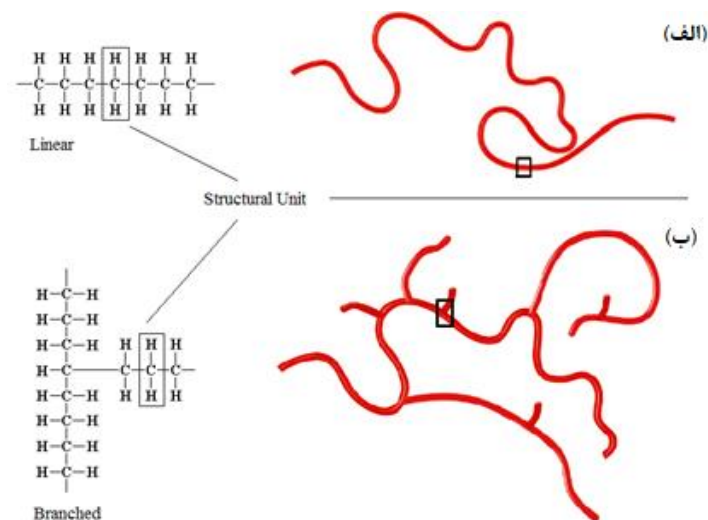
^۲ PTT

^۳ FENE

ویسکوالاستیسیته^۱ خاصیت دسته‌ای از مواد است که رفتاری میان دو خاصیت کلی ویسکوز بودن و الاستیک بودن را از خود نشان می‌دهند و این خاصیت به هنگام تحمیل نیروی خارجی و اعمال تغییر شکل بر آن پدیدار می‌شود. مواد ویسکوز، مانند عسل، در برابر تنش اعمال شده، پاسخ‌هایی به صورت جریان برشی و کرنش (تغییر شکل طولی) با تغییرات خطی نسبت به زمان از خود واکنش نشان می‌دهند. مواد الاستیک، مانند آهن نیز به هنگام رویاروی با تنش، به آرامی کشیده می‌شوند و در صورتی که میزان تنش از آستانه کشسانی آن‌ها فراتر رفته باشد، به محض برداشته شدن تنش، به وضعیت اولیه خود باز می‌گردند. مواد ویسکوالاستیک به مانند نام خود، خواصی از این دو دسته کلی مواد دارند. خاصیت الاستیک به طور معمول ناشی از وجود پیوندهای گسترده مولکولی در سرتاسر صفحات بلوری جامدات و وجود ساختار منظم و سازمان یافته آن‌هاست، ولی در سوی مقابل لزجت ناشی از نفوذ مولکول‌ها و اتم‌ها به درون ساختار نامنظم سیالات است. به طور کلی تمامی مواد دارای مقداری از پاسخ‌های ویسکوالاستیک هستند چرا که در سیالاتی مانند آب که ما به عنوان سیال نیوتنی می‌شناسیم خاصیت بسیار ضعیف الاستیک نیز مشاهده می‌شود و همچنین در مقابل در فولاد هم که به عنوان ماده الاستیک می‌شناسیم، خاصیت بسیار ضعیف ویسکوز دیده می‌شود.

محلول‌ها و مذاب‌های پلیمری اغلب موادی به شدت غیرنیوتنی هستند. مواد پلیمری از مولکول‌های طولی تشکیل شده‌اند که از تکرار یک واحد مشخص به نام واحد ساختاری تشکیل شده‌اند. همچنین مولکول‌های پلیمری می‌توانند به صورت یک رشته‌ی طولی که به مولکول خطی موسوم است و یا از چند رشته‌ی به هم پیوسته که مولکول شاخه‌دار نامیده می‌شود، تشکیل شوند. در شکل ۱-۱ مولکول خطی و شاخه‌دار پلی‌اتیلن با واحد ساختاری $CH_2 = CH_2$ نشان داده شده است.

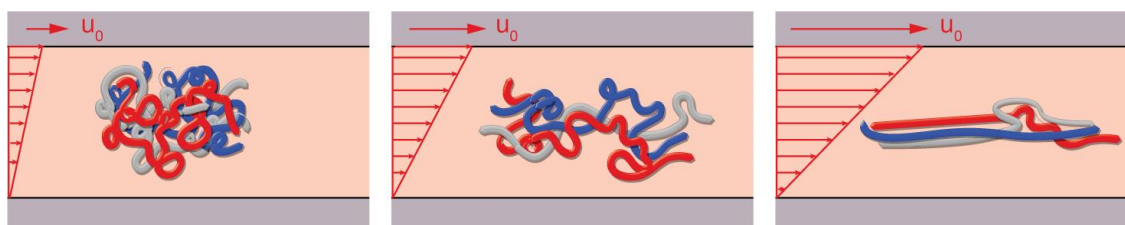
^۱ Viscoelasticity



شکل ۱-۱: نمای شماتیک مولکول پلی اتیلن: الف) خطی (پلی اتیلن سنگین)، ب) شاخه دار (پلی اتیلن سبک) [۱]

به طور کلی مواد درشت مولکول عمدتاً از خود رفتار غیر نیوتنی نشان می دهند. در سیالات نیوتنی وزن مولکولی معمولاً از ۱۰۰۰ گرم بر مول کمتر می باشد، در حالی که در مواد پلیمری وزن مولکولی بین ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰ گرم بر مول است.

در محلول های پلیمری رقیق در صورتی که ماده برای مدت زمان کافی در حال سکون قرار بگیرد، آرایش مولکول ها به صورت درهم تنیده و تصادفی پایدار خواهد بود. حال اگر این ماده پلیمری تحت انواع تغییر شکل ها قرار بگیرد، در آن صورت مولکول های پلیمر در اثر بارگذاری، آرایش فضایی جدیدی پیدا می کنند. در شکل ۱-۲ نمونه ای از این تغییر آرایش مولکولی نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: تغییر آرایش مولکول پلیمری از حالت پایدار تصادفی به حالت جدید در اثر بارگذاری [۱]

درضمن ممکن است که در یک محلول پلیمری مولکول‌ها ساختار خود را با برخی جهت‌های خاص، تطبیق دهند به نحوی که آرایش مولکولی‌شان دیگر تصادفی نباشد. بنابراین در یک ماده‌ی پلیمری، تغییر آرایش مولکول‌ها موجب تغییر خواصی نظیر لزجت می‌شود و چون این تغییر آرایش به‌طور آنی انجام نمی‌شود، لذا سبب وابستگی تغییر شکل‌های سیال به زمان می‌گردد. همچنین در ساختار مولکولی، نیروهای بین‌اتمی مانند فنرهایی عمل می‌کنند که قادرند به ماده در حین تغییر آرایش، رفتار الاستیک نیز بدهند. به عبارت دیگر ماده از خود رفتار ویسکوالاستیک نشان می‌دهد.

۱-۲-۱ سیال باگر^۱

سیال باگر یک مایع ویسکوالاستیک با لزجتی ثابت است. درواقع این سیالات محلول‌های پلیمری رقیقی هستند که با استفاده از حلالی به‌اندازه‌ی کافی لزج مانند محلول آب و گلیسرین ساخته می‌شوند که در آن‌ها تنش‌های ناشی از الاستیسیته قابل اندازه‌گیری هستند [۲]. به علت ثابت بودن لزجت سیالات باگر، و درنتیجه امکان مقایسه آن‌ها با سیالات نیوتنی در یک لزجت مشخص، می‌توان اثرات الاستیک سیالات باگر را به‌صورت واضح و جدا از اثرات لزجت در پدیده مورد آزمایش بررسی نمود که حاکی از اهمیت بسیار بالای این نوع از سیالات غیرنیوتنی است. علاوه بر این، در سیالات غیرنیوتنی لزجت به عوامل مختلفی مانند نرخ برشی، زمان و دما وابسته است، اما سیال باگر به علت استقلال از کمیت‌های فوق تبدیل به یک سیال موردعلاقه برای پژوهشگران، به‌خصوص موضوعات مربوط به آزمایشگاه شده است. باگرها باوجود پیچیدگی در ساخت، چون لزجت آن‌ها با تغییرات نرخ برشی تقریباً ثابت می‌ماند، تحلیل رفتار سیال غیرنیوتنی را ساده‌تر کرده و اجازه می‌دهند تا اثر سایر پارامترهای مؤثر در پدیده برخورد، مانند الاستیسیته، با دقت و اطمینان بیشتری بررسی شود.

^۱ Boger fluid

۳-۱ مروری بر تحقیقات پیشین

مطالعه جنبه‌های برخورد و حرکت یک جسم در داخل یک سیال به دلیل کاربرد و رخ دادن مکرر آن پیرامون زندگی ما بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از مهم‌ترین مواردی که در این پدیده می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد نیروی پسا (نیروی مقاوم در برابر حرکت) می‌باشد. نیروی پسا دارای رابطه‌ای خطی با مقدار لزجت سیالات است. به عنوان مثال، مقدار این نیرو در آب بسیار کمتر از مقدار متناظر در عسل است که به علت مقدار کمتر لزجت آب در مقایسه با عسل است.

اکثر محققان در تلاش هستند تا مقدار این نیرو را با روش‌های مختلفی کاهش دهند که از جمله این روش‌ها می‌توان به افزایش دما و ایجاد شیار سطحی روی سطح جسم اشاره نمود. کاهش نیروی پسا در کاربردهای نظامی، به عنوان مثال شلیک موشک‌های زیردریایی، می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش مصرف سوخت و در نتیجه هزینه داشته باشد.

۱-۳-۱ سیالات نیوتنی

بررسی مکانیک و نیروهای دخیل در اتلاف انرژی جنبشی که در طول برخورد و حرکت یک جسم داخل یک سیال اتفاق می‌افتد می‌تواند بهترین روش جهت درک این فرآیند باشد. برای سیالات نیوتنی نیروهای اینرسی و ویسکوز می‌توانند از دلایل اتلاف انرژی جنبشی باشند که البته به سرعت برخورد جسم نیز بستگی دارد [۳]. اما در سیالات غیرنیوتنی با شرایط بسیار پیچیده و متفاوتی روبرو هستیم که نتایج آن می‌تواند کاربردهای مفیدی داشته باشد.

در مجموع می‌توان بررسی‌های انجام‌شده را به سه گروه کلی آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی دسته‌بندی کرد. با توجه به این که پروژه‌ی حاضر به صورت آزمایشگاهی انجام شده است، ابتدا تاریخچه تحقیقات آزمایشگاهی و در ادامه موارد مربوط به تحقیقات عددی و تحلیلی گزارش شده است.

فون کارمن [۴] در سال ۱۲۹۲ به بررسی ورود اجسام به داخل آب پرداخت. او از اولین افراد محقق در این زمینه بود که در این پروسه سطح مقطعی به فرم گوه و به شکل کف کشتی را برای ورود به آب انتخاب کرد و توانست پارامترهای مهمی همچون نیروی برخورد^۱، فشار و سرعت گوه هنگام ورود به آب را اندازه‌گیری کند.

وودهاال و می [۵] به بررسی نیروی پسا در ورود کره‌های فلزی با اندازه‌ها و سرعت‌های متفاوت به آب پرداختند و دریافتند که ضریب نیروی پسا تابعی از دو عدد بی‌بعد رینولدز^۲ و فرود^۳ می‌باشد. هم‌چنین کوی و همکاران [۶] بررسی‌هایی تجربی در ارتباط با نیروی پسا انجام دادند. آن‌ها گوی‌هایی با اندازه و جنس‌های متفاوت انتخاب کردند و سطح گوی‌ها را به‌وسیله‌ی ماده‌ای پوشش دادند که هنگام ورود گوی به آب باعث تشکیل حباب‌های بسیار ریزی بر روی سطح جسم می‌شد. پس از آزمایش سقوط گوی‌های بدون پوشش و گوی‌هایی که تشکیل حباب می‌دادند دریافتند که تشکیل حباب باعث کاهش نیروی پسا تا ۱۵ درصد می‌شود. بادیلی و همکاران [۷] در مورد ورود پرتابه‌های استوانه‌ای با دماغه‌های متفاوت (صاف، گرد و مخروطی) به آب پژوهشی را به‌صورت آزمایشگاهی انجام دادند. آن‌ها با قرار دادن یک مدار الکتریکی در داخل پرتابه اطلاعات موردنیاز از جمله نیروها، سرعت، شتاب، جابه‌جایی و ضرایب لحظه‌ای نیروهای لیفت^۴ و پسا را اندازه‌گیری کردند. و درنهایت به این نتیجه‌ی مهم رسیدند که اگر پرتابه استوانه‌ای با دماغه صاف به‌صورت مایل وارد آب شود، باعث کاهش نیروی برخورد می‌شود. لوف و همکاران [۸] تحقیاتی را به‌صورت آزمایشگاهی روی موج‌هایی که روی

^۱ Impact force

^۲ Reynolds number

^۳ Froud number

^۴ Lift force

دیواره‌ی کاواک^۱ تشکیل می‌شود انجام دادند. پرتابه‌های آن‌ها مخروطی شکل و به‌صورت مایل و با زاویه‌های متفاوت به داخل آب شلیک می‌شدند. آن‌ها طول‌موج و دامنه‌ی این امواج را اندازه‌گیری کردند و دریافتند که نیروی واردشده‌اندازه‌گیری شده و مقدار نیرویی که با توجه به این امواج تخمین زدند، تناسب خطی دارد. نیو و همکاران [۹] برخورد اجسام منشوری با دماغه‌ها و زاویه‌های مختلف به آب را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اجسام را توسط یک محفظه‌ی هوای فشرده به داخل آب پرتاب کردند. در این مطالعه بود که برای نخستین بار، تشکیل کاواک و پاشش حاصل از برخورد توسط دوربین‌های پرسرعت ثبت و مورد بررسی قرار گرفت.

از مهم‌ترین تحقیقات آزمایشگاهی که اثرات آب‌دوستی^۲ و آب‌گریزی^۳ را در پدیده برخورد بررسی کردند می‌توان به مطالعه تروسکات [۱۰] اشاره کرد که اثرات آب‌دوستی و آب‌گریزی سطح، سرعت چرخشی و نسبت چگالی را بر تشکیل کاواک مورد بررسی قرار داد. تروسکات و تشت [۱۱] گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز را همراه با چرخش عرضی به سمت آب پرتاب کردند و به‌وسیله دوربین‌های پرسرعت نیز تصاویر را ضبط کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در داخل آب یک توده سیال گوه‌ای شکل به‌صورت عرضی از داخل کاواک تشکیل‌شده در پشت کره عبور می‌کند و دریافتند که توده تشکیل‌شده در سرعت نفوذ کره در آب بسیار مؤثر است. هم‌چنین مطالعه تجربی گوی‌های آب‌گریز کوچک توسط آریستوف و بوش [۱۲] در سال ۲۰۰۹ انجام شد. آن‌ها بر روی ساختار کاواک و پاشش تشکیل‌شده^۴ از ورود گوی‌های آب‌گریز به آب تمرکز کردند و یک مدل تحلیلی نیز در مورد شکل‌های مختلف کاواک ارائه دادند. میلیو [۱۳، ۱۴] بررسی مسئله گوی به آب را به‌صورت تحلیلی مورد مطالعه

^۱ Cavity

^۲ Hydrophilic

^۳ Hydrophobic

^۴ Splash Curtain

قرار داد. او یک حل تحلیلی در مورد تعیین نیروهای برخورد در حالت ورود گوی به صورت مایل ارائه کرد.

اینگل و لوئیس [۱۵] نیروها و فشارهای ناشی از برخورد عمودی اجسام به سطح آب را با چندین روش مختلف (مدل سازی المان محدود، کد پنل سه بعدی و روش المان مرزی دوبعدی) مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی واگنر [۱۶] و چوانگ [۱۷] مقایسه کردند و به تطابق قابل ملاحظه‌ای رسیدند. با استفاده از روش هیدرودینامیک ذره، کیم و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۰۷ مسئله‌ی ورود اجسام متقارن به آب را مورد بررسی قرار دادند. یانگ و کیو [۱۹] یک مطالعه عددی در مورد نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر پرتابه در هنگام ورود به آب انجام دادند. آن‌ها تمام ابعاد مسئله را مورد بررسی قرار داده و معادلات ناویر استوکس را به شیوه‌ی المان مرزی برای مسئله‌ی مورد مطالعه حل کردند. وو [۲۰] در سال ۲۰۱۲ یک مطالعه شبیه سازی با روش المان مرزی برای برخورد یک گوه با سطح آزاد آب انجام داد و پیوستگی پتانسیل و سرعت را در گرهِای هر المان در نظر گرفت و نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد که به تطابق قابل قبولی رسید.

احمدزاده و همکاران [۲۱] نیز یک مطالعه‌ی عددی رو پدیده برخورد یک گوی با اندازه‌های متفاوت به سطح آب داشتند. آن‌ها با استفاده از نرم افزار آباکوس^۱ و به روش کوپل اوایلر-لاگرانژ پدیده‌ی مورد نظر را شبیه سازی و با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند.

در تحقیقات مربوط به برخورد گوی داغ به سطح سیال و نفوذ در آن اکثراً از رخ دادن پدیده‌ی لیدنفروست^۲ صحبت می شود که اولین بار توسط یوهان گوتلب لیدنفروست [۲۲] مطرح شد. اگر گوی را قبل از ورود به آب تا دماهای بالایی مثل ۲۰۰ یا ۳۰۰ درجه سانتی گراد حرارت دهیم، با پدیده‌ی

^۱ Abaqus

^۲ Leidenfrost

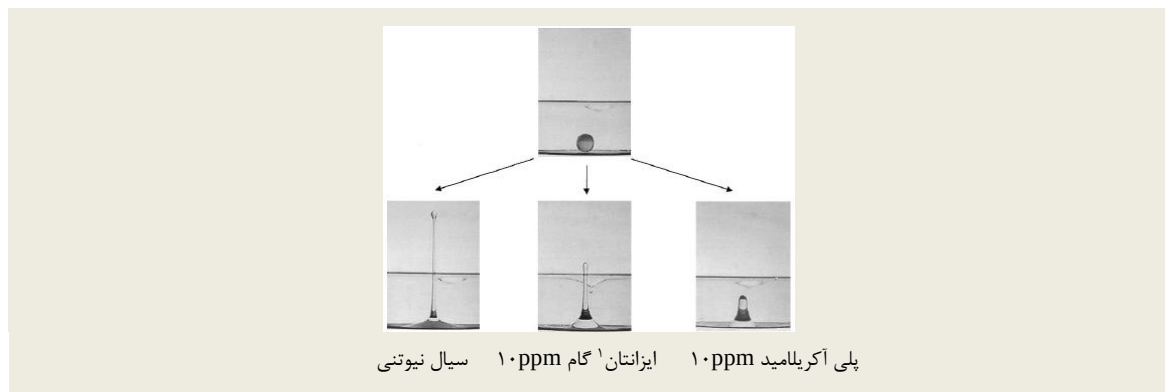
لیدنفروست روبه‌رو می‌شویم. در ارتباط با اثر لیدنفروست، هنگامی که مقداری آب بر روی یک صفحه‌ی فلزی داغ ریخته شود، در محل تماس آب و فلز، لایه نازکی از آب بخار تشکیل می‌شود که از نفوذ حرارت به قسمت بالایی این لایه بخار جلوگیری کرده و در نتیجه از تبخیر آب، جلوگیری می‌نماید. واکارلسکی و همکاران [۲۳] تشکیل و ساختار لایه‌های بخار را در زمان ایجاد پدیده لیدنفروست مورد بررسی قرار دادند. هدف آن‌ها بررسی اثر این لایه‌های بخار بر روی ضریب پسا گوی بود. آن‌ها گوی‌های فلزی را حرارت داده و از فاصله‌های متفاوت روی سطح آب رها کردند و با استفاده از دوربین پرسرعت پدیده‌ی قالب را ثبت و ضبط کردند و دریافتند که مقادیر بیشتر سرعت برخورد گوی به سطح آب اغتشاش لایه‌مرزی در زمان تشکیل پدیده‌ی لیدنفروست و کاهش پسا فشاری را به دنبال دارد. جیلیس و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۲ یک پژوهش عددی بر چگونگی تأثیر پدیده‌ی لیدنفروست روی کاهش ضریب پسا انجام دادند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار انسیس سی‌افایکس^۱ حرکت گوی و استوانه را در دو حالت داغ و سرد مورد مقایسه قرار دادند و مشاهده کردند که جسم داغ با سرعت بسیار بیشتری نسبت به حالت سرد در داخل آب حرکت می‌کند. آن‌ها همچنین گزارش کردند که علت افزایش سرعت به خاطر به وجود آمدن حالت لایه‌های بخار در اطراف جسم است که باعث کاهش ضریب پسا می‌شود. مهری و اکبرزاد [۲۵] مشخصات هیدرودینامیکی کره‌های داغ و سرد و نیز شیاردار و بدون شیار را هنگام ورود آب به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها بر روی گوی‌ها شیارهایی به صورت افقی و عمودی ایجاد کردند و گوی‌ها را در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه و از فاصله ۰/۵ سانتی‌متری بر روی آب رها کردند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که افزایش تعداد شیارهای افقی اثر قابل توجهی بر عمق پیش روی گوی به درون آب دارد. به علت کمینه بودن نیروی مقاوم، نیروهای پسای اصطکاکی و فشاری، بیشترین مقدار سرعت و شتاب ثبت شده متعلق به گوی با

^۱ Ansys CFX

تعداد پنج شیار است. هم‌چنین گزارش کردند که افزایش دما باعث افزایش سرعت سقوط گوی بدون شیار و کاهش سرعت گوی شیاردار شده است.

۱-۳-۲ سیالات غیرنیوتنی

بررسی پدیده سقوط و حرکت گوی درون سیال‌ها در حوزه‌ی مکانیک سیالات غیرنیوتنی از پیشینه‌ای نزدیک به چهل سال برخوردار است. حرکت ذرات سوسپانسیون (ذرات معلق در یک مخلوط ناهمگن) در محیط‌های ویسکوالاستیک که در بسیاری از پروسه‌های صنعتی دیده می‌شوند نشانگر اهمیت مطالعه‌ی این پدیده در حوزه‌ی سیالات غیرنیوتنی است. چنی و والترز [۲۶، ۲۷] از اولین افرادی بودند که این پدیده را در سیالات غیرنیوتنی با استفاده از دوربین پرسرعت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیرات رفتار رئولوژیکی سیال در طی پروسه‌ی برخورد را مطالعه کردند و نشان دادند که می‌توان با افزودن مقدار کمی پلی‌آکریلامید (شکل ۱-۳) به محلول نیوتنی، سیالی با خاصیت ویسکوالاستیک تهیه کرد که باعث کاهش ارتفاع قابل‌توجهی در پاشش و جت حاصل از برخورد در این سیال می‌شود.



شکل ۱-۳: تأثیر پلیمر در کاهش ارتفاع جت عمودی سیال [۲۷]

لی و همکاران [۲۸] مطالعه‌ای درباره قدرت توقف قابل‌توجه سیالات غیرنیوتنی در مقابل حرکت گوی درون این سیالات انجام دادند. پژوهش آن‌ها مربوط به جلیقه‌های کولار^۱ است که با

^۱ Xanthan gum

سوسپانسیون‌ها آغشته شده است. این مطالعات پیشنهاد دادند که خاصیت غلیظ شوندگی^۲ سوسپانسیون وقتی در معرض تنش برشی قرار می‌گیرد، باعث افزایش این خاصیت شده و این امر باعث کاهش و اتلاف انرژی جنبشی جسم می‌شود. پیرو این پژوهش تحقیقاتی نیز با کاربرد نظامی انجام شده که تبدیل به پایه و اساس ساخت پوشش‌های زرهی شده است [۲۹-۳۳]. وایتوک و هنریچ [۳۴] نیز تحقیقاتی مشابه برای توصیف اتلاف انرژی جنبشی در سیالات ویسکوالاستیک غلیظ شونده اما در محدوده سرعت‌های پایین انجام دادند. گوئد و همکاران [۳۵] بررسی کردند که کدام خاصیت سیالات ویسکوالاستیک باعث کاهش شدید سرعت برخورد گوی به سیال می‌شود و دریافتند که کاهش سرعت گوی‌ها ناشی از خاصیت الاستیک سیال‌ها می‌باشد و نه به خاطر خاصیت رقیق شوندگی^۳ یا غلیظ شوندگی که در برخی سیالات ویسکوالاستیک شاهد هستیم.

تابوتو و همکاران [۳۶] در مورد وضعیت تنش تسلیم کاربوپول^۴، در طول برخورد گوی به سطح آزاد این سیال تحقیق کردند. آن‌ها نتایج خود را بر اساس اعداد بی‌بعدی چون رینولدز ارائه دادند که به وسیله آن مطالعاتشان به دو دسته‌ی رژیم رینولدز بالا و پایین تقسیم شد. آن‌ها آستانه‌ای مشخص کردند که در آن هیچ جت سیالی دیده نمی‌شود که مشخص کردن این نقطه به شدت مدول الاستیک کاربوپول وابسته بود. آن‌ها دریافتند که شکل دهانه‌ی شکل گرفته به واسطه‌ی برخورد بیانگر وضعیت سیال است و قطر دهانه شکل گرفته با سرعت برخورد جسم رابطه دارد و همچنین وقتی تنش کمتر از تنش تسلیم است مواد به صورت جامد عمل می‌کند.

^۱ Kevlar

^۲ Shear thickening

^۳ Shear thinning

^۴ Carbopol

اوپونگ و بروین [۳۷] حرکت میکرو ذرات فلورسنت را در ژل کاربوپول ETD 2050 مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که در فرکانس‌های بالا بیشتر ذرات یک محیط ویسکوز و در فرکانس‌های پایین محیط الاستیک را تجربه می‌کنند. اما در عین حال ذراتی را هم مشاهده کردند که در تمام فرکانس‌ها محیطی الاستیک را تجربه می‌کنند و ثابت و بدون حرکت باقی هستند که این امر حاکی از آن است که این ذرات به نوعی گرفتار تنش تسلیم این سیال شده‌اند.

بیسس و همکاران [۳۸] در مورد ضریب پسا یک جسم کروی در سیال ویسکوالاستیک هرشل بارکلی^۱ با یک مدل عددی به تحقیق و بررسی پرداختند. نتایج آن‌ها تأییدکننده این بود که وجود لغزش روی سطح کره می‌تواند ضریب پسا را تا حدود ۳۰ درصد کاهش دهد.

بلکری و میتسولیس [۳۹] بررسی در مورد ضریب پسا جریان خزشی^۲ بینگهام پلاستیک^۳ گذرنده از یک جسم کروی انجام دادند که نمی‌تواند با موضوع مورد پژوهش ما بدون ارتباط باشد. آن‌ها دریافتند که افزایش عدد بی‌بعد بینگهام باعث افزایش قابل توجه ضریب پسا می‌شود.

آکرز و بلمونته [۴۰] تشکیل حفره و مجموعه پروسه‌ای که پس از برخورد یک گوی به سطح آزاد سیال ورم لایک میسلار^۴ رخ می‌دهد را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. طی مشاهده‌ی آن‌ها گوی پس از این که به سطح سیال برخورد می‌کند و کمی در سیال نفوذ می‌کند، سرعت گوی به صفر رسیده و ناگهان به عقب برگشته و دوباره به پایین حرکت می‌کند. این اتفاق چندین بار رخ داده و هر بار از مقدار حرکت برگشتی (به سمت بالا) گوی کاسته می‌شود تا این که به یک ریتم یکنواخت رسیده و با همان حالت ته‌نشین شده و به ته ظرف می‌رسد. آن‌ها اکثر نتایج خود را مثل عمق نفوذ

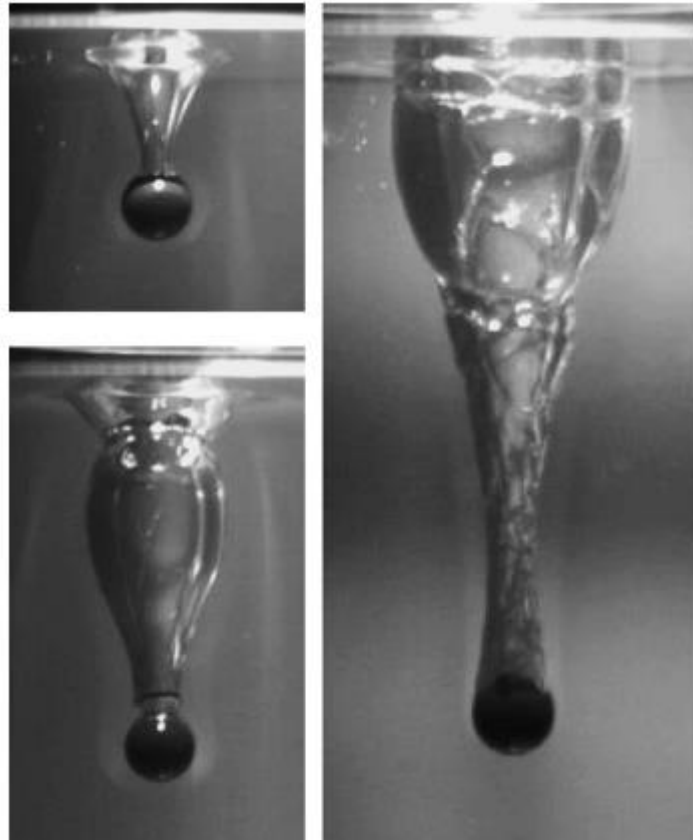
^۱ Herschel-Bulkley

^۲ Creeping flow

^۳ Bingham plastic

^۴ Wormlike micellar

اولیه، عمق حفره و ... به وسیله اعداد بی بعدی چون فراد به صورت رابطه‌هایی فرمول‌بندی کردند. همچنین آن‌ها تغییری در سطح داخلی حفره مشاهده کردند که بعضی مواقع از حالت صاف به حالت سخت و خشن تغییر حالت می‌دهد (شکل ۴-۱) که این امر به زمان رهایی از تنش^۱ و نسبت نیروی گرانش به الاستیک، وابسته است.



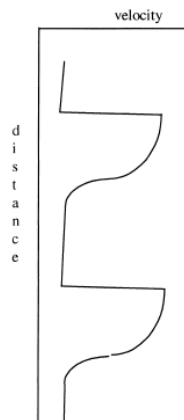
شکل ۴-۱: تغییر سطح صاف داخلی حفره به حالت سخت و زیر [۴۰]

مولینگر و همکاران [۴۱] پدیده‌ی غیرمنتظره‌ای را در ته‌نشین شدن یک ذره کروی در سیال هیدروکسیل پروپیل^۲ مشاهده کردند. بدین صورت که سرعت ذره به صورت منظم کاهش و افزایش پیدا می‌کرد. آن‌ها این حرکت را با استفاده از نوارهای کشی تصویرسازی کردند، بدین صورت که وقتی گوی گرفتار یک سری نوارها می‌شود، آن‌ها را با خود می‌کشد و این باعث کاهش سرعت ذره می‌شود

^۱ Relaxation Time

^۲ Hydroxyl propyl

اما وقتی نوارها بیش از حد کشیده می شوند پاره می شوند که این امر باعث افزایش سرعت ناگهانی گوی می شود (خطوط افقی در شکل ۵-۱) که این پروسه تا ته نشینی کامل گوی ادامه دارد.



شکل ۵-۱: نمودار تغییرات سرعت در پایین آمدن گوی در داخل سیال هیدروکسیل پروپیل [۴۱]

در ادامه به بیان مشخصات کلی مطالعه حاضر خواهیم پرداخت. سپس به اهمیت، ارزش و نوآوری موضوع پرداخته می شود و در انتها مروری اجمالی بر ساختار کلی پژوهش موردنظر صورت می گیرد.

۴-۱ تئوری برخورد و معادلات حاکم

جهت بررسی و تشریح نتایج این تحقیق، نویسنده لازم می داند که به مرور و معرفی نیروها و عکس العمل های حاکم بر سقوط و حرکت گوی درون سیال بپردازد. با توجه به پژوهش های انجام شده توسط فون کارمن [۴] نیروهای وارد شده بر گوی در حال حرکت را می توان به این صورت در نظر گرفت که mg نیروی وزن گوی و $V(t)$ سرعت گوی در زمان برخورد به سطح آب در جهت حرکت گوی و $F(t)$ مجموع نیروهای مقاوم در مسیر حرکت گوی و در خلاف جهت گوی در نظر گرفته شده است. البته مقدار نیروهای اعمال شده وابسته به رژیم سیالی است که جسم در آن حرکت می کند.

معادله زیر به کمک قانون نیوتن استخراج شده است که در آن V_0 سرعت اولیه گوی، m جرم

گوی و m_a جرم اضافه شده^۱ است.

$$\sum F = ma \quad (1-1)$$

$$mg - F(t) = ma(t) \quad (2-1)$$

$$mg - F(t) = \frac{d}{dt}(mV(t)) \quad (3-1)$$

$$V(t) = \frac{mV_0}{m + m_a(t)} \quad (4-1)$$

نیروی $F(t)$ برآیند نیروهای شناوری F_b ، جرم اضافه شده F_{am} و نیروی پسای لزجت F_d است.

$$F(t) = F_b(t) + F_{am}(t) + F_d(t) \quad (5-1)$$

در پدیده سقوط جسم و برخورد آن به سطح آزاد آب دو حالت کلی وجود دارد که مربوط به تشکیل یا عدم تشکیل حفره هوا در سیال است و این دو حالت خود نیز تابعی از زاویه برخورد می باشد. اگر زاویه برخورد جسم با سطح آزاد سیال تغییر نکند، حفره هوا ایجاد نمی شود. اما در صورت تغییر زاویه برخورد، مثلاً با ایجاد پوشش آب گریز روی سطح جسم، با مکش هوا به درون سیال و ایجاد حفره مواجه خواهیم شد.

اگر در جریان سیال حفره هوا تولید شود، نیروی فشاری با نیروهای حاصل از این حفره ها موازنه خواهند شد و در غیر این صورت، این توازن از برآیند نیروی فشاری و گردابه های ایجاد شده و نیز حباب های کوچک هوا حاصل خواهد شد. به عنوان یک نکته مهم باید ذکر شود که اگر در اطراف یک جسم در حال حرکت درون سیال یک لایه بخار تشکیل شود که مانع از تماس مستقیم سیال با این جسم شود، سرعت پیشروی جسم نامبرده در سیال افزایش خواهد یافت که از کاهش نیروی پسا حاصل شده است.

^۱ Added Mass

جهت محاسبه نیروی شناوری F_b باید دقت شود که آیا درون سیال حفره هوا ایجاد شده است یا خیر. در صورت تشکیل حفره هوا و قبل از اینکه جدایش این حفره رخ دهد، مقدار نیروی شناوری وارد بر گوی فولادی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_b(t) = \left(\frac{2}{3} R_0 + (Z(t) - R_0) \right) \pi R_0^2 \rho g \quad (6-1)$$

که در آن ρ چگالی آب، R_0 شعاع گوی، g شتاب جاذبه و $Z(t)$ فاصله بین نوک حفره هوا در نزدیکی سطح سیال و انتهای گوی است.

بعد از جدایش حفره هوا و تقسیم شدن آن به دو قسمت، همان‌طور که رابطه بالا نشان می‌دهد، به دلیل تغییر در ابعاد حفره، باید نیروی شناوری را از رابطه‌ای دیگر محاسبه نمود. نیروی شناوری مجموعه به هم پیوسته گوی و حفره هوا که با سیالی احاطه شده است به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$F_b = \rho V_c g \quad (7-1)$$

که در آن V_c حجم مجموعه گوی و حفره هوا است.

بعد از جدایش تک تک حفره‌های هوا، در نهایت به لحظه‌ای خواهیم رسید که در آن گوی به تنهایی در سیال حرکت می‌کند. در این حالت نیروی شناوری به آسانی قابل محاسبه است که در زیر آمده است.

$$F_b = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \rho g \quad (8-1)$$

منظور از جرم اضافه شده همان مجموعه متشکل از حفره هوا و سیال محیط حفره و گوی است که مقدار نیروی مقاوم زیر را به گوی اعمال می‌نماید.

$$F_{am}(t) = m_a \ddot{Z}(t) \quad (9-1)$$

$$F_{am}(t) = \frac{\rho V_c \ddot{Z}(t)}{2} \quad (10-1)$$

که در آن $\ddot{Z}(t)$ شتاب گوی و m_a مقدار جرم اضافه شده است که برای هر جسم متناسب با خطوط جریان^۱ بوده و در تمام مدت زمان پیشروی آن درون سیال از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$m_a = \frac{0.672}{6} \rho \pi L_c D_c^2 \quad (11-1)$$

در این رابطه L_c طول کاواک و D_c بیشترین قطر حفره است. مقدار جرم اضافه شده مربوط به یک گوی تنها و بدون حفره هوا نیز از رابطه $m_a = \rho V / 2$ محاسبه می شود.

نیروی پسای لزجت F_d نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$F_d(t) = F(t) - F_b(t) - F_{am}(t) \quad (12-1)$$

ضریب پسای کلی گوی در حال حرکت درون سیال نیز از رابطه زیر به دست می آید:

$$C_D(t) = \frac{F(t) - F_b(t) - F_{am}(t)}{\frac{1}{2} \rho \dot{Z}(t)^2 \pi R_0^2} \quad (13-1)$$

از آنجا که نیروهای شناوری و جرم افزوده شده در فازهای مختلف سقوط گوی، یعنی قبل و بعد از جدایش حفره هوا و نیز در حالتی که گوی کاملاً از حفره هوا جدا شده است، متفاوت هستند، ضریب پسای کلی گوی به طور جداگانه برای هر یک از مراحل ذکر شده در ادامه محاسبه شده است.

در مرحله قبل از جدایش حفره هوا:

$$C_D(t) = \frac{m(g - \ddot{Z}(t)) - \left(\frac{2}{3} R_0 + (Z(t) - R_0) \right) \pi R_0^2 \rho g - \frac{0.672}{6} \rho \pi L_c D_c^2 \ddot{Z}(t)}{\frac{1}{2} \rho \dot{Z}(t)^2 \pi R_0^2} \quad (14-1)$$

در مرحله بعد از جدایش حفره هوا:

^۱ Streamlines Bodies

$$C_D(t) = \frac{m(g - \ddot{Z}(t)) - \rho\pi D_c^2 \left(\frac{L_e}{6} + \frac{2L_r}{15} \right) g - \frac{0.672}{6} \rho\pi L_c D_c^2 \ddot{Z}(t)}{\frac{1}{2} \rho \dot{Z}(t)^2 \pi R_0^2} \quad (15-1)$$

حالت گوی تنها و جدایش کامل حفره هوا از گوی:

$$C_D(t) = \frac{m(g - \ddot{Z}(t)) - \frac{4}{3} \pi R_0^3 \rho g - \frac{2}{3} \rho \pi R_0^3 \ddot{Z}(t)}{\frac{1}{2} \rho \dot{Z}(t)^2 \pi R_0^2} \quad (16-1)$$

۱-۴-۱ نیروی کشش سطحی آب

نیروی کشش سطحی آب، F_{st} ، عاملی بسیار مؤثر در زمان برخورد اجسام با سطح آب و البته در زمان حرکت آن‌ها درون آب به شمار می‌رود. این نیرو تابعی از دما است به‌طوری‌که با افزایش دما و در نتیجه افزایش جنبش مولکولی در سطح سیالات، نیروی کشش سطحی کاهش می‌یابد و برعکس. مقدار نیروی کشش سطحی از معادله ۲-۱۷ قابل محاسبه است که در آن Ψ زاویه‌ای است که حفره هوا با افق می‌سازد، $2\pi R_0 \sin \beta$ طول حلقه تماس و σ کشش سطحی آب است.

$$F_{st}(t) = 2\pi R_0 \sigma \sin \beta \sin \Psi \quad (17-1)$$

۲-۴-۱ ضریب نیروی هیدرودینامیکی

ضریب نیروی هیدرودینامیکی رفتار کلی گوی محرک درون سیال را مشخص کرده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$C_F(t) = \frac{m(g - \ddot{Z}(t))}{\frac{1}{2} \rho \dot{Z}(t)^2 \pi R_0^2} \quad (18-1)$$

۵-۱ معرفی تحقیق حاضر

در تحقیق حاضر، سقوط گوی بر روی سطح آزاد و نیز حرکت گوی درون سیال نیوتنی (محلول آب و گلیسرین) و سیال غیرنیوتنی (سیال باگر حاصل از ترکیب پلی‌آکریلامید^۱، آب و گلیسرین^۲) به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است.

با بهره‌گیری از تجهیزات دقیق و پیشرفته مانند دوربین دارای قابلیت تصویربرداری بالا، پاشش سیال پس از برخورد گوی، حفره به وجود آمده پشت گوی، جابه‌جایی، سرعت و شتاب گوی و همچنین تغییرات ضریب هیدرودینامیکی در مسیر حرکت بررسی شده‌اند. در این آزمایش تجهیزات به‌گونه‌ای تعبیه و جایگذاری شده است که نور به صورت مستقیم به طرف لنز دوربین تابیده نشود و مشکلی برای ثبت تصاویر ایجاد نکند. همچنین از یک آهنربای الکتریکی استفاده شده است که پس از قطع جریان الکتریکی آهنربا، گوی در اثر وزن خود و بدون سرعت اولیه سقوط کند.

۶-۱ نوآوری و ضرورت انجام تحقیق

با توجه به این که از آب به عنوان سیال حلال برای ساخت باگر استفاده می‌شود، برای نخستین بار اثر آب‌دوستی و آب‌گریزی سطح گوی فولادی در پدیده برخورد آن به سطح آزاد سیالات ویسکوالاستیک باگر و نیوتنی به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. از آنجا که نیروی پسا به عنوان نیروی مقاوم در برابر حرکت اجسام درون سیال شناخته می‌شود، محققین همواره در تلاش جهت کاهش این نیرو می‌باشند. به عنوان مثال، در کاربردهای نظامی نیروی پسا باعث می‌شود تا زیردریایی سوخت بیشتری

^۱ Polyacrylamide

^۲ Glycerol

را جهت حرکت درون سیال مصرف نماید. از آنجا که سطوح آب‌گریز باعث کاهش نیروی پسا می‌شوند، می‌توان به اهمیت انجام این تحقیق پی برد.

۷-۱ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا به بررسی اهمیت سقوط گوی فولادی و حرکت آن درون سیال‌های نیوتنی و غیرنیوتنی و همچنین معرفی نیروهای موثر بر گوی در مسیر حرکت در سیال پرداخته شده است. در فصل دوم تجهیزات مورد استفاده در آزمایشگاه و همچنین مواد مورد آزمایش و طریقه ساخت سیال نیوتنی و غیرنیوتنی معرفی شده‌اند. همان‌طور که ذکر شده است، بعد از ثبت تصاویر و با استفاده از پردازش تصویر اطلاعاتی همچون جابه‌جایی نسبت به زمان، تغییرات سرعت، شتاب و ضریب نیروی هیدرودینامیکی حرکت گوی داخل سیال در ارتفاع‌های سقوط متفاوت به‌دست آمده است. در فصل سوم به بحث و بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته پرداخته شده است و در فصل چهارم، نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادهایی جهت تحقیق‌های آینده ارائه شده‌اند.

فصل ۲: تجہیزات آزمایسگاہ و روش کار

۱-۲ مقدمه

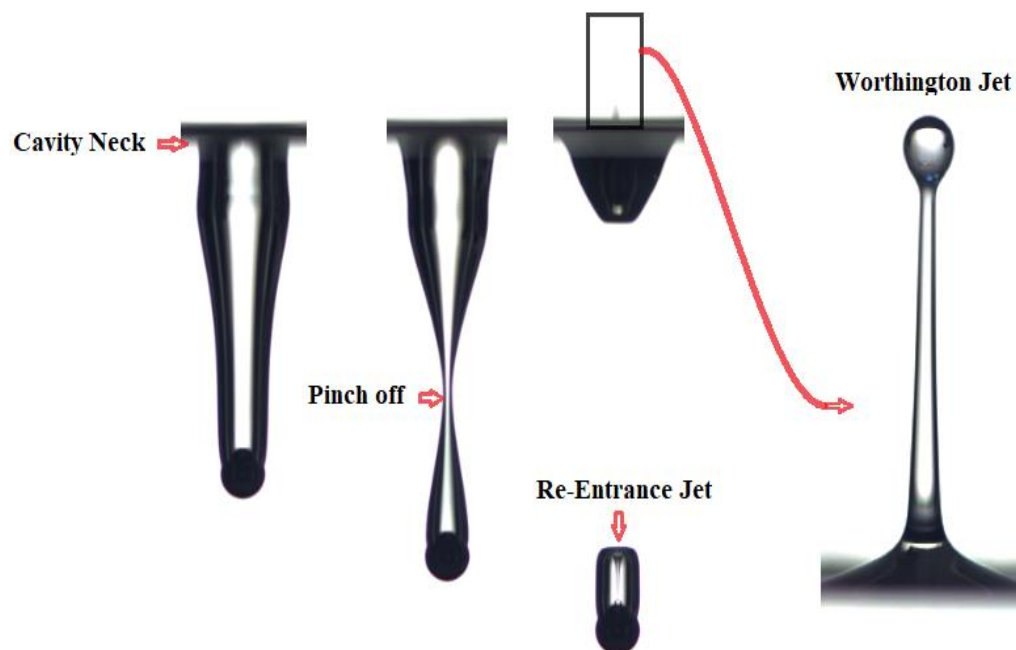
همان‌طور که می‌دانیم دقت بالا و انعطاف‌پذیری تجهیزات آزمایشگاهی موجب کوتاه شدن زمان آزمایش‌ها و افزایش امکان تکرار آن‌ها می‌گردد. دوربین‌های پرسرعت ازجمله ابزارهای مفید در راستای بهبود نتایج آزمایشگاهی به شمار می‌روند. به کمک این دوربین‌ها می‌توان پدیده‌هایی را که وقوع آن‌ها در مدت‌زمانی بسیار کوتاه رخ می‌دهند، ثبت و مورد مطالعه قرار داد. برخورد قطرات یا یک ذره با سطوح جامد یا سیال، سقوط قطره‌های سیال نیوتنی و غیرنیوتنی و جریان‌های اسپری ازجمله وقایعی در مکانیک سیالات هستند که امروزه روش‌های پردازش تصویر کمک شایانی در درک پدیده‌های فیزیکی آن‌ها نموده است.

در این قسمت مواد مورد استفاده در ساخت سیال معرفی و درباره خواص و ویژگی‌های آن‌ها بحث می‌شود. در ادامه نیز سایر تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها معرفی و درباره ابزارهای ساخته‌شده نیز توضیح داده می‌شود.

۲-۲ معرفی بخش‌های مختلف یک کاواک

برخورد یک گوی به سطح یک سیال ممکن است باعث ایجاد کاواک شود. شکل گرفتن کاواک به عوامل مختلفی همچون سرعت برخورد گوی به سطح سیال، لزجت سیال، مقدار زبری سطح گوی، اندازه زاویه تماس سطح گوی که منجر به تعریف سطح آب‌دوست و آب‌گریز می‌شود و همچنین دما و زاویه برخورد گوی به سطح سیال نیز می‌تواند در فرآیند تشکیل کاواک مؤثر باشد. بخش‌های مختلف کاواک شکل‌گرفته در تحقیق حاضر در شکل ۱-۲ مشخص شده است. البته در این شکل به خاطر لزجت بالای سیال فقط جت عمودی به سمت بالا وجود دارد و پاششی به طرفین در قسمت بالایی سطح سیال مشاهده نمی‌شود که ممکن است در کاواک شکل‌گرفته در یک سیال رقیق‌تر مثل

آب یا سیال C_6F_{14} مشاهده شود (شکل ۲-۲). پاششی که در این سیالات رقیق رخ می‌دهد به صورت پرده‌ای شکل است که می‌توان آن را نیز بخشی از یک کاواک تعریف شود.



شکل ۲-۱: معرفی قسمت‌های مختلف کاواک



شکل ۲-۲: تشکیل پرده پاششی تاجی شکل در اثر برخورد گوی به سطح سیال C_6F_{14} [۴۲]

۳-۲ رژیم‌های برخورد

در برخورد گوی به سطح یک سیال رژیم‌های متفاوتی تعریف شده است که معمولاً مرز به وجود آمدن این رژیم‌ها با عدد بی‌بعد وبر^۱ و گاهی اوقات نیز با اعداد بی‌بعد فراد و باند^۲ نیز مشخص می‌شود. جابه‌جایی در این رژیم‌ها به اندازه گوی و سرعت برخورد گوی به سطح سیال بستگی دارد که از پارامترهای تعریف عدد وبر می‌باشند و تأییدکننده اهمیت بالای عدد وبر در تعیین مرزهای رژیم‌های متفاوت است. طبق پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی برخورد گوی به سطح سیال چهار نوع رژیم تعریف شده است. این چهار رژیم برخورد عبارت‌اند از: شبه استاتیک^۳، جدایش نیمه عمیق^۴، جدایش عمیق^۵ و جدایش سطحی^۶. در شکل ۳-۲ می‌توان این چهار نوع رژیم برخورد را مشاهده کرد.



شکل ۳-۲: (الف) سقوط گوی درون سیال در رژیم شبه استاتیک. (ب) سقوط گوی درون سیال در رژیم جدایش نیمه عمیق. (پ) سقوط گوی درون سیال در رژیم جدایش عمیق. (ت) سقوط گوی درون سیال در رژیم جدایش سطحی.

^۱ Weber number

^۲ Bond number

^۳ Quasi Static

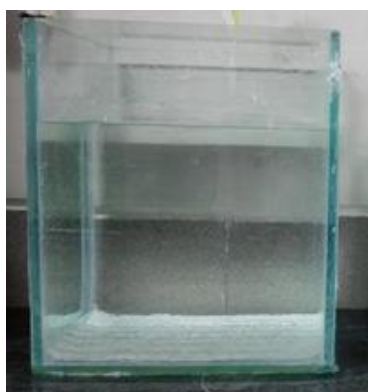
^۴ Shallow Seal

^۵ Deep Seal

^۶ Surface Seal

۴-۲ ساخت سیالات مورد آزمایش

به منظور انجام مقایسه بین رفتار مایعات نیوتنی و غیرنیوتنی در مسئله‌ی برخورد سطوح آب‌دوست و آب‌گریز در شرایط آزمایشگاهی یکسان، دو مایع مختلف هرکدام به مقدار ۴۰۰۰ میلی‌لیتر ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در این مطالعه از محلول غیرنیوتنی پلی‌آکریلامید و محلول نیوتنی حاصل از آب و گلیسیرین بهره برده شده است (شکل ۲-۱).



نیوتنی



غیرنیوتنی

شکل ۴-۲: سیالات ساخته شده برای آزمایش

برای ساخت محلول پلیمری باگر، ابتدا مقدار کمی از پودر پلیمر پلی‌آکریلامید (با توجه به اندازه‌ی غلظت موردنظر) به آب مقطر افزوده می‌شود. پس از اطمینان از حل شدن کامل پودر پلیمر در آب و همگن بودن آن، به آرامی گلیسیرین با نسبت جرمی ترکیبی ۸۰ (گلیسیرین) به ۲۰ (آب مقطر) اضافه می‌گردد. گلیسیرین و آب به راحتی در یکدیگر حل می‌شوند. از گلیسیرین به عنوان عامل تنظیم لزجت استفاده می‌گردد. افزودن اندکی پلی‌آکریلامید به آب، موجب تغییر در لزجت و ایجاد خاصیت کشسانی (الاستیک) می‌گردد. این نکته قابل توجه است که چنانچه ماده پلیمری به خوبی در آب حل نشود، تشخیص آن کار ساده‌ای نیست اما با افزودن گلیسیرین ناهمگنی‌ها به صورت رگه در محلول نمایان خواهند شد.

طی فرآیند ساخت کامل سیال پلیمری، ابتدا نمونه‌های ۲۰۰ میلی‌لیتری به مدت ۴۸ ساعت روی هات پلیت تهیه شده‌اند. این نمونه‌ها ۲۰ مرتبه و به‌صورت جداگانه ساخته شده‌اند و در نهایت درون ظرف مکعب مستطیلی (شکل ۲-۴) با یکدیگر ترکیب شده‌اند. در مورد سیال دوم ساخته‌شده که نیوتنی است، تنها از ترکیب آب مقطر و گلیسرین با همان نسبت جرمی ترکیبی به کار رفته برای سیال باگر، استفاده شده است که در مدت‌زمان ۴۸ ساعت مقدار ۴۰۰۰ میلی‌لیتر تهیه شده است (شکل ۲-۴). ملاحظه می‌شود که سیال نیوتنی خیلی سریع و در مدت دو شبانه‌روز ساخته شده است. شکل ۲-۵ تصاویر آب مقطر، گلیسرین و پلی‌آکریلامید استفاده‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

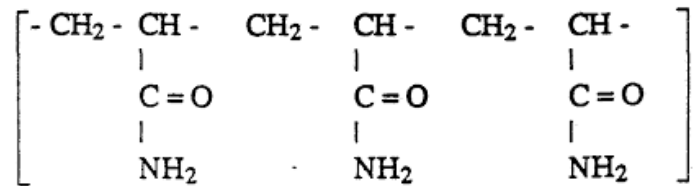


شکل ۲-۵: آب مقطر، گلیسرین و پلی‌آکریلامید

یک بافت پلیمری را می‌توان مجموعه‌ای از ساختارهای کوچک دانست (مونومرها) که این ساختار به تعداد بسیار زیادی تکرار شده است. تولید پلیمر طی فرایندی به نام پلیمریزاسیون^۱ اتفاق می‌افتد

^۱ Polymerization

که دو نوع عمده آن تغلیظ^۱ و اضافه کردن^۲ می‌باشد. شکل ۲-۴ نمایی از پیوندهای مولکولی این ماده نمایش داده شده است.



شکل ۲-۶: نمایی از پیوندهای مولکولی پلی‌آکریلامید

این ماده در دسته‌ی پرکاربردترین پلیمرها در صنایع مختلف است. در اکثر موارد کاربردهای پلی-آکریلامید، این ماده در یک ترکیب پایه آبی حل شده است. این پلیمر به‌صورت پودری سفیدرنگ و بی‌بو (شکل ۲-۵) موجود است که جرم‌های مولکولی 5×10^6 گرم بر مول و 20×10^6 در آزمایشگاه موجود می‌باشد. در این مطالعه از نمونه با جرم مولکولی 20×10^6 گرم بر مول برای ساخت محلول پلیمر باگر استفاده شده است.



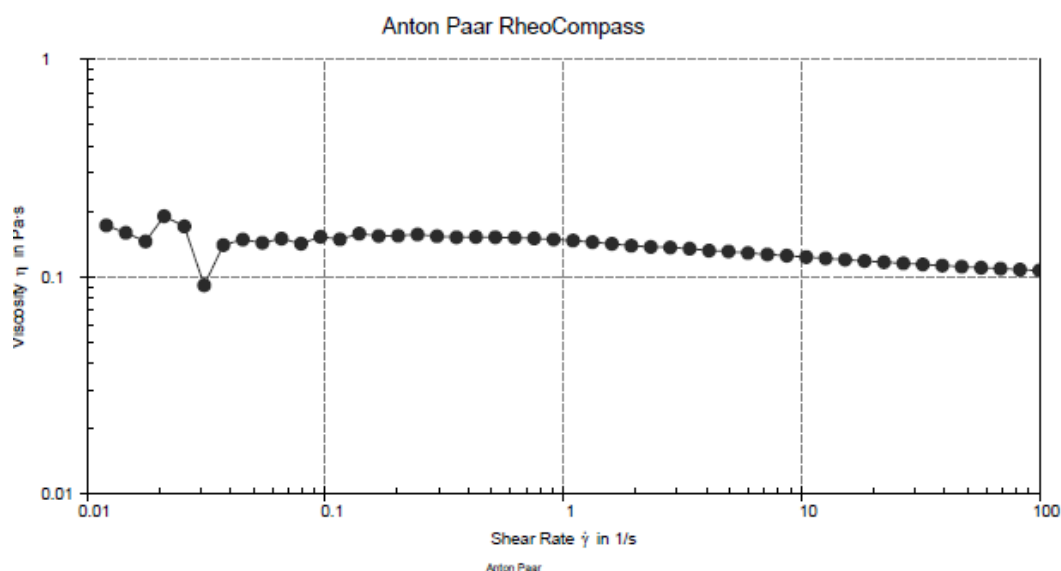
شکل ۲-۷: حالت پودر پلی‌آکریلامید

پیچیدگی رفتار پلیمرها سبب می‌شود که برای بیان خواص این مواد، حداقل به یک خاصیت الاستیک به همراه یک خاصیت ویسکوز نیاز باشد که در این صورت پی بردن به اثر هرکدام از این

^۱ Condensation

^۲ Addition

خاصیت‌ها به‌طور جداگانه کار بسیار دشواری است. همان‌طور که قبلاً هم ذکر شده است، از خصوصیات ویژه سیال غیرنیوتنی باگر ثابت بودن مقدار لزجت است که در شکل ۸-۲ نشان داده شده است. مقدار لزجت سیال باگر برحسب نرخ برش به‌وسیله دستگاه ویسکومتر اندازه‌گیری شده است و نمودار آن در شکل ۸-۲ ترسیم شده است. طبق این شکل می‌توان دریافت که مقدار لزجت با تقریب خوبی خطی افقی را نشان می‌دهد. به‌منظور بررسی جداگانه اثرات الاستیک، و نه لزجت، بر پدیده‌ی برخورد گوی با سطح سیال، باید اثرات لزجت را ثابت نگه داشت که با استفاده از باگرها و ویژگی خاص آن‌ها این هدف محقق می‌گردد.



شکل ۸-۲: نمودار تغییرات لزجت برحسب تغییرات نرخ برش

جداول ۱-۲ و ۲-۲ خواص فیزیکی مواد را نشان می‌دهند. مقادیر از اندازه‌گیری مستقیم خواص در آزمایشگاه حاصل شده‌اند. مقدار لزجت نیز به‌وسیله دستگاه ویسکومتر اندازه‌گیری شده است.

جدول ۱-۲: خواص سیالات مورد استفاده در دمای $T=23\pm0.5^\circ$

محلول سیال نیوتنی	محلول سیال غیر نیوتنی (باگر)	گلیسرین	آب	
۶۵	۶۴/۲	۶۳	۷۲	کشش سطحی $\sigma(\text{dynes/cm})$
۱۱۹۵	۱۲۰۸	۱۲۶۰	۹۹۷/۶	چگالی $\rho(\text{kg/m}^3)$
۷۳	-	۱۴۹	۱	لزجت $\mu(\text{cP})$

گستره‌ی زمان رهایی از تنش، (λ_i, η_i) ها، به وسیله‌ی داده‌های آزمون سیال پلیمری در مد نوسانی به دست می‌آید. برای مدل سازی سیال پلیمری در مد نوسانی از مدل ماکسول استفاده شده است. در این مدل G' و G'' با روابط (۱۹-۲) و (۲۰-۲) تعریف می‌شوند:

$$G' = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \lambda_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (19-2)$$

$$G'' = \eta_i \omega + \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (20-2)$$

روابط (۱۹-۲) و (۲۰-۲)، G' و G'' را به n مؤلفه تقسیم می‌کنند که هر مؤلفه با یک زمان رهایی از تنش λ_i و یک ضریب لزجت η_i مشخص می‌شود. مقدار n برای هر مد تا زمانی که به یک برازش خوب برای داده‌ها برسیم افزایش می‌یابد. بدین منظور تابع f_{min} را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$f_{min} = \sum_{i=1}^m \left[\left(G'_{model}(\omega) - G'_{exp}(\omega) \right)^2 + \left(G''_{model}(\omega) - G''_{exp}(\omega) \right)^2 \right] \quad (21-2)$$

گستره‌ی رهایی از تنش، (λ_i, η_i) ها برای سیال پلیمری در جداول ۲-۲ آمده است.

حال با مشخص بودن مقدار (λ_i, η_i) ها می‌توان با استفاده از رابطه (۲-۲۲) مقدار زمان رهایی از

تنش متناسب با نمونه غیرنیوتنی را محاسبه کرد.

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \eta_i \lambda_i}{\sum \eta_i} \quad (2-22)$$

با توجه به گستره‌ی رهایی از تنش، (λ_i, η_i) ها، زمان رهایی از تنش متوسط برای سیال موردنظر

۱۱/۹۳ ثانیه می‌باشد.

جدول ۲-۲: مقادیر λ_i و η_i برای سیال غیرنیوتنی

i	η_i	λ_i
۱	۰/۰۰۱۵	۰/۱۲۴۵
۲	۰/۰۰۱۸	۰/۹۵۲۱
۳	۰/۰۲۱۴	۳/۴۹۵۸
۴	۱	۷/۶۱۰۵
۵	۱/۰۰۲۵	۱۰/۶۱۰۸
۶	۱/۰۰۶۳	۱۰/۸۲۵۳
۷	۱/۰۰۷۱	۱۱/۸۶۲۳
۸	۲/۰۰۳۸	۱۵/۴۵۲۸

مقیاس زمان مشخصه برای یک ماده ویسکوالاستیک همان زمان رهایی از تنش است. این زمان

برای گازها و مایعات نیوتنی زمانی بسیار کوچک (کوچک‌تر از 10^{-6} تا 10^{-4} ثانیه) و برای جامدات

الاستیک عدد بزرگی (بزرگ‌تر از ۱۰۰ ثانیه) می‌باشد. بنابراین زمان مشخصه برای یک سیال

ویسکوالاستیک در حد وسط این محدوده می‌گنجد. مقدار زمان رهایی از تنش جهت به‌دست آوردن عدد وایزنبرگ کاربرد دارد. عدد وایزنبرگ میزان خاصیت الاستیک سیال را نشان می‌دهد. این عدد بر اساس روابط مختلفی تعریف شده که رابطه‌ی (۲-۲۳) متداول‌ترین شکل بیان آن می‌باشد. بنابراین در یک سیال به‌خصوص، بالا بودن عدد وایزنبرگ به معنای غیرنیوتنی بودن این سیال است و عدد وایزنبرگ برابر صفر نیز بیان‌گر سیال نیوتنی می‌باشد.

$$Wi = \lambda \dot{\gamma} \quad (2-23)$$

۲-۵ آبدوستی و آب‌گریزی

برای انجام آزمایش‌های مربوطه از دو نوع گوی فولادی آبدوست و آب‌گریز استفاده شده است. همه گوی‌ها دارای قطر ۵ میلی‌متر و ساخت شرکت SKF آلمان هستند. برای بررسی میزان آبدوستی و آب‌گریزی گوی‌ها از آن‌ها تست زاویه تماس گرفته شده است. گوی‌های آبدوست همان گوی‌های اولیه هستند که هیچ نوع فرآیندی روی سطح آن انجام نشده ولی برای تهیه گوی‌های آب‌گریز پروسه‌ای نانو مهندسی شده و تقریباً پیچیده روی سطح گوی‌های اولیه توسط پارک علم و فناوری دانشگاه تهران انجام شده است. همان‌طور که در شکل (۲-۹) دیده می‌شود با توجه به قطره آب که روی آن قرار داده شده است به راحتی می‌توان خاصیت آبدوستی و آب‌گریزی آن‌ها مشاهده کرد.



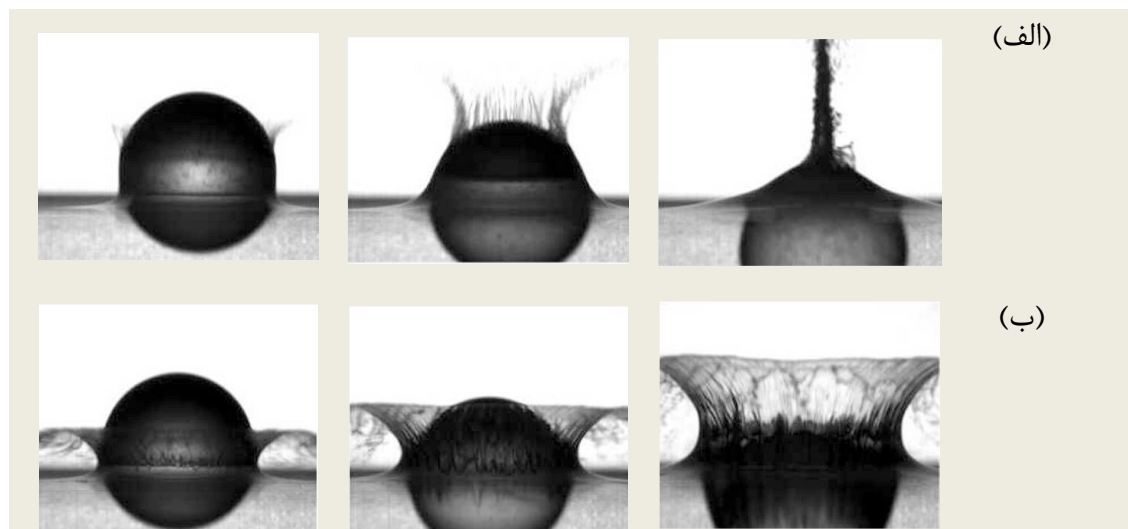
(آب‌گریز)



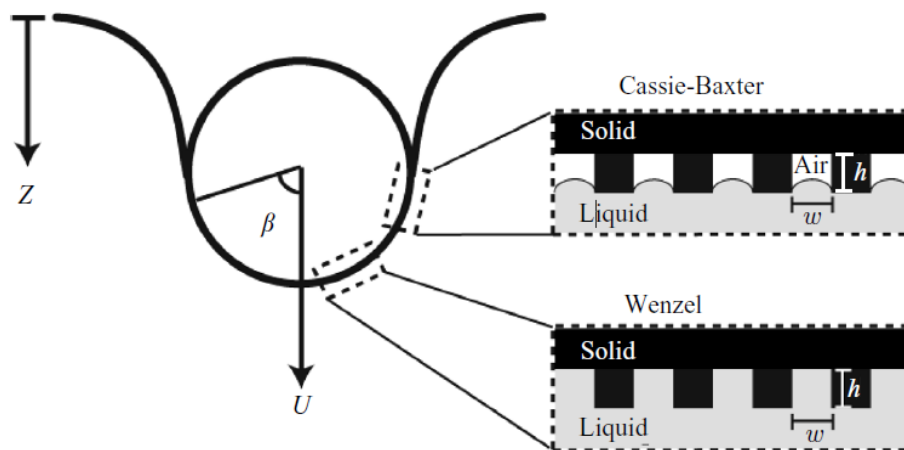
(آبدوست)

شکل ۲-۹: گوی‌های مورد استفاده در آزمایش

دو گوی آب‌دوست و آب‌گریز هنگام ورود به آب رفتاری بسیار متفاوت و قابل‌توجه از خود بروز می‌دهند که نشان‌دهنده‌ی آن است که الگو و نحوه پاشش سیال ارتباط مستقیمی با میزان زبری سطح جسم جامد دارد (شکل ۲-۱۰). معمولاً برای ایجاد خاصیت آب‌گریزی بر روی سطوح موردنظر از پوشش‌های آب‌گریز استفاده می‌شود. پوشش‌های آب‌گریز که معمولاً بر روی سطح موردنظر پاشیده می‌شوند، باعث ایجاد ناهمواری و تخلخل بر روی سطح می‌شوند. این ناهمواری‌ها به‌گونه‌ای است که وقتی سیال بر روی این سطح جریان می‌یابد هوا داخل این ناهمواری‌ها حبس شده و از ارتباط سیال با سطح جلوگیری می‌کند (شکل ۲-۱۱). به‌این‌ترتیب باعث ایجاد سطحی آب‌گریز می‌شود. آب‌گریزی سطح تأثیر بسیار زیادی در فرم تشکیل پاشش سیال و همچنین در سرعت، شتاب و ضریب هیدرودینامیکی جسم در داخل سیال دارد.



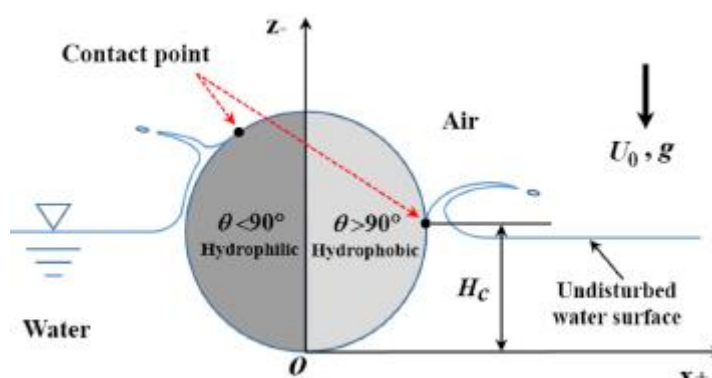
شکل ۲-۱۰: الف) ورود یک گوی آب‌دوست به آب ب) ورود یک گوی آب‌گریز به آب [۴۳]



شکل ۲-۱۱: مقایسه شماتیک سطوحی که در تماس با آب خیس نمی‌شوند و سطوحی که در تماس با آب خیس می‌شوند [۱۲]

۲-۵-۱ اندازه‌گیری زاویه تماس

خواص آب‌گریزی یا آب‌دوستی یک سطح عموماً بر مبنای زاویه تماس یک قطره مایع بر روی آن بیان می‌شود. به‌عنوان یک قانون کلی، هنگامی که زاویه تماس قطره مایع بر روی سطح جامد کمتر از ۹۰ درجه باشد، به‌عنوان سطح آب‌دوست و اگر این زاویه بیشتر از ۹۰ درجه باشد، سطح آب‌گریز شناخته می‌شود. در حالت سقوط جسم به داخل سیال (شکل ۲-۱۲) نیز می‌توان زاویه تماس را مشاهده و با سیستم‌های پیشرفته اندازه‌گیری کرد که به آن زاویه تماس دینامیکی می‌گویند.



شکل ۲-۱۲: مقایسه رفتار سطح آب‌گریز و آب‌دوست هنگام ورود به آب [۴۵]

اندازه زاویه تماس روی سطح گوی‌های موردنظر به کمک آزمون اندازه‌گیری زاویه تماس محاسبه شده است. کاربردهای اصلی اندازه‌گیری زاویه تماس، تعیین میزان آب‌گریزی یا آب‌دوستی، خود تمیز شوندگی و سایر خواص سطح می‌باشد. اندازه‌گیری زاویه تماس به روش Sessile Drop انجام شده است. در این آزمون قطره‌هایی با اندازه مشخص (مثلاً ۴ میکرولیتر در استاندارد ASTM D7334) بر روی نمونه قرار می‌گیرند، سپس به وسیله دوربینی با دقت بالا از این قطره و زاویه تماس خط سه فازی در محل برخورد قطره با سطح تصویر برداری می‌شود.



شکل ۲-۱۳: نمونه تصاویر اندازه‌گیری زاویه تماس. تصویر سمت چپ خام و تصویر سمت راست به کمک نرم‌افزار SPPF تحلیل شده‌اند.

تصویر فوق به کمک نرم‌افزارهای پردازش تصویر، پردازش شده و زوایا محاسبه می‌شوند. برای آزمون اندازه‌گیری زاویه تماس دینامیک و یا زاویه تماس پسماند از روش بزرگ و کوچک کردن قطره استفاده می‌شود که طی آن قطره‌های با اندازه مشخص روی نمونه قرار می‌گیرد و سپس با سرعتی پایین مقداری سیال به آن تزریق و سپس مکش می‌شود تا بدین ترتیب زوایای پیشروی و پسروی محاسبه شوند. نتایج حاصل برای تست زاویه تماس استاتیک که برای آزمایش حاضر به دست آمده، به شرح زیر است:

جدول ۲-۳: نتایج تست زاویه تماس

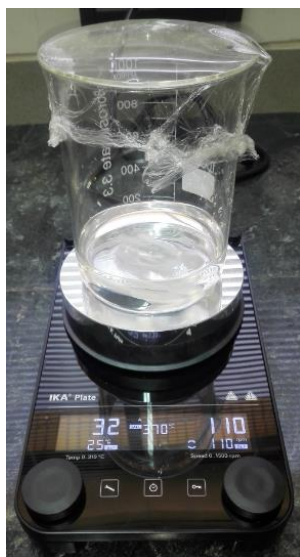
نوع گوی	شماره آزمایش	زاویه تماس θ	میانگین زاویه تماس θ_{ave}
آب دوست	۱	۸۱/۲-۷۸/۵	۸۵/۶
	۲	۸۳/۴-۸۱/۷	
	۳	۸۷/۶-۹۲/۲	
	۴	۸۸/۳-۹۲/۰	
آب گریز	۱	۱۶۲/۷-۱۶۳/۰	۱۶۰/۶
	۲	۱۶۱/۲-۱۶۰/۷	
	۳	۱۶۰/۸-۱۵۹/۷	
	۴	۱۵۸/۶-۱۵۷/۸	

سیال مورد استفاده برای انجام این تست آب مقطر بوده و اندازه قطره در تست های استاتیک آب حدود ۷ میکرو لیتر برای نمونه آب دوست و حدود ۴ میکرو لیتر برای نمونه آب گریز می باشد. در ضمن تست اندازه گیری زاویه تماس توسط دستگاه Jikan CAG-20 انجام شده است. همان طور که از نتایج مربوط در جدول بالا مشخص است، میانگین زاویه تماس مربوط به گوی های آب دوست ۸۵/۶ و آب دوست ۱۶۰/۶ می باشد.

۶-۲ تجهیزات آزمایش

۱-۶-۲ همزن هات پلیت

برای همگن‌سازی سیال مورد مطالعه به یک همزن با سرعت‌های دورانی کم نیاز است که با استفاده از همزن هات پلیت IKA Plate (شکل ۱۴-۲) حاصل شده است. سیال غیرنیوتنی مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر از ترکیب گلیسیرین به‌عنوان ماده لزج‌کننده، آب مقطر به‌عنوان حلال و ماده پلیمری (پلی‌آکریلامید) به دست آمده است. سرعت دورانی همزن در محدوده ۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و دمای آن نیز از ۰ تا ۳۱۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. میدان مغناطیسی ایجادشده توسط همزن، قرص آهنربای سفیدرنگ که در ظرف محلول غوطه‌ور شده است را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه مخلوط ظرف با سرعت تنظیم شده دستگاه، ۱۱۰ دور بر دقیقه، به چرخش درمی‌آید اما خود ظرف ثابت می‌باشد.



همزن هات پلیت در حال ساخت سیال پلیمری



قرص آهنربا مخصوص هات پلیت

شکل ۱۴-۲: همزن هات پلیت IKA Plate همراه با بشر، قرص مغنت و سیال پلیمری

دلیل انتخاب مقدار سرعت دورانی ۱۱۰ برای آزمایش‌های انجام‌شده ممانعت از شکستن پیوندهای پلیمری تشکیل‌شده در ترکیب ویسکوالاستیک است. در غیر این صورت و در مقادیر سرعت دورانی بالاتر، ممکن است شاهد از همپاشی پیوندهای مذکور و در نتیجه از بین رفتن خاصیت الاستیک مخلوط به‌دست‌آمده باشیم.

در ارتباط با دمای تنظیم‌شده دستگاه در عدد ۲۵ درجه سانتی‌گراد، شایان ذکر است که سیال مورد مطالعه چندین مرتبه و در محدوده دمایی مختلف ساخته شده است که طبق نتایج حاصل از دستگاه ویسکومتر، بهترین دما مربوط به عدد ۲۵ بوده است. در ضمن چون ساخت سیال مدت‌زمان نسبتاً زیادی را طلب می‌کند (ساخت هر ۲۰۰ سی‌سی ۴۸ ساعت زمان می‌برد)، در طی ساخت ممکن است مقداری از آب مقطر موجود در ترکیب بخار شود، بدین منظور همان‌طور که در شکل (۲-۱۴) می‌بیند در طی این فرآیند با ایجاد پوشش پلاستیک سلفون بر روی ظرف بشر، از تبخیر شدن آب مقطر جلوگیری شده است.

۲-۶-۲ دوربین پرسرعت

آزمایش‌های انجام‌شده در کار حاضر همراه با تصویربرداری از سقوط گوی‌های فولادی آب‌گریز و آب‌دوست درون سیال‌های نیوتنی و غیرنیوتنی بوده و در نهایت نتایج به کمک پردازش تصاویر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بدین منظور از یک دوربین پرسرعت (S1 pco.dimax CMOS^۱) استفاده شده است که در بالاترین سرعت توانایی ثبت ۴۵۰۰ تصویر بر ثانیه را داراست. رزولوشن دوربین از ۲۴۰×۱۶ تا ۱۰۰۸×۱۰۰۸ قابل‌تغییر است که با افزایش سرعت تصویربرداری به دلیل محدودیت

^۱ Complementary metal-oxide-semiconductor

های حافظه، به‌طور طبیعی رزولوشن^۱ کم می‌شود. یک نمونه تصویر ثبت شده با دوربین با سرعت ۲۰۰۰ فرم بر ثانیه در شکل ۱۷-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۵: دوربین پرسرعت CMOS مدل pco.dimax S1

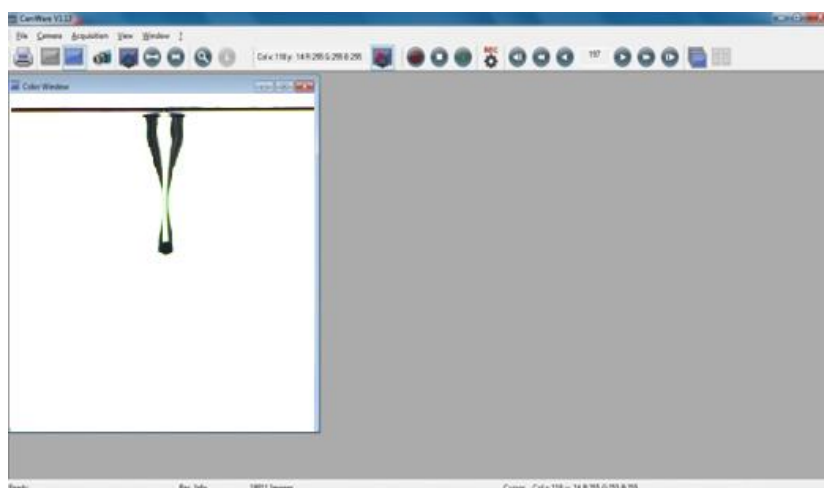
محدوده زمانی نوردی این دوربین (شکل ۲-۱۵) از $1/5$ میکروثانیه تا ۴۰ میلی‌ثانیه می‌باشد و قابلیت کنترل هوشمند باتری را دارد. این دوربین برای ذخیره تصاویر نیز به حافظه داخلی 36GB مجهز است و رابط‌های آن شامل USB 3.0، GigE/USB 2.0، HD-SDI و CameraLink می‌باشد. در شکل ۲-۱۶ می‌توان یک نمونه از تصویر برخورد گوی آب‌دوست به سطح محلول سیال نیوتنی را مشاهده نمود. بعد از بررسی نسبت تصاویر ضبط شده توسط دوربین با اندازه واقعی آن‌ها توسط تابع imread در برنامه متلب و همچنین با توجه به این‌که تصاویر با سرعت ۲۰۰۰ تصویر بر ثانیه ثبت شده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت هر پیکسل فضایی معادل $0,000238$ میلی‌متر مربع را پوشش می‌دهد. بهره‌گیری از چنین رزولوشن بالایی در هنگام تصویربرداری این اطمینان را به وجود می‌آورد که چنانچه پیکسلی بر مرزهای کره واقع شود، خطای قابل ملاحظه‌ای وارد محاسبات نمی‌گردد.

^۱ Resolution



شکل ۲-۱۶: تصویر تشکیل کاواک بعد از برخورد گوی آب‌دوست به سطح محلول سیال نیوتنی

نورپردازی از نکات برجسته در استفاده از دوربین می‌باشد که با استفاده از هشت لامپ ۱۰۰۰ وات در آزمایش‌های انجام‌شده تأمین شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که نورپردازی به‌گونه‌ای باشد که مرزهای کره از فضای اطراف آن کاملاً قابل تفکیک باشند. همان‌طور که در شکل ۲-۲۲ مشاهده می‌شود، کنترل عملکرد دوربین توسط نرم‌افزار CamWare V3.13 صورت می‌گیرد. این نرم‌افزار قابلیت تنظیم دوربین جهت تصویربرداری در شرایط مختلف مانند نور کم یا زیاد و دسترسی به تمام اطلاعات ضبط‌شده به‌وسیله دوربین و همچنین ذخیره تصاویر و فیلم را در فرمت‌هایی نظیر WMV، AVI، JPEG، TIFF به کاربر می‌دهد.



شکل ۲-۱۷: نرم‌افزار camware برای کنترل دوربین

به همراه دوربین از یک لنز Nikon مدل AF-S Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED VR برای آزمایش‌ها استفاده شده است. این لنز ماکرو مخصوص عکاسی و فیلم‌برداری از نزدیک (تا بزرگنمایی ۱:۱) و پرتره می‌باشد. لنز مذکور این قابلیت را دارد که به هنگام نزدیک شدن دوربین به پدیده‌ی موردنظر، تصویری واضح از آن را در اختیار کاربر قرار دهد. شکل ۲-۱۸ لنز مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.





شکل ۲-۱۹: ترازو دیجیتال مدل GE 200

۲-۶-۴ ویسکومتر

برای محاسبه‌ی لزجت سیالات نیوتنی موجود در آزمایش‌ها و همچنین تغییر لزجت برحسب نرخ برش برای محلول‌های پلیمری از ویسکومتر شرکت Brookfield مدل DVE-LV (شکل ۲-۲۰) استفاده شده است. محدوده مجاز این دستگاه 1-2000000 سانتی‌پواز^۱ است (البته در صورت وجود تمام اسپیندل‌های^۲ مرتبط با دستگاه). در هنگام استفاده از این دستگاه باید توجه داشت که از ظرف مناسب با هر اسپیندل استفاده شود (قطر ظرف بیش از دو برابر قطر اسپیندل نباشد) و دما ثابت نگه داشته شود.

^۱ Centipoise

^۲ Spindle



شکل ۲-۲۰: ویسکومتر مدل DVE-LV ساخت شرکت Brook field

۲-۶-۵ رئومتر^۱

همان‌طور که در شکل ۲-۲۱ مشاهده می‌شود، برای اندازه‌گیری خواص رئومتری سیال غیرنیوتنی منتخب در این تحقیق، از یک دستگاه رئومتر MCR302 ساخت شرکت Anton Paar استفاده شده است. تمام آزمایش‌های رئومتری در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است.

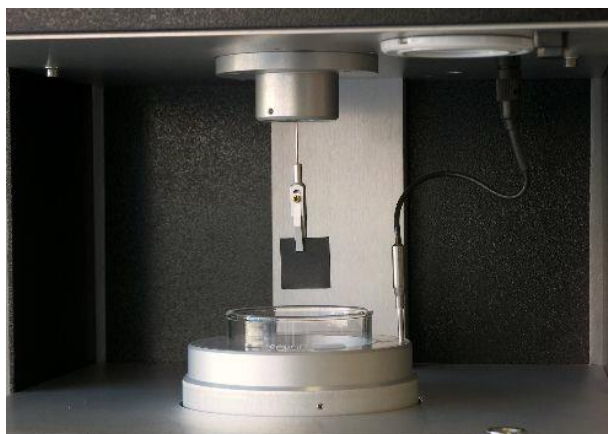
^۱ Rheometer



شکل ۲-۲۱: ویسکومتر مدل MCR302 ساخت شرکت Anton Paar

۲-۶-۶ دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی

شکل ۲-۲۲ دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی تنسیومتر^۱ را نشان می‌دهد که به روش ویل‌هلمی^۲ کشش سطحی سیال را محاسبه می‌کند. این آزمایش در آزمایشگاه سنگ و سیال دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است.



شکل ۲-۲۲: دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی تنسیومتر به روش ویل‌هلمی

^۱ Tensiometer

^۲ Wilhelmy

۷-۶-۲ آهنربای الکتریکی

جهت آزادسازی گوی‌ها از حالت سکون از یک مگنت الکتریکی استفاده شده است (شکل ۲-۲۳) که جریان الکتریکی در آن به کمک کلیدی قطع و وصل می‌شود. به این ترتیب که با برقراری جریان الکتریکی در مگنت، خاصیت مغناطیسی آن فعال می‌شود و با نزدیک کردن گوی فولادی، آن را به خود جذب می‌کند، سپس با قطع کردن جریان الکتریسیته توسط کلیدی که در مسیر جریان برق تعبیه شده بلافاصله گوی متصل به مگنت رها می‌شود.



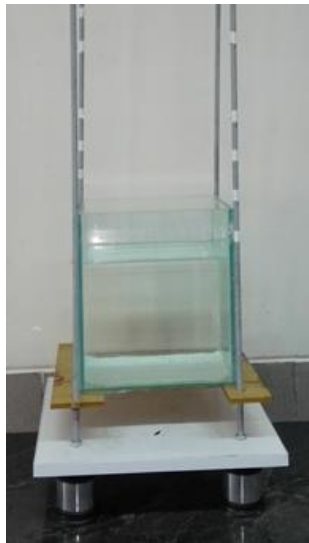
شکل ۲-۲۳: آهنربای الکتریکی

آهنربا هم روی پایه‌ای قرار گرفته است که امکان جابه‌جایی در دو راستای عمودی و افقی را دارا می‌باشد تا در صورت نیاز امکان جابه‌جایی آن برای تغییر ارتفاع گوی تا سطح سیال فراهم باشد.

۷-۲ نحوه‌ی استقرار تجهیزات آزمایش

به منظور انجام آزمایش‌ها، سیال با گر تهیه شده داخل ظرف شیشه‌ای ساخته شده به ابعاد $15 \times 20 \times 20$ سانتی‌متر مکعب قرار داده شده است. برای سقوط گوی‌ها از مگنت الکتریکی استفاده شده است. جهت اطمینان از تراز بودن مخزن و مگنت، امکاناتی برای مگنت و مخزن تعبیه شده است

که قابلیت جابه‌جایی و تنظیم آن‌ها را دارند. بدین منظور از یک صفحه مربعی از جنس پلکسی‌گلاس که توسط چهار میله‌ی رزوه شده به ارتفاع ۱ متر در چهار گوشه آن تعبیه شده کنترل می‌شوند که مخزن روی این صفحه قرار گرفته است (شکل ۲-۲۴). با توجه به رزوه بودن میله‌ها، می‌توان به راحتی فاصله‌ی صفحه را نسبت به سطح زمین تغییر داد. برای ثابت نگه داشتن صفحه و میله‌ها و حفظ تعادل آن‌ها، صفحه‌ای بزرگ‌تر به عنوان پایه در زیر این مجموعه تعبیه شده است.



شکل ۲-۲۴: جایگاه قرارگیری مخزن به همراه مخزن سیال

قبل از انجام هر آزمایش، موازی بودن سطح آزاد سیال و سطح مغنت که گوی به آن متصل می‌شود به وسیله‌ی ابزار تراز بررسی شده است. به دلیل این که برخورد گوی به سطح سیال از حساسیت بالایی برخوردار است، هر آزمایش چندین بار تکرار شده است. همان‌طور که در شکل ۲-۲۵ مشاهده می‌شود، دوربین در سطحی موازی با سطح برخورد گوی با سیال قرار داده شده است.



شکل ۲-۲۵: نحوه استقرار تجهیزات برای تصویربرداری

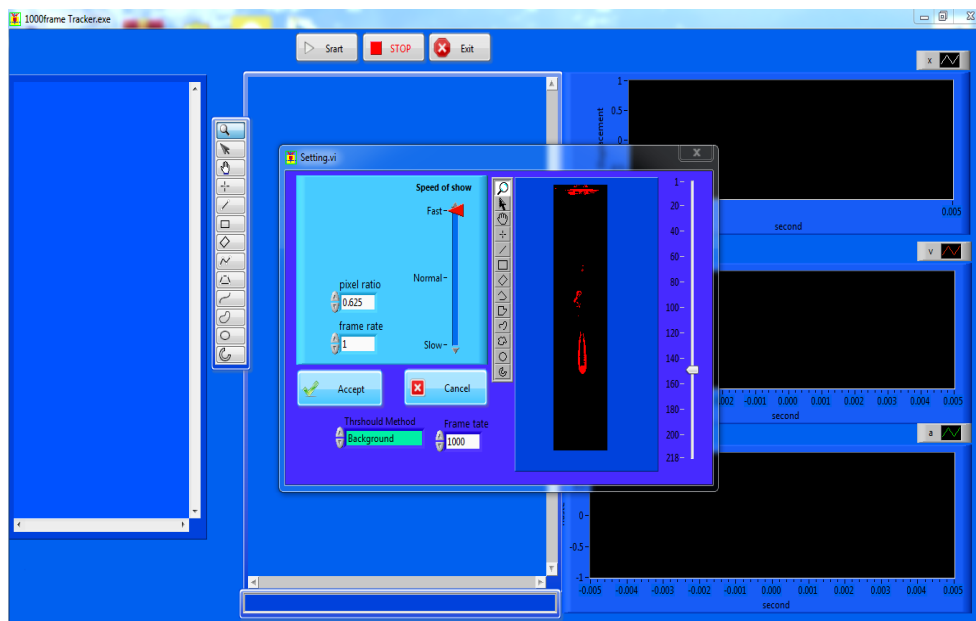
نورافکن‌ها طوری مستقر شده‌اند که بتوانیم هم از روبه‌رو و هم از پشت ستاپ به پدیده‌ای که در طی آزمایش اتفاق می‌افتد نوردهی داشته باشیم. قسمت جلو ستاپ، نور لازم را مستقیماً از خود لامپ‌ها می‌گیرد اما قسمت پشت ستاپ از انعکاس نوری که بر روی صفحه‌ی مقوایی سفید موجود در پشت ستاپ قرار دارد، استفاده می‌کند. به این ترتیب روشنایی لازم را برای تصویربرداری فراهم می‌کنیم.

لازم به ذکر است که قبل از انجام هر آزمایش، گوی‌ها باید به‌طور کامل تمیز شوند (حذف آلودگی و چربی ناشی از دستان کاربر) زیرا در غیر این صورت گوی قادر نخواهند بود رفتار طبیعی خود را به نمایش بگذارد. برای پاک‌سازی، ابتدا سطح گوی به‌دقت با اتانول تمیز شده و بعد از اینکه کاملاً خشک شد، دوباره مورد استفاده قرار گرفته است.

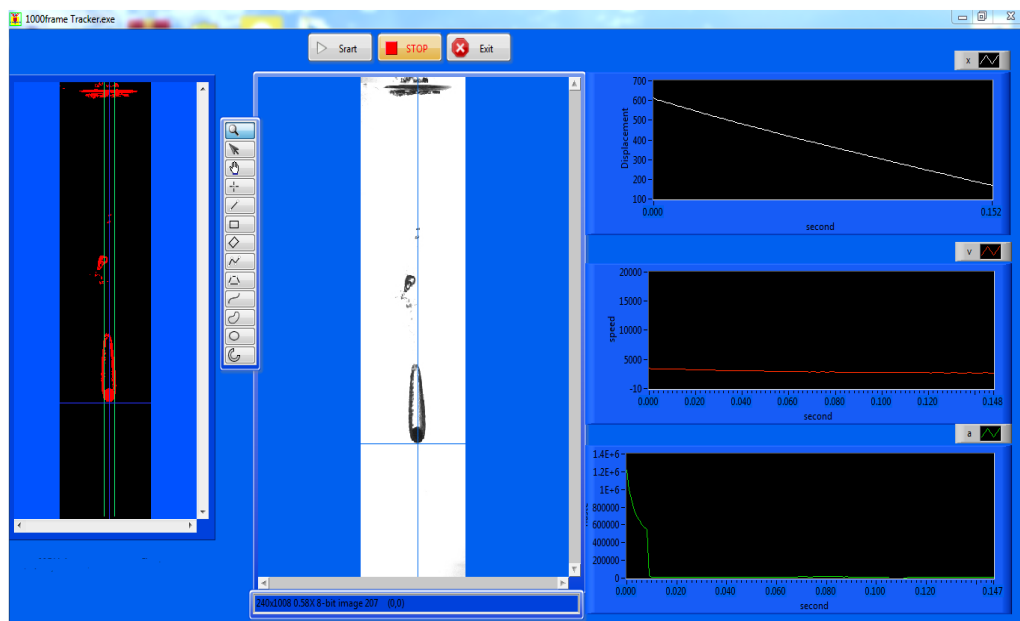
۲-۸ پردازش تصویر

برای به دست آوردن موقعیت مکانی، سرعت، شتاب و دیگر پارامترهای هیدرودینامیکی آزمایش‌ها از کد پردازش تصویر استفاده شده است. این کد با استفاده از نرم‌افزار لب ویو نوشته شده و از ماژول

Edge Detective به عنوان هسته مرکزی برای تشخیص پیکسل‌ها استفاده می‌کند. این کد با استفاده از تصاویر عریض که در آن‌ها گوی با پیکسل‌های سیاه و آب با پیکسل‌های سفید مشاهده می‌شوند، در لحظه (هزارم ثانیه) تغییرات پیکسل در پایین‌ترین نقطه گوی را نسبت به پیکسل قبلی محاسبه می‌کند و نمودارهای موقعیت مکانی، سرعت و شتاب گوی را نمایش می‌دهد. این کد تمام تصاویر گوی را از لحظه برخورد به سطح آب تا لحظه‌ای که موردنظر است دریافت کرده و با استفاده از عدد فریمی که تصاویر با آن گرفته شده‌اند (در این تحقیق ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه) و همچنین طول هر پیکسل که کاربر تعریف می‌کند (۰/۰۰۰۲۳۸ متر) خروجی موردنظر را به کاربر می‌دهد. شکل ۲-۲۶ چگونگی دریافت مشخصات تصاویر از جمله فریم و طول پیکسل و شکل ۲-۲۷ نحوه پردازش تصاویر توسط نرم‌افزار و نمودارهای خروجی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۶: دریافت عکس‌ها و تشخیص پیکسل‌های سیاه و سفید توسط نرم‌افزار



شکل ۲-۲۷: خروجی‌های نمودار مکان، سرعت و شتاب برحسب زمان توسط نرم‌افزار

فصل ۳: نتایج و تفسیر آن ها

۳-۱ مقدمه

در این فصل به بحث و بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده برخورد گوی فلزی بر سطح آزاد سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی باگر پرداخته می‌شود. سعی شده است نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده به‌طور کامل مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور، نمودارهای جابجایی، سرعت، شتاب و ضریب هیدرودینامیکی نسبت به زمان برای گوی فولادی که از سه ارتفاع سقوط ۵/، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری بالای سطح آزاد سیال ترسیم شده‌اند. همچنین از پنج عدد بی‌بعد رینولدز، موئینگی، وبر، باند و وایزنبرگ در تحلیل و مقایسه نتایج حاصل از دو نوع سیال استفاده شده است.

۳-۲ اعداد بی‌بعد مورد مطالعه

در این قسمت به معرفی مختصر اعداد بی‌بعد مورد استفاده در تحقیق حاضر پرداخته شده است. در برخورد یک گوی به سطح یک سیال نیروهای مختلفی مؤثر هستند. از این‌رو برای مشخص شدن میزان تأثیر این نیروها و نیز اهمیت آن‌ها از پنج عدد بی‌بعد مهم در زمینه برخورد گوی به سطح سیال استفاده شده است که به شرح زیر می‌باشد.

عدد رینولدز

عدد رینولدز، نسبت نیروهای اینرسی به لزجت را بیان کرده و درجه اهمیت نسبی این دو نیرو را به‌صورت کمی بیان می‌کند.

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (۳-۱)$$

عدد وبر

این عدد نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی را بیان می‌کند و در مطالعه سطح مشترک گاز- مایع، مایع- مایع و مایع- جامد اهمیت دارد.

$$We = \frac{\rho U D}{\sigma} \quad (2-3)$$

عدد باند

عدد باند عبارت است از نسبت نیروی گرانشی به نیروی کشش سطحی که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Bo = \frac{\rho g D}{\sigma} \quad (3-3)$$

عدد موئینگی^۱

این عدد نیز نسبت لزجت به نیروی کشش سطحی را بیان می‌کند.

$$Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \quad (4-3)$$

عدد وایزنبرگ

جهت تعیین خاصیت الاستیک سیالات غیرنیوتنی از عدد بی بعد وایزنبرگ استفاده می‌شود.

$$Wi = \frac{\lambda U}{D} \quad (5-3)$$

^۱ Capillary number

۳-۳ نتایج سیال غیرنیوتنی

در این بخش تأثیر آب‌دوستی و آب‌گریزی سطح گوی فولادی به کمک نمودارهای جابجایی، سرعت، شتاب و ضریب نیروی هیدرودینامیکی که نسبت به زمان ترسیم شده‌اند، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

۳-۳-۱ نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر

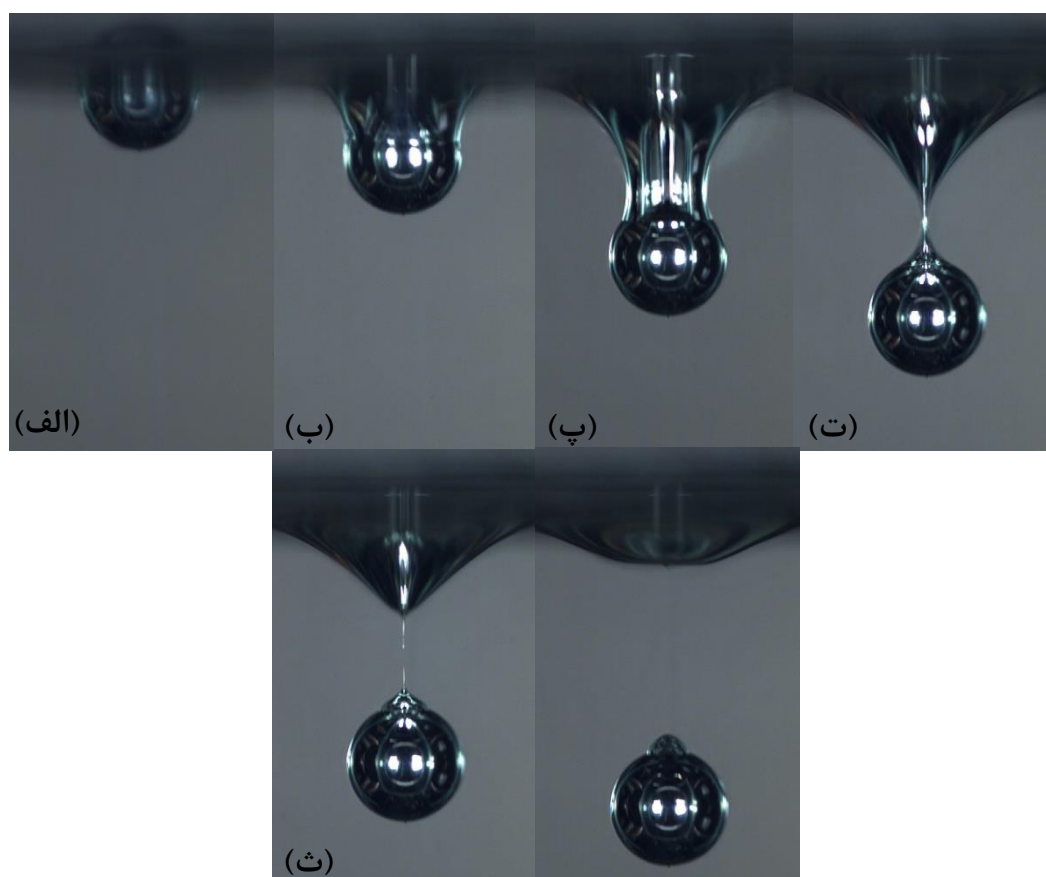
جهت محاسبه سرعت برخورد گوی به سطح سیال از رابطه $U \approx \sqrt{2gh}$ استفاده شده است. همان‌طور که در جدول ۳-۱ گزارش شده است، در این تحقیق از پنج عدد بی‌بعد برای بررسی اثرات هیدرودینامیکی سقوط گوی استفاده شده است که نتایج مربوط در جدول ۳-۱ آورده شده است.

جدول ۳-۱: مقادیر اعداد بی‌بعد مربوط به ارتفاع سقوط ۰/۵ سانتی‌متر در سیال غیرنیوتنی

مقدار	عدد بی‌بعد
۰/۱۵۴	Re
۰/۶۷۶	Ca
۰/۳۱۲	We
۹/۱۳	Bo
۷۸/۷۳۸	Wi

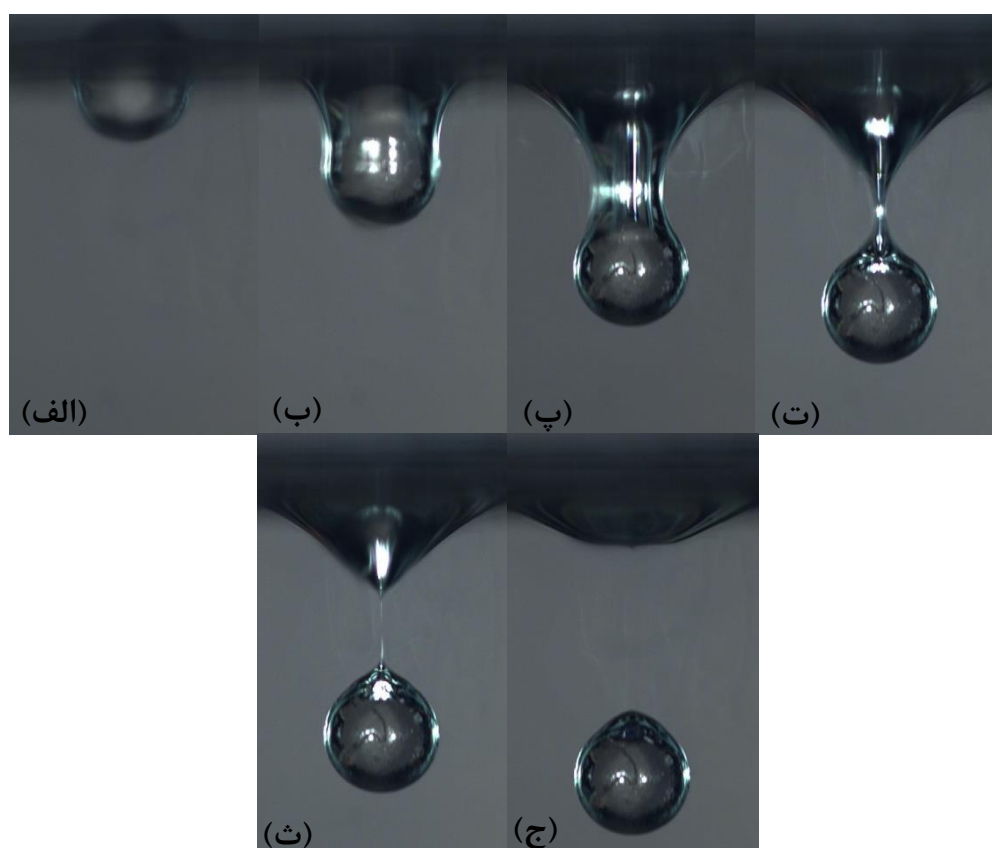
با توجه به شکل ۳-۱ می‌توان مشاهده نمود از زمانی که نصف گوی آب‌دوست در سیال فرو رفته است، یک کاواک کوچک با سطحی کاملاً پایدار شروع به ظاهر شدن می‌کند (شکل ۳-۱، ب-ج) که دلیل آن تعادل بین نیروی کشش سطحی سیال پلیمری و نیروی جاذبه است. به خاطر این که سقوط از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متری نیروی بسیار کمی را به سطح سیال وارد می‌کند، مولکول‌های سطحی سیال

با توجه به پیوند نسبتاً قوی که دارند به آرامی شکل سطحی خود را از دست می‌دهند. تشکیل کامل کاواک به معنای آغاز زمان جدایش کاواک از سطح گوی می‌باشد (شکل ۱-۳، ت) اما به خاطر لزجت کششی قابل توجه سیال پلیمری عمل جدایش کامل کاواک از سطح گوی به تعویق افتاده و ابتدا یک رشته‌ی بسیار نازک از سیال و هوا بین کاواک و سطح گوی تشکیل شده (شکل ۱-۳، ث) و کشیده می‌شود تا قطع شود (شکل ۱-۳، ج). سپس جدایش اتفاق افتاده و تنها یک حباب کوچک گنبدی شکل متقارن روی سطح گوی باقی می‌ماند و تا انتهای مسیر همراه گوی سقوط می‌کند (شکل ۱-۳، ج). ذکر این نکته حائز اهمیت است که در ارتفاع سقوط 0.5 سانتی‌متری، در قسمت سطح بالای سیال هیچ‌گونه پاشش و یا جت سیال عمودی به سمت بالا مشاهده نشده است که به علت سرعت ناچیز برخورد گوی در مقابل لزجت نسبتاً بالای سیال است.



شکل ۱-۳: سقوط گوی آب‌دوست از ارتفاع 0.5 سانتی‌متری در سیال غیرنیوتنی و ایجاد رژیم شبه استاتیک

در گوی آب‌گریز فرآیند تشکیل کاواک دقیقاً مانند گوی آب‌دوست است و تنها تفاوت آن در تشکیل حباب در اطراف گوی بعد از نقطه جدایش است. در گوی آب‌دوست شاهد یک حباب گنبدی شکل و متمرکز در قسمت بالای گوی بعد از جدایش هستیم. اما در گوی‌های آب‌گریز، حباب هوا به‌صورت یک لایه نازک و البته متقارن گوی را احاطه می‌نماید که حجم هوا در قسمت بالایی گوی کمی نسبت به اطراف بیشتر است. (شکل ۳-۲، ج).



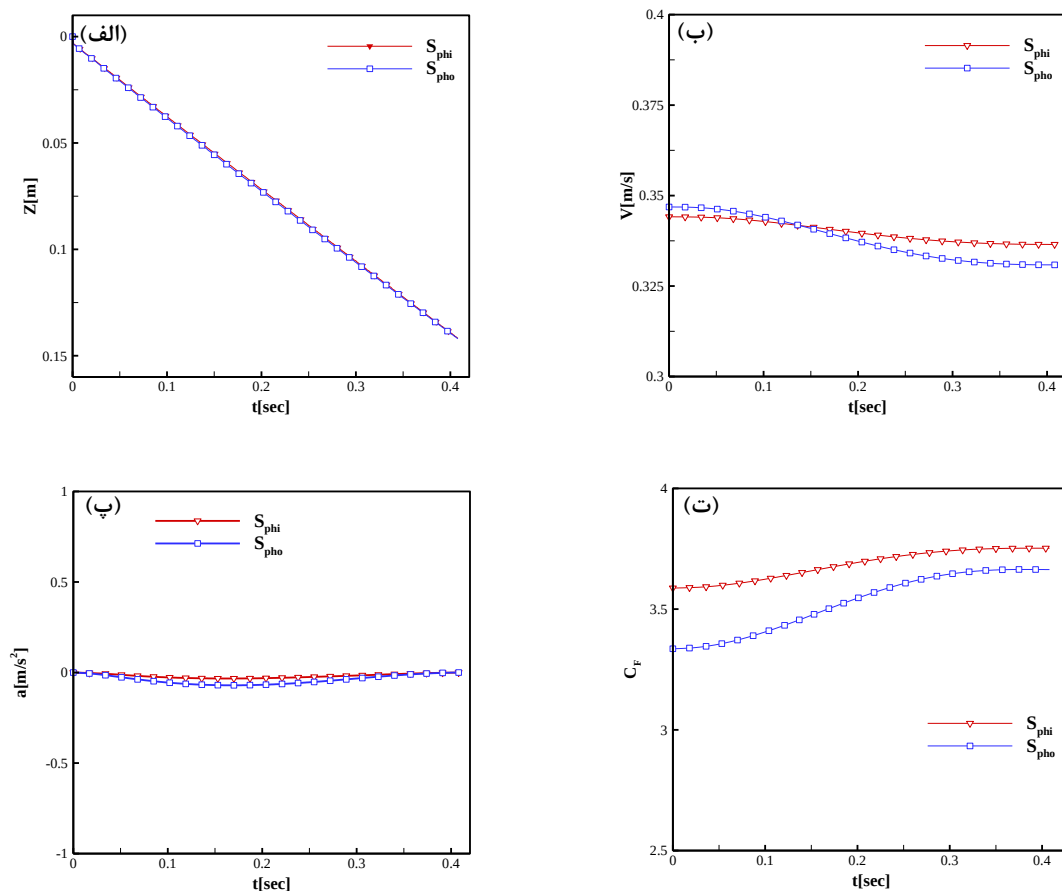
شکل ۳-۲: سقوط گوی آب‌گریز از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متری در سیال غیرنیوتنی و ایجاد رژیم شبه استاتیک

نمودارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب گوی فولادی برحسب زمان و برای هر دو حالت آب‌دوست و آب‌گریز در شکل ۳-۳ نشان داده شده‌اند. با توجه به اینکه عمق سیال درون ظرف ۰/۱۵ متر است، طبق شکل ۳-۳، الف مشاهده می‌شود که گوی فولادی تقریباً بعد از مدت ۰/۴ ثانیه از لحظه ورود به سطح آزاد سیال ($z=0$) به کف ظرف ($z=0.15$) رسیده است. جهت بررسی دقیق‌تر شکل ۳-۳، (الف)

نمودار بزرگنمایی شده‌ای تهیه شده است و حاکی از آن است که گوی با سطح آب‌گریز اندکی سریع‌تر از گوی با سطح آب‌دوست به کف ظرف رسیده است که علت آن عدم چسبندگی بین سیال پلیمری و گوی آب‌گریز است. با توجه به این که سقوط از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متری و در رژیم شبه استاتیک رخ داده که در این رژیم به علت سرعت و شتاب کم قضاوت کردن درباره رفتار گوی‌ها بسیار سخت و همراه با خطا است. معمولاً رفتار پرتابه‌ها با توجه به نمودارهای سرعت و شتاب به‌دست آمده از تصاویر حرکت در سیال تحلیل می‌شود.

نمودار سرعت نیز در شکل ۳-۳ (ب) ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که سرعت گوی آب‌دوست در ابتدا ۰/۳۴۴ متر بر ثانیه بوده و با کاهش سرعت در مدت‌زمان سقوط در سیال در نهایت به ۰/۳۳۷ متر بر ثانیه می‌رسد. در مقابل، گوی آب‌گریز سرعت اولیه‌ای تقریباً برابر گوی آب‌دوست داشته ولی کاهش سرعت بیشتری را تجربه کرده است. سرعت گوی آب‌گریز در لحظه ۰/۴ ثانیه کمتر از ۰/۳۳۲ متر بر ثانیه ثبت شده است.

در نمودار شتاب نیز همان‌طور که مشاهده می‌شود هر دو نوع گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز در لحظه‌ی ورود به سیال شتاب صفر و سپس شتاب منفی اما با شیب‌های متفاوت را تجربه کرده‌اند. با توجه به نمودار شتاب می‌توان دریافت که گوی آب‌گریز کاهش سرعت شدیدتری را در هر لحظه از مسیر نسبت به گوی آب‌دوست دارد.



شکل ۳-۳: نتایج سقوط گوی از ارتفاع ۰/۵ سانتی متری در سیال غیریوتنی: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (ب) نمودار سرعت گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (پ) نمودار شتاب گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (ت) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$)

با توجه به شکل ۳-۳(ت) که مربوط به تغییرات ضریب هیدرودینامیکی گوی‌ها بر حسب زمان می‌باشد مشاهده می‌شود که گوی آب‌دوست در ابتدا که وارد سیال پلیمری شده ضریب هیدرودینامیکی یا به‌نوعی پسای بیشتری را نسبت به گوی آب‌گریز احساس کرده است. بعد از گذشت مدت‌زمان یکسان، هردو نوع گوی شاهد افزایش ضریب هیدرودینامیکی بوده‌اند که در ادامه به مقادیر پایا ولی متفاوت نسبت به هم میل کرده‌اند که این مقدار برای گوی آب‌دوست تقریباً $3/75$ و آب‌گریز $3/65$ می‌باشد. مقادیر پایای ثبت‌شده برای ضریب هیدرودینامیکی نشانگر تعادل هیدرودینامیکی حرکت گوی درون سیال است.

۳-۲-۳ نتایج سقوط گوی ها از ارتفاع ۵۰ سانتی متر

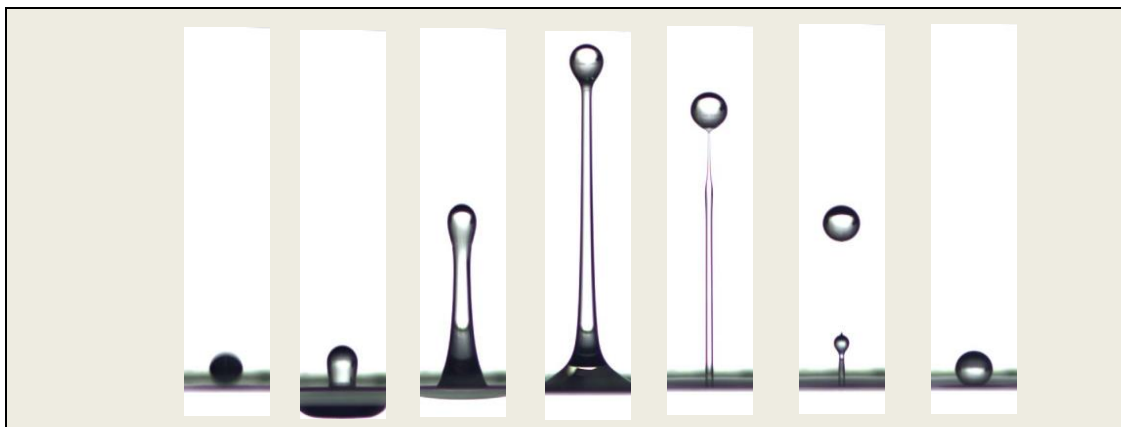
در این بخش به بررسی تغییرات جابه جایی، سرعت، شتاب و ضریب هیدرودینامیکی گوی هایی با سطوح آب دوست و آب گریز از ارتفاع سقوط ۵۰ سانتی متر پرداخته شده است. سرعت ورودی به سیال با استفاده فرمول $U \approx \sqrt{2gh}$ محاسبه شده که مقدار آن $2/71$ می باشد. قطر گوی در تمام نمونه آزمایش ها ۵ میلی متر بوده و مقادیر اعداد بی بعد استفاده شده برای ارتفاع سقوط ۵۰ سانتی متر نیز در جدول ۳-۲ آورده شده اند.

جدول ۳-۲: مقادیر اعداد بی بعد مربوط به ارتفاع سقوط ۵۰ سانتی متر در سیال غیرنیوتنی

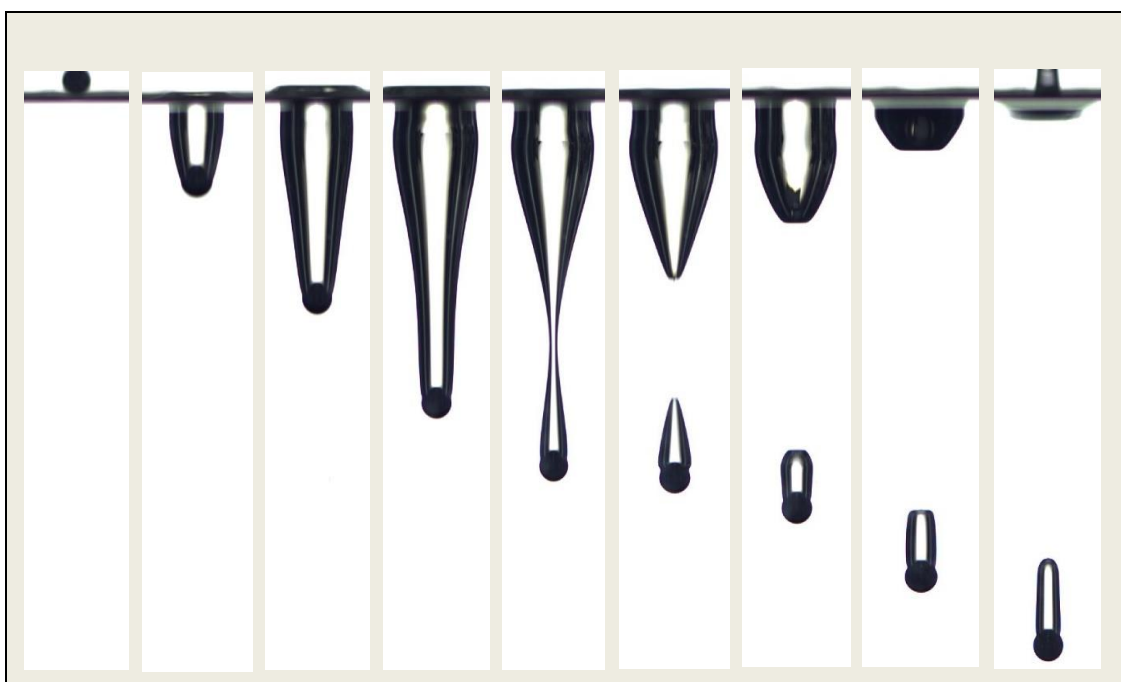
مقدار	عدد بی بعد
۱/۲۵۱	Re
۵/۵۲۲	Ca
۲/۵۵	We
۹/۱۳	Bo
۶۴۶/۶۰۶	Wi

شکل های ۳-۴ و ۳-۵ نشان دهنده قسمت های مختلف کاواک حاصل از برخورد گوی آب دوست از ارتفاع سقوط ۵۰ سانتی متری است. قابل توجه است که تصاویر ضبط شده از گوی آب گریز هم بسیار شبیه به تصاویر شکل ۳-۴ و ۳-۵ است و جهت اختصار تنها تصاویر مربوط به گوی آب دوست در ادامه گزارش شده است. شکل کاواک های تشکیل شده در سیال پلیمری پس از سقوط از ارتفاع ۵۰ سانتی متر نشان دهنده این است که سقوط از این ارتفاع در حوزه رژیم جدایش عمیق قرار دارد (شکل ۳-۵). البته همه رژیم های برخورد منحصر به یک سرعت برخورد نمی باشند و دارای محدوده ای از سرعت می باشند.

نکته قابل توجه لزجت کششی بالای سیال پلیمری است. همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود، از لحظه‌ی شروع شکل‌گیری جت عمودی هیچ قطره‌ای از سیال جدا نمی‌شود و تا آخرین لحظه که جت به سطح سیال برمی‌گردد، به وسیله یک رشته بسیار باریکی به سطح سیال متصل است.

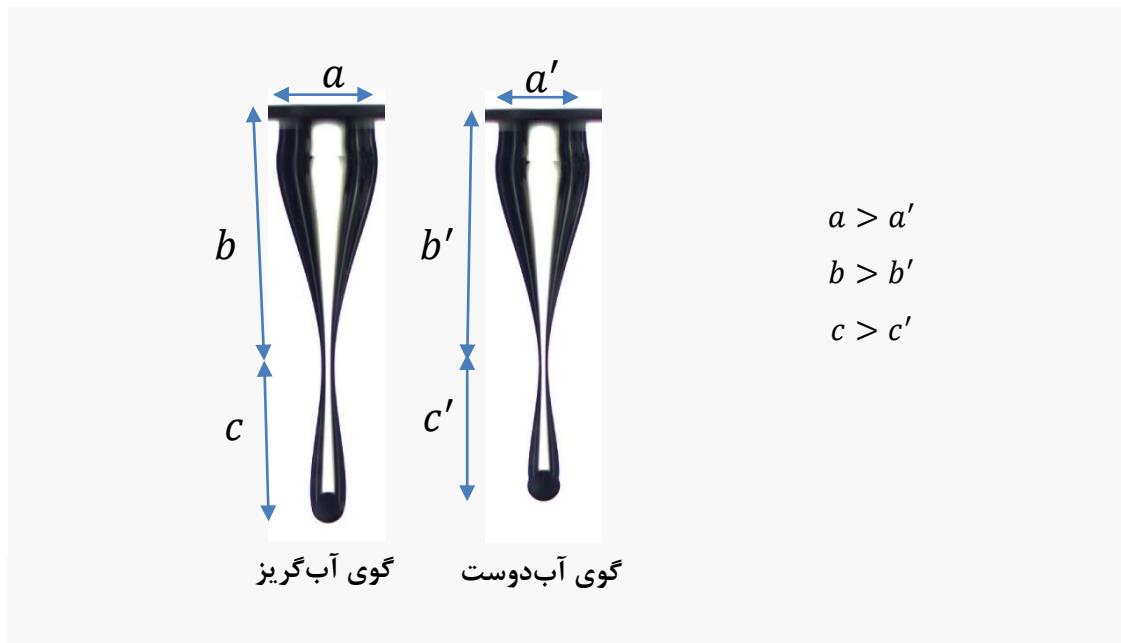


شکل ۳-۴: پاشش ناشی از سقوط گوی آب‌دوست از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در سیال غیرنیوتنی



شکل ۳-۵: کاواک تشکیل‌شده ناشی از سقوط گوی آب‌دوست از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در سیال غیرنیوتنی

همان‌طور که در شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود، تفاوت تصاویر ضبط‌شده در دو نوع گوی ذکرشده مربوط به حجم کاواک تشکیل‌شده است. با توجه به این شکل آشکار است که حجم حفره‌های ایجادشده در حالت آب‌گریز کمی نسبت به حالت آب‌دوست بیشتر است و دیگر تفاوتی در تصاویر دیده نمی‌شود.

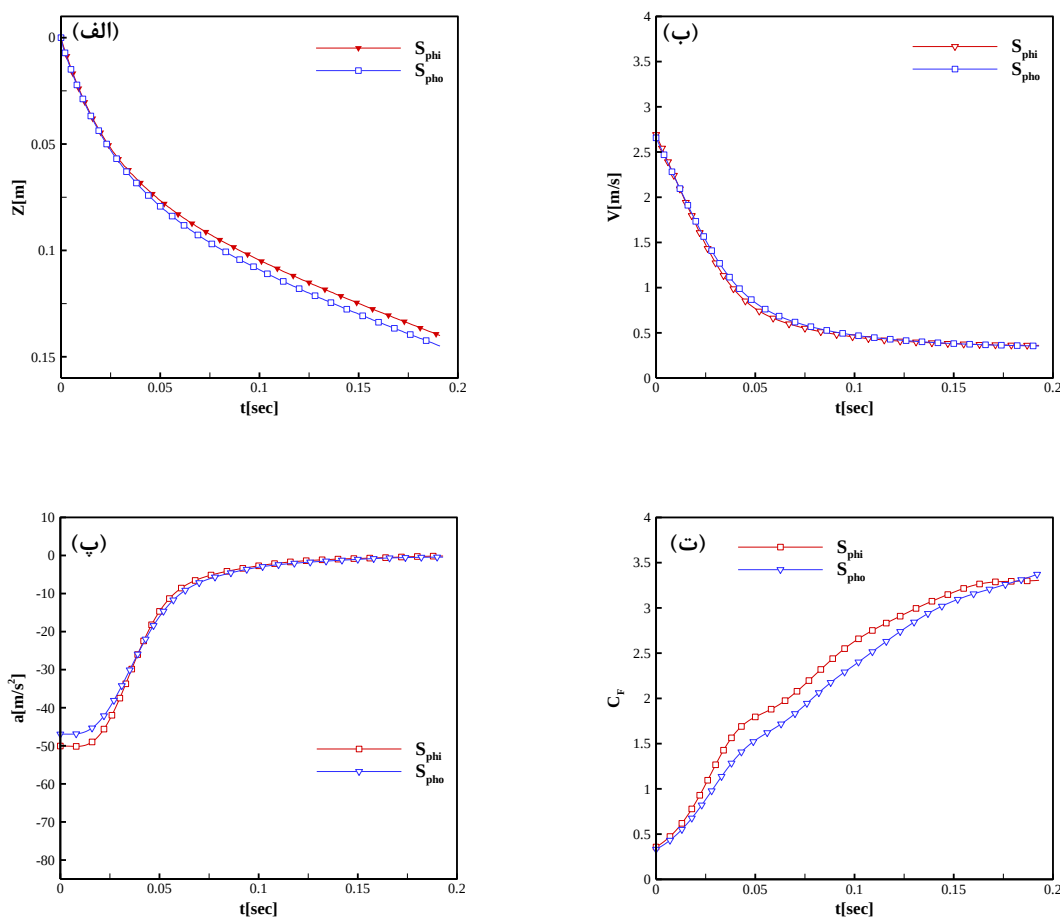


شکل ۳-۶: کاواک تشکیل‌شده توسط گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز در لحظه شکل‌گیری نقطه جدایش

نمودارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب گوی فولادی برحسب زمان و برای هر دو حالت آب‌دوست و آب‌گریز در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. با توجه به اینکه عمق سیال درون ظرف ۰/۱۵ متر است، طبق شکل ۳-۷ (الف) مشاهده می‌شود که گوی‌های فولادی تقریباً بعد از گذشت تقریباً ۰/۲ ثانیه از لحظه ورود به سطح آزاد سیال ($z=0$)، به کف ظرف ($z=0.15$) رسیده‌اند. با توجه به نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان مشاهده می‌شود که گوی با سطح آب‌گریز اندکی سریع‌تر از گوی با سطح آب‌دوست به کف ظرف رسیده است.

با توجه به نمودار شتاب (شکل ۳-۷، پ)، گوی آب‌گریز تقریباً تا قبل از زمان ۰/۰۵ ثانیه شتاب بیشتری را نسبت به گوی آب‌دوست تجربه می‌کند اما پس از این زمان تا انتها با اختلاف بسیار کم و

تقریباً موازی گوی آب‌دوست شتاب بیشتری دارد. در نمودار ضریب هیدرودینامیکی که از تغییرات مربوط به شتاب و سرعت در طول مسیر به‌دست آمده است مشاهده می‌شود که در اکثر اوقات گوی آب‌دوست پسای بیشتری را تجربه است (شکل ۳-۸، ت).



شکل ۳-۷: نتایج سقوط گوی از ارتفاع ۵۰ سانتی متری در سیال غیرنیوتنی: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های آب‌دوست S_{ϕ} و آب‌گریز S_{pho} . (ب) نمودار سرعت گوی‌های آب‌دوست S_{ϕ} و آب‌گریز S_{pho} . (پ) نمودار شتاب گوی‌های آب‌دوست S_{ϕ} و آب‌گریز S_{pho} . (ت) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌های آب‌دوست S_{ϕ} و آب‌گریز S_{pho}

همان‌طور که در نمودار سرعت (شکل ۳-۷، ب) مشاهده می‌شود، تفاوت تغییرات سرعت زیادی را در گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز نسبت به یکدیگر نمی‌بینیم و هردو با سرعت ورودی تقریباً ۲/۷۱ متر بر ثانیه و سرعت پایانی ۰/۵ متر بر ثانیه به مسیر خود تا انتهای مسیر ادامه داده‌اند.

۳-۳-۳ نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر

در این بخش سقوط گوی از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهایی همچون تغییرات جابه‌جایی، سرعت، شتاب و ضریب هیدرودینامیکی گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز نسبت به زمان توسط نمودارهای مربوطه مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت ورودی به سیال با استفاده فرمول $U \approx \sqrt{2gh}$ محاسبه شده که مقدار آن $3/68$ متر بر ثانیه می‌باشد. قطر گوی در تمام نمونه آزمایش‌ها ۵ میلی‌متر بوده و مقدار اعداد بی‌بعد استفاده شده برای این ارتفاع سقوط نیز در جدول ۳-۳ آورده شده است.

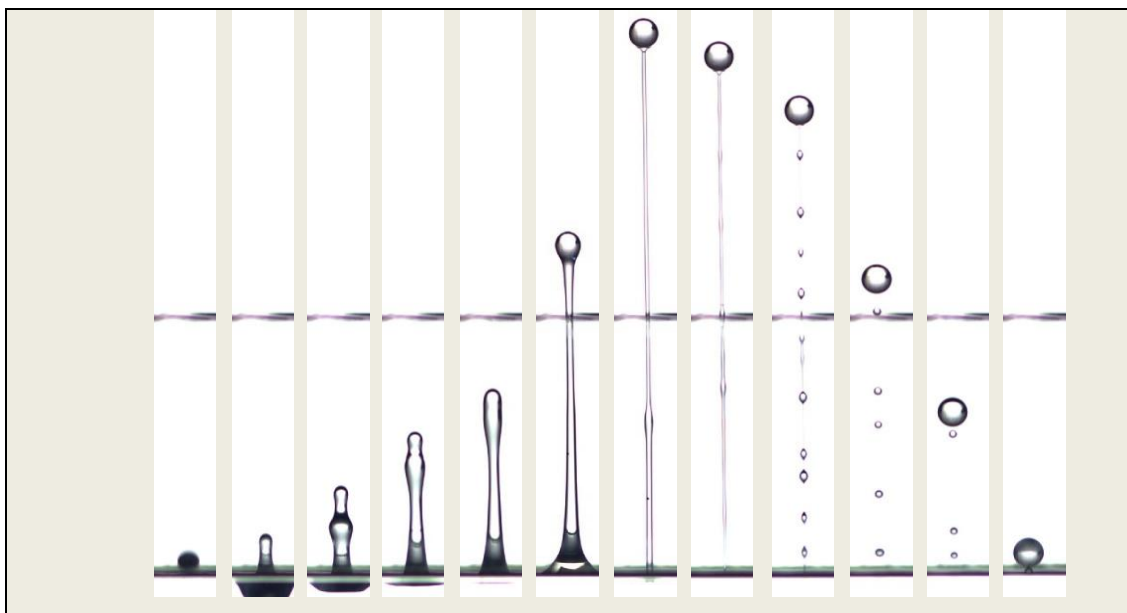
جدول ۳-۳: مقادیر اعداد بی‌بعد مربوط به ارتفاع سقوط ۱۰۰ سانتی‌متر در سیال غیرنیوتنی

مقدار	عدد بی‌بعد
۱/۷۴۲	Re
۷/۷۰۲	Ca
۳/۵۵۶	We
۹/۱۳	Bo
۸۷۸/۰۴۸	Wi

شکل‌های ۳-۸ و ۳-۹ تمام قسمت‌های کاواک تشکیل‌شده در سیال پلیمری پس از سقوط از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. این تصاویر گویای این است که سقوط از این ارتفاع همچون ارتفاع سقوط ۵۰ سانتی‌متر، در حوزه رژیم جدایش عمیق قرار دارد اما با این افزایش ارتفاع سقوط و کاهش قطر قسمت بالایی کاواک که اصطلاحاً به آن گردن کاواک^۱ می‌گویند، به مرز رژیم جدایش سطحی نزدیک شده است (شکل ۳-۹). در تصاویر شکل ۳-۸ همانند شکل ۳-۴ نکته قابل‌توجه

^۱ Cavity neck

می‌تواند لزجت کششی بالای سیال پلیمری باشد. همان‌طور که در شکل ۳-۸ مشاهده می‌شود، از لحظه‌ی شروع شکل‌گیری جت سیال پلیمری تا لحظاتی که جت به صورت عمودی و به سمت بالا حرکت می‌کند، به‌وسیله‌ی یک رشته‌ی بسیار نازک به سطح سیال متصل است، فقط در آخرین لحظاتی که جت به سطح سیال برمی‌گردد شاهد جدا شدن قطراتی که از جت سیال شکل گرفته‌اند می‌باشیم.

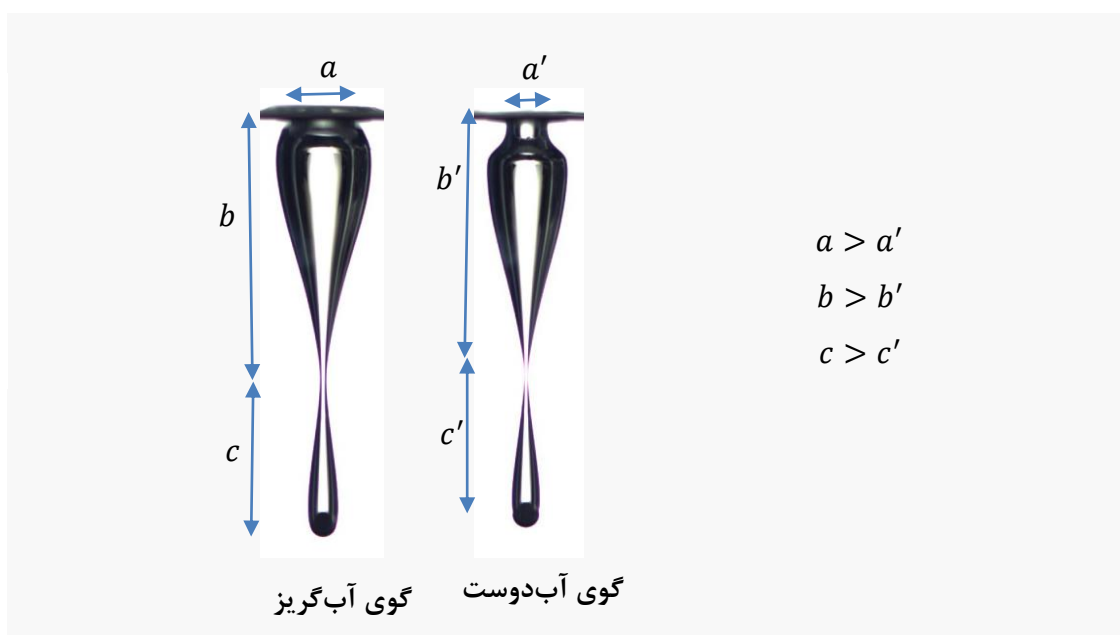


شکل ۳-۸: پاشش ناشی از سقوط گوی از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر در سیال غیرنیوتنی

تصاویر ضبط‌شده از قسمت‌های مختلف کاواک گوی با سطح آب‌گریز هم بسیار شبیه به تصاویر شکل ۳-۸ و ۳-۹ است با این تفاوت که نقطه جدایش کمی پایین‌تر (حدود ۳ میلی‌متر) نسبت به گوی آب‌دوست شکل‌گرفته است. همچنین حجم حفره‌های شکل‌گرفته (حفره اول از سطح سیال تا نقطه جدایش (شکل ۳-۱۰ طول b) و حفره دوم از نقطه جدایش تا سطح گوی (شکل ۳-۱۰ طول c)) کمی نسبت به حالت آب‌دوست بیشتر می‌باشد.



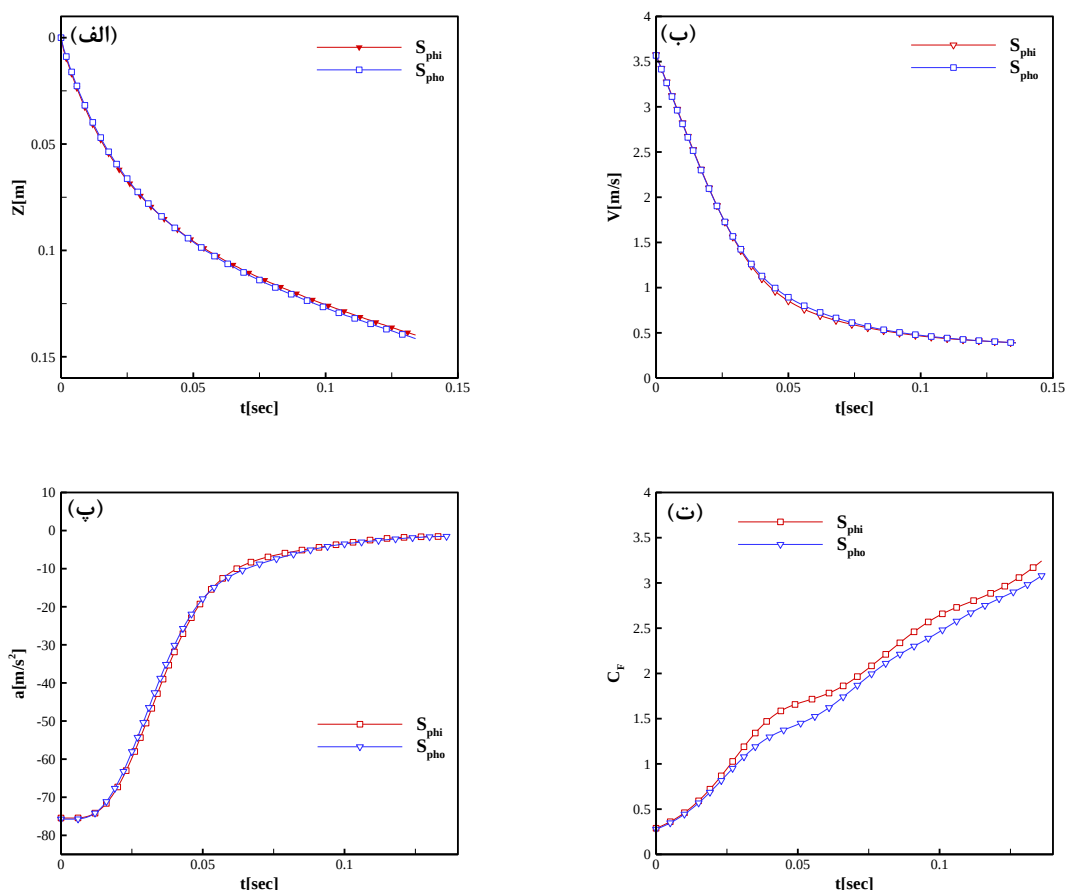
شکل ۳-۹: کاواک تشکیل شده ناشی از سقوط گوی از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متر در سیال غیرنیوتنی



شکل ۳-۱۰: کاواک تشکیل شده توسط گوی های آب دوست و آب گریز در لحظه شکل گیری نقطه جدایش

نمودارهای مربوط به تغییر کمیت هایی همچون مکان، سرعت، شتاب و ضریب هیدرودینامیکی گوی های فولادی نسبت به زمان، برای هر دو حالت آب دوست و آب گریز، در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است. با توجه به اینکه عمق سیال درون ظرف ۰/۱۵ متر است، طبق شکل ۳-۱۱ (الف) مشاهده

می‌شود که گوی‌ها تقریباً بعد از مدت ۰/۱۳ ثانیه از لحظه ورود به سطح آزاد سیال ($z=0$) به کف ظرف ($z=0.15$) رسیده‌اند و همانند ارتفاع سقوط‌های قبلی (۰/۵ و ۵۰ سانتی‌متر) که مورد بررسی قرار گرفت، گوی با سطح آب‌گریز اندکی سریع‌تر از گوی با سطح آب‌دوست به کف ظرف رسیده است.



شکل ۳-۱۱: نتایج سقوط گوی از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری در سیال غیرنیوتنی: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (ب) نمودار سرعت گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (پ) نمودار شتاب گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$). (ت) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌های آب‌دوست (S_{ϕ}) و آب‌گریز ($S_{\phi o}$)

در نمودار مربوط به شتاب (شکل ۳-۱۱، پ) تقریباً تغییرات مربوط به شتاب برای گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز به هم نزدیک می‌باشند. برای رهاسازی گوی، هرچه از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر به سمت ۱۰۰ سانتی‌متر حرکت می‌کنیم، روند نزدیک شدن نتایج تغییرات جابه‌جایی، سرعت و شتاب گوی‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شود، به‌نوعی می‌توان نتیجه گرفت با این افزایش ارتفاع اثر آب‌دوستی

و آب‌گریزی سطح گوی کمتر می‌شود. همان‌طور که در نمودار سرعت شکل ۳-۱۱ (ب) نیز مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت زیادی را در گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز نسبت به یکدیگر مشاهده نمی‌شود و هردو با سرعت ورودی تقریباً $3/7$ متربرثانیه و با سرعت پایای $0/5$ متربرثانیه به مسیر خود تا انتهای مسیر ادامه داده‌اند. همچنین تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیکی (شکل ۳-۱۱، ت) را نسبت تغییرات ضریب نیروی هیدرودینامیک مربوط به ارتفاع‌های قبلی ($0/5$ و 50 سانتی‌متر) مقایسه کنیم، شاهد کمتر شدن اختلاف مقدار پسا بین گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز می‌شویم، اما در مجموع گوی آب‌دوست پسای بیشتری را تجربه کرده است.

۳-۴ سیال نیوتنی

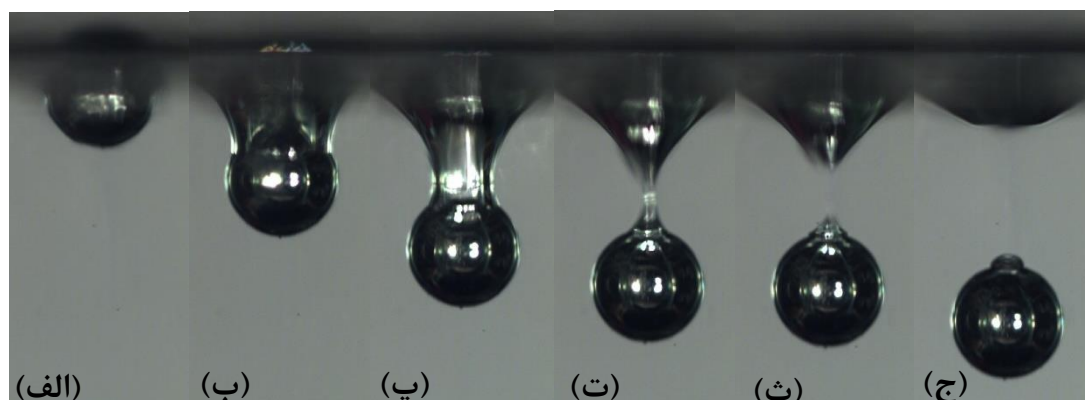
۳-۴-۱ نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع $0/5$ سانتی‌متر

در این قسمت همانند آزمایش‌هایی که در سیال غیرنیوتنی گرفته شد، جهت محاسبه سرعت برخورد گوی به سطح سیال نیوتنی از رابطه $U \approx \sqrt{2gh}$ استفاده شده که مقدار سرعت ورودی تقریباً $0/33$ متربرثانیه به‌دست آمده است. اعداد بی‌بعد موردنظر نیز با ارتفاع سقوط $0/5$ سانتی‌متر محاسبه شده و در جدول ۳-۴ نشان داده شده است.

جدول ۳-۴: مقادیر اعداد بی‌بعد مربوط به ارتفاع سقوط $0/5$ سانتی‌متر در سیال نیوتنی

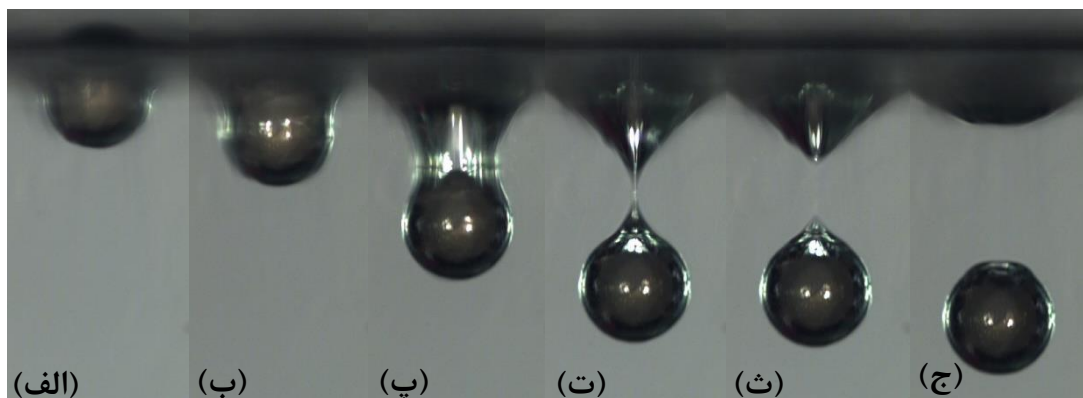
مقدار	عدد بی‌بعد
$0/272$	Re
$0/373$	Ca
$0/305$	We
$9/02$	Bo

با توجه به شکل ۳-۱۲ از زمانی که نصف گوی آب‌دوست در سیال فرو رفته است، یک کاواک کوچک با سطحی کاملاً پایدار شروع به ظاهر شدن می‌کند (شکل ۳-۱۳، ت). به خاطر این که سقوط از ارتفاع ۵/۰ سانتی‌متری نیروی بسیار کمی را به سطح سیال وارد می‌کند. پس از تشکیل کامل کاواک زمان جدایش کاواک از سطح گوی می‌باشد (شکل ۳-۱۲، ت)، سپس جدایش اتفاق افتاده و تنها یک حباب کوچک گنبدی شکل متقارن روی سطح گوی باقی می‌ماند و تا انتهای مسیر همراه گوی سقوط می‌کند (شکل ۳-۱۳، ج). در ضمن به علت سرعت ناچیز برخورد گوی در مقابل لزجت نسبتاً بالای سیال، در قسمت سطح بالای سیال هیچ‌گونه پاشش و یا جت سیال عمودی به سمت بالا مشاهده نمی‌شود.



شکل ۳-۱۲: سقوط گوی آب‌دوست از ارتفاع ۵/۰ سانتی‌متری در سیال نیوتنی و ایجاد رژیم شبه استاتیک

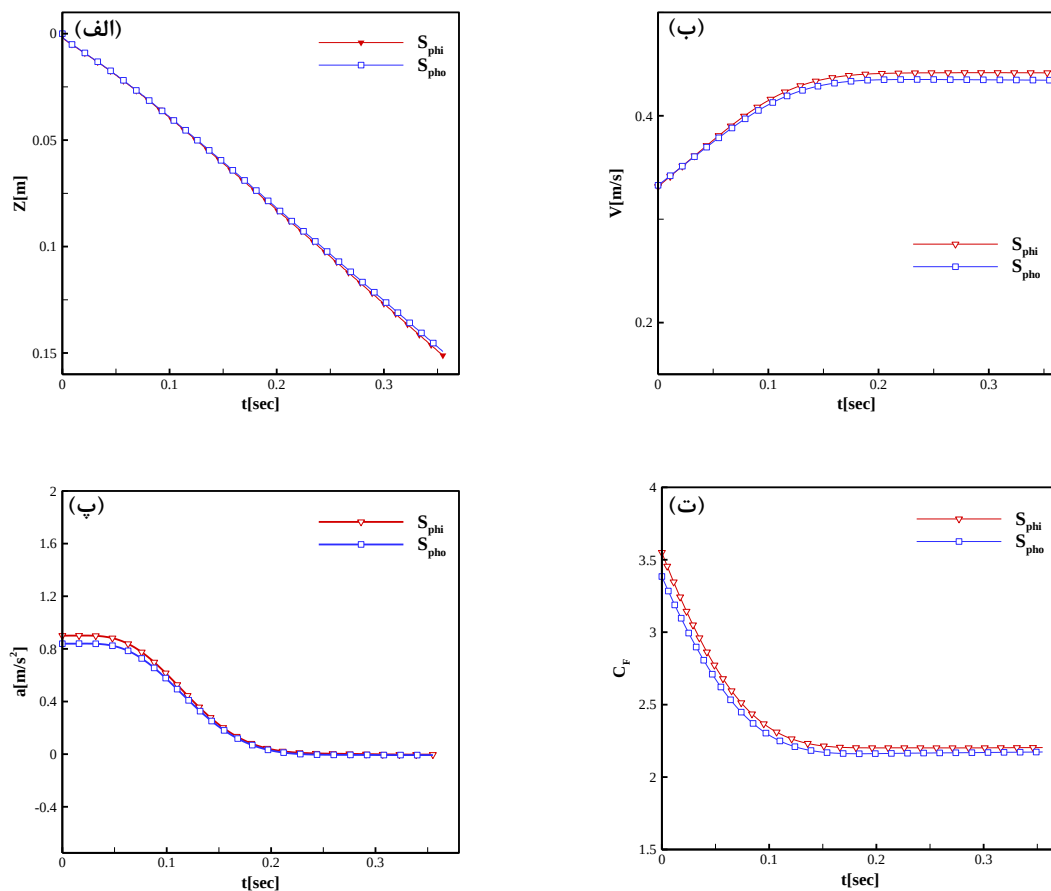
در گوی آب‌گریز فرآیند تشکیل کاواک مانند گوی آب‌دوست است و تفاوت آن در تشکیل حباب در اطراف گوی بعد از نقطه جدایش است. در گوی آب‌دوست شاهد یک حباب گنبدی شکل و متمرکز در قسمت بالای گوی بعد از جدایش هستیم. اما در گوی‌های آب‌گریز، حباب هوا به صورت یک لایه نازک و متقارن گوی را احاطه می‌نماید که حجم هوا در قسمت بالایی گوی کمی نسبت به اطراف گوی بیشتر است (شکل ۳-۱۳، ج).



شکل ۳-۱۳: سقوط گوی آب‌گریز از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متری در سیال نیوتنی و ایجاد رژیم شبه استاتیک

نمودارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب گوی فولادی برحسب زمان و برای هر دو حالت آب‌دوست و آب‌گریز در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است. طبق شکل ۳-۱۴ (الف) گوی‌های فولادی تقریباً بعد از مدت ۰/۳۵ ثانیه از لحظه ورود به سطح آزاد سیال ($z=0$) به کف ظرف ($z=0.15$) رسیده‌اند. با توجه به نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان مشاهده می‌شود که گوی با سطح آب‌دوست اندکی سریع‌تر از گوی با سطح آب‌گریز به کف ظرف رسیده است.

سقوط از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر و در رژیم شبه استاتیک رخ داده است. همان‌طور که در نتایج مربوط به سیال پلیمری هم ذکر شد، در این رژیم به علت سرعت و شتاب کم گوی قضاوت کردن درباره رفتار گوی بسیار سخت و همراه با خطا است و به همین علت در این رژیم معمولاً رفتار پرتابه‌ها با توجه به نمودارهای سرعت و شتاب به‌دست‌آمده از تصاویر حرکت در آب تحلیل می‌شود.



شکل ۳-۱۴: نتایج سقوط گوی از ارتفاع ۰/۵ سانتی متری در سیال نیوتنی: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). (ب) نمودار سرعت گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). (پ) نمودار شتاب گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). (ت) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho})

نمودار سرعت نیز در شکل ۳-۱۴ (ب) ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که سرعت گوی تا قبل از زمان ۰/۱ ثانیه در دو حالت مذکور تقریباً یکسان بوده اما بعد از این زمان و تا لحظه ۰/۲ ثانیه شاهد افزایش اختلاف سرعت گوی‌ها هستیم که البته گوی آب‌دوست سرعت بیشتری به خود گرفته است و از لحظه ۰/۲ ثانیه تا رسیدن گوی‌ها به کف ظرف هردو سرعت پایایی را تجربه می‌کنند.

در نمودار شتاب (شکل ۳-۱۴، پ) نیز همان‌طور که مشاهده می‌شود در لحظه‌ی ورود به سیال،

گوی آب‌دوست شتاب بیشتری را نسبت به گوی آب‌گریز تجربه کرده است. اما تا آخر مسیر هرچه زمان می‌گذرد شتاب هردو گوی روند کاهشی به خود گرفته و به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند تا به صفر برسند.

با توجه به شکل ۳-۱۴ (ت) که مربوط به ضریب هیدرودینامیکی گوی‌ها می‌باشد، گوی آب‌دوست در ابتدا که وارد سیال پلیمری شده ضریب هیدرودینامیکی یا به‌نوعی پسای بیشتری را نسبت به گوی آب‌گریز احساس کرده است. بعد از گذشت مدت‌زمان ۰/۱ ثانیه هردو گوی کاهش پسا را تجربه کرده و پس از آن تا انتهای مسیر هردو گوی پسای ثابتی را تجربه می‌کنند که به‌نوعی می‌توان نتیجه گرفت هردو به تعادل هیدرودینامیکی می‌رسند.

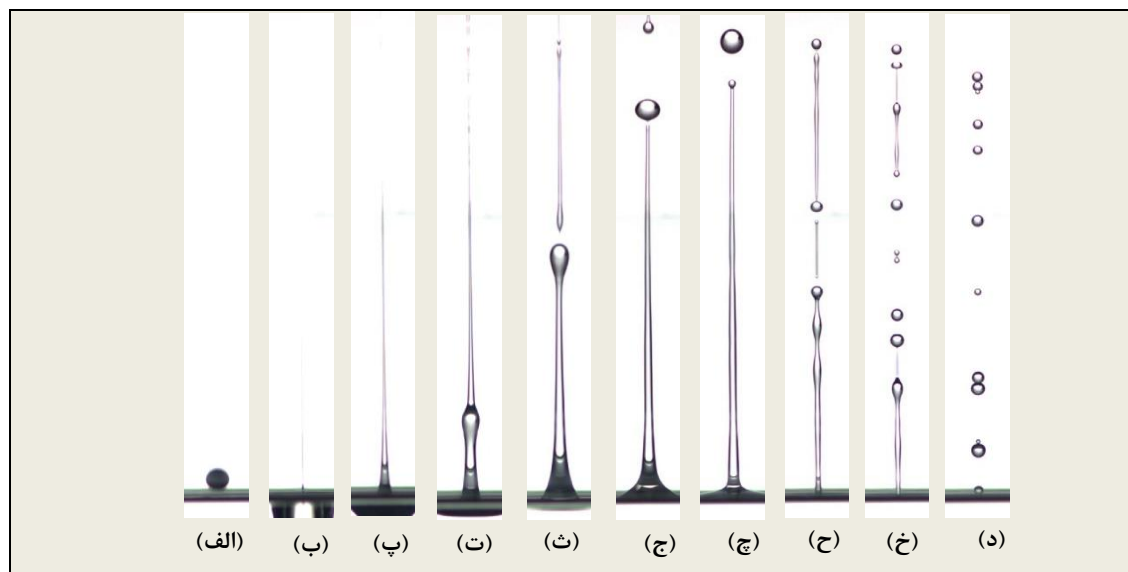
۳-۴-۲ نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر

در این بخش به بررسی تغییرات جابه‌جایی، سرعت، شتاب و ضریب هیدرودینامیکی گوی‌هایی با سطوح آب‌دوست و آب‌گریز از ارتفاع سقوط ۵۰ سانتی‌متر پرداخته شده است. همانند دیگر ارتفاع‌های سقوط، سرعت ورودی به سیال با استفاده از فرمول $U \approx \sqrt{2gh}$ محاسبه شده که مقدار آن ۲/۷۱ می‌باشد. قطر گوی در تمام نمونه آزمایش‌ها ۵ میلی‌متر بوده و مقدار اعداد بی‌بعد استفاده شده برای ارتفاع سقوط ۵۰ سانتی‌متر در جدول ۳-۵ آورده شده است.

جدول ۳-۵: مقادیر اعداد بی‌بعد مربوط به ارتفاع سقوط ۵۰ سانتی‌متر در سیال نیوتنی

مقدار	عدد بی‌بعد
۲/۲۱۸	Re
۳/۰۴۳	Ca
۲/۵۵	We
۹/۰۲	Bo

شکل‌های ۱۵-۳ و ۱۶-۳ نشان‌دهنده تمام قسمت‌های کاواک شکل‌گرفته از برخورد یک گوی آب‌دوست از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر است. همان‌طور که در تصاویر مشهود است، سقوط از این ارتفاع در حوزه رژیم جدایش عمیق قرار دارد. نکته قابل‌توجه لزجت کششی پایین سیال نیوتنی در مقابل سیال پلیمری که قبلاً مورد بررسی قرار دادیم، می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۵-۳ مشاهده می‌شود، از لحظه‌ی شروع شکل‌گیری جت عمودی در ابتدا یک جت اولیه بسیار باریک شکل‌گرفته (شکل ۱۵-۳، پ) و در همان لحظات ابتدایی از جت ثانویه جدا می‌شود (شکل ۱۵-۳، ث) که این در سیال پلیمری مشاهده نمی‌شود. بعد گذشت زمانی اندک جت سیال به چندین قطره جدا از هم تبدیل می‌شود و پس از طی کردن ارتفاعی دوباره بر روی سطح سیال سقوط می‌کند (شکل ۱۵-۳، د). ارتفاعی که این جت سیال طی می‌کند (نزدیک به ۶۰ سانتی‌متر) بسیار بیشتر از جت سیال شکل‌گرفته در سیال پلیمری (نزدیک به ۵ سانتی‌متر) برای همین ارتفاع سقوط گوی است.

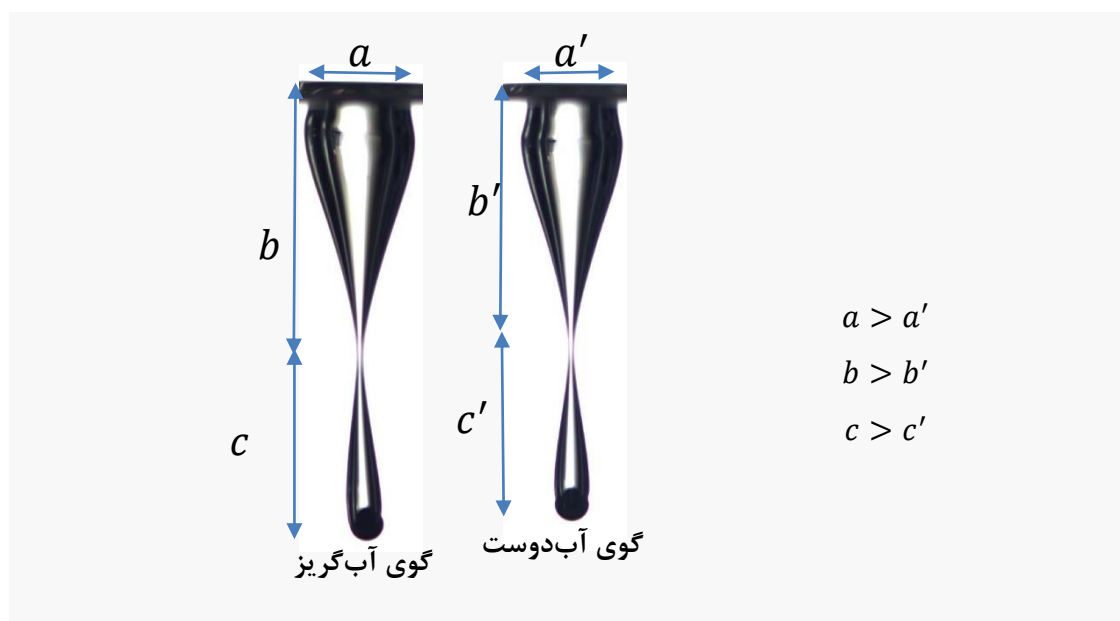


شکل ۱۵-۳: پاشش ناشی از سقوط گوی آب‌دوست از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در سیال نیوتنی



شکل ۳-۱۶: کاواک تشکیل شده ناشی از سقوط گوی آب دوست از ارتفاع ۵۰ سانتی متر در سیال نیوتنی

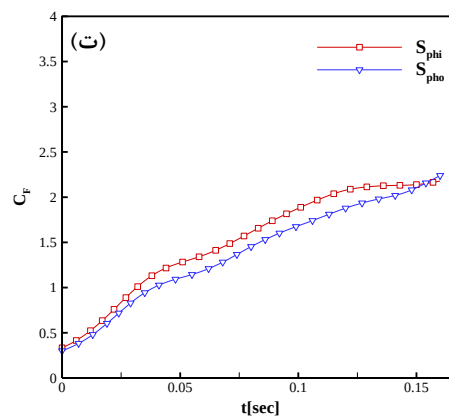
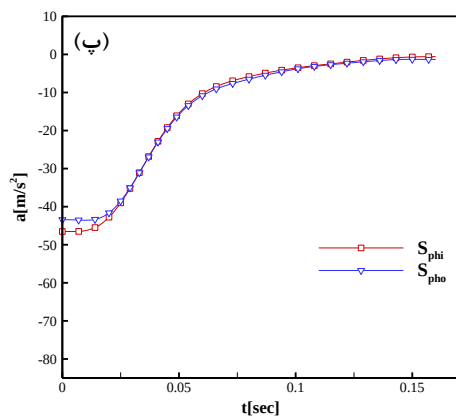
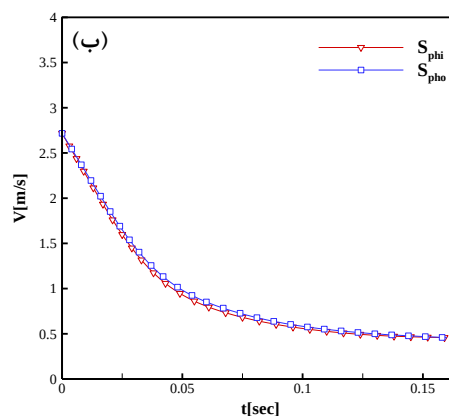
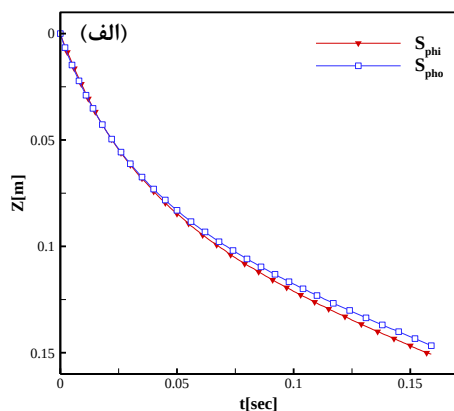
تصاویر ضبط شده از کاواک شکل گرفته ناشی از سقوط گوی آب گریز، مشابه شکل های ۳-۱۵ و ۳-۱۶ می باشند. فقط در حجم حفره های شکل گرفته در حین سقوط با گوی آب دوست کمی اختلاف دارند که برای واضح تر شدن موضوع در شکل ۳-۱۷ ابعاد این حفره در لحظه جدایش با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۳-۱۷: کاواک تشکیل شده توسط گوی های آب دوست و آب گریز در لحظه شکل گیری نقطه جدایش

نمودارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب گوی فولادی برحسب زمان و برای هر دو حالت آب‌دوست و آب‌گریز در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است. عمق سیال درون ظرف ۰/۱۵ متر است و طبق شکل ۳-۲۰، الف مشاهده می‌شود که گوی‌های فولادی تقریباً بعد از مدت ۰/۱۶ ثانیه از لحظه ورود به سطح آزاد سیال ($z=0$) به کف ظرف ($z=0.15$) رسیده‌اند. با توجه به نمودار تغییرات مکان نسبت به زمان مشاهده می‌شود که گوی با سطح آب‌دوست اندکی سریع‌تر از گوی با سطح آب‌گریز به کف ظرف رسیده است. با توجه به نمودار شتاب (شکل ۳-۱۸، پ) گوی آب‌دوست در لحظات اولیه اندازه شتاب و سرعت کمتری (شکل ۳-۱۸، ب) را نسبت به گوی آب‌گریز تجربه می‌کند. البته این اختلاف به سمت مقدار کمتری میل می‌کند که می‌توان با مراجعه به نمودار ضریب هیدرودینامیکی (شکل ۳-۲۰، ت) این موضوع را مشاهده کرد.

همان‌طور که در نمودار سرعت شکل ۳-۱۸ (ب) مشاهده می‌شود، اختلاف سرعت‌های آب‌دوست و آب‌گریز بسیار اندک می‌باشند که هر دو با سرعت ورودی تقریباً ۲/۷۱ متر بر ثانیه و سرعت پایای ۰/۵ متر بر ثانیه تا انتهای مسیر ادامه داده‌اند. البته در لحظاتی از مسیر گوی با سطح آب‌گریز سرعت بیشتری را در مسیر تجربه می‌کند.



شکل ۳-۱۸: نتایج سقوط گوی از ارتفاع ۵۰ سانتی متری در سیال نیوتنی: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). (ب) نمودار سرعت گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). (پ) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). (ت) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}).

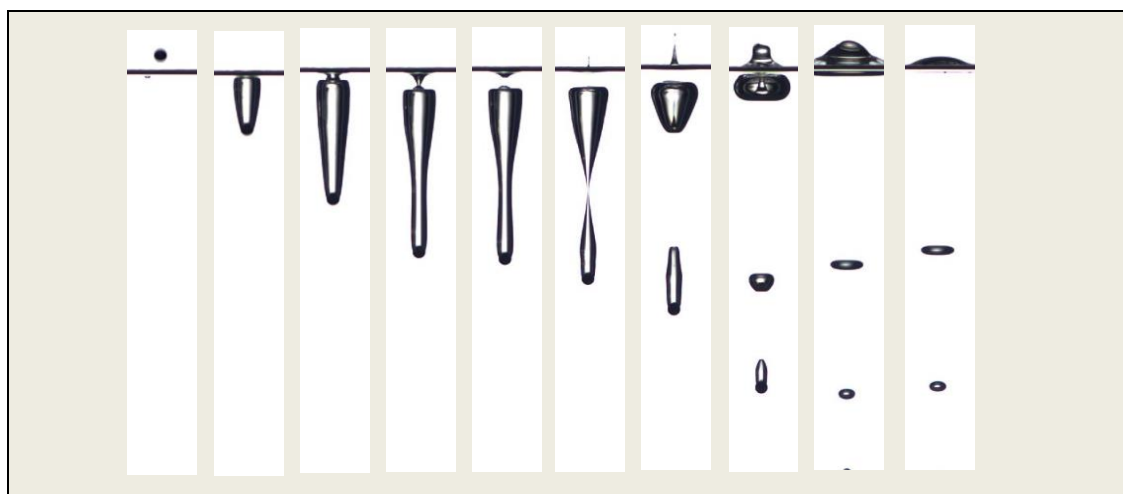
۳-۴-۳ نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر

در این بخش سقوط گوی از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت ورودی به سیال با استفاده فرمول $U \approx \sqrt{2gh}$ محاسبه شده که مقدار آن $3/68$ متر بر ثانیه می‌باشد. مقدار اعداد بی‌بعد استفاده‌شده برای این ارتفاع سقوط نیز در جدول ۳-۶ آورده شده است.

جدول ۳-۶: مقادیر اعداد بی بعد مربوط به ارتفاع سقوط ۱۰۰ سانتی متر در سیال نیوتنی

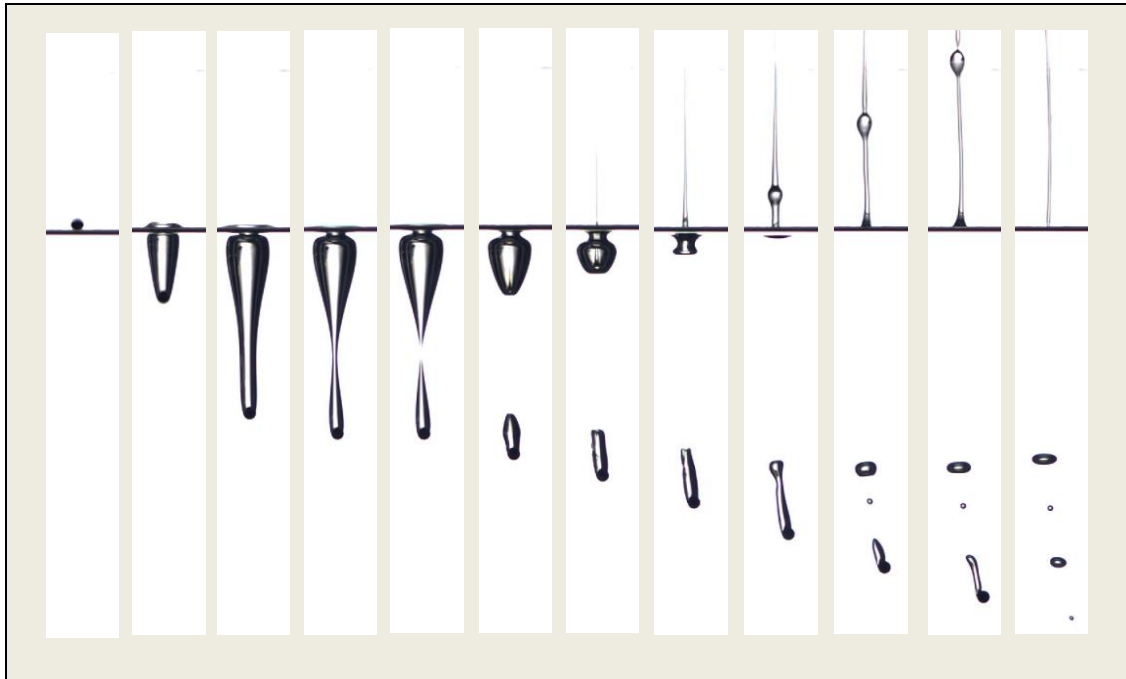
مقدار	عدد بی بعد
۳/۰۹۴	Re
۴/۲۴	Ca
۳/۴۷	We
۹/۰۲	Bo

شکل ۳-۱۹ کاواک تشکیل شده از سقوط گوی آب دوست در سیال نیوتنی، پس از سقوط از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متر را نشان می دهد. همان طور که در این تصاویر مشخص است سقوط از این ارتفاع در حوزه رژیم جدایش سطحی قرار دارد.



شکل ۳-۱۹: کاواک تشکیل شده ناشی از سقوط گوی آب دوست از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متر در سیال نیوتنی

اما شکل کاواک تشکیل شده در شکل ۳-۲۰ از سقوط گوی آب گریز از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری در سیال نیوتنی نشان دهنده رژیم جدایش عمیق می باشد. اما همان طور که از این شکل استنباط می شود که این ارتفاع باعث به حداقل رسیدن قطر قسمت بالای کاواک (گردن کاواک) شده و بسیار به رژیم جدایش سطحی نزدیک شده یا به نوعی روی مرز دو رژیم جدایش قرار گرفته است.

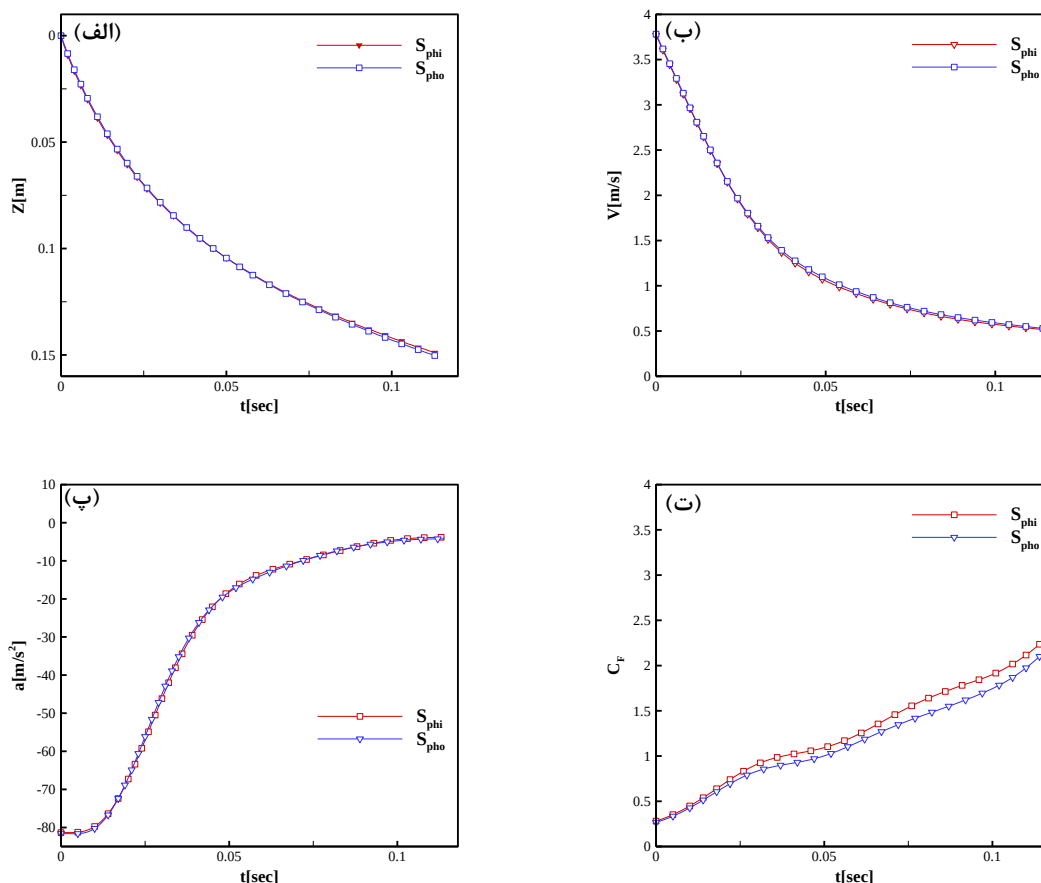


شکل ۳-۲۰: کاواک تشکیل شده ناشی از سقوط گوی آب‌گریز از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر در سیال نیوتنی

نمودارهای مربوط به تغییر کمیت‌هایی همچون مکان، سرعت، شتاب و ضریب هیدرودینامیکی گوی‌های فولادی نسبت به زمان، برای هر دو حالت آب‌دوست و آب‌گریز، در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است. با توجه به اینکه عمق سیال درون ظرف ۰/۱۵ متر است، طبق شکل ۳-۲۱(الف) مشاهده می‌شود که گوی‌ها تقریباً بعد از مدت ۰/۱۲۴ ثانیه از لحظه ورود به سطح آزاد سیال ($z=0$) به کف ظرف ($z=0.15$) رسیده‌اند.

نتایج حاصل از تمام نمودارها (شکل ۳-۲۱) حاکی از این است که افزایش ارتفاع سقوط باعث کاهش اثر آب‌دوستی و آب‌گریزی سطح گوی‌ها شده است. همان‌طور که در نمودارهای مربوط به شتاب و سرعت و جابه‌جایی گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز دیده می‌شود، تقریباً نمودارها روی هم قرار گرفته‌اند و اختلاف چندانی وجود ندارد. بیشترین اختلاف در نمودار ضریب هیدرودینامیکی مشاهده می‌شود که حاکی از آن است که مانند ارتفاع سقوط‌های قبلی (۰/۵ و ۵۰ سانتی‌متر) گوی آب‌گریز پسای بیشتری را تجربه کرده است. اما باز هم این اختلاف نسبت به نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی قبلی (مربوط به ارتفاع ۰/۵ و ۵۰ سانتی‌متر) کمتر شده است که حاکی از نزدیک شدن

نتایج به یکدیگر است. نمودارهای سرعت هردو تقریباً منطبق برهم و هردو دارای سرعت ورودی ۳/۷۱ متر بر ثانیه و سرعت انتهایی ۰/۵ متر بر ثانیه به مقصد رسیده‌اند. شتاب هردو گوی نیز تقریباً منطبق به یکدیگر و هردو در ابتدای مسیر شتاب کاهشی نزدیک به ۸۰- متر بر مجذور ثانیه و سپس تا انتهای زمان حرکت به سمت شتاب صفر میل کرده‌اند.



شکل ۳-۲۱: نتایج سقوط گوی از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری در سیال نیوتنی: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). (ب) نمودار سرعت گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). (پ) نمودار شتاب گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}). (ت) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌های آب‌دوست (S_{phi}) و آب‌گریز (S_{pho}).

۳-۵ مقایسه نتایج در محدوده اعداد بی بعد یکسان

به منظور مقایسه اثر دو سیال نیوتنی و غیرنیوتنی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر از عدد بی بعد یکسان استفاده شده است. برای این منظور از اعداد بی بعد رینولدز و موئینگی استفاده شده است. سیال نیوتنی موردنظر فقط دارای خاصیت ویسکوز بوده اما سیال غیرنیوتنی حاضر که یک سیال پلیمری می‌باشد، علاوه بر خاصیت ویسکوز کمی هم خاصیت الاستیک دارا می‌باشد. به همین منظور بررسی خاصیت الاستیک در نتایج حاصل می‌تواند در استفاده و کاربرد از این خاصیت در اموری که مربوط به حرکت در یک سیال باشد، مانند زیردریایی‌ها یا موشک‌هایی که در داخل آب شلیک می‌شوند، کاربرد بسزایی داشته باشد.

۳-۵-۱ نتایج مربوط به عدد رینولدز

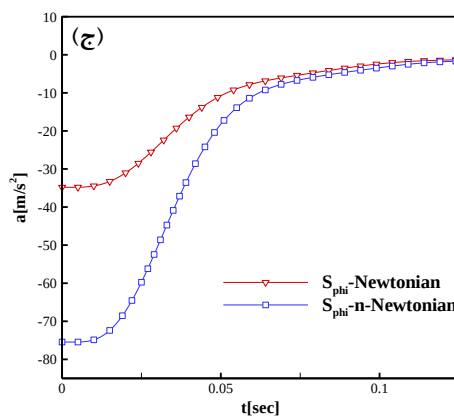
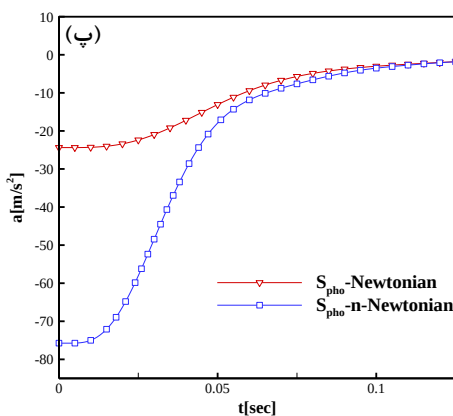
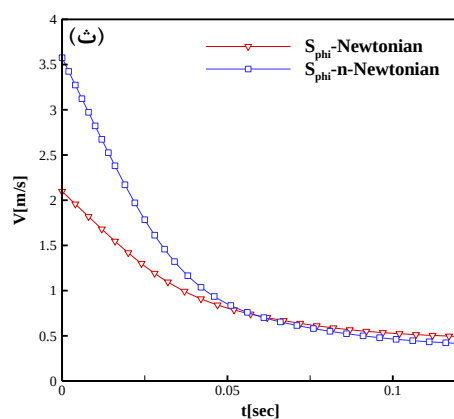
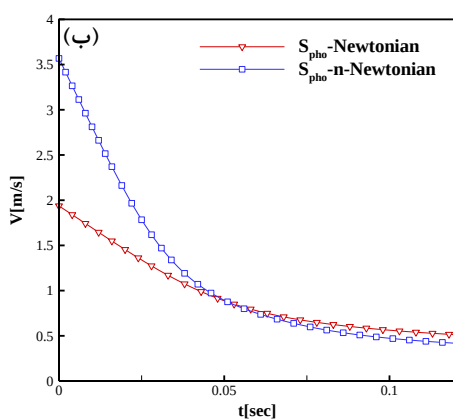
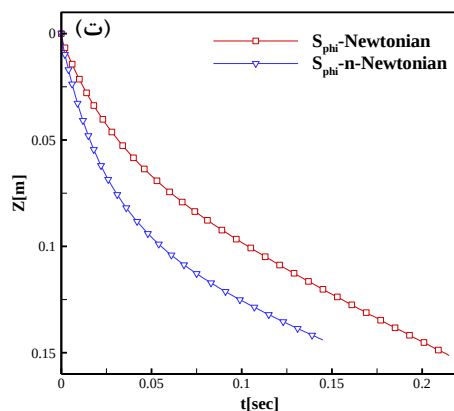
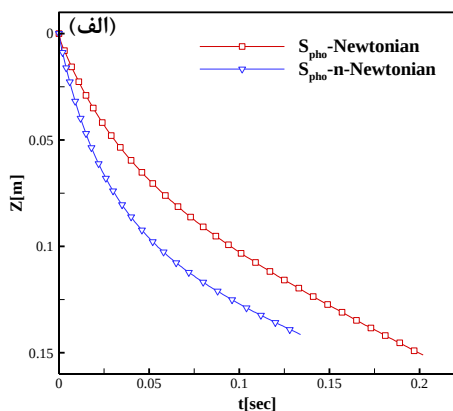
عدد رینولدز، نسبت نیروهای اینرسی به لزجت را بیان می‌کند. به منظور استفاده از این عدد مقدار رینولدز $1/7$ را در هردو سیال نیوتنی و غیرنیوتنی به دست آورده و با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم. به منظور رسیدن به نسبت مساوی نیروهای اینرسی به لزجت برای دو سیال، از ارتفاع سقوط ۲۵ سانتی‌متر برای سیال نیوتنی و ۱۰۰ سانتی‌متر برای سیال غیرنیوتنی استفاده شده تا برای هر دو سیال به عدد رینولدز مساوی $1/7$ برسیم. در ادامه به بررسی نتایج در این عدد رینولدز می‌پردازیم:

با توجه به شکل ۳-۲۲(الف) و ۳-۲۲(ت) هردو گوی با سطوح آب‌گریز و آب‌دوست در سیال غیرنیوتنی زودتر از سیال نیوتنی به انتهای مسیر رسیده‌اند. البته کمی اختلاف در آب‌دوست و آب‌گریز بودن سطح در نمودارها مشاهده می‌شود. به طور مثال اگر ارتفاع $(0/14)$ را مورد بررسی قرار دهیم، گوی آب‌دوست این جابه‌جایی را در سیال نیوتنی در زمان $0/19$ ثانیه و در سیال غیرنیوتنی در $0/135$ ثانیه طی کرده است که اختلاف زمانی $0/055$ ثانیه وجود دارد. اما گوی آب‌گریز این

جابه‌جایی را در سیال نیوتنی در زمان ۰/۱۷۷ ثانیه و در سیال غیرنیوتنی در ۰/۱۳۱ ثانیه طی کرده است که ۰/۰۴۶ ثانیه اختلاف زمانی وجود دارد. حال متوجه می‌شویم که در سقوط گوی با سطح آب‌گریز این اختلاف ۰,۰۰۴ ثانیه کاهش یافته است.

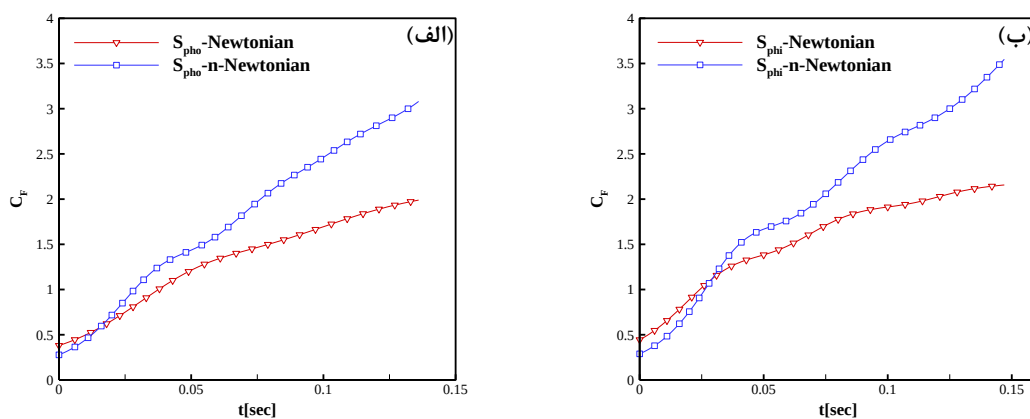
همان‌طور که در نمودار مربوط به سرعت در شکل ۳-۲۴ (ب) مشاهده می‌شود، گوی با سطح آب‌گریز سرعت اولیه بیشتری را در ابتدای مسیر و همچنین کاهش سرعت بیشتری در ادامه مسیر در سیال غیرنیوتنی نسبت به نیوتنی دارد و در یک نقطه از نمودار یکدیگر را قطع می‌کنند که این اتفاق برای گوی آب‌دوست هم افتاده است (۳-۲۴، ث). البته لحظه‌ای که دو خط یکدیگر را قطع کرده‌اند یا به‌نوعی به سرعت برابر رسیده‌اند در گوی‌های آب‌گریز کمی زودتر اتفاق افتاده است. همچنین گوی با سطح آب‌گریز در مجموع سرعت حدی بیشتری را تا انتهای مسیر تجربه می‌کند.

در نمودار مربوط به تغییرات شتاب (شکل ۳-۲۴، پ و شکل ۳-۲۴، ج) مهم‌ترین نکته مربوط به شتاب ضربه‌ای کاهشی است که گوی‌ها در لحظه ورود به سیال‌ها تجربه می‌کنند. هردو نوع گوی در سیال غیرنیوتنی شتاب ضربه‌ای کاهشی ۸۰- متر بر مجذور ثانیه را تجربه کرده‌اند اما در سیال نیوتنی تقریباً گوی با سطح آب‌دوست ۳۵- و آب‌گریز ۲۵- متر بر مجذور ثانیه را گذرانده است. می‌توان نتیجه گرفته که پیوندهای پلیمری شکل‌گرفته در سیال غیرنیوتنی که به آن خاصیت الاستیک داده، از تأثیر آب‌گریزی گوی بر روی شتاب جلوگیری کرده است. اما در سیال نیوتنی که شاهد تقریباً ۱۰ متر بر مجذور ثانیه اختلاف هستیم نشان می‌دهد که سطح آب‌گریز کاهش بسزایی در کاهش شتاب اولیه ورود گوی به سیال داشته است.



شکل ۳-۲۲: نتایج سقوط گوی در عدد رینولدز $1/7$: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی آب‌گریز (S_{pho}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ب) نمودار سرعت گوی آب‌گریز (S_{pho}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (پ) نمودار شتاب گوی آب‌گریز (S_{pho}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ت) نمودار مکان لحظه‌ای گوی آب‌دوست (S_{phi}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ث) نمودار سرعت گوی آب‌دوست (S_{phi}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ج) نمودار شتاب گوی آب‌دوست (S_{phi}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی.

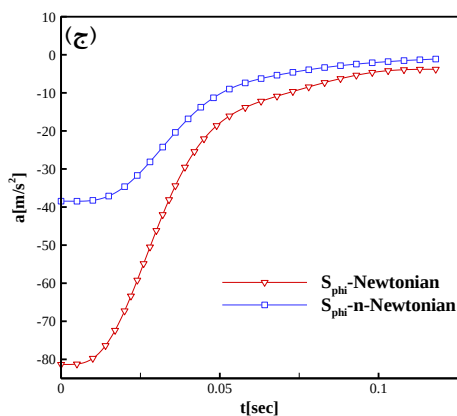
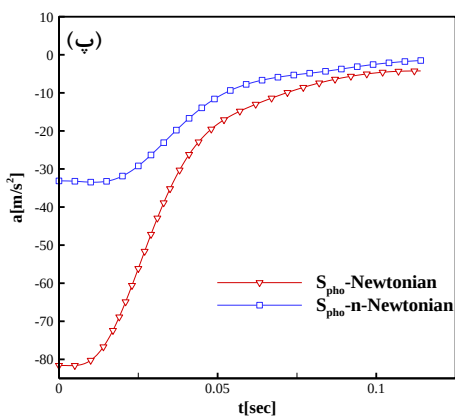
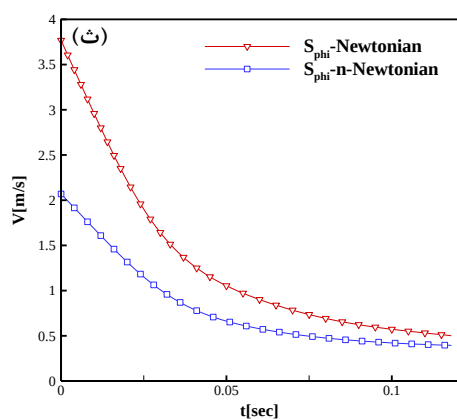
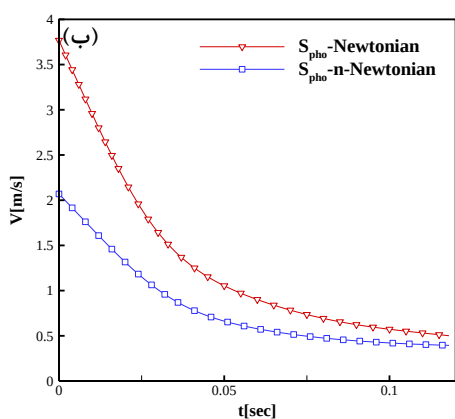
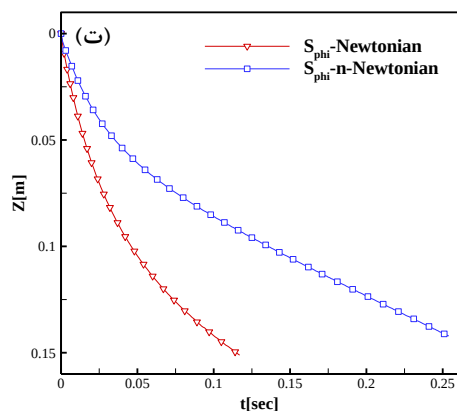
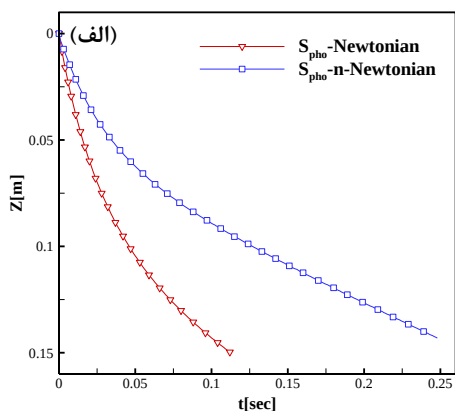
همان‌طور که در شکل ۳-۲۳ مشاهده می‌شود هردو نوع گوی‌ها آب‌دوست و آب‌گریز در هر دو نوع سیال روند افزایشی ضریب هیدرودینامیکی را دنبال می‌کنند. هم گوی با سطح آب‌دوست و هم آب‌گریز در این عدد رینولدز، در سیال پلیمری پسای بیشتری را تجربه کرده‌اند که می‌توان دلیل آن را باز هم به خاصیت الاستیک سیال مرتبط کنیم که خاصیت دمپ کردن حرکت گوی را به سیال داده است. نکته قابل‌توجه دیگر این است که در سیال نیوتنی، آب‌دوستی و آب‌گریزی سطح تأثیر چندانی در روند افزایش ضریب هیدرودینامیکی نداشته که در هردو، بعد از گذشت تقریباً 0.2 ثانیه ضریب هیدرودینامیکی ۲ را تجربه کرده‌اند اما در همین مدت‌زمان، آب‌گریزی سطح توانسته در سیال غیر نیوتنی بیش از 0.5 واحد ضریب هیدرودینامیکی را کاهش دهد.



شکل ۳-۲۳: نتایج سقوط گوی در عدد رینولدز $1/7$: (الف) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی آب‌گریز (S_{ϕ}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ب) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی آب‌گریز (S_{ϕ}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی.

۳-۵-۲ نتایج مربوط به عدد موئینگی

به‌منظور استفاده از عدد بی‌بعد موئینگی، مقدار عدد موئینگی $4/24$ را در هردو سیال نیوتنی و غیرنیوتنی به‌دست آورده و با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم. در ادامه به بررسی نتایج مربوط به این مقدار از عدد موئینگی می‌پردازیم.



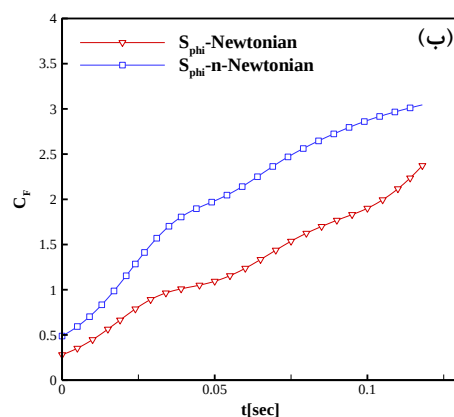
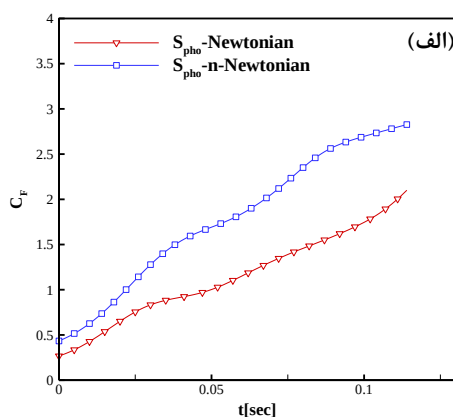
شکل ۳-۲۴: نتایج سقوط گوی در عدد موئینگی ۴/۲۴: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی آب‌گریز (S_{pho}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ب) نمودار سرعت گوی آب‌گریز (S_{pho}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (پ) نمودار شتاب گوی آب‌گریز (S_{pho}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ت) نمودار مکان لحظه‌ای گوی آب‌دوست (S_{phi}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ث) نمودار سرعت گوی آب‌دوست (S_{phi}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ج) نمودار شتاب گوی آب‌دوست (S_{phi}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی.

با توجه به نمودارهای جابه‌جایی برحسب زمان (شکل‌های ۳-۲۴، الف و ۳-۲۴، ت) هردو گوی با سطوح آب‌گریز و آب‌دوست در سیال نیوتنی در عدد موئینگی ۴/۲۴ زودتر نسبت به حرکت در سیال غیرنیوتنی مسیر را طی کرده‌اند.

در نمودارهای مربوط به سرعت (شکل‌های ۳-۲۴، ب و ۳-۲۴، ث) تفاوت عمده‌ای که مشاهده می‌شود در سرعت‌های ورودی به سیال‌های نیوتنی و غیرنیوتنی است که متعاقب با سرعت‌های برخورد متفاوتی که نسبت به یکدیگر دارند، تقریباً قابل پیش‌بینی می‌باشد که تقریباً این مقدار در سیال نیوتنی ۳/۷ و در سیال غیرنیوتنی ۲ متر بر ثانیه می‌باشد.

در مورد نمودار شتاب (شکل‌های ۳-۲۴، پ و ۳-۲۴، ج) باید به شتاب ضربه‌ای کاهشی ابتدای مسیر اشاره کنیم. می‌توان گفت مقدار اختلافی که یک گوی آب‌دوست در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی تجربه می‌کند از یک گوی آب‌گریز در دو نوع سیال کمتر است.

در نمودار مربوط به ضریب هیدرودینامیکی (شکل ۳-۲۷) هم شاهد پسای بیشتر هر دو نوع با سطح‌های آب‌دوست و آب‌گریز در سیال غیرنیوتنی نسبت به سیال نیوتنی هستیم که نشان‌دهنده اثر الاستیک در پسای هرچه بیشتر حرکت دارد.



شکل ۳-۲۵: نتایج سقوط گوی در عدد موئینگی ۴/۲۴: (الف) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی آب‌گریز (S_{pho}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی. (ب) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی آب‌گریز (S_{phi}) در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی.

فصل ۴ : نتیجه گیری و پیشنهاد

۴-۱ بحث و نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه به بررسی آزمایشگاهی اثر آب‌دوستی و آب‌گریزی سطح بر سرعت سقوط اجسام کروی در دو سیال نیوتنی و غیرنیوتنی (باگر) پرداخته شد.

گوی‌ها بعد از سقوط از ارتفاع $0/5$ سانتی‌متر و برخورد به سطح هردو نوع سیال کاواک‌هایی در محدوده رژیم شبه استاتیک تشکیل دادند. در سقوط گوی‌ها با هردو نوع سطح در سیال غیرنیوتنی شاهد کاهش سرعت ادامه‌دار می‌باشیم اما در سیال نیوتنی از همان ابتدا شاهد افزایش سرعت بر هردو نوع گوی با سطح آب‌دوست و آب‌گریز تا زمانی که به یک سرعت پایا می‌رسند، هستیم. تغییرات شتاب در سیال غیرنیوتنی در طول مسیر از شتاب صفر شروع و سپس تا میانه‌های مسیر به سمت شتاب منفی و از میانه‌ها تا پایان دوباره به سمت شتاب سفر میل می‌کند اما در سیال نیوتنی در کل مسیر شتاب مثبت اما روند کاهشی و به سمت صفر دارد. کاواک تشکیل شده برای هردو نوع گوی و برای هردو سیال از ارتفاع سقوط $0/5$ بسیار شبیه یکدیگر و تفاوت قابل توجهی را ندارند.

در ارتفاع سقوط 50 و 100 سانتی‌متر شاهد شتاب کاهشی بسیار قابل توجهی در ابتدای هر ورود گوی و برای هر دو نوع سیال هستیم. اما در ارتفاع سقوط یکسان گوی با سطح آب‌دوست شتاب کاهشی بیشتری را تجربه می‌کنند. کاواک تشکیل شده از ارتفاع 50 سانتی‌متر در رژیم جدایش عمیق قرار دارد اما در ارتفاع سقوط 100 سانتی‌متر کاواک تشکیل شده در سیال غیرنیوتنی در رژیم جدایش عمیق و در سیال نیوتنی در رژیم جدایش سطحی قرار دارد.

از نکات برجسته این پژوهش می‌توان به مقایسه‌ای که در یک مقدار ثابت دو عدد بی‌بعد انجام گرفت، اشاره کرد. مهم‌ترین نکته‌ای که پس از بررسی دو سیال نیوتنی و غیرنیوتنی و همچنین اثر آب‌دوستی و آب‌گریزی در رینولدز $1/7$ و موئینگی $4/24$ به‌دست آمد، تأثیر بسیار زیاد خاصیت الاستیک سیال غیرنیوتنی بر روی پسای حرکتی گوی است. همان‌طور که در نمودارهای بالا بررسی

شد، با توجه به این که ارتفاع سقوط گوی‌ها در به‌دست آمدن عدد بی‌بعد یکسان متفاوت است و به دنباله آن سرعت گوی‌ها در ورودی سیال‌ها نیز متفاوت می‌شود، قاعداً پیش‌بینی می‌شود که ممکن است گوی‌ها گاهی اوقات در سیال نیوتنی و گاهی اوقات در سیال غیرنیوتنی کاهش سرعت بیشتری را تجربه کنند. چون تقریباً در انتهای مسیر به یک سرعت پایا می‌رسند قاعداً باید گوی‌هایی که با سرعت بیشتری وارد شده‌اند، کاهش سرعت بیشتری را داشته باشند که همین اتفاق هم افتاده است. اما اگر به نمودارهای تغییرات ضریب هیدرودینامیکی مربوط به هر دو عدد رینولدز و موئینگی توجه کنید، متوجه می‌شوید که اصلاً تغییرات ارتفاع سقوط و سرعت و شتاب در پسای بیشتر یا کمتر گوی‌ها در سیال غیرنیوتنی و نیوتنی تأثیر نداشته و یک روند را حفظ کرده است. استنباط می‌شود که تغییرات ارتفاع سقوط، سرعت، شتاب و همچنین آب‌گریزی و آب‌دوستی سطح در پسای بیشتر سیال‌ها تأثیری نداشته و گوی‌ها در سیال غیرنیوتنی پسای حرکتی بیشتری را تجربه کرده‌اند.

۲-۴ پیشنهادها برای تحقیق آینده

به منظور ارتقای سطح کیفی تحقیق حاضر و انجام مطالعه جامع‌تر در راستای موضوع این پایان نامه، پیشنهادها و توصیه‌هایی به شرح زیر مطرح می‌گردد:

- بررسی اثر هندسه استوانه‌ای جسم بر سرعت سقوط در سیال نیوتنی و غیرنیوتنی
- برخورد گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز با سرعت بالا به سیال پلیمری
- ورود پرتابه‌هایی با زاویه برخوردهای مختلف به سطح سیال نیوتنی و غیرنیوتنی
- بررسی اثر زبری سطح در برخورد گوی به سطح سیال نیوتنی و غیرنیوتنی
- بررسی عددی برخورد گوی‌ها با پوشش‌های سطحی مختلف همچون آب‌دوستی، آب‌گریزی و یا زبری سطح در برخورد با سطح آزاد سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی

- [1] T. Osswald, N. Rudolph, Polymer Rheology Fundamentals and Applications. *Munich: Hanser Publications*, 2015.
- [2] D. F. James, Boger fluids, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 41, 2009, 129-142.
- [3] Bruus Henrik, Theoretical microfluidics. Oxford: Oxford university press, 18, 2008.
- [4] Von Karman, T., The impact of seaplane floats during landing, *National Advisory Committee for Aeronautics*, NACA TN 321, 1929, 1-8.
- [5] May, A. and Woodhull, J.C., Drag coefficients of steel spheres entering water vertically, *Journal of Applied Physics*, 19(12), 1948, 1109-1121.
- [6] Cui, Z., Fan, J.M. and Park, A.H., Drag coefficients for a settling sphere with microbubble drag reduction effects, *Powder Technology*, 138, 2003, 132-134.
- [7] Bodily, K.G., Carlson, S.J. and Truscott, T.T., The water entry of slender axisymmetric bodies, *Physics of Fluids*, 26(7), 2014, 072108-37.
- [8] Louf, J.F., Chang, B., Eshraghi, J., Mituniewicz, A., Vlachos, P.P. and Jung, S., Cavity ripple dynamics after pinch-off, *Journal of Fluid Mechanics*, 850, 2018, 611-623.
- [9] New, A.P., Lee, T.S. and Low, H.T., Impact loading and water entrance characteristics of prismatic bodies, *The Third International Offshore and Polar Engineering Conference*, 6-11 June, Singapore, 1993.
- [10] Truscott, T.T., Beal, D.N. and Techet, A.H., Shallow angle water entry of ballistic projectiles, *Proceedings of The 7th International Symposium On Cavitation*, Ann Arbor, Michigan, USA, 17-22 August, 2009.
- [11] Truscott, T.T., *Cavity dynamics of water entry for spheres and ballistic projectiles*, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA, 2009.
- [12] Aristoff, J.M. and Bush, J.W.M., Water entry of small Hydrophobic Spheres, *Journal of Fluid Mechanics*, 619, 2009, 45-78.
- [13] Miloh, T., On the initial-stage slamming of a rigid sphere in a vertical water entry, *Applied Ocean Research*, 13(1), 1991, 43-48.
- [14] Miloh, T., On the oblique water entry problem of a rigid sphere, *Journal of Engineering Mathematics*, 25(1), 1991, 77-92.
- [15] Engle, A., and Lewis, R., A comparison of hydrodynamic impacts prediction methods with two dimensional drop test data, *Marine structures*, 16(2), 2003, 175-182.

- [16] Wagner, H., Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces, *Z. Angew. Math. Mech*, 12(4), 1932, 193-215.
- [17] Chuang, S. L., Slamming of rigid wedge-shaped bodies with various deadrise angles, *Structural Mechanics Laboratory Research and Development*, Report 2268, 1966.
- [18] Kim, Y. W., Kim, Y., Liu, Y. M., and Yue, D., On the water-entry impact problem of asymmetric bodies, *Proceedings of Ninth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, USA, 2007.
- [19] Yang, Q., and Qiu, W., Numerical simulation of water impact for 2D and 3D bodies, *Ocean Engineering*, 43, 2012, 82-89.
- [20] Wu, G., Numerical simulation for water entry of a wedge at varying speed by a high order boundary element method, *Journal of Marine Science and Application*, 11(2), 2012, 143-149.
- [21] Ahmadzadeh, M., Saranjam, B., Fard, A. H., and Binesh, A. R., Numerical simulation of sphere water entry problem using Eulerian–Lagrangian method, *Applied Mathematical Modelling*, 38(5-6), 2014, 1673-1684.
- [22] Leidenfrost, J. G., *De aquae communis nonnullis qualitatibus tractatus*. Ovenius, 1756.
- [23] Vakarelski, I. U., Patankar, N. A., Marston, J. O., Chan, D. Y., and Thoroddsen, S. T., Stabilization of Leidenfrost vapour layer by textured superhydrophobic surfaces, *Nature*, 489(7415), 2012, 274-277.
- [24] Gylys, J., Paukštaitis, L., and Skvorčinskienė, R., Numerical investigation of the drag force reduction induced by the two-phase flow generating on the solid body surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(25-26), 2012, 7645-7650.
- [25] Mehri, A. and P. Akbarzadeh, Hydrodynamic characteristics of heated/non-heated and grooved/un-grooved spheres during free-surface water entry. *Journal of Fluids and Structures*, 97, 2020, 103100.
- [26] Cheny, J. M., and K. Walters, Extravagant viscoelastic effects in the Worthington jet experiment. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 67, 1996, 125-135.
- [27] Cheny, J.-M. and K. Walters, Rheological influences on the splashing experiment. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 86(1-2), 1999, 185-210.
- [28] Lee, Y.S., E.D. Wetzel, and N.J. Wagner, The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid. *Journal of materials science*, 38(13), 2003, 2825-2833.
- [29] Mahfuz, Hassan, Floria Clements, Vijaya Rangari, Vinod Dhanak, and Graham Beamson, Enhanced stab resistance of armor composites with functionalized silica nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 105, 2009.

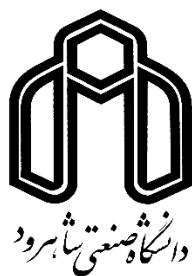
- [30] Majumdar, A., B.S. Butola, and A. Srivastava, An analysis of deformation and energy absorption modes of shear thickening fluid treated Kevlar fabrics as soft body armour materials. *Materials & Design*, 51, 2013, 148-153.
- [31] Majumdar, A., B.S. Butola, and A. Srivastava, Optimal designing of soft body armour materials using shear thickening fluid. *Materials & Design*, 46, 2013, 191-198.
- [32] Majumdar, Abhijit, Bhupendra Singh Butola, and Ankita Srivastava ,Development of soft composite materials with improved impact resistance using Kevlar fabric and nano-silica based shear thickening fluid. *Materials & Design*, 54, 2014, 295-300.
- [33] Tan, V., T. Tay, and W. Teo, Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions. *International journal of solids and structures*, 42(5-6), 2005, 1561-1576.
- [34] Waitukaitis, S.R. and H.M. Jaeger, Impact-activated solidification of dense suspensions via dynamic jamming fronts. *Nature*, 487(7406), 2012, 205-209.
- [35] de Goede Thijs, C., G. de Bruin Karla, and D. Bonn, High-velocity impact of solid objects on Non-Newtonian Fluids. *Scientific Reports (Nature Publisher Group)*, 9, 2019.
- [36] Tabuteau, Hervé, Darek Sikorski, J. Simon, and John R. de Bruyn, Impact of spherical projectiles into a viscoplastic fluid. *Physical Review E*, 84, 2011.
- [37] Oppong, F.K. and J.R. de Bruyn, Diffusion of microscopic tracer particles in a yield-stress fluid. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 142(1-3), 2007, 104-111.
- [38] Deglo de Besses, B., A. Magnin, and P. Jay, Sphere drag in a viscoplastic fluid. *AICHE journal*, 50(10), 2004, 2627-2629.
- [39] Blackery, J. and E. Mitsoulis, Creeping motion of a sphere in tubes filled with a Bingham plastic material. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 70(1-2), 1997, 59-77.
- [40] Akers, B. and A. Belmonte, Impact dynamics of a solid sphere falling into a viscoelastic micellar fluid. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 135(2-3), 2006, 97-108.
- [41] Mollinger, A., E. Cornelissen, and B. Van den Brule, An unexpected phenomenon observed in particle settling: oscillating falling spheres. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 86(3), 1999, 389-393.
- [42] Marston, Jeremy O., Tadd T. Truscott, Nathan B. Speirs, Mohammad M. Mansoor, and Sigurdur T. Thoroddsen, Crown sealing and buckling instability during water entry of spheres. *Journal of Fluid Mechanics*, 794, 2016, 506-529.
- [43] Duez, C., Ybert, C., Clanet, C., and Bocquet, L., Making a splash with water repellency, *Nature physics*, 3(3), 2007, 180-183.

- [44] Li, Daqin, Jiayue Zhang, Mindi Zhang, Biao Huang, Xiaojian Ma, and Guoyu Wang, Experimental study on water entry of spheres with different surface wettability. *Ocean Engineering*, 187, 2019, 106123.

Abstract

A body descending through a fluid is defined as a classic problem in fluid mechanics, resulting in the appearance of a vertical jet along with the descent centerline. The problem of a body movement in a fluid has been investigating since a long time ago, showing its importance in fluid mechanics. The movement of submarines, applicable to numerous industrial processes, suspensions and torpedoes in a fluid ambient are of important cases regarding a body moving in a fluid. In the present experimental work, a steel ball settling into free-surface non-Newtonian Boger and Newtonian fluids is studied. In the conducted experiments the effects of hydrophilicity and hydrophobicity of a 5-mm steel ball on displacement, velocity, acceleration, hydrodynamic force coefficient, generation of the cavity, and the pinch-off point are studied. Results reveal that the volume of cavity generated due to the fall of hydrophobic balls is larger than that for hydrophilic balls and, consequently, these hydrophobic surfaces experience more buoyancy-drag force. In addition, the forces due to the added mass and viscosity also affect the overall drag force, which causes that under the same conditions, the total drag of the hydrophilic sphere is higher than the hydrophobic sphere. Furthermore, regardless of the type of the ball's surface, comparisons which are made for the dimensionless Reynolds number equal to 1.7, and the dimensionless Capillary number equal to 4.24 reveal this fact that at these numbers, the non-Newtonian Boger fluid undergoes higher drag force than the corresponding amount in the Newtonian fluid.

Keywords: steel ball, hydrophilic and hydrophobic surfaces, cavity, drag force



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis in Energy Conversion

An experimental study on the collapse of spherical body in Newtonian and non-Newtonian fluids

By: Reza Ghasemi

Supervisor:

Dr. Mahmood Norouzi

Advisors:

Dr. Pouria Akbarzadeh

Dr. Mohsen Nazari

October 2020