

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آیرودینامیک

بررسی آزمایشگاهی تأثیر هم‌زمان شیار سطحی و دما بر
افزایش سرعت سقوط اجسام کروی در داخل آب

نگارنده:

علی مه‌ری

استاد راهنما:

دکتر پوریا اکبرزاده

خرداد ۱۳۹۸

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

گروه مهندسی آیرودینامیک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای علی مهري به شماره دانشجویی: ۹۵۱۴۷۱۴

تحت عنوان: بررسی آزمایشگاهی تأثیر همزمان شیار سطحی و دما بر افزایش سقوط اجسام کروی در آب
در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه
مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			دکتر پوریا اکبرزاده

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور

تعهد نامه

این جانب **علی مهروی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی هوافضا** گرایش **آئرو دینامیک** دانشکده **مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود** نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی تأثیر هم‌زمان شیار سطحی و دما بر افزایش سرعت سقوط اجسام کروی در داخل آب تحت راهنمایی **دکتر پوریا اکبرزاده** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج 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 بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

اثری کوچک است، خیلی کوچک و شاید هیچ؛

اما به یاد عهد قدیم و رسم ندیم، تقدیم می شود به:

اولین و مهربان ترین آموزگار زندگی ام، پروردگار یگانه ام؛

تقدیم می شود به پدر و مادر عزیزتر از جانم؛ آنان که امروز، بیشتر از دیروز و نه به اندازه ی فردا،

دوستشان دارم...

سپاس

سپاس **خدایی** را که اول و آخر وجود است، بی آنکه اولی بر او پیشی گیرد یا آخری پس از او باشد؛

خدایی که دست هر چشمی از دامان دیدارش کوتاه است و فهم هر کبوتر توصیفگری از پرواز در آسمان

وصفش عاجز....

بر خود لازم می‌دانم از استاد ارجمندم جناب آقای **دکتر پوریا اکبرزاده** که بی‌دریغ مرا در مسیر رسیدن

به هدف‌هایم و انجام این پژوهش پشتیبانی کرد، نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشم. در پایان از **خانم**

شقایق یوسفی، مهندس شاهین قائم، و سایر عزیزانی که در انجام این تحقیق مرا یاری کردند متشکرم.

چکیده

امروزه ایجاد تغییرات فیزیکی (زبر کردن سطح، ایجاد دیمپل، ایجاد گردابه سازها و غیره) در اجسامی که در آب حرکت می‌کنند به عنوان عاملی که می‌تواند تغییرات زیادی را در مشخصه‌های هیدرودینامیکی اجسام ایجاد کند مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها غالباً ساده، کم هزینه و سازگار با محیط زیست هستند. در این پژوهش اثر شیار سطحی (شیارهای افقی و عمودی) و دما بر عملکرد هیدرودینامیکی، مسیر حرکت، سرعت سقوط، شتاب، چگونگی شکل‌گیری کاواک، نقطه جدایش کاواک و ضریب نیروی هیدرودینامیکی اجسام کروی با قطر ۲۰ میلی‌متر به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. همه آزمایش‌ها با هفت گوی انجام شده است و گوی‌ها شامل شش گوی دارای شیار با الگوی شیار متفاوت و یک گوی بدون شیار می‌باشند. همه نمونه‌ها در سه رژیم برخورد متفاوت با عدد فراد ($Fr = 1, Fr = 100, Fr = 200$)، اعداد وبر ($W = 13.6, W = 1360, W = 2720$)، عدد باند ($B = 13.6$) و عدد رینولدز ($Re = 702.5, Re = 7025, Re = 9935$) آزمایش شده‌اند. برای آزمایش‌هایی که اثر دما مورد مطالعه قرار گرفته است، گوی‌ها در سه دمای ۲۵، ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد آزمایش شده‌اند. چگونگی سقوط و حرکت گوی‌ها در آب با استفاده از یک دوربین پرسرعت و در محدوده (۲۰۰۰-۱۰۰۰) فریم بر ثانیه تصویربرداری شده است. مشاهدات نشان می‌دهد که در رژیم برخورد با کمترین عدد فراد ($Fr = 1$) با افزایش شیارهای افقی سرعت حرکت گوی‌ها در آب بیشتر می‌شود اما با افزایش دمای سطح گوی‌ها در اطراف گوی بدون شیار یک کاواک بخار متقارن و در اطراف گوی‌ها دارای شیار یک کاواک بخار نامتقارن تشکیل می‌شود و همین باعث کاهش سرعت گوی‌های دارای شیار در آب با افزایش دما می‌گردد. در دو رژیم دیگر برخورد با اعداد فراد ($Fr = 100, Fr = 200$) مشاهده شد که گوی‌های دارای شیار پس از برخورد با سطح آب یک کاواک قابل توجه تشکیل می‌دهند در حالی که پس از برخورد گوی بدون شیار تنها یک کاواک بسیار

کوچک تشکیل می‌شود. نمودارهای سرعت برای گوی‌ها نشان داد که سرعت گوی‌های دارای شیار در این دو رژیم به مراتب بیشتر از سرعت گوی بدون شیار است و سرعت گوی‌ها دارای شیار افقی بیشتر از سرعت گوی‌های دارای شیار افقی و عمودی می‌باشد.

کلمات کلیدی: سقوط پرتابه در آب، گوی دارای شیار، سرعت سقوط، شکل‌گیری کاواک، گوی حرارت

داده شده، رژیم برخورد

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مفاهیم و پیشینه تحقیق
۲	۱-۱- سقوط پرتابه در آب.....
۴	۲-۱- پیشینه تحقیق.....
۴	۱-۲-۱- پژوهش‌های آزمایشگاهی.....
۹	۲-۲-۱- پژوهش‌های تحلیلی.....
۱۰	۳-۲-۱- پژوهش‌های عددی.....
۱۳	۴-۲-۱- پیشینه تحقیق اثر دما بر ورود اجسام به آب.....
۱۵	1-3- ضرورت انجام تحقیق.....
۱۶	۴-۱- نوآوری تحقیق.....
۱۶	۵-۱- ساختار پایان‌نامه.....

۱۷	فصل ۲: تئوری برخورد و معادلات حاکم
۱۸	۱-۲- تئوری برخورد و معادلات حاکم.....
۲۱	۱-۱-۲- نیروی شناوری.....
۲۴	۲-۱-۲- نیروی (اثر) جرم اضافه شده.....
۲۵	۳-۱-۲- نیروی پسای لزجت.....
۲۶	۴-۱-۲- نیروی کشش سطحی آب.....
۲۶	۵-۱-۲- ضریب کل نیروی‌های هیدرودینامیکی.....
۲۷	۲-۲- اعداد بیبعد مهم:.....
۲۸	۳-۲- آب‌دوستی و آب‌گریزی.....
۲۹	۱-۳-۲- زاویه تماس.....
۳۰	۲-۳-۲- زاویه مخروطی.....
۳۱	۴-۲- رژیم‌های برخورد.....
۳۳	۱-۴-۲- معرفی بخش‌های مختلف یک کاواک.....
۳۷	۲-۴-۲- رژیم شبه استاتیک:.....
۳۸	۳-۴-۲- رژیم جدایش نیمه عمیق.....
۳۹	۴-۴-۲- رژیم جدایش عمیق.....
۴۰	۵-۴-۲- رژیم جدایش سطحی.....

۴۳	فصل ۳: معرفی مسئله و بستر آزمایشگاهی
۴۴	۱-۱- تعریف مسئله.....

- ۳-۱-۱- معرفی بستر آزمایشگاهی ۴۴
- ۳-۱-۲- تصویربرداری ۴۹
- ۳-۱-۳- رها سازی گویها ۵۲
- ۳-۱-۴- پردازش تصاویر ۵۳

۵۵

فصل ۴: نتایج و تفسیر آن‌ها

- ۴-۱- نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۰/۵ سانتیمتر ۵۶
- ۴-۱-۱- نتایج سقوط گوی‌ها با دمای ۲۵ درجه در آب ۵۶
- ۴-۱-۲- نتایج سقوط گوی با دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد در آب ۶۶
- ۴-۱-۳- نتایج سقوط گوی با دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد در آب ۷۳
- ۴-۱-۴- اثر شیار و دمای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتیگراد بر طول کاواک ۸۰
- ۴-۲- نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر ۸۶
- ۴-۳- نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر ۱۰۱

۱۱۹

فصل ۵: جمع بندی و پیشنهادها

- ۵-۱- جمع بندی و نتیجه گیری ۱۲۰
- ۵-۲- پیشنهادها برای تحقیقات آینده ۱۲۱

۱۲۵

مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: شلیک اژدر MK-46 از هلیکوپتر AW159 Wildcat ۳
- شکل ۲-۱: سامانه ضد زیردریایی ASW Rocketsan ۳
- شکل ۱-۲: دیاگرام نیروهای یک گوی هنگام برخورد به سطح آب ۱۸
- شکل ۲-۲: برخورد گوی بدون شیار با سطح آب بدون تشکیل کاواک ۲۱
- شکل ۳-۲: برخورد گوی با سطح دارای شیار به سطح آب و تشکیل کاواک ۲۱
- شکل ۴-۲: کاواک قبل از لحظه جدایش. $(U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re_0 = 9935, D_0 = 20 \text{ [mm]})$ ۲۳
- شکل ۵-۲: کاواک متصل به گوی بعد از لحظه جدایش. $(U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re_0 = 9935, D_0 = 20 \text{ [mm]})$ ۲۴
- شکل ۶-۲: ورود به آب یک گوی در رژیم شبه استاتیک [۱۱] ۲۶
- شکل ۷-۲: مقایسه شماتیک سطوحی که در تماس با آب خیس نمی‌شوند و سطوحی که در تماس با آب خیس می‌شوند [۱۱] ۲۹
- شکل ۸-۲: (الف) ورود یک گوی با سطح آب‌دوست به آب. (ب) ورود یک گوی با سطح آب‌گریز به آب [۴۷] ۲۹
- شکل ۹-۲: مقایسه رفتار سطح آب‌گریز و آب‌دوست هنگام ورود به آب [۴۸] ۳۰
- شکل ۱۰-۲: شماتیک معرفی زاویه مخروطی گوی و کاواک ۳۱
- شکل ۱۱-۲: (الف) سقوط گوی بدون ایجاد کاواک در آب. (ب) سقوط گوی درون آب در رژیم شبه استاتیک. (ت) سقوط گوی درون آب در رژیم جدایش عمیق. (ث) سقوط گوی درون آب در رژیم جدایش عمیق. (ج) سقوط گوی در رژیم جدایش سطحی [۴۹] ۳۲
- شکل ۱۲-۲: شماتیک چگونگی تشکیل کاواک در رژیم جدایش عمیق و جدایش سطحی [۴۸] ۳۲
- شکل ۱۳-۲: معرفی قسمت‌های یک کاواک [۱۴] ۳۳
- شکل ۱۴-۲: جدایش کاواک اطراف یک گوی در چندین مرحله [۱۶] ۳۴
- شکل ۱۵-۲: (الف-ج) روند شکل‌گیری پرده پاشش تاجی شکل پس از برخورد یک گوی به سطح مایع $C_6 F_{14}$ [۱۸] ۳۵
- شکل ۱۶-۲: وجود ناپایداری کمانشی در پرده پاشش تاجی شکل [۱۸] ۳۵
- شکل ۱۷-۲: شکل‌گیری جت برگشتی در رژیم جدایش عمیق [۱۸] ۳۷
- شکل ۱۸-۲: ورود یک گوی به آب در رژیم شبه استاتیک [۱۱] ۳۸
- شکل ۱۹-۲: برخورد یک گوی با سطح آب‌گریز به سطح آب در رژیم جدایش نیمه عمیق و تشکیل کاواک [۱۱] ۳۹

- شکل ۲-۲۰: شکل‌گیری کاواک در اطراف یک گوی کوچک با سطح آب‌گریز در رژیم جدایش عمیق [۱۱] ۴۰
- شکل ۲-۲۱: برخورد یک گوی کوچک با سطح آب‌گریز به سطح آب در رژیم جدایش سطحی [۱۱] ۴۱
- شکل ۳-۱: معرفی اجزای بستر آزمایش‌گاهی و شماتیک یک نمونه از گوی‌های دارای شیار ۴۶
- شکل ۳-۲: تصویربرداری از سقوط گوی‌ها در آب با لنز ۱۰۵ میلی‌متری ۴۶
- شکل ۳-۳: تصویربرداری از سقوط گوی‌ها در آب با لنز ۲۰۰ میلی‌متری ۴۷
- شکل ۳-۴: گوی‌های دارای شیار و گوی بدون شیار ۴۸
- شکل ۳-۵: دماسنج لیزری Kimo kiray 300 ۴۸
- شکل ۳-۶: کوره حرارتی برقی به‌منظور حرارت دادن به گویها ۴۹
- شکل ۳-۷: دوربین پرسرعت PCO dimax S ۵۰
- شکل ۳-۸: لنز Carl Zeiss 85mm f/1.4 Planer ۵۰
- شکل ۳-۹: تصویر نیمه عریض از تشکیل کاواک بعد از برخورد گوی دارای شیار به سطح آب ۵۱
- شکل ۳-۱۰: لنز ماکرو Micro Nikkor 105mm VR ۵۲
- شکل ۳-۱۱: لنز ماکرو AF Nikkor 200mm F/4D ED-IF ۵۲
- شکل ۳-۱۲: دریافت عکسها و تشخیص پیکسل‌های سیاه و سفید از هم توسط نرم‌افزار ۵۴
- شکل ۳-۱۳: خروجی‌های نمودار مکان، سرعت و شتاب برحسب زمان توسط نرم‌افزار ۵۴
- شکل ۴-۱: ورود گوی با شناسه $S0,0$ به آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتیگراد، در رژیم شبه استاتیک، $(U0 = 0.31 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 13.6, Fr = 1.0, Re0 = 702.5, D0 = 20 [mm])$ ۵۷
- شکل ۴-۲: ورود گوی با شناسه $S5,0$ به آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتیگراد، در رژیم شبه استاتیک، $(U0 = 0.31 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 13.6, Fr = 1.0, Re0 = 702.5, D0 = 20 [mm])$ ۵۸
- شکل ۴-۳: ورود گوی با شناسه $S1,0$ به آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتیگراد، در رژیم شبه استاتیک، $(U0 = 0.31 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 13.6, Fr = 1.0, Re0 = 702.5, D0 = 20 [mm])$ ۶۰
- شکل ۴-۴: ورود گوی با شناسه $S5,5$ به آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتیگراد، در رژیم شبه استاتیک، $(U0 = 0.31 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 13.6, Fr = 1.0, Re0 = 702.5, D0 = 20 [mm])$ ۶۱
- شکل ۴-۵: جدایش کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0, S1,0, S1,1, S3,0, S3,3, S5,0, S5,5$ دمای سطح گویها ۲۵ درجه سانتیگراد، در رژیم شبه استاتیک، $(U0 = 0.31 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 13.6, Fr = 1.0, Re0 = 702.5, D0 = 20 [mm])$ ۶۲
- شکل ۴-۶: شماتیک برخورد گوی دارای شیار با سطح آب ۶۳

- شکل ۴-۷: (الف) ورود گوی با شناسه $S0,0$ به آب، دمای سطح گوی 25 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک. (ب) ورود گوی با شناسه $S5,0$ به آب، دمای سطح گوی 25 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک..... ۶۴
- شکل ۴-۸: (الف تا پ) نمودارهای مکان لحظه‌ای، سرعت و شتاب گویها با شناسه‌های $S1,0$ ، $S0,0$ ، $S3,0$ و $S5,0$. (ت تا ج) نمودارهای مکان لحظه‌ای، سرعت و شتاب گویها با شناسه‌های $S1,1$ ، $S0,0$ ، $S3,3$ و $S5,5$ ۶۵
- شکل ۴-۹: (الف) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,0$ ، $S3,0$ و $S5,0$. (ب) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گویها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,1$ ، $S3,3$ و $S5,5$ ۶۶
- شکل ۴-۱۰: ورود گوی با شناسه $S0,0$ به آب، دمای سطح گوی 100 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک، $(U0 = 0.31 [m.s - 1], B = 13.6, W = 13.6, Fr = 1.0, Re0 = 702.5, D0 = 20 [mm])$ ۶۸
- شکل ۴-۱۱: ورود گوی با شناسه $S5,0$ به آب، دمای سطح گوی 100 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک، $(U0 = 0.31 [m.s - 1], B = 13.6, W = 13.6, Fr = 1.0, Re0 = 702.5, D0 = 20 [mm])$ ۶۹
- شکل ۴-۱۲: ورود گوی با شناسه $S5,5$ به آب، دمای سطح گوی 100 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک، $(U0 = 0.31 [m.s - 1], B = 13.6, W = 13.6, Fr = 1.0, Re0 = 702.5, D0 = 20 [mm])$ ۷۰
- شکل ۴-۱۳: (الف) ورود گوی با شناسه $S0,0$ به آب، دمای سطح گوی 100 درجه سانتی‌گراد در رژیم شبه استاتیک. (ب) ورود به آب گوی با شناسه $S5,0$ به آب، دمای سطح گوی 100 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک..... ۷۱
- شکل ۴-۱۴: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های $S0,0$ ، $S1,0$ ، $S3,0$ ، $S5,0$. (ب) نمودار سرعت گوی‌های $S0,0$ ، $S1,0$ ، $S3,0$ ، $S5,0$. (پ) نمودار شتاب گوی‌های $S0,0$ ، $S1,0$ ، $S3,0$ ، $S5,0$. (ت) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های $S0,0$ ، $S1,1$ ، $S3,3$ ، $S5,5$. (ث) نمودار سرعت گوی‌های $S0,0$ ، $S1,1$ ، $S3,3$ ، $S5,5$. (ج) نمودار شتاب گوی‌های $S0,0$ ، $S1,1$ ، $S3,3$ ، $S5,5$ ۷۲
- شکل ۴-۱۵: (الف) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,0$ ، $S3,0$ ، $S5,0$. (ب) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,1$ ، $S3,3$ ، $S5,5$ ۷۳
- شکل ۴-۱۶: ورود گوی با شناسه $S0,0$ به آب، دمای سطح گوی 200 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک، $(U0 = 0.31 [m.s - 1], B = 13.6, W = 13.6, Fr = 1.0, Re0 = 702.5, D0 = 20 [mm])$ ۷۵
- شکل ۴-۱۷: ورود گوی با شناسه $S5,0$ به آب، دمای سطح گوی 200 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک، $(U0 = 0.31 [m.s - 1], B = 13.6, W = 13.6, Fr = 1.0, Re0 = 702.5, D0 = 20 [mm])$ ۷۶

- شکل ۴-۱۸ : (الف) ورود گوی با شناسه $S0,0$ به آب، دمای سطح گوی 200 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک. (ب) ورود گوی با شناسه $S5,0$ به آب، دمای سطح گوی 200 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک. ۷۸
- شکل ۴-۱۹ : (الف تا پ) نمودارهای مکان لحظه‌ای، سرعت و شتاب گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,0$ ، $S3,0$ ، $S5,0$. (ت تا ج) نمودارهای مکان لحظه‌ای، سرعت و شتاب گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,1$ ، $S3,3$ ، $S5,5$ ۷۹
- شکل ۴-۲۰ : (الف) نمودارهای ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,0$ ، $S3,0$ ، $S5,0$. (ب) نمودارهای ضریب نیروهای هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,1$ ، $S3,3$ ، $S5,5$ ۸۰
- شکل ۴-۲۱ : نمودار طول نقطه جدایش کاواک و طول کاواک گوی‌ها با شناسه $S0,0$ ، $S1,0$ ، $S3,0$ در $S5,0$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد. ۸۱
- شکل ۴-۲۲ : نمودار طول نقطه جدایش کاواک و طول کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,1$ ، $S3,3$ ، $S5,5$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد. ۸۲
- شکل ۴-۲۳ : نمودار قطر کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,0$ ، $S3,0$ ، $S5,0$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد. ۸۳
- شکل ۴-۲۴ : نمودار قطر کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,1$ ، $S3,3$ ، $S5,5$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد. ۸۴
- شکل ۴-۲۵ : نمودار زمان جدایش کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,0$ ، $S3,0$ ، $S5,0$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد. ۸۵
- شکل ۴-۲۶ : نمودار زمان جدایش کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S0,0$ ، $S1,1$ ، $S3,3$ ، $S5,5$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد. ۸۶
- شکل ۴-۲۷ : برخورد گوی با شناسه $S0,0$ به سطح آب، دمای سطح گوی 25 درجه سانتی‌گراد،
 $(U0 = 3.13 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 1360, Fr = 100, Re0 = 7025, D0 = 20 [mm])$ ۸۸
- شکل ۴-۲۸ : برخورد گوی با شناسه $S0,0$ به سطح آب، دمای سطح گوی 25 درجه سانتی‌گراد،
 $(U0 = 3.13 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 1360, Fr = 100, Re0 = 7025, D0 = 20 [mm])$ ۸۸
- شکل ۴-۲۹ : برخورد گوی با شناسه $S1,0$ به سطح آب، دمای سطح گوی 25 درجه سانتی‌گراد،
 $(U0 = 3.13 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 1360, Fr = 100, Re0 = 7025, D0 = 20 [mm])$ ۸۹
- شکل ۴-۳۰ : برخورد گوی با شناسه $S1,0$ به سطح آب، دمای سطح گوی 25 درجه سانتی‌گراد،
 $(U0 = 3.13 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 1360, Fr = 100, Re0 = 7025, D0 = 20 [mm])$ ۸۹

- شکل ۴-۳۱: برخورد گوی با شناسه S5,0 به سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد،
 $(U_0 = 3.13 [m.s - 1], B = 13.6, W = 1360, Fr = 100, Re_0 = 7025, D_0 = 20 [mm])$
 ۹۱
- شکل ۴-۳۲: برخورد گوی با شناسه S5,0 به سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد،
 $(U_0 = 3.13 [m.s - 1], B = 13.6, W = 1360, Fr = 100, Re_0 = 7025, D_0 = 20 [mm])$
 ۹۱
- شکل ۴-۳۳: چگونگی تشکیل شدن جت برگشتی در برخورد گوی با شناسه S5,0 به سطح آب،
 $(U_0 = 3.13 [m.s - 1], B = 13.6, W = 1360, Fr = 100, Re_0 = 7025, D_0 = 20 [mm])$
 ۹۲
- شکل ۴-۳۴: برخورد جت برگشتی با محیط دوفازی درون کاواک و دیواره‌های کاواک،
 $(U_0 = 3.13 [m.s - 1], B = 13.6, W = 1360, Fr = 100, Re_0 = 7025, D_0 = 20 [mm])$
 ۹۲
- شکل ۴-۳۵: برخورد گوی با شناسه S1,1 به سطح آب، دمای گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد،
 $(U_0 = 3.13 [m.s - 1], B = 13.6, W = 1360, Fr = 100, Re_0 = 7025, D_0 = 20 [mm])$
 ۹۳
- شکل ۴-۳۶: برخورد گوی با شناسه S1,1 به سطح آب، دمای گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد،
 $(U_0 = 3.13 [m.s - 1], B = 13.6, W = 1360, Fr = 100, Re_0 = 7025, D_0 = 20 [mm])$
 ۹۴
- شکل ۴-۳۷: نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های S0,0، S1,0، S3,0، S5,0 (ب) نمودار سرعت گوی‌های
 S0,0، S1,0، S3,0، S5,0 (پ) نمودار شتاب گوی‌های S0,0، S1,0، S3,0، S5,0 (ت) نمودار مکان
 لحظه‌ای گویه‌ای S0,0، S1,1، S3,3، S5,5 (ث) نمودار سرعت گوی‌های S0,0، S1,1، S3,3، S5,5
 (ج) نمودار شتاب گوی‌های S0,0، S1,1، S3,3، S5,5
 ۹۶
- شکل ۴-۳۸: (الف) کاواک تشکیل شده از برخورد گوی با شناسه S5,0 با سطح آب. (ب) کاواک
 تشکیل شده از برخورد گوی با شناسه S5,5 با سطح آب.
 ۹۷
- شکل ۴-۳۹: (الف) نمودارهای ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های S0,0، S1,0،
 S3,0، S5,0 (ب) نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های S0,0، S1,1، S3,3، S5,5.
 ۹۸
- شکل ۴-۴۰: نمودارهای طول نقطه جدایش کاواک و طول کاواک بر حسب تعداد شیار گوی‌ها.
 ۹۹
- شکل ۴-۴۱: نمودار قطر کاواک (در لحظه جدایش) بر حسب تعداد شیار گوی‌ها.
 ۹۹
- شکل ۴-۴۲: نمودار زمان نقطه جدایش کاواک بر حسب تعداد شیارهای هر گوی.
 ۱۰۰
- شکل ۴-۴۳: برخورد گوی با شناسه S0,0 با سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد،
 $(U_0 = 4.42 [m.s - 1], B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re_0 = 9935, D_0 = 20 [mm])$
 ۱۰۲
- شکل ۴-۴۴: برخورد گوی با شناسه S0,0 با سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد،
 $(U_0 = 4.42 [m.s - 1], B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re_0 = 9935, D_0 = 20 [mm])$
 ۱۰۲

- شکل ۴-۴۵: برخورد گوی با شناسه S1,0 با سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد،
 $(U0 = 4.42 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re0 = 9935, D0 = 20 [mm])$
 ۱۰۴
- شکل ۴-۴۶: برخورد گوی با شناسه S1,0 با سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد،
 $(U0 = 4.42 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re0 = 9935, D0 = 20 [mm])$
 ۱۰۴
- شکل ۴-۴۷: چگونگی فروریزش کاواک گوی با شناسه S1,0 پس از برخورد با کاواک ۱۰۵
- شکل ۴-۴۸: برخورد گوی با شناسه S1,1 با سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد،
 $(U0 = 4.42 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re0 = 9935, D0 = 20 [mm])$
 ۱۰۶
- شکل ۴-۴۹: برخورد گوی با شناسه S1,1 با سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد،
 $(U0 = 4.42 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re0 = 9935, D0 = 20 [mm])$
 ۱۰۶
- شکل ۴-۵۰: برخورد گوی با شناسه S5,0 به سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد،
 $(U0 = 4.42 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re0 = 9935, D0 = 20 [mm])$
 ۱۰۸
- شکل ۴-۵۱: به وجود آمدن ناپایداری کمانشی پس از برخورد گوی با شناسه S5,0 به سطح آب،
 $(U0 = 4.42 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re0 = 9935, D0 = 20 [mm])$
 ۱۰۸
- شکل ۴-۵۲: برخورد گوی با شناسه S5,0 به سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد،
 $(U0 = 4.42 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re0 = 9935, D0 = 20 [mm])$
 ۱۰۹
- شکل ۴-۵۳: به وجود آمدن موج روی سطح کاواک در رژیم جدایش عمیق پس از برخورد گوی با
 شناسه S5,0 به سطح آب،
 $(U0 = 4.42 [m.s^{-1}], B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re0 = 9935, D0 = 20 [mm])$
 ۱۰۹
- شکل ۴-۵۴: نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های S0,0، S1,0، S3,0، S5,0. (ب) نمودار سرعت گوی‌های
 S0,0، S1,0، S3,0، S5,0. (پ) نمودار شتاب گوی‌های S0,0، S1,0، S3,0، S5,0. (ت) نمودار مکان
 لحظه‌ای گوی‌های S0,0، S1,1، S3,3، S5,5. (ث) نمودار سرعت گوی‌های S0,0، S1,1، S3,3، S5,5.
 (ج) نمودار شتاب گوی‌های S0,0، S1,1، S3,3، S5,5. ۱۱۲
- شکل ۴-۵۵: (الف) کاواک تشکیل شده پس از برخورد گوی با شناسه S1,0 به سطح آب از ارتفاع
 ۱۰۰ سانتی‌متری. (ب) کاواک تشکیل شده پس از برخورد گوی با شناسه S1,1 به سطح آب از ارتفاع
 ۱۰۰ سانتی‌متری ۱۱۳
- شکل ۴-۵۶: (الف) کاواک تشکیل شده پس از برخورد گوی با شناسه S5,0 به سطح آب از ارتفاع
 ۱۰۰ سانتی‌متری. (ب) کاواک تشکیل شده پس از برخورد گوی با شناسه S5,5 به سطح آب از ارتفاع
 ۱۰۰ سانتی‌متری ۱۱۴

شکل ۴-۵۷: (الف) نمودارهای ضریب نیروی هیدرودینامیکی گویها با شناسه‌های $S_{3,0}$, $S_{1,0}$, $S_{0,0}$

$S_{5,0}$, (ب) نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی گویها با شناسه‌های $S_{5,5}$, $S_{3,3}$, $S_{1,1}$, $S_{0,0}$ ۱۱۵

شکل ۴-۵۸: نمودار طول نقطه جدایش و طول کاواک بر حسب تعداد شیار هر گوی، $(U_0 =$

۱۱۶ $4.42 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re_0 = 9935, D_0 = 20 \text{ [mm])}$

شکل ۴-۵۹: نمودار قطر کاواک بر حسب تعداد شیار هر گوی، $(U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B =$

۱۱۷ $13.6, W = 2720, Fr = 200, Re_0 = 9935, D_0 = 20 \text{ [mm])}$

شکل ۴-۶۰: نمودار زمان جدایش کاواک بر حسب تعداد شیار هر گوی، $(U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}\text{]},$

۱۱۸ $B = 13.6, W = 2720, Fr = 200, Re_0 = 9935, D_0 = 20 \text{ [mm])}$

فهرست جداول

جدول (۳-۱) معرفی اعداد بی‌بعد و نمادهای استفاده شده ۴۷

فهرست نشانه‌ها

B	عدد باند
C_D	ضریب نیروی پسا
C_F	ضریب نیروی هیدرودینامیکی
C_m	ضریب جرم اضافه‌شده
D_C [mm]	قطر کاواک
D_0 [m]	قطر گوی
F_a	نیروی کشش سطحی
F_b	نیروی شناوری
F_d	نیروی پسای لزجی
Fr	عدد فراد
h_G [mm]	عمق شیار
H_p	عمق جدایش کاواک
h_r [cm]	ارتفاع رهاسازی گوی
L_c [mm]	طول کاواک
N_{HG}	تعداد شیارهای افقی گوی
N_{VG}	تعداد شیارهای عمودی گوی
Re_0	عدد رینولدز
$S_{i,j}$	شناسه گوی‌ها
U_0 [m/s]	سرعت برخورد گوی به سطح آب
V_0 [m/s]	سرعت اولیه گوی
W	عدد وبر
W_G [mm]	عرض شیار گوی
\dot{z} [m/s]	سرعت لحظه‌ای گوی
\ddot{z} [m/s ²]	شتاب لحظه‌ای گوی
μ [Pa.s]	لزجت دینامیکی
ρ [Kg/m ³]	چگالی
ϱ [Kg/m ³]	نسبت چگالی
σ [m. N/m]	کشش سطحی
ψ	زاویه کاواک مجاور گوی با محور افقی

فصل ۱:

مفاهیم و پیشینه تحقیق

۱-۱- سقوط پرتابه در آب

مطالعه اثر هیدرودینامیک بین یک جسم در حال حرکت و سطح آزاد آب بیش از یک قرن است که مورد مطالعه قرار گرفته است. این مسئله از بسیاری از پارامترهای فیزیکی از جمله هندسه پرتابه، خواص مواد، خواص سیال و سایر متغیرها، تأثیر می‌پذیرد. با پیشرفت در تصویربرداری و به وجود آمدن دوربین‌های تصویربرداری با سرعت بالا که برخی از آن‌ها سرعتی باورنکردنی را برای تصویربرداری از پدیده‌های با سرعت بالا فراهم می‌کنند، مشاهده و تحلیل اتفاقاتی که در هنگام ورود اجسام و پرتابه‌ها به آب رخ می‌دهد بسیار آسان شده است و امروزه بسیاری از سلاح‌های تاکتیکی نظامی دریایی (گلوله‌های سوپر کاویتاسیون، راکت‌های ضد زیردریایی و اژدرها) به خاطر پیشرفت در مطالعه تصویری ورود پرتابه‌ها به آب توسعه یافته‌اند (شکل ۱-۱، شلیک اژدر Mk-46 از هلیکوپتر AW159 Wildcat) و (شکل ۱-۲، سامانه ضد زیردریایی ASW Rocketsan). در این میان بررسی مدل‌های آزمایشگاهی به دلیل نزدیک بودن به شرایط واقعی و دقیق‌تر بودن خروجی‌های به‌دست‌آمده از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. مسئله اندرکنش میان پرتابه و سیال در هنگام ورود و تأثیر متغیرهایی همچون شکل جسم، کشش سطحی سیال و دما، شاخه‌ای نوین را برای مطالعه عددی و تجربی این پدیده به صورت تست‌های بصری ایجاد کرده است. امروزه یکی از دغدغه‌های اصلی پژوهشگران حوزه هیدرودینامیک کاهش دادن نیروی پسا هنگام حرکت اجسام درون آب است. مقاومت کمتر به معنی سرعت بیشتر و مصرف انرژی کمتر می‌باشد. امروزه به‌منظور کاهش نیروی پسا روش‌های گسترده و متنوعی پیشنهاد می‌شود نظیر استفاده از پوشش‌های آب‌گریز و پلیمری، تزریق حباب‌های هوا به داخل مایع، لرزش دادن جسم، سوپر کاویتاسیون، ایجاد تغییرات فیزیکی رو سطح اجسام (زبری و ناهمواری) و موارد دیگر. تغییر خواص فیزیکی روی سطح اجسام (مانند ایجاد زبری و ناهمواری و ...) می‌تواند به‌عنوان عاملی مناسب برای کاهش نیروی پسا درون آب مطرح شود که در این راستا ایجاد شیار روی سطوح اجسام نیز می‌تواند در این دسته قرار گیرد.



شکل ۱-۱: شلیک اژدر MK-46 از هلیکوپتر AW159 Wildcat



شکل ۲-۱: سامانه ضد زیر دریایی ASW Rocketsan

۱-۲- پیشینه تحقیق

در این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی تأثیر همزمان و جداگانه شیار سطحی و دما بر ورود یک جسم کروی به داخل آب پرداخته می‌شود. تعداد گوی‌های مورد آزمایش هفت گوی می‌باشد که یکی از آن‌ها بدون شیار و شش گوی دیگر شش الگوی متفاوت شیار را دارند. این گوی‌ها از سه ارتفاع (۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰) و در سه رژیم متفاوت در آب رها شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. پژوهش‌های انجام‌شده را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: پژوهش‌های آزمایشگاهی، حل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی.

۱-۲-۱- پژوهش‌های آزمایشگاهی

پژوهش‌های آزمایشگاهی اولیه برای اندازه‌گیری نیروهای برخورد حین ورود به آب نیز به دلیل ناتوانی ابزار در تحمل شوکی که حین برخورد تحمل می‌شود و همچنین ناتوانی ابزار در پاسخ سریع در حین اندازه‌گیری‌های دینامیک دشوار بوده است. اولین جرقه‌های مطالعه تجربی بررسی سطح آزاد سیال و ورود جسم به داخل آب را می‌توان متعلق به فون کارمن [۱] دانست. او در سال ۱۹۲۹، در مورد چگونگی ورود یک گوه (سطح مقطع یک کشتی) به آب و همچنین نیروهای وارد بر آن هنگام ورود به آب مطالعاتی آزمایشگاهی انجام داد. او توانست برخی از مهم‌ترین کمیت‌ها از جمله نیروی برخورد^۱، سرعت و فشار را در هنگام برخورد گوه به سطح آب محاسبه و اندازه‌گیری کند. در سال ۱۹۴۸ وودهاال و می [۲] در یک تحقیق آزمایشگاهی در مورد چگونگی ورود چند گوی فلزی (در اندازه‌های ۱/۴ تا ۱۱/۲ اینچ) در سرعت‌های متفاوت (۲۵ تا ۲۰۸ فوت بر ثانیه) به آب و محاسبه پسا آن‌ها در هنگام

¹ Impact force

حرکت در آب مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که ضریب نیروی پسا تابع دو عدد بی‌بعد رینولدز^۲ و فراد^۳ می‌باشد. گرینهاو و لین [۳] در سال ۱۹۸۳ به بررسی کمیت‌های هیدرودینامیکی یک گوه در هنگام ورود به آب (در زوایای مختلف) پرداختند. در این آزمایش‌ها گوه با چند زاویه از جمله ۳۰ درجه و ۶۰ درجه به آب انداخته شد و مکان لحظه‌ای آن اندازه‌گیری شد. آن‌ها همچنین در آزمایشی دیگر ورود و خروج یک سیلندر از آب را مورد بررسی قرار دادند و کمیت‌های هیدرودینامیکی آن را اندازه‌گیری و پروفایل سطح آب هنگام خروج سیلندر را ثبت کردند.

در سال ۱۹۹۲، کول و همکاران [۴] آزمایش‌هایی را برای بررسی ورود یک جسم به صورت مایل در آب، با ابعاد واقعی (راکت) و با هدف محاسبه فشار کاواک^۴ انجام دادند. ابزار و تجهیزات ثبت نتایج در داخل راکت قرار داده شد. نتایج برای یک سرعت (۳۰۱ متر بر ثانیه)، یک زاویه ورود (۲۹ درجه) و یک شکل دماغه ارائه گردید. شتاب سه محوری و فشار پایه اندازه توسط تجهیزات ثبت نتایج اندازه‌گیری شد و این نتایج با آزمایش‌های مقیاس آزمایشگاهی اندازه‌گیری و در این آزمایش‌ها درک مناسبی از تغییرات فشار حاصل شد. بررسی‌های آزمایشگاهی در سال ۱۹۹۳ نیز توسط نیو و همکاران [۵] با مطالعه برخورد به آب اجسام منشوری با دماغه‌های متفاوت ادامه پیدا کرد. اجسام با استفاده از یک محفظه هوای فشرده و یک شیر مغناطیسی که توانایی تنظیم زوایای مختلف ورود را داشت به داخل آب شلیک شدند. شتاب جسم توسط یک شتاب سنج سه محوری اندازه‌گیری گردید. همچنین برای اولین بار هر دو فرآیند پاشش قطره‌های آب و شکل‌گیری کاواک هوا توسط دوربین پرسرعت ثبت و به تصویر کشیده شد. فالتینسن و ژائو [۶] در یک تحقیق آزمایشگاهی-عددی به ورود اجسام متقارن به آب، هنگامی که زاویه بین جسم و سطح آب بسیار کم است پرداختند. آن‌ها نتایج آزمایشگاهی خود را با نتایجی که با

² Reynolds number

³ Froude number

⁴ Cavity

استفاده از روش المان مرزی به دست آوردند را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند که تطابق خوبی حاصل شد. آن‌ها یک فرمول را نیز برای جرم افزوده شده^۵ وابسته به زمان در محاسبه نیروی برخورد معرفی کردند. در سال ۲۰۰۳ کوی و همکاران [۷] در تحقیقی آزمایشگاهی در مورد چگونگی تأثیر پدیده میکرو-حباب بر کاهش نیروی پسا هنگام سقوط یک گوی (با چندین اندازه و ماده مختلف) در آب مطالعاتی انجام دادند. آن‌ها گوی‌های مورد آزمایش را با ماده‌ای ویژه که هنگام تماس با آب تولید حباب‌هایی در مقیاس میکرو می‌کرد پوشاندند. آن‌ها پس انجام این آزمایش‌ها دریافتند که در گوی‌هایی که با این ماده خاص پوشانده شده‌اند، نیروی پسا به میزان ۱۵ درصد نسبت به گوی‌هایی که با این ماده پوشانده نشده‌اند کمتر است. در سال ۲۰۰۹ تروسکات و همکاران [۸] ورود به آب پرتابه‌های بالستیک با زاویه کم را در آزمایشگاه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از ورود به آب پرتابه‌های بالستیک با دوربین پرسرعت تصاویری را تهیه کردند و در مورد کاواک^۶ تشکیل شده در پشت این پرتابه‌ها مطالعاتی را انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که پرتابه‌های با نسبت طول به قطر کمتر، داخل کاواک بخار در حالت ناپایداری قرار می‌گیرند و مدام منحرف می‌شوند درحالی که پرتابه‌های با نسبت طول به قطر بیشتر، پایداری بیشتری در کاواک بخار دارند و اثر دیواره‌های کاواک بر آن‌ها کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر این تروسکات [۹] در پایان‌نامه خود، در یک تحقیق آزمایشگاهی اثر آب‌گریزی^۷ و آب‌دوستی^۸ سطح، سرعت چرخشی و نسبت چگالی بر نحوه تشکیل کاواک گلوله‌های کروی و استوانه‌ای هنگام ورود به آب را بررسی کرد. نتایج آزمایش‌های تروسکات نشان داد تفاوت قابل توجهی بین سرعت سقوط گلوله‌های بدون تشکیل کاواک و گلوله‌های که اطراف آن‌ها کاواک تشکیل می‌شود از میان سیال وجود دارد.

⁵ Added Mass

⁶ Cavity

⁷ Hydrophobic

⁸ Hydrophilic

تروسکات و تشت [۱۰] در سال ۲۰۰۹ در مورد ورود به آب گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز دارای چرخش مطالعاتی آزمایشگاهی را انجام دادند. آن‌ها پس از ثبت تصاویر ورود به آب این گوی‌ها با دوربین پرسرعت مشاهده کردند که در هنگام ورود به آب گوی‌های دارای سرعت چرخش عرضی یک گوه از جنس سیال تشکیل می‌شود که از کاواک تشکیل شده در پشت سیال به شکل عرضی عبور می‌کنند. آن‌ها دریافتند که این گوه تشکیل شده می‌تواند روی سرعت سقوط گوی‌ها در سیال تأثیر بگذارد. آریستوف و بوش [۱۱] نیز در سال ۲۰۰۹ ورود به آب گوی‌های کوچک آب‌گریز را در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در مورد ساختار و ویژگی‌های کاواک‌های تشکیل شده در اثر ورود گوی‌های آب‌گریز مطالعه کردند و یک مدل تحلیلی را برای شکل‌های متفاوت کاواک ارائه دادند و در نهایت برای بهبود وضعیت پاشش آب گوی‌های آب‌گریز هنگام برخورد به سطح آب با عدد وبر^۹ بالا یک مدل تئوری را نیز ارائه دادند. همچنین آریستوف و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۰ یک تحقیق جامع آزمایشگاهی و تحلیلی در مورد ورود به آب گوی‌های مختلف (با جنس‌های مختلف) را انجام دادند. آن‌ها با استفاده از دوربین پرسرعت تصاویر ورود به آب گوی‌های مختلف را ثبت کردند و زمان و عمق جدایش کاواک تشکیل شده ناشی از برخورد گوی‌ها به سطح آب را اندازه‌گیری کردند. تشت و تروسکات [۱۳] در سال ۲۰۱۱ نیز در مورد ورود به آب گوی‌های آب‌دوست و آب‌گریز دارای چرخش نیز تحقیق آزمایشگاهی را انجام دادند. آن‌ها در مورد نحوه تشکیل کاواک، مسیر حرکت و نیروهای وارد به این گوی‌ها مطالعاتی را انجام دادند. در سال ۲۰۱۲ مارستون و همکاران [۱۴] مشاهدات خود را از ورود به آب گوی‌های داغ و سرد از جنس آهن، آگاته و تنگستن-کاربید به سیال C_6F_{14} را گزارش کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در برخوردهای با سرعت بالا، کاواک شکل گرفته در پشت گوی‌های داغ و سرد از نظر کیفی شبیه به هم هستند. در سال ۲۰۱۴ بادیلی و همکاران [۱۵] در مورد سقوط پرتابه‌های استوانه‌ای شکل با دماغه‌های مختلف (صاف، گرد و مخروطی شکل) مطالعه‌ای آزمایشگاهی انجام دادند. آن‌ها یک مدار الکتریکی را درون این پرتابه

⁹ Weber number

قرار دادند که می‌توانست نیروها، سرعت‌ها و مسیر حرکت استوانه درون آب را اندازه‌گیری کند. آن‌ها با استفاده از مدار الکتریکی ذکر شده توانستند ضریب نیروهای لیفت و پسا لحظه‌ای را اندازه‌گیری کنند. آن‌ها دریافتند که نیروی برخورد استوانه با دماغه صاف هنگامی که به‌صورت مایل وارد آب می‌شود کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۴ منصور و همکاران [۱۶] تحقیقی آزمایشگاهی را در مورد ورود به آب گوی‌های فوق‌ابگریز در رژیم توسعه‌یافته، در دامنه عدد فراد ($18 < Fr < 960$) انجام دادند. آن‌ها مکانیزمی بنام محافظ پرده پاشش آب^{۱۰} را ساختند که از ورود قطره‌های آب به کاواک تشکیل شده در هنگام ورود گوی‌ها به آب جلوگیری می‌کرد. آن‌ها مشاهده کردند که عمق و زمان نقطه جدایش کاواک^{۱۱}، کاواک^{۱۱}، شدیداً تابع اندازه و سرعت برخورد گوی‌ها به سطح آب است. در سال ۲۰۱۶ جیانگ و همکاران [۱۷] به مطالعه عددی در مورد تشکیل پدیده سوپر‌کاویتاسیون ناشی از ورود به آب پرتابه‌های استوانه‌ای شکل با سرعت بالا تحت تأثیر مواد افزودنی کاهنده پسا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن مواد کاهنده پسا به آب می‌تواند باعث افزایش سوپر‌کاویتاسیون شود و در پی آن نیروی پسا اطراف پرتابه کاهش می‌یابد. مارستون و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۶ در مورد چگونگی پاشش قطره‌های آب پس از برخورد گوی به سطح آب تحقیق کردند. آن‌ها دریافتند هنگامی که گوی به سطح آب برخورد می‌کند، پس از شکل‌گیری دو جت ناپایدار در کناره‌های گوی یک پرده پاشش آب^{۱۲} به شکل تاج به وجود می‌آید که یک ناپایداری انقباضی دارد و باعث فروریزش در کاواک می‌شود. لوف و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۸ در مورد چگونگی شکل‌گیری ریبیل^{۱۳} (موج‌های تشکیل شده روی دیواره کاواک) که بعد از ورود پرتابه‌های مخروطی شکل (با زوایای ورود به آب مختلف) و هنگام جدایش کاواک در اطراف پرتابه

¹⁰ Splash Guard

¹¹ Cavity Pinch Off

¹² Splash Curtain

¹³ Ripples

تشکیل می‌شوند، تحقیقی آزمایشگاهی را انجام دادند. آن‌ها طول موج و دامنه‌ی ریبیل شکل گرفته روی سطح کاواک اطراف پرتابه را گزارش کردند. آن‌ها دریافتند که نیروی اندازه‌گیری شده با نیروی تخمین زده‌شده به وسیله ریبیل‌ها تناسب خطی دارد.

۱-۲-۲- پژوهش‌های تحلیلی

اولین پژوهش تحلیلی که در مورد تعیین نیروهای برخورد به آب منتشر شده است نیز به سال ۱۹۲۹ و ون کارمن باز [۱] می‌گردد. ون کارمن با استفاده از اصولی همچون بقای ممنتوم و مفهوم جرم اضافه شده، نیروهای برخورد را که هنگام ورود به آب شناورها به آن‌ها وارد می‌شود را محاسبه کرده است. ون کارمن فرض کرد که در حین اولین مراحل برخورد، ممنتوم مجموعه آب و جسم ثابت باقی می‌ماند و سرعت جسم کاهش می‌آید درحالی‌که به دلیل اضافه شدن جرمی از آب که با سرعت لحظه‌ای جسم جامد حرکت می‌کند، جرم جسم اضافه می‌شود، که به جرم اضافه‌شده معروف است. بر مبنای نظریه ون کارمن، تعیین نیروی حداکثر برخورد وابسته به تعیین جرم اضافه‌شده و مشتق آن است. محاسبه جرم اضافه‌شده شدیداً به تغییر شکل سطح آزاد جسم وابسته است که اغلب محاسبه آن بسیار دشوار است. اغلب پژوهشگرانی که از سال ۱۹۲۹ تا ۱۹۵۹ در مورد ورود به آب اجسام تحقیقاتی را انجام می‌دادند به ادامه‌ی پژوهش‌های ون کارمن پرداختند که در سال ۱۹۵۹ شبهلی [۲۰] در یک تحقیق جامع به‌مرور و بررسی همه‌ی آن‌ها پرداخت. در ۱۹۹۱ میلیو [۲۲،۲۱] مسئله ورود به آب گوی‌های صلب را بررسی کرد. ایشان یک حل تحلیلی برای تعیین نیروهای برخورد در حین ورود زاویه‌دار کره به آب توسعه داد. در همین سال هویسون [۲۳] نتایج تحلیلی گذشته در مورد برخورد اجسام دوبعدی با سطح آب را خلاصه کرد و گسترش داد.

آریتسوف و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۹ مطالعاتی تحلیلی در مورد ورود به آب گوی‌های آب‌گریز و استوانه‌های عمودی انجام دادند. آن‌ها یک مدل تئوری برای پیش‌بینی کمیت‌های مهمی همچون عمق

و زمان جدایش کاواک، عمق استوانه در زمان جدایش کاواک و حجم کاواک پشت جسم توسعه دادند. گرچه تاکنون حل‌های تحلیلی مختلفی برای مسئله ورود به آب اجسام مختلف ارائه شده است، اما این روش‌ها به دلیل فرضیات ساده کننده‌ای که برخی از اثرات مهم از جمله لزجت جریان را نادیده می‌گیرند، با گسترش رایانه‌های امروزی جای خود را به شبیه‌سازی‌های عددی داده‌اند.

۱-۲-۳- پژوهش‌های عددی

شبیه‌سازی‌های عددی که توسط محققین مختلف در مورد کنش میان سازه سیال انجام شده است را می‌توان به دو دیدگاه کلی تقسیم‌بندی نمود:

روش‌های شبیه‌سازی تقریبی و روش‌های شبیه‌سازی مستقیم. در روش‌های شبیه‌سازی‌های تقریبی از فرض‌های ساده کننده‌ای همچون جریان پتانسیل یا جریان استوکس استفاده می‌شود و به همین علت توانایی در نظر گرفتن برخی اثرات مهم از جمله اثر لزجت و جدایش جریان را ندارند. آنجیلری و اسپیزیکا [۲۴] در سال ۱۹۹۵، با استفاده از روش المان محدود، برخورد عمودی یک کره صلب را روی سطح آب بررسی کردند و آزمایش‌هایی برای به دست آوردن تغییرات شتاب کره حین برخورد را در جهت صحت‌سنجی روش عددی مورد استفاده انجام دادند. هو [۲۵] در سال ۱۹۹۶، و اسماعیلی و تریگویسون [۲۶] در سال ۱۹۹۸ مروری جامع بر شبیه‌سازی‌های تقریبی عددی انجام دادند. در سال ۲۰۰۳ اینگل و لوئیس [۲۷]، نتایج فشارها و نیروهای هیدرودینامیک حاصل از برخورد عمودی با سطح آب را با استفاده از چندین روش مختلف (کد پنل سه‌بعدی، روش المان مرزی دوبعدی و مدل‌سازی المان محدود)، به دست آورده و سپس با نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی واگن [۲۸] و چوانگ [۲۹] مقایسه و تطابق مناسبی مشاهده نمودند. کوربین و اوکوسو [۳۰] در سال ۲۰۰۴، پژوهشی روی کوپلینگ هیدرو الاستیکی مدل المان محدود با تئوری واگن [۲۸] برای مسئله برخورد به آب انجام دادند. هدف اینکار امکان‌سنجی کوپلینگ مستقیم روش المان محدود برای قسمت سازه‌ای باحالتی از

تئوری واگن در مورد بارهای هیدرودینامیکی در حین برخورد یک جسم الاستیکی به سطح آب بود. در این تحقیق یک روش توانمند ارائه شد و برای حالت دوبعدی صحت سنجی شد، لازم به ذکر است که کاربرد این روش برای هر جسم الاستیک با زاویه مرده کم می‌باشد. باتیستین و افراتی [۳۱] در سال ۲۰۰۳، به بررسی عددی ورود به آب عمودی یک جسم دوبعدی متقارن و غیرمتقارن با شکل پرداختند. این بررسی با در نظر گرفتن جریان پتانسیل یک سیال تراکم ناپذیر با صرف‌نظر از اثرهای گرانش و کشش سطحی انجام شد. در این تحقیق شبیه‌سازی با استفاده از روش المان مرزی انجام شد و شرایط مرزی سطح آزاد کاملاً غیرخطی بود. تمرکز این پژوهش روی ارزیابی توزیع فشار و بار کلی هیدرودینامیکی وارده بر جسم برخوردکننده بوده است. آن‌ها صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده را برای استوانه، کره و مخروط انجام دادند. پارک و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۰۳، در پژوهشی عددی، روشی را برای محاسبه نیروهای برخورد و کمانش اجسامی که با سرعت زیاد وارد آب می‌شوند ارائه کردند. آن‌ها با صرف‌نظر کردن از لزجت سیال جریان پتانسیل را غیر لزج فرض کردند. این فرض مقدار زیادی از زمان محاسبات را کاهش داد درحالی‌که با در نظر گرفتن شرایط سطح آزاد غیرخطی، دقت حل همچنان در سطح قابل قبولی باقی ماند. آن‌ها مسئله را با روش پانل^{۱۴} حل کردند که در این روش جسم به پانل یا المان‌ها تقسیم می‌شود و هر پانل می‌تواند کاملاً شناور، تا حدی شناور و یا کاملاً خارج از آب باشد. آن‌ها نتایج به دست آمده را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند و تا حد زیادی تطابق نتایج حاصل شد. در سال ۲۰۰۴ راو [۳۳]، تحقیقی عددی و تجربی در مورد برخورد یک زیردریایی با سطح آب انجام داد. او در این پژوهش از روش المان محدود برای به وجود آوردن مدل ساده‌شده و از روش پانل منبع برای محاسبه جرم اضافه‌شده، استفاده کرد. کلیفسمن و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۰۵، ورود به آب اجسام گوه‌ای و استوانه‌ای شکل را با حل معادلات ناویر استوکس و با استفاده از روش نسبت حجمی سیال و گسسته سازی معادلات روی شبکه کارترین ثابت به‌صورت دوبعدی بررسی

¹⁴ Panel Method

کرده‌اند. یانگ و همکاران [۳۵] در سال ۲۰۰۷ ورود به آب تیغه‌های متقارن و نامتقارن را با زوایای ورود خیلی کم^{۱۵} (کمتر از ۴ درجه) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از روش‌های عددی نیروهای هیدرودینامیکی حاصل از برخورد این تیغه‌ها به سطح آب را به دست آوردند. فایرلی کلراک و تویتنس [۳۶]، در سال ۲۰۰۷ تحقیقی را در مورد برخورد گوه‌های به سطح آب را انجام دادند. در مطالعه آن‌ها از تحلیل دینامیک سیالات محاسبات برای تعیین اندازه حرکت جرم اضافه‌شده، اندازه حرکت جریان و اثرات گرانش هنگام ورود به آب اجسام گوه‌ای شکل با سرعت ثابت با زاویه ۵ درجه تا ۴۵ درجه استفاده شده است. روش حل عددی آن‌ها روش حجم محدود بوده که توسط نرم‌افزار فلونت^{۱۶} صورت گرفته است. کیم و همکاران [۳۷]، در سال ۲۰۰۷ مسئله ورود به آب را برای اجسام متقارن با استفاده از روش هیدرودینامیک ذره تحلیل کرده‌اند. یانگ و کیو [۳۸]، در سال ۲۰۱۲ نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر پرتابه را در حین ورود به آب به صورت عددی تحلیل کردند. آن‌ها معادلات ناویر استوکس را به شیوه‌ی المان مرزی حل کردند و همه‌ی ابعاد مسئله را مورد بررسی قرار دادند. وو [۳۹] در سال ۲۰۱۲ با استفاده از روش المان مرزی برخورد گوه با سطح آب را شبیه‌سازی کرد. او پیوستگی پتانسیل و سرعت را درگره‌های هر المان در نظر گرفت، و سپس نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد که تا حد هر دو نتیجه تا حد قابل قبولی باهم مطابقت داشتند. احمدزاده و همکاران [۴۰] در سال ۲۰۱۴ با استفاده از نرم‌افزار آباگوس و به روش کوپل اویلر-لاگرانژ شبیه‌سازی عددی برخورد یک گوی به سطح آزاد را انجام دادند. آن‌ها شبیه‌سازی را برای گوی‌های با اندازه و وزن‌های متفاوت انجام دادند و سپس نتایج را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند که با یکدیگر مطابقت داشتند.

¹⁵ Shallow Angels

¹⁶ Fluent

۱-۲-۴ - پیشینه تحقیق اثر دما بر ورود اجسام به آب

پدیده لیدنفروست اولین بار توسط یوهان گوتلب لیدنفروست [۴۱] مطرح شد، او در سال ۱۷۵۶ در کتاب خود چگونگی به وجود آمدن پدیده‌ی لیدنفروست را شرح داد. او در این کتاب توضیح داد که هنگامی که یک صفحه‌ی فلزی بسیار داغ روی آتش قرار گرفته است و روی آن مقداری آب ریخته می‌شود، قسمتی از آب به صورت قطره‌هایی درمی‌آید که روی صفحه حرکت می‌کنند و تبخیر نمی‌شوند و این مسئله به خاطر ایجاد یک لایه بخار بین قطره‌های آب و صفحه فلزی داغ است.

در سال ۲۰۱۱ واکارلسکی و همکاران [۴۲]، روی چگونگی تشکیل لایه‌های بخار در هنگام ایجاد پدیده لیدنفروست تحقیقاتی انجام دادند. آن‌ها چند گوی فلزی را حرارت داده و با دماهای مختلف در آب و چند مایع دیگر رها کردند و با دوربین پرسرعت از این سقوطها عکس‌برداری کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هر چه سرعت برخورد گوی به سطح آب بیشتر باشد، به عبارتی گوی در حال سقوط عدد رینولدز بیشتری داشته باشد باعث مغشوش شدن لایه‌مرزی در هنگام ایجاد پدیده لیدنفروست می‌شود و پسای فشاری به‌وضوح کاهش می‌آید. هدف اصلی آن‌ها از این تحقیقات بررسی اثر لایه‌های بخار روی ضریب پسا یک گوی جامد که به‌طور آزادانه در چند مایع مختلف رها می‌شود در محدوده رژیم حرکتی زیربحرانی بود. دیوید کوره [۴۳] در سال ۲۰۱۲، روی چگونگی تشکیل پدیده لیدنفروست در سقوط گلوله‌های با دمای بالا تحقیق‌هایی انجام داد، کوره با آزمایش روی چگونگی تشکیل پدیده لیدنفروست، تفاوت فیلم بخار تشکیل شده در گوی‌ها با دماهای مختلف را ثبت کرد. او همچنین به روشی عددی برای محاسبه ضخامت فیلم بخار ایجاد شده در هنگام ایجاد پدیده لیدنفروست دست یافت. جیلیس و همکاران [۴۴] در سال ۲۰۱۲، تحقیقی عددی روی چگونگی کاهش نیروی پسا بر اثر پدیده لیدنفروست انجام دادند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار انسیس سی اف ایکس^{۱۷} حرکت یک استوانه و یک گوی داغ و

¹⁷ Ansys CFX

سرد را در آب با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج تحقیق‌های آن‌ها نشان داد که در هنگام اجسام داغ در آب (در این تحقیق یک استوانه و گوی) به علت دوفازی شدن جریان اطراف این اجسام و وجود لایه‌های بخار ضریب نیروی پسا کاهش چشمگیری دارد و این اجسام هنگامی که داغ هستند با سرعت بیشتری نسبت به هنگامی که سرد هستند در آب حرکت می‌کنند. در پژوهشی دیگر توسط آقای جیلیس و همکاران [۴۵] در سال ۲۰۱۵، تأثیر دمای آب بر سرعت سقوط اجسام کروی مورد مطالعه قرار گرفته است. آن‌ها سه گوی فلزی از جنس فولاد ضدزنگ، مس و آلومینیوم را در دماهای مختلف گرم کردند و سپس در یک استخر کوچک پر از آب رها کردند. آن‌ها پس از امتحان کردن دماهای مختلف آب به این نتیجه رسیدند که افزایش سرعت سقوط به‌طور مستقیم با رشد دمای اجسام مطابقت ندارد و در برخی از تست‌ها استثناءهایی مشاهده می‌شود. البته به‌طور کلی با افزایش دمای اجسام سرعت سقوط نیز افزایش می‌یابد. یکی از نکته‌های قابل توجه که آقای جیلیس و همکارانش به آن دست یافتند این بود که در رها کردن گوی فلزی با جنس فولاد ضدزنگ در دمای ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد و دمای آب ۱۴ درجه سانتی‌گراد بیشترین سرعت سقوط ثبت شد و یک تفاوت ۲۵ درصدی را با گویی که دمای محیط را داشت ثبت کرد. بعلاوه آن‌ها بیان می‌کنند که در حالت کلی با افزایش دمای آب سرعت سقوط نیز افزایش پیدا می‌کند، زیرا شرایط تشکیل بخار بهبود پیدا می‌کند که در دمای ۹۹ درجه سانتی‌گراد (دمای آب) بیشترین افزایش سرعت سقوط گوی‌ها که افزایشی ۳۷-۳۸ درصدی است، ثبت شده است. در سال ۲۰۱۷ منصور و همکاران [۴۶]، پایداری خطوط جریان و حفره‌های خورشیدی شکل به دنبال برخورد گوی‌های لیدنفرست شده به سطح سیال C_6F_{14} مورد را مورد مطالعه قرار گرفته دادند. آن‌ها نشان دادند که، پس از برخورد گوی‌های لیدنفرست کاواک‌های مارپیچ^{۱۸} شکل و همچنین ریب‌های کوچک و بزرگی در زیر آب به وجود می‌آیند. نتایج آن‌ها نشان داد که پس از برخورد گوی‌های لیدنفرست به سطح این سیال، کاواک‌های کشیده همراه با امواج آبشاری حلقه‌ای شکل بر اثر آشفتگی

¹⁸ Helical Cavity

فشاری به وجود می‌آیند. همچنین نشان دادند که عدم وجود ارتباط فیزیکی بین گوی فلزی و مایع، که ناشی از قرار گرفتن گوی در یک کپسول از جنس بخار است، و برای هموار کردن امواجی که در بستر حفره به وجود آمده‌اند ضروری است.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

امروزه کاهش نیروی پسا یکی از چالش‌های اصلی علم هیدرودینامیک و آئرو دینامیک است. تا به امروز روش‌های زیادی برای کاهش نیروی پسا پیشنهاد شده است و بسیاری از این روش‌ها نیز به کاربرد صنعتی رسیده است. چالش برانگیزترین قسمت از تحقیق‌های انجام شده در مورد کاهش نیروی پسا، مربوط به کاهش این نیرو در آب می‌باشد. در هنگام حرکت اجسام در زیر آب به دلیل لزجت بالای آب همواره پسای زیادی ایجاد می‌شود که افزایش مصرف سوخت و به دنبال آن افزایش مصرف هزینه‌ها را به دنبال دارد. تا به حال موضوعات بسیاری برای کاهش نیروی پسا در آب مورد مطالعه قرار گرفته است که از جمله این موضوعات می‌توان به مطالعه‌ی اثر لیدنفرست روی کاهش نیروی پسا، مطالعه‌ی اثر سوپرکاویتاسیون روی کاهش نیروی پسا، ایجاد پوشش‌های آب‌گریز روی سطح اجسام، پوشش دادن اجسام با موادی که هنگام تماس با آب تولید حباب می‌کنند و موضوعات بسیار دیگری اشاره کرد. اما یکی از موضوعاتی که همواره مغفول مانده است، مطالعه‌ی هم‌زمان چند اثر مربوط به کاهش نیروی پسا باهم و بخصوص مطالعه‌ی چند اثر هم‌زمان بر روی سقوط یک پرتابه درون آب می‌باشد، زیرا اکثر موضوعاتی که مورد مطالعه قرار گرفته است بیشتر آنالیز جریان حول یک جسم بوده است و کمتر موضوع سقوط یک جسم و مطالعه‌ی اثرات مختلف در کاهش نیروی پسا و افزایش سرعت سقوط مورد مطالعه قرار گرفته است. لذا لازم است که تحقیقی جامع در این مورد صورت گیرد. در این پژوهش اثر دما و شیار سطحی بر سرعت سقوط هفت گوی فولادی که یکی از آن‌ها بدون شیار و شش گوی دیگر دارای شش الگوی شیار سطحی هستند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در یک رژیم برخورد نیز گوی‌ها در سه دمای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

۱-۴- نوآوری تحقیق

در این پژوهش اثر شیار سطحی و دما به صورت جداگانه و باهم بر سرعت سقوط گوی‌های فولادی مورد مطالعه قرار گرفته است. این شیارها با شش الگوی متفاوت به صورت شیارهای افقی و عمودی روی سطح گوی‌ها ایجاد شده‌اند. هم‌چنین در این پژوهش اثر شیار سطحی بر چگونگی تشکیل کاواک، طول کاواک، قطر کاواک، طول نقطه جدایش کاواک، زمان جدایش کاواک، ضریب نیروی هیدرودینامیکی و شتاب مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

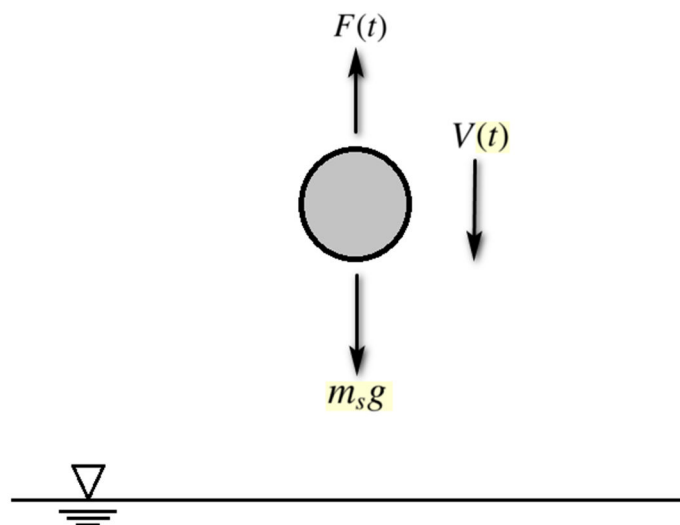
در فصل اول این پژوهش مفاهیم و پیشینه تحقیق آورده شده . در فصل دوم تئوری برخورد و معادلات حاکم مورد مطالعه قرار گرفته است. در فصل سوم مسئله مورد تحقیق و بستر آزمایشگاهی معرفی شده است و در فصل چهارم نتایج و تفسیر آن‌ها آورده شده است. در فصل پنجم نیز می‌توان جمع‌بندی نتایج و پیشنهادهایی را برای ادامه این پژوهش مشاهده کرد.

فصل ۲:

تئوری برخورد و معادلات حاکم

۱-۲- تئوری برخورد و معادلات حاکم

تابه حال آزمایش‌های زیادی به منظور بررسی پدیده برخورد و پاشش قطرات آب هنگام برخورد یک جسم به سطح آزاد آب انجام شده است و مدل‌های زیادی برای تشریح این پدیده‌ها تعریف و توسعه داده شده است، اما پدیده برخورد به سطح آزاد آب نیز از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است و همه‌ی مدل‌ها توانایی تشریح همه ابعاد و ویژگی‌های پدیده برخورد را ندارند. همان‌طور که در فصل دوم گفته شده اولین کسانی که به منظور فهمیدن نیروهای اعمال شده به یک قایق به هنگام ورود به آب این پدیده‌ها را مطالعه کردند فون کارمن [۱] و واگن [۲۸] بودند. آن‌ها برخی از این نیروها را هنگام ورود به آب قایق محاسبه و مدلی تحلیلی را تعریف کردند. اگر یک گوی جامد را هنگام برخورد به سطح آب در نظر بگیرید (شکل ۱-۲)، نیروهای مختلفی هنگام برخورد به سطح آب و حرکت در آن به گوی وارد می‌شود که با توجه به رژیم‌ها از یک جنس هستند. همان‌طور که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود، $V(t)$ سرعت گوی هنگام برخورد به سطح آب، $F(t)$ مجموع نیروهای مقاوم گوی است، که شامل سه نیرو می‌شود و $m_s g$ نیز نیروی وزن است که باعث حرکت گوی به سمت پایین می‌شود.



شکل ۱-۲: دیاگرام نیروهای یک گوی هنگام برخورد به سطح آب

با استفاده از قانون دوم نیوتن می‌توان برای نیروهایی که در شکل ۱-۲ وجود دارند نوشت:

$$\sum F = ma \quad (۱-۲)$$

$$m_s g - F(t) = \frac{d}{d(t)} [m_s V(t)] \quad (۲-۲)$$

که می‌توان $V(t)$ را به صورت زیر تعریف کرد:

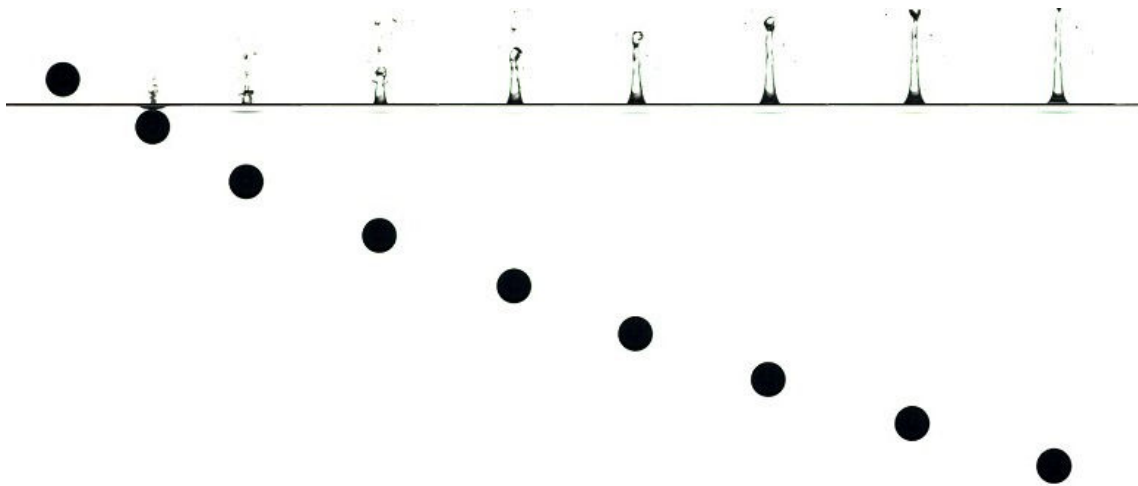
$$V(t) = \frac{mV_0}{m + m_a(t)} \quad (۳-۲)$$

که در رابطه‌ی بالا V_0 سرعت اولیه گوی، m وزن گوی و m_a جرم اضافه شده می‌باشد، در واقع جرم اضافه شده اثر یا به عبارتی دیگر نیرویی است که به خاطر وزن اضافه شده سیال هنگام برخورد جسم به سطح آب یا حرکت در زیر آب در نظر می‌گیرند. در رابطه (۲-۴)، $F(t)$ خود شامل سه نوع نیرو می‌باشد که نیروهای فشاری، پسای اصطکاک پوستی (تنش‌های سطحی) یا همان پسای لزجی که ناشی از لزجت سیال می‌باشد و نیروی ناشی جرم افزوده، البته در برخی از منابع نیروی کشش سطحی آب هم به عنوان یک نیروی تأثیرگذار در نظر گرفته شده است. نیروهای پسای لزجت و کشش سطحی در مقایسه با نیروی وزن تقریباً کوچک هستند. بنابراین اگر نیروی خالص هیدرودینامیکی که روی کره ایفای نقش می‌کند با توجه به وزن گوی مهم است، پس از آن گوی تحت السلطه نیروی فشاری است که شامل نیروی ناپایدار جرم افزوده شده و شناوری هیدرو استاتیک است. در نمونه‌هایی که پس از برخورد به سطح آب کاواک ایجاد می‌شود، نیروی فشاری به وسیله کاواک تشکیل شده در زیر سطح آب تعدیل می‌شود و در نمونه‌هایی که پس از برخورد به سطح آب کاواک تشکیل نمی‌شود نیروی فشاری به وسیله گردابه‌ها و از هم پاشیدن حباب‌های کوچک و لخته‌های هوا تعدیل می‌شود. در رابطه ۲-۴ می‌توان نیروهای وارد به گوی را هنگام ورود به آب مشاهده کرد.

$$F(t) = F_b(t) + F_a(t) + F_d(t) \quad (۴-۲)$$

که $F_b(t)$ نیروی شناوری، $F_a(t)$ نیروی کشش سطحی آب و $F_d(t)$ پسای ویسکوز می‌باشد، که هر کدام

از این نیروها به تفصیل معرفی خواهند شد. در ابتدا لازم است قبل از معرفی نیروها حالت‌های مختلف برخورد به سطح آب توضیح داده شود. فارغ از رژیم‌های مختلف برخورد که در ادامه به تفصیل توضیح داده خواهد شد در حالت کلی برخورد به سطح آزاد آب دو حالت کلی دارد که برخورد همراه با تشکیل کاواک و بدون تشکیل کاواک می‌باشد. در واقعاً هنگام برخورد گوی به سطح آب اگر زاویه برخورد که در ادامه متن درباره‌ی آن توضیح داده خواهد شد، در حالت عادی باشد گوی بدون تشکیل کاواک وارد آب می‌شود، اما اگر هنگام برخورد زاویه برخورد تغییر کند که این پدیده یا با ایجاد پوشش آب‌گریز روی سطح گوی اتفاق می‌افتد، باعث تشکیل کاواک یا در واقع کشیدن هوا به داخل آب و تشکیل حفره‌ای از هوا می‌شود که به آن در اصطلاح علمی کاواک می‌گویند، در شکل ۲-۲ می‌توان برخورد یک گوی با سطح آب بدون تشکیل کاواک و در شکل ۳-۲ نیز می‌توان برخورد یک گوی به سطح آب و تشکیل کاواک را مشاهده کرد. البته کاواک در رژیم‌های متفاوت برخورد و اجسام مختلف شکل‌های متفاوتی دارد ولی فرآیند تشکیل آن‌ها به یک‌شکل است. دمای آب نیز در تشکیل نوع و اندازه کاواک مؤثر است زیرا با تغییر دمای آب کشش سطحی آب نیز تغییر پیدا می‌کند و به دنبال آن زاویه‌ی برخورد با سطح آب تغییر پیدا می‌کند و همین موضوع باعث تغییر در اندازه‌ی کاواک می‌شود. در اجسامی که فاقد پوشش آب‌گریز می‌باشند با حرارت دادن به سطح تا حدی که باعث شود آبی که با سطح تماس پیدا می‌کند بخار شود، و پدیده جوشش بحرانی اتفاق می‌افتد که در این حالت لایه‌ای از بخار اطراف جسم را فرا می‌گیرد (در دماهای زیاد یک کاواک بزرگ بخار تشکیل می‌شود) و مانع از تماس سطح جسم با آب می‌شود که بدین‌وسیله نیروی پسای اصطکاکی در اطراف گوی کاهش پیدا کرده و سرعت حرکت آن در آب افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۲-۲: برخورد گوی بدون شیار با سطح آب بدون تشکیل کاواک



شکل ۲-۳: برخورد گوی با سطح دارای شیار به سطح آب و تشکیل کاواک

۲-۱-۱- نیروی شناوری

همان طور که اشاره شد نیروی شناوری $F_b(t)$ یک نیرو از مجموع نیروهای مقاوم هنگام برخورد و حرکت گوی در سیال است. این نیرو در هنگامی که کاواک اطراف جسم تشکیل شود و قبل از اینکه جدایش کاواک رخ دهد ناشی از فشار هیدرو استاتیک می باشد. نیروی شناوری هنگامی که در اطراف جسم کاواک تشکیل شود و هنگامی که اطراف جسم کاواک وجود نداشته باشد به شکلی متفاوت محاسبه می گردد.

نیروی شناوری هنگامی که هنوز جدایش کاواک رخ نداده است (شکل ۲-۴) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_b(t) = \rho(2/3)\pi R_0^3 g + \rho g[Z(t) - R_0]\pi R_0^2 \quad (۵-۲)$$

که در رابطه (۵-۲)، ρ چگالی آب، R_0 شعاع گوی، g شتاب جاذبه و $Z(t)$ فاصله بالاترین نقطه کاواک (نزدیک به سطح آب) تا انتهای گوی می‌باشد. بعد از اینکه کاواک به نقطه جدایش رسید، کاواک به دو قسمت تقسیم می‌شود، و به دلیل تغییر اندازه کاواک نیروی شناوری را باید به روش دیگری محاسبه کرد. برای این منظور باید حجم کاواک متصل به گوی (شکل ۲-۵) را محاسبه کرد، این کار را می‌توان با استفاده از تقریب منحنی خطی قطعه‌ای به منظور ایجاد یک منحنی بسته زنجیری شکل برای نیمی از کاواک متصل به گوی انجام داد و چون کاواک متصل به گوی دارای تقارن می‌باشد می‌توان آن را دو برابر کرد تا سطح کاواک و گوی به دست آید و سپس با انتگرال گرفتن از آن حجم به دست می‌آید که فرمول مستقیم محاسبه حجم گوی و کاواک متصل به آن پس از انتگرال‌گیری در ادامه ذکر می‌شود. نیروی شناوری یک سیستم کاواک-گوی بسته که با مایع احاطه شده است به وسیله رابطه $F_b = \rho V_c g$ محاسبه می‌شود که در این رابطه، V_c حجم ادغام شده کاواک-گوی می‌باشد. V_c را می‌توان با روشی که ذکر شد به دست آورد که با استفاده از شکل ۲-۵ خواهیم داشت:

$$V_c = \pi D_c^2 \left(\frac{L_e}{6} + \frac{2L_r}{15} \right) \quad (۶-۲)$$

که در رابطه (۶-۲)، D_c قطر کاواک، L_e همان گونه که در شکل ۲-۵ می‌توان مشاهده کرد طول بخشی پایینی کاواک گوی و L_r هم با توجه به شکل ۲-۵ طول بخش بالایی کاواک است (حجم قسمت پایین کاواک که متصل به گوی است با استفاده از یک بیضی و حجم قسمت بالا با استفاده از یک پارابولا^{۱۹} محاسبه شده است). از لحظه جدایش کاواک به بعد کاواک متصل به گوی شروع به فروریزش می‌کند

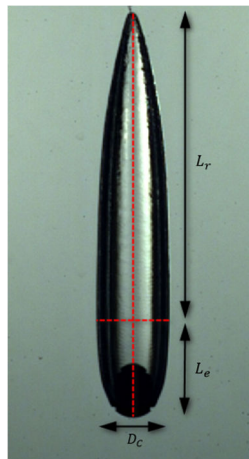
¹⁹ Parabola

تا جایی که دیگر از بین می‌رود و تنها گوی در آب حرکت می‌کند در این حالت می‌توان نیروی شناوری را از رابطه زیر به دست آورد:

$$F_b = (4/3)\pi R_0^2 \rho g \quad (7-2)$$



شکل ۲-۴: کاواک قبل از لحظه جدایش. $U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$, $B = 13.6$, $W = 27^\circ$, $Fr = 2^\circ$, $Re_0 = 993^\circ$, $D_0 = 2^\circ \text{ [mm]}$



شکل ۲-۵: کاواک متصل به گوی بعد از لحظه جدایش. , $U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$, $B = 13.6$, $W = 27 \text{ [g]}$, $F = 0.001 \text{ [N]}$, $Re_0 = 993 \text{ [mm]}$, $D_0 = 20 \text{ [mm]}$

۲-۱-۲- نیروی (اثر) جرم اضافه شده

هنگام برخورد گوی به سطح آب و حرکت در آن مقداری از مایع در اطراف گوی جابجا می‌شود و با آن حرکت می‌کند، در واقع از شتاب مایعی که گوی را احاطه کرده است می‌توان رابطه زیر را بیان کرد:

$$F_a(t) = m_a \ddot{Z}(t) \quad (۸-۲)$$

$$F_a(t) = C_m V_c \rho \ddot{Z}(t) \quad (۹-۲)$$

در رابطه‌های بالا C_m ضریب جرم اضافه شده و $\ddot{Z}(t)$ شتاب است. اگرچه مقدار V_c در زمانی که فروریزش اتفاق می‌افتد ایجاد می‌کند و C_m نیز بستگی به الگوی جریان اطراف گوی دارد، میانگین ثابت جرم اضافه شده برای اجسام متناسب با خطوط جریان^{۲۰} در کل مسیر سقوط گوی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$m_a = 0.672 \rho [(1/6) \pi L_c D_c^2] \quad (۱۰-۲)$$

جرم اضافه شده برای گوی‌هایی که کاواک به آن‌ها متصل نیست، به‌سادگی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$m_a = C_m V \rho \quad (۱۱-۲)$$

²⁰ Streamlined Bodies

که در این عبارت مقدار C_m برابر با 0.5 است.

۲-۱-۳- نیروی پسای لزجت

ضریب پسای کلی یک گوی هنگام حرکت در آب را می‌توان با توجه به رابطه ۲-۴ به صورت زیر محاسبه کرد:

$$F_d(t) = F(t) - F_a(t) - F_b(t) \quad (12-2)$$

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

رابطه (۱۳-۲) همان‌طور که ذکر شد برای محاسبه ضریب پسای کلی گوی است و چون مقدار نیروی شناوری و جرم افزوده شده در فازهای مختلف سقوط متفاوت است، برای محاسبه ضریب پسای هر فاز باید نیروی شناوری و جرم افزوده‌شده را متناسب با همان فاز در رابطه (۱۳-۲) قرار داد که برای فاز قبل از جدایش کاواک خواهیم داشت:

$$C_D(t) = \frac{m_s[g - \ddot{Z}(t)] - \left[0.672\rho\left(\frac{1}{6}\pi L_C D_C^2\right)\right]\ddot{Z}(t) - \left[\rho\frac{2}{3}\pi R_0^3 g + \rho g[Z(t) - R_0]\pi R_0^2\right]}{\frac{1}{2}\rho[\dot{Z}(t)^2]\pi R_0^2} \quad (14-2)$$

و برای فاز بعد از جدایش کاواک:

$$C_D(t) = \frac{m_s[g - \ddot{Z}(t)] - \left[0.672\rho\left(\frac{1}{6}\pi L_C D_C^2\right)\right]\ddot{Z}(t) - \rho V_C g}{\frac{1}{2}\rho[\dot{Z}(t)^2]\pi R_0^2} \quad (15-2)$$

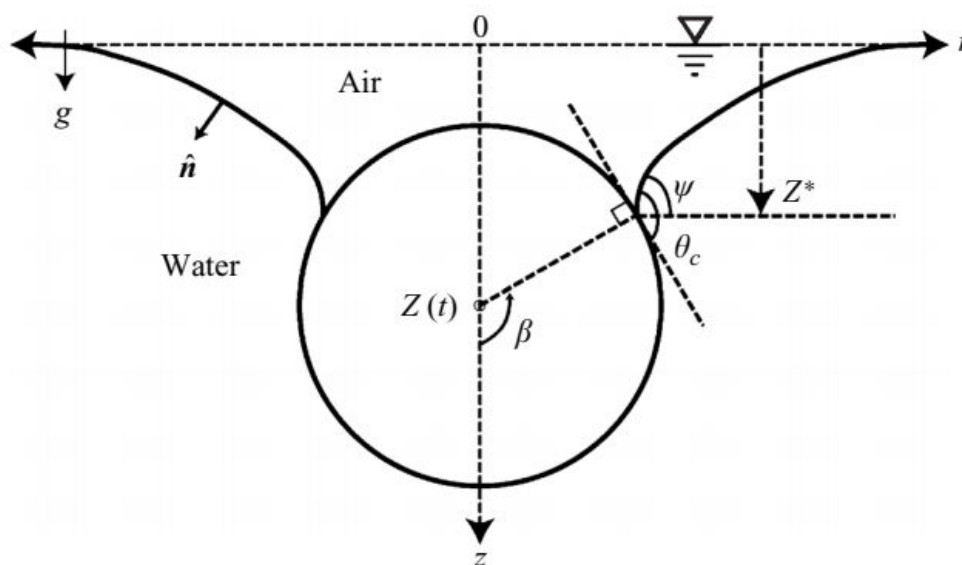
در فاز انتهایی که کاواک بر اثر فروریزش از گوی جدا شده است، ضریب پسا از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_D(t) = \frac{m_s[g - \ddot{Z}(t)] - \frac{3}{4}\pi R_0^3 \rho \left[\frac{1}{2}\ddot{Z}(t) + g\right]}{\frac{1}{2}\rho[\dot{Z}(t)^2]\pi R_0^2} \quad (16-2)$$

۲-۱-۴- نیروی کشش سطحی آب

نیروی کشش سطحی آب در هنگام برخورد اجسام با سطح آزاد آب تأثیر بسزایی روی حرکت اجسام در آب دارد و ارتباط مستقیمی با دما دارد، باکم شدن دما نیروی کشش سطحی آب افزایش و با افزایش دما کاهش می‌یابد. بردار نیروی کشش سطحی آب $F_c(t)$ در هنگام برخورد گوی به سمت بالا است و این نیرو را می‌توان با استفاده از رابطه (۲-۱۷) به دست آورد. که در این رابطه Ψ زاویه‌ای است که کواک مجاور گوی با محور افقی می‌سازد، $2\pi R_0 \sin \beta$ طول حلقه تماس و σ کشش سطحی آب است.

$$F_c(t) = 2\pi R_0 \sigma \sin \beta \sin \Psi \quad (۲-۱۷)$$



شکل ۲-۶: ورود به آب یک گوی در رژیم شبه استاتیک [۱۱]

۲-۱-۵- ضریب کل نیروهای هیدرودینامیکی

ضریب کل نیروهای هیدرودینامیکی رفتاری کلی گوی را در هنگام حرکت در آب را مشخص و در واقع نیروی کل هیدرودینامیکی مجموع کل نیروهای شناوری، پسا و دیگر نیروها را مدل می‌کند. این نیرو را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

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

۲-۲- اعداد بی بعد مهم:

در خصوص اعداد بی بعد تأثیرگذار و مهم نیز می توان عددهای زیر را معرفی کرد.

الف- عدد رینولدز

عدد رینولدز، یک عدد بی بعد است که نسبت نیروهای اینرسی به لزجت را بیان کرده و درجه اهمیت نسبی این دو نیرو را به صورت کمی بیان می کند.

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (19-2)$$

ب- عدد فراد

این عدد نسبت نیروی اینرسی به نیروی وزن را بیان می کند:

$$Fr = \frac{U_0^2}{gR_0} \quad (20-2)$$

در مبحث برخورد پرتابه ها به سطح آب این عدد از اهمیت خاصی برخوردار است زیرا می توان انتقال از یک رژیم برخورد به رژیم دیگر را با توجه به این عدد فهمید.

پ- عدد وبر

این عدد نسبت نیروی اینرسی به کشش سطحی را بیان می کند:

$$W = \frac{\rho U_0 R_0}{\sigma} \quad (21-2)$$

عدد وبر در مطالعه سطح مشترک گاز- مایع، مایع- مایع و مایع- جامد (جدار لوله یا کانال) اهمیت دارد و در مواردی که جسم بسیار بزرگ است این عدد بسیار کوچک و قابل چشم پوشی است.

ت- عدد باند

عدد باند^{۲۱} عبارت است از نسبت نیروی گرانشی به نیروی کشش سطحی که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Bo = \frac{\rho g R_0}{\sigma} \quad (۲۲-۲)$$

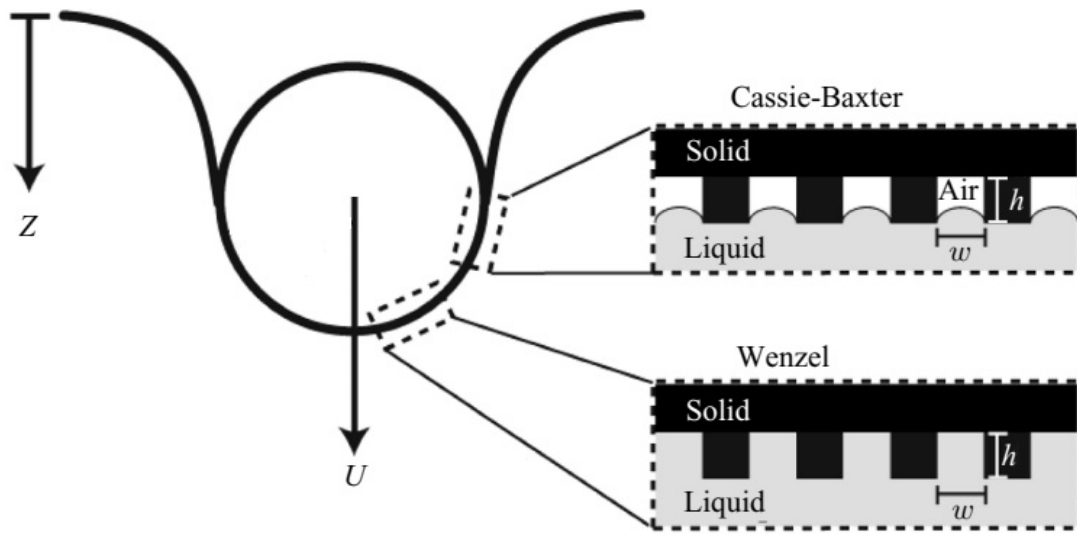
۳-۲- آب‌دوستی و آب‌گریزی

هنگامی که جسمی جامد به سطح آب برخورد می‌کند معمولاً قطره‌های آب به اطراف پاشیده می‌شوند که الگو و نحوی این پاشش ارتباط مستقیمی با سطح جسم جامد دارد. طبق پژوهش انجام شده توسط دیوز و همکاران [۴۷] میزان رطوبت دوستی جسم هنگام برخورد به سطح آب عاملی کلیدی در تعیین درجه پاشش قطره‌های آب است. در واقع سطوح آب‌گریز با افزایش زاویه تماس باعث ایجاد کاواک می‌شوند، در شکل ۸-۲ (الف) می‌توان ورود به آب یک جسم بدون تغییر زاویه برخورد و در شکل ۸-۲ (ب) نیز می‌توان ورود به آب یک جسم با تغییر زاویه برخورد را مشاهده کرد. معمولاً آب‌گریزی روی سطوح را می‌توان با استفاده از پاشش پوشش‌های آب‌گریز که سطحی متخلخل را ایجاد می‌کنند یا ایجاد ناهمواری روی سطوح ایجاد کرد، در هر دو حالت در بین منافذ سطوح هوا گیر افتاده و چون هوا خاصیت آب‌گریزی دارد، کاواک ایجاد می‌شود و هوا به درون آب کشیده می‌شود. آریستوف و بوش [۱۱] در پژوهش خود درباره سقوط گوی‌های کوچک آب‌گریز به داخل آب، این سطوح رو به دو وضعیت تقسیم کرده‌اند، سطوحی در آن‌ها هوا بین آب و سطح جامد قرار می‌گیرد و خیس نمی‌شوند^{۲۲} و سطوحی که در نهایت در تماس با آب کاملاً خیس می‌شوند^{۲۳} (شکل ۷-۲).

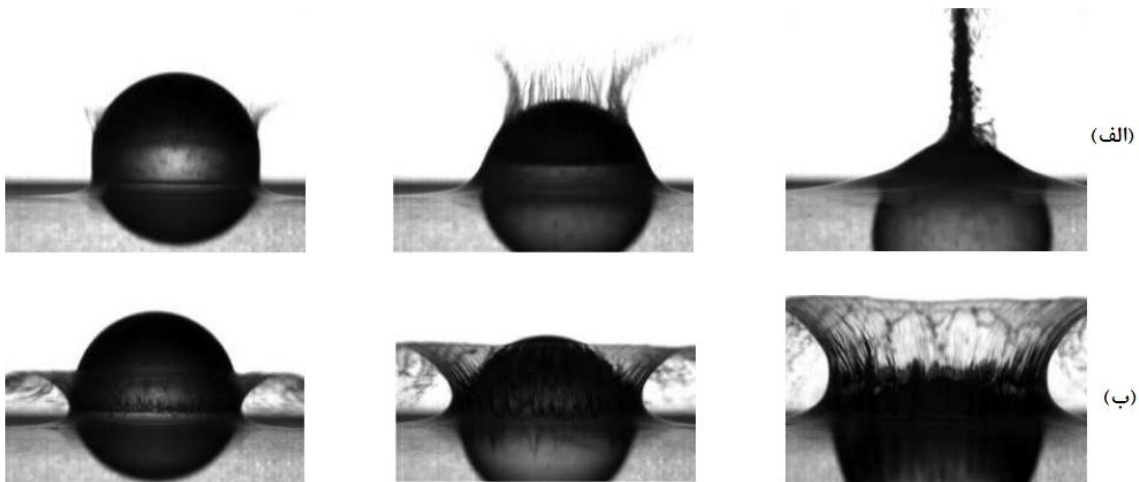
²¹ Bond number

²² Cassie-Baxter

²³ Wenzel



شکل ۲-۷: مقایسه شماتیک سطوحی که در تماس با آب خیس نمی‌شوند و سطوحی که در تماس با آب خیس می‌شوند [۱۱]

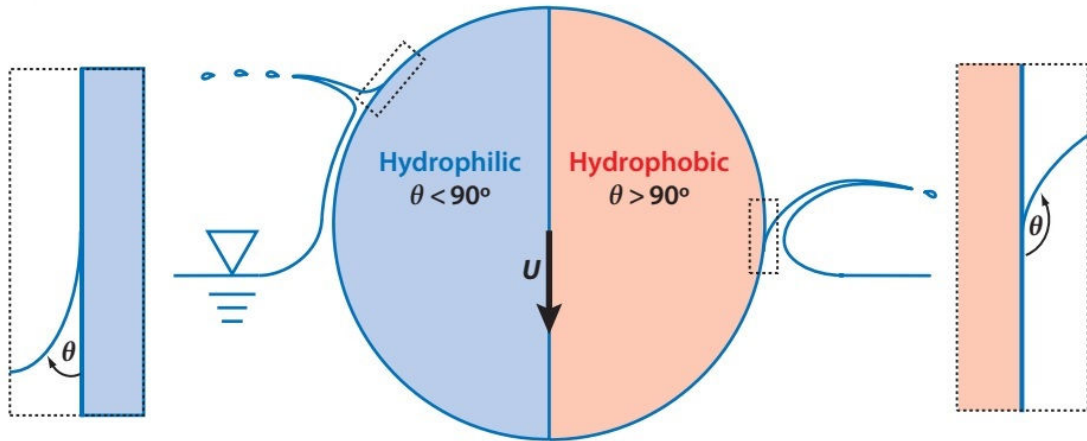


شکل ۲-۸: (الف) ورود یک گوی با سطح آب‌دوست به آب. (ب) ورود یک گوی با سطح آب‌گریز به آب [۴۷]

۲-۳-۱- زاویه تماس

این زاویه در واقع زاویه بین خط تماس آب و جسم است که در منابع مختلف با نمادهای θ_a ، θ و θ_d

نشان داده شده است و زاویه تماس پیشرو، زاویه تماس دینامیک و زاویه خیسی^{۲۴} نیز نامیده می‌شود. این زاویه برای اجسام آب‌گریز بیشتر از ۹۰ درجه است و برای اجسام آب‌دوست کمتر از ۹۰ درجه می‌باشد (شکل ۲-۹).



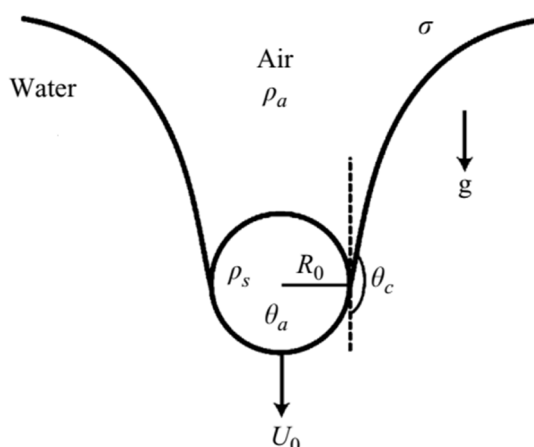
شکل ۲-۹: مقایسه رفتار سطح آب‌گریز و آب‌دوست هنگام ورود به آب [۴۸]

۲-۳-۲- زاویه مخروطی

به زاویه‌ای که کاواک با خط مماس بر سطح گوی می‌سازد زاویه مخروطی^{۲۵} گفته می‌شود. آریستوف و بوش [۱۱] در مشاهدات خود به این نکته اشاره کرده‌اند که چون در برخوردهای با سرعت بالا به سطح آب مشاهده جزئیات خط تماس برخورد بسیار سخت است، به همین علت چون اندازه‌گیری زاویه مخروطی نسبت به زاویه تماس راحت‌تر است می‌توان در مطالعات برخورد به سطح آب از این زاویه بجای زاویه تماس استفاده کرد، در شکل ۲-۱۰ می‌توان شماتیک این زاویه در هنگام برخورد گوی به سطح آب را مشاهده کرد.

²⁴ Wetted angle

²⁵ Cone angle



شکل ۲-۱۰: شماتیک معرفی زاویه مخروطی گوی و کاواک

۲-۴- رژیم‌های برخورد

در برخورد گوی با سطح آب رژیم‌های متفاوتی وجود دارد که معمولاً مرز به وجود آمدن این رژیم‌ها را با عدد وبر و گاهی با عدد فرود مشخص می‌شود و به وجود آمدن این رژیم‌ها به سرعت برخورد گوی به سطح آب بستگی دارد و لازم به ذکر است با تغییر سایز گوی‌ها نیز رژیم تغییر می‌کند و رژیم ایجاد شده به عدد باند بستگی پیدا می‌کند. طبق پژوهش انجام شده توسط آریستوف و بوش [۱۱] در هنگام برخورد گوی به سطح آب چهار نوع رژیم به وجود می‌آید. این چهار رژیم برخورد عبارت‌اند از، شبه استاتیک^۱، جدایش نیمه عمیق^۲، جدایش عمیق^۳ و جدایش سطحی^۴. در شکل ۲-۱۱ می‌توان این چهار چهار رژیم برخورد را بعلاوه برخورد گوی بدون تشکیل کاواک را مشاهده کرد، همچنین در شکل ۲-۱۲ نیز می‌توان شماتیک چگونگی تشکیل کاواک در رژیم جدایش عمیق و جدایش سطحی را مشاهده

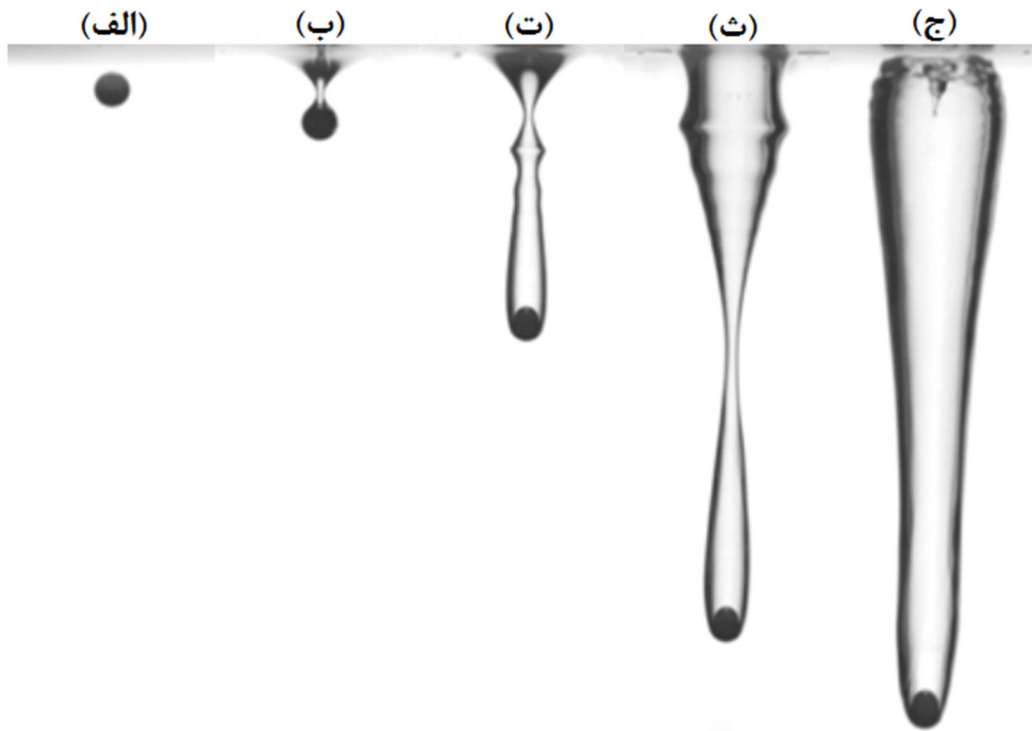
¹ Quasi Static

² Shallow Seal

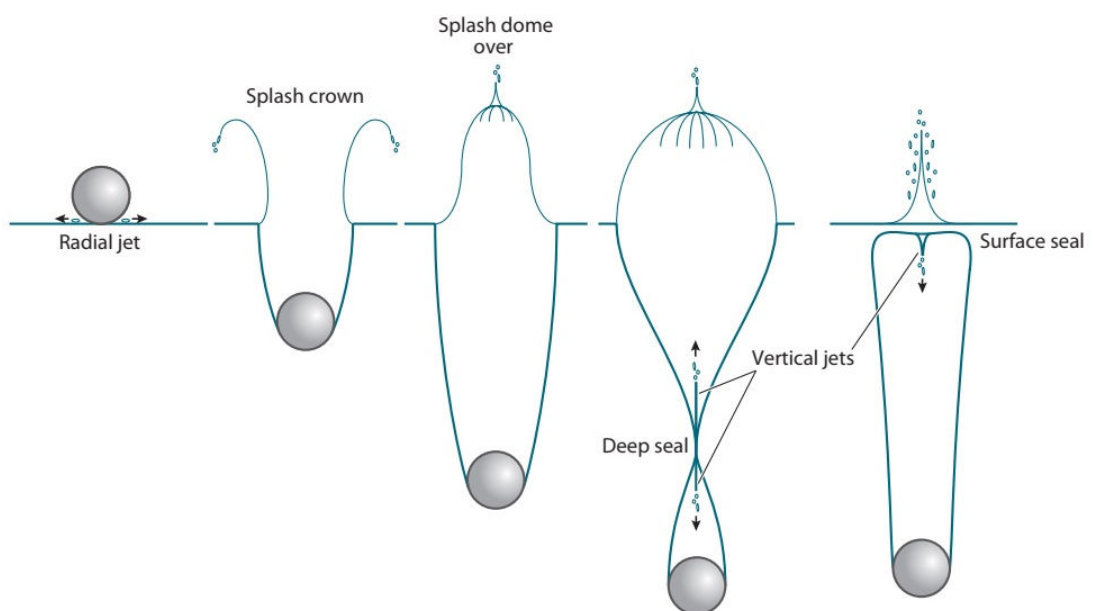
³ Deep Seal

⁴ Surface Seal

نمود.



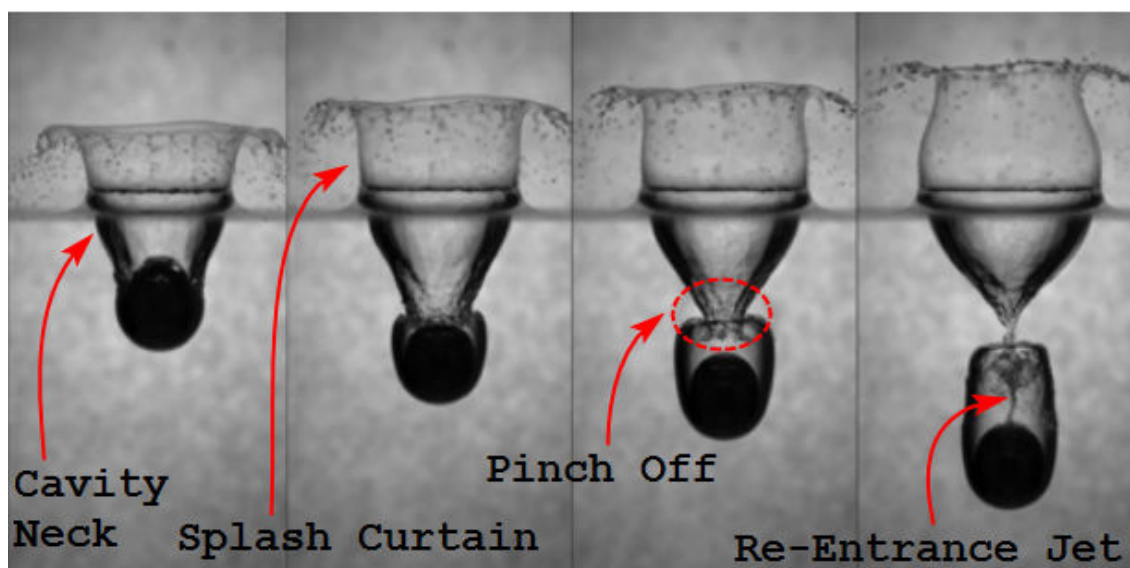
شکل ۲-۱۱: (الف) سقوط گوی بدون ایجاد کاواک در آب. (ب) سقوط گوی درون آب در رژیم شبیه استاتیک. (ت) سقوط گوی درون آب در رژیم جدایش نیمه عمیق. (ث) سقوط گوی درون آب در رژیم جدایش عمیق. (ج) سقوط گوی در رژیم جدایش سطحی [۴۹].



شکل ۲-۱۲: شماتیک چگونگی تشکیل کاواک در رژیم جدایش عمیق و جدایش سطحی [۴۸].

۲-۴-۱- معرفی بخش‌های مختلف یک کاواک

در هنگام برخورد یک جسم به سطح آب، معمولاً سه عامل باعث ایجاد کاواک می‌شوند، تغییر زاویه برخورد بین جسم و آب (معمولاً در برخورد سطوح آب‌گریز دیده می‌شود)، سرعت بالای جسم هنگام برخورد به سطح آب که باعث ایجاد پدیده کاویتاسیون می‌شود و حرارت بالای جسم هنگام برخورد به سطح آب که باعث ایجاد پدیده لیدنفرست می‌شود. در تغییر زاویه برخورد بین جسم و آب، جنس کاواک تشکیل شده از هوا است اما در دو عامل بعدی که ذکر شد، جنس کاواک تشکیل شده از بخار آب مخلوط با هوا می‌باشد. شکل ۲-۱۳ برخورد یک گوی با سیال C_6F_{14} و تشکیل کاواک پس از برخورد را نشان می‌دهد.

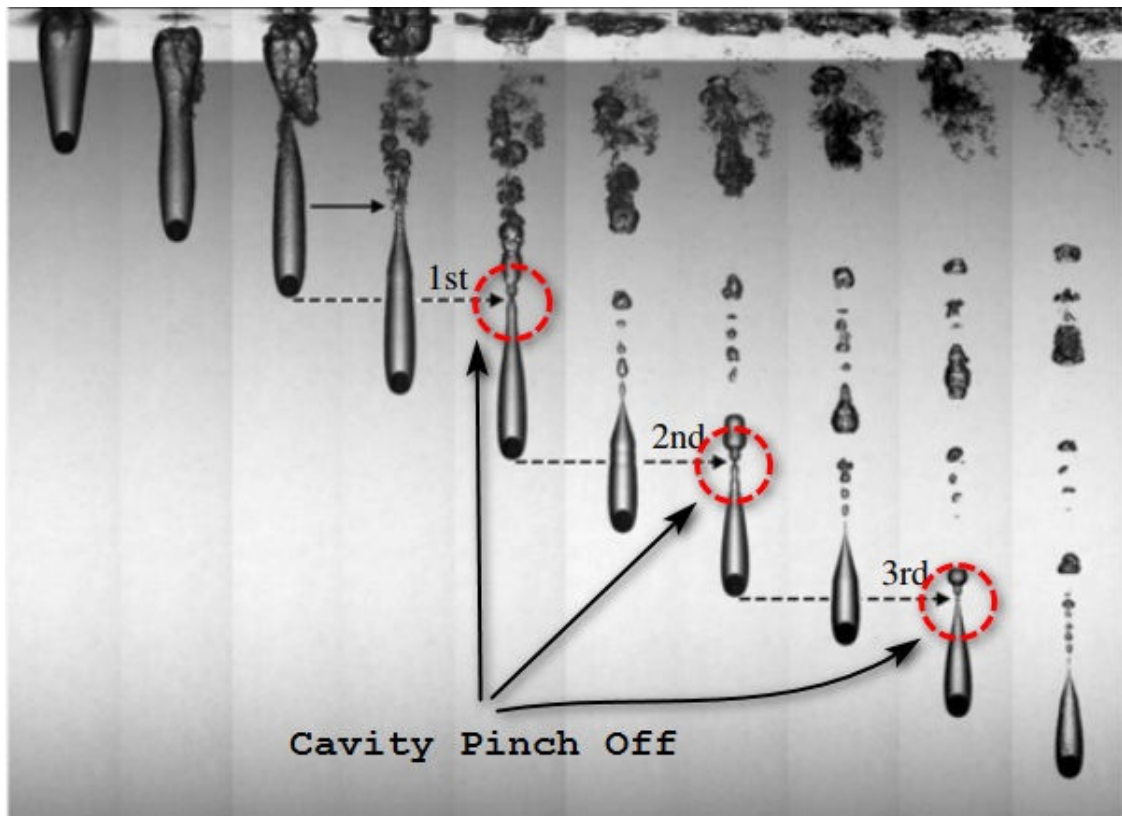


شکل ۲-۱۳: معرفی قسمت‌های یک کاواک [۱۴].

۲-۴-۱-۱- نقطه جدایش کاواک

پس از برخورد گوی به سطح آب و تشکیل کاواک، گوی به سمت پایین حرکت می‌کند تا جایی که کاواکی که پشت گوی تشکیل شده است و گوی را در بر گرفته است به دو قسمت تقسیم می‌شود، به

نقطه‌ای که کاواک به دو قسمت تقسیم می‌شود نقطه جدایش کاواک می‌گویند. این نقطه در رژیم‌های مختلف برخورد در فاصله‌های مختلفی از کاواک رخ می‌دهد و کاملاً وابسته به رژیم برخورد است و حتی ممکن است یک کاواک چندین نقطه جدایش متعدد داشته باشد. شکل ۲-۱۴ یک برخورد گوی با دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با سطح آب و تشکیل کاواک و جدایش چندباره آن را نشان می‌دهد.

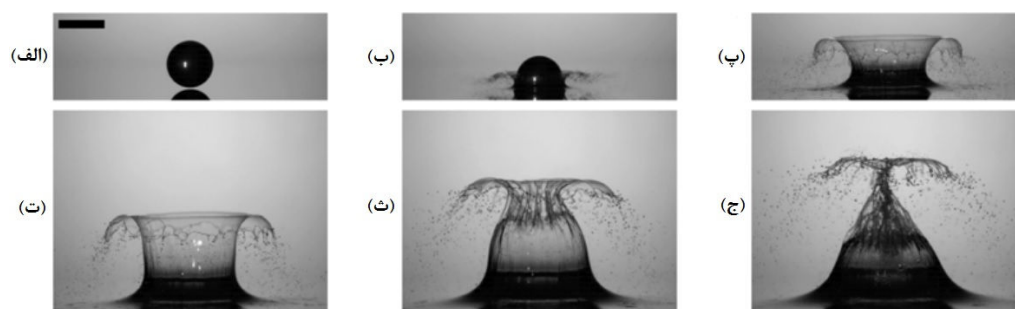


شکل ۲-۱۴: جدایش کاواک اطراف یک گوی در چندین مرحله [۱۶]

۲-۱-۴-۲- پرده پاشش آب

بعد از برخورد هر جسمی به سطح آب، در اثر نیروی برخورد جسم قطره‌های آب از سطح جدا شده و در هوا پراکنده می‌شوند که با توجه به جسمی که به سطح برخورد می‌کند این پراکندگی قطره‌ها می‌تواند بی‌نظم و یا دارای نظم خاصی باشد. هنگامی که با برخورد جسم به سطح آب کاواک تشکیل می‌شود علاوه بر پاشش قطرات آب یک پرده آب از لحظه‌ای که جسم به سطح آب برخورد از سطح آب بلند می‌شود (شروع به رشد می‌کند) و با توجه به شکل جسمی که به سطح برخورد می‌کند و رژیمی

که جسم در آن به سطح آب برخورد می‌کند، شکل خاصی به خود می‌گیرد، که این پدیده پرده پاشش آب^۱ نام داد. طبق پژوهش انجام شده توسط مارستون و همکاران [۱۸]، هنگامی که یک گوی به سطح آب برخورد می‌کند (گویی که پس از برخورد به سطح آب کاواک تشکیل دهد) یک جت شعاعی^۲ در اطراف محل برخورد گوی به سطح آب تشکیل می‌شود و سپس این جت شعاعی رشد می‌کند و به شکل یک تاج درمی‌آید و پرده پاشش آب را تشکیل می‌دهد، در شکل ۲-۱۵ می‌توان روند شکل‌گیری یک پرده پاشش آب را مشاهده کرد. در نهایت پرده پاشش آب بر اثر یک ناپایداری کمانشی بسته شده و فروریزش می‌کند که شکل ۲-۱۶ بیانگر همین موضوع است.



شکل ۲-۱۵: (الف-ج) روند شکل‌گیری پرده پاشش تاجی شکل پس از برخورد یک گوی به سطح مایع C_6F_{14} [۱۸]



¹ Splash Curtain

² Radial Jet

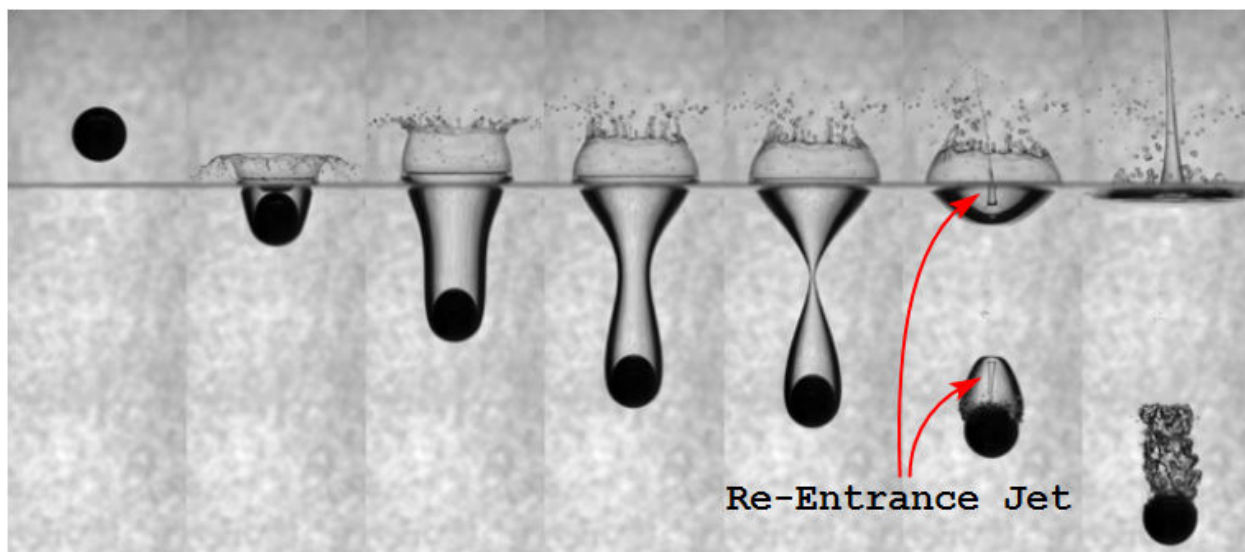
شکل ۲-۱۶: وجود ناپایداری انقباضی در پرده پاشش تاجی شکل [۱۸]

۲-۴-۱-۳- جت برگشتی

بعد از اینکه در یک کاواک جدایش رخ می‌دهد، کاواک به دو قسمت تقسیم می‌شود که یک قسمت به صورت یک کاواک بسته گوی را احاطه کرده و با گوی به سمت پایین حرکت می‌کند و قسمت دیگر که یک کاواک باز است به سمت سطح آب حرکت می‌کند، هنگام حرکت هر دو کاواک به سمت بالا و پایین یک جت آب برگشتی^۱ در جهت حرکت کاواک (یکی به سمت پایین و دیگری به سمت بالا) تشکیل می‌شود که ابتدا قطر کمی دارد و سپس بر قطر آن افزوده می‌شود. در کاواکی که به سمت سطح آب حرکت می‌کند، علت تشکیل این جت نیروی کشش سطحی آب و نیروی فشار آب که به جداره‌های کاواک وارد می‌شود است، هنگامی که گوی در رژیم شبه استاتیک و جدایش نیمه عمیق به سطح آب برخورد می‌کند جت به شکلی کاملاً صاف و بدون اینکه از مسیر خود منحرف شود به سمت بالا حرکت می‌کند و به مرور قطر آن افزایش می‌یابد و قسمتی از نوک جت به صورت قطره‌های آب پاشیده می‌شود و پس از کاهش سرعت آن، در اثر نیروی جاذبه به سمت پایین فروریزش می‌کند، سرعت این جت در ابتدای حرکت بسیار زیاد است. در رژیم جدایش عمیق بعد از جدایش کاواک دو جت برگشتی تشکیل می‌شود که یکی به سمت سطح آب حرکت می‌کند و دیگری همراه با کاواکی به گوی متصل است به سمت پایین حرکت می‌کند. در این رژیم جت برگشتی به سمت بالا هنگام برخورد با آبشار پرده پاشش^۲ آب برخورد می‌کند و جت میرا می‌شود. در شکل ۲-۱۷ می‌توان تشکیل جت برگشتی در رژیم جدایش عمیق را مشاهده نمود.

¹ Re-Entrance Jet

² Splash Curtain Waterfall



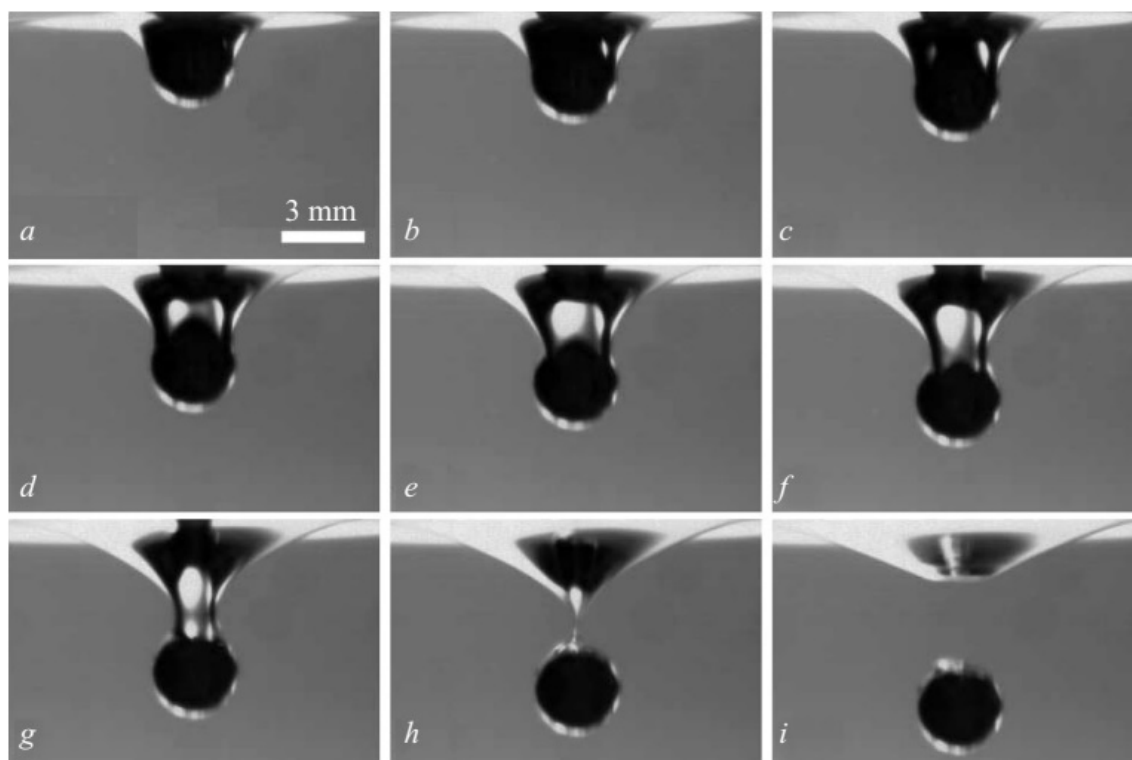
شکل ۲-۱۷: شکل‌گیری جت برگشتی در رژیم جدایش عمیق [۱۸]

۲-۴-۲- رژیم شبه استاتیک:

این رژیم معمولاً در سرعت‌های بسیار پایین رخ می‌دهد و مقدار عدد وبر و فرود نیز بسیار پایین است، البته قطر گوی نیز بسیار مهم است و با افزایش قطر گوی مقدار عدد وبر و فرود که رژیم شبه استاتیک در محدوده آن‌ها رخ می‌دهد نیز افزایش پیدا می‌کند که متعاقباً عدد باند افزایش پیدا می‌کند. پس از برخورد گوی به سطح آب در رژیم شبه استاتیک، گوی به آرامی غرق می‌شود و کاملاً در آب فرو می‌رود و سپس یک کاواک کوچک تشکیل می‌شود و به دلیل اینکه در این رژیم بین جاذبه و کشش سطحی آب یک تعادل وجود دارد، این کاواک پایداری بالایی دارد و اصطلاحاً به آن هلال پایدار^۱ نیز می‌گویند. در این رژیم ورود هوا به داخل سیال بسیار کم است و پس از جدایش کاواک تنها یک حباب کوچک روی سطح گوی باقی می‌ماند تا قسمتی از مسیر به گوی چسبیده است و پس از آن از سطح گوی جدا می‌شود. کاواک تشکیل شده نیز به سمت سطح آب حرکت می‌کند و یک جت برگشتی کوچک نیز

¹ Static Meniscus

تشکیل می‌شود که به سمت بالا حرکت می‌کند، در شکل ۲-۱۸ می‌توان روند ورود یک گوی آب‌گریز در رژیم شبه استاتیک را مشاهده کرد. آریستوف و بوش [۱۱] در آزمایش‌های خود مشاهده کردند که در رژیم شبه استاتیک اندازه کاواک تشکیل شده هنگام ورود به آب گوی با پوشش آب‌گریز تقریباً برابر با گوی معمولی و بدون پوشش آب‌گریز است.

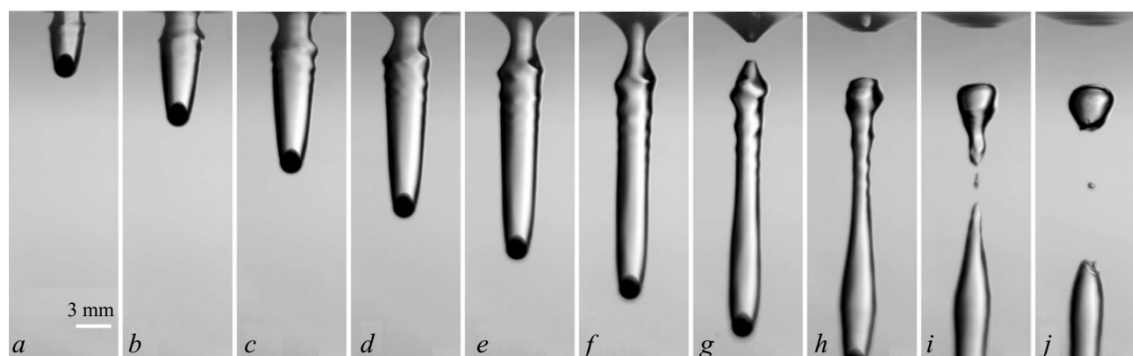


شکل ۲-۱۸: ورود یک گوی به آب در رژیم شبه استاتیک [۱۱]

۲-۴-۳- رژیم جدایش نیمه عمیق

با بالا رفتن سرعت برخورد گوی به سطح آب و به دنبال آن افزایش عدد فراد و وبر، هنگام برخورد گوی‌ها به سطح آب یک کاواک هوا که اندازه آن هم قابل توجه است به وجود می‌آید، که این کاواک به سمت پایین گسترده می‌شود. پس از پایین رفتن گوی، کاواک به نقطه جدایش می‌رسد و قسمت اعظم

کاواک (قسمت بالایی کاواک که اصطلاحاً به آن گردن کاواک^۱ می‌گویند) به سمت سطح آب حرکت می‌کند که همراه با یک جت برگشتی آب است و همچنین قسمتی از کاواک نیز که تقریباً بیشتر گوی را در بر گرفته است، همراه با گوی به سمت پایین حرکت می‌کند و در ادامه مسیر نیز به مرور از انتها شروع به فرو ریزش می‌کند و هم‌زمان یک جت برگشتی کوچک نیز از انتهای گوی شروع به ریزش به سمت پایین می‌کند و پس از آن سطح کاواک بسیار متلاطم و ناهموار می‌شود و موج‌های کوچکی روی دیواره کاواک ایجاد می‌شود (ریپل) که در شکل ۲-۱۹ می‌توان چگونگی تشکیل کاواک پس از برخورد یک گوی آب‌گریز با سطح آب آورده شده است.



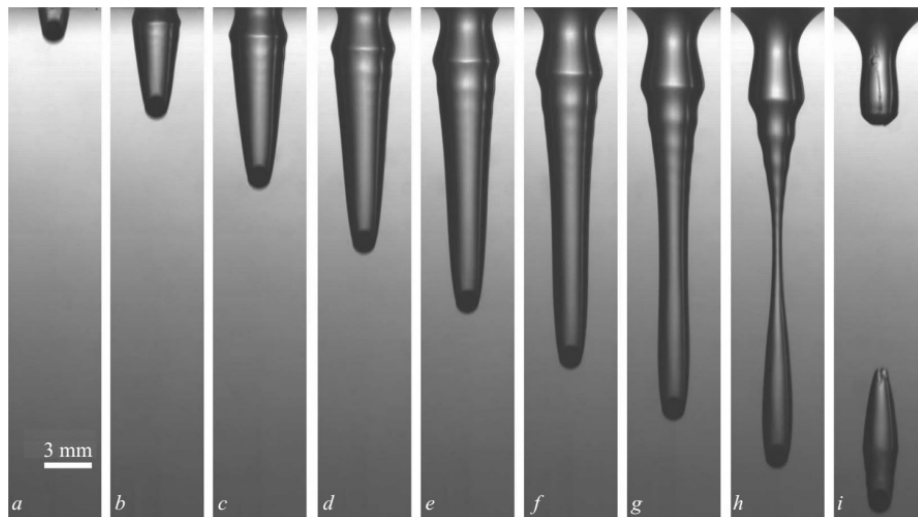
شکل ۲-۱۹: برخورد یک گوی با سطح آب‌گریز به سطح آب در رژیم جدایش نیمه عمیق و تشکیل کاواک [۱۱]

۲-۴-۴- رژیم جدایش عمیق

این رژیم در سرعت‌های بالاتر از سرعتی که در آن رژیم جدایش نیمه عمیق رخ می‌دهد، به وجود می‌آید. در این رژیم هوای بسیار بیشتری در مقایسه با رژیم جدایش نیمه عمیق وارد آب می‌شود و کاواک اندازه بزرگ‌تری دارد. پس از برخورد گوی دار به سطح آب و تشکیل کاواک گوی به سمت پایین حرکت می‌کند و پس اندکی حرکت پرده تشکیل شده ناشی از پاشش آب کاملاً بسته می‌شود و به شکل

¹ Cavity neck

گنبدی درمی‌آید و قسمتی از قطرات آب آن در کاواک می‌ریزد که ناهمواری‌هایی را در سطح بالایی کاواک (گردن کاواک) به وجود می‌آورد و سطح بالایی کاواک را کاملاً متلاطم و ناهموار می‌کند. گوی به سمت پایین حرکت می‌کند تا اینکه کاواک به نقطه جدایش برسد و به دو قسمت تقسیم شود، در این هنگام قسمت بالایی کاواک به همراه یک جت برگشتی به سمت سطح آب حرکت می‌کند و چون بر اثر ریزش قطرات آب ناشی از گنبدی شدن پرده پاشش آب متلاطم شده است قسمتی از آن نیز به سمت پایین فروریزش می‌کند، قسمت دوم کاواک نیز که بیشتر گوی را در برگرفته است و همراه با گوی به سمت پایین می‌رود و روی دیواره‌های آن نیز موج‌هایی با طول‌موج بزرگ‌تر از رژیم جدایش نیمه عمیق تشکیل می‌شود که سرعت انتشارشان تقریباً نصف سرعت حرکت گوی است. در شکل ۲-۲۰ می‌توان شکل‌گیری یک کاواک در رژیم جدایش عمیق را مشاهده نمود.

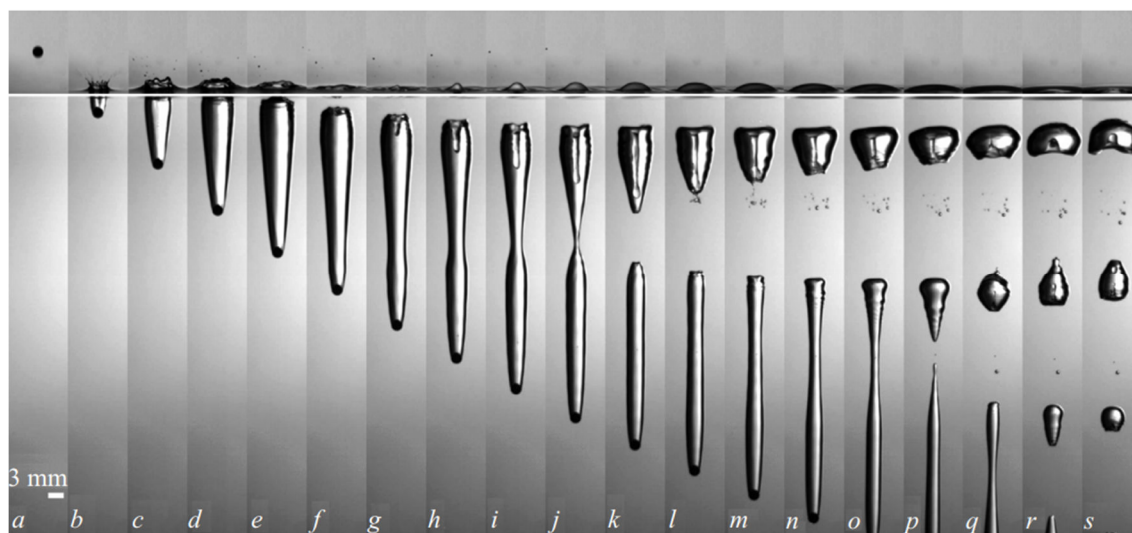


شکل ۲-۲۰: شکل‌گیری کاواک در اطراف یک گوی کوچک با سطح آب‌گریز در رژیم جدایش عمیق [۱۱]

۲-۴-۵- رژیم جدایش سطحی

طبق پژوهش آریستوف و بوش [۱۱]، این رژیم در بالاترین عدد وبر رخ می‌دهد و پس از برخورد گوی به سطح آب و برخلاف رژیم جدایش عمیق که در آن پس از برخورد گوی به سطح آب پرده پاشش آب کاواک کاملاً به شکل گنبدی درمی‌آید و کاواک بالای سطح آب بسته می‌شود، در این رژیم کاواک زیر

سطح آب بسته می‌شود. کاواک به سمت پایین گسترده می‌شود تا جایی که به نقطه جدایش برسد و پس از آن قسمتی از کاواک که گوی را احاطه کرده است همراه با گوی به سمت پایین حرکت می‌کند و قسمت دیگر به سمت سطح آب حرکت می‌کند. در رژیم جدایش سطحی نیز بعد از برخورد گوی با سطح آب و تشکیل کاواک تنها یک جت برگشتی به سمت پایین شکل می‌گیرد که همراه با گوی به سمت پایین حرکت می‌کند تا جایی که کاواک به نقطه جدایش برسد. در شکل ۲-۲۱ می‌توان مشاهده کرد که پس از برخورد یک گوی کوچک آب‌گریز به سطح آب در رژیم جدایش سطحی یک کاواک تشکیل می‌شود که زیر سطح آب بسته شده است و کاواک در این رژیم چندین بار به نقطه جدایش رسیده است.



شکل ۲-۲۱: برخورد یک گوی کوچک با سطح آب‌گریز به سطح آب در رژیم جدایش سطحی [۱۱]

فصل ۳:

معرفی مسئله و بستر آزمایشگاهی

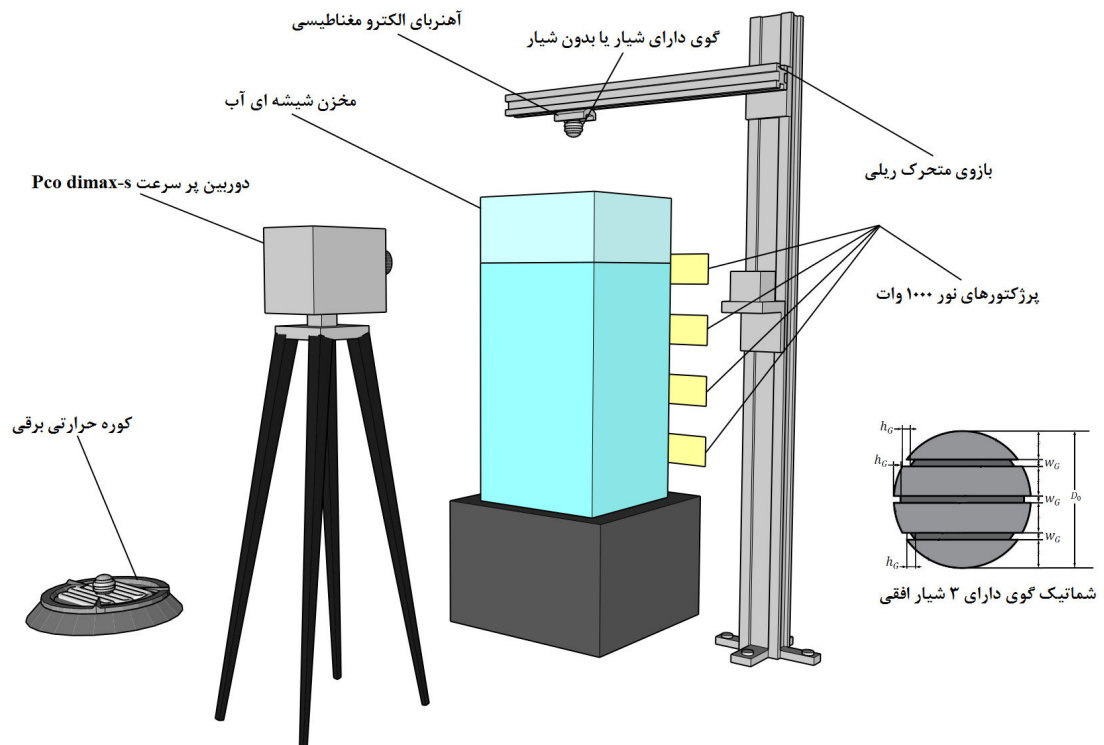
۳-۱- تعریف مسئله

در این پژوهش تأثیر شیار سطحی و حرارت (در یک رژیم سقوط) بر عملکرد هیدرودینامیکی، مسیر حرکت، سرعت، ضریب کل نیروهای هیدرودینامیکی و نحوه شکل‌گیری کاواک چند گوی در چند سرعت مختلف هنگام برخورد به سطح آب و حرکت در آن به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. در رژیم شبه استاتیک (ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر و سرعت ۰/۳۱ متر بر ثانیه) گوی‌ها در دمای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز تست و تأثیر دما بر چگونگی سقوط و حرکت این گوی‌ها در آب مطالعه شده است. و لازم به ذکر است که گوی‌ها در فقط در رژیم شبه استاتیک در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد آزمایش شده‌اند و در بقیه رژیم‌های برخورد به علت سخت بودن تثبیت دمای گوی‌ها، آزمایش رهاسازی گوی‌ها در فقط در دمای محیط انجام شده است.

۳-۱-۱- معرفی بستر آزمایشگاهی

جنس گوی‌های از فولاد است و قطر گوی‌ها ۲۰ میلی‌متر ($D_0 = 20 \text{ [mm]}$)، صافی سطحی گوی‌ها $R_a = 0.06$ و چگالی آن‌ها $\rho_s = 7780.4 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$ است. سطح گوی‌ها به‌صورت افقی و عمودی شیار زده شده و عمق شیارها $h_G = 1.25 \text{ [mm]}$ و عرض شیارها $w_G = 1.0 \text{ [mm]}$ است، برای مثال شماتیک یک گوی دارای شیار را می‌توان در شکل ۳-۱ مشاهده نمود. همان‌طور که در جدول ۳-۱ توضیح داده شده است، تعداد شیارها ۰، ۱، ۳ و ۵ است اگر i تعداد شیارهای افقی و j تعداد شیارهای عمودی باشد، $S_{i,j}$ یک شاخص برای شناسایی هر گوی است برای مثال $S_{5,0}$ شناسه یک گوی پنج شیار افقی و $S_{3,3}$ شناسه یک گوی با ۳ شیار افقی و ۳ شیار عمودی است. تعداد گوی‌ها هفت عدد می‌باشد که یک گوی بدون شیار و شش گوی دیگر در یک فرآیند ماشین‌کاری روی سطح آن‌ها شش‌الگوی مختلف شیار ایجاد شده است و در شکل ۳-۴ نیز می‌توان این گوی‌ها را مشاهده کرد. سیال استفاده

شده در استخر آب شیرین است که چگالی آن $\rho = 998.2 \text{ [kg/m}^3]$ می‌باشد. کشش سطحی آب برابر با $\sigma = 72 \text{ [mN.m}^{-1}]$ و لزجت دینامیک آب نیز برابر با $\mu = 8.90 \times 10^{-3} \text{ [Pa.s]}$ می‌باشد. همه آزمایش‌ها در محدوده دمایی ۲۴ تا ۲۶ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. جنس استخر آب از شیشه و سطح مقطع آن ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر مربع و ارتفاع آن ۸۵ سانتی‌متر است. همان‌طور که در (شکل ۱-۳، ۲-۳ و ۳-۳) مشاهده می‌شود سیستم رهاسازی شامل یک چهارچوب فلزی با یک بازوی متحرک است که یک آهنربای الکترومغناطیسی به این بازو متصل شده و با یک کلید که جریان برق آن را قطع و وصل می‌کند کنترل می‌شود، این بازو در چهار جهت قابل جابجایی است و به وسیله آن می‌توان ارتفاع رهاسازی گوی‌ها را تنظیم کرد. برای حرارت دادن به گوی‌ها از یک کوره آزمایشگاهی استفاده شده است و گوی‌ها در دمای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده و با استفاده از یک انبرک فلزی به آهنربای الکترومغناطیسی متصل شده‌اند که در (شکل ۳-۵) می‌توان این کوره را هنگام حرارت دادن به یک گوی مشاهده کرد. اندازه‌گیری دمای گوی‌ها با استفاده از کابل ترموکوپل دماسنج Kimo Kiray 300 که دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد را دارد انجام شده است و در شکل ۳-۶ می‌توان این دماسنج را به همراه کابل ترموکوپل آن مشاهده نمود.



شکل ۳-۱: معرفی اجزای بستر آزمایشگاهی و شماتیک یک نمونه از گوی‌های دارای شیار



شکل ۳-۲: تصویربرداری از سقوط گوی‌ها در آب با لنز ۱۰۵ میلی‌متری



شکل ۳-۳: تصویربرداری از سقوط گوی‌ها در آب با لنز ۲۰۰ میلی‌متری

جدول (۱-۳) معرفی اعداد بی‌بعد و نمادهای استفاده شده

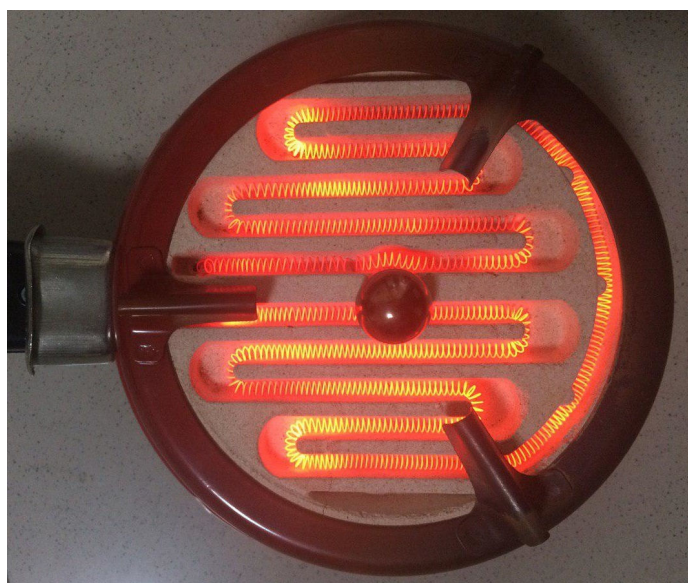
واحد	محدوده و مقادیر	معرفی	نماد	پارامترها
mm	20	شکل ۱-۳	$D_0 = 2R_0$	قطر گوی
mm	1.25	شکل ۱-۳	h_G	عمق شیار
mm	1	شکل ۱-۳	w_G	عرض شیار
-	0,1,3,5	-	N_{HG}	تعداد شیارهای افقی
-	0,1,3,5	-	N_{VG}	تعداد شیارهای عمودی
-	-	i نماد تعداد شیار-		
-	-	های افقی و z نماد تعداد شیارهای افقی	$S_{i,j}$	شناسه گوی‌ها
m/s	0.31-4.42	$\sqrt{2gh_r}$	U_0	سرعت برخورد
cm	0.5-100	-	h_r	ارتفاع رهاسازی گوی
-	-	z_{pinch}/R_0	H_P	عمق Pinch Off
-	13.60-2720	$\rho U_0^2 R_0 / \sigma$	W	عدد وبر
-	13.60	$\rho g R_0^2 / \sigma$	B	عدد بوند
-	702-9935	$\rho U_0 D_0 / \mu$	Re_0	عدد رینولدز برخورد
-	7.79	ρ_s / ρ	ϱ	نسبت چگالی
-	1-100	$U_0^2 / (gR_0)$	F	عدد فرود



شکل ۳-۴: گوی‌های دارای شیار و گوی بدون شیار



شکل ۳-۵: دماسنج لیزری Kimo kiray 300



شکل ۳-۶: کوره حرارتی برقی به منظور حرارت دادن به گوی‌ها

۳-۱-۲- تصویربرداری

تصویربرداری از برخورد گوی‌ها به سطح آب، حرکت در آن و تشکیل کاواک با استفاده از دوربین پرسرعت PCO dimax S انجام گرفته است. این دوربین قابلیت این را دارد تا با نورپردازی‌های خاص تا ۱۰۰۰۰۰ فریم بر ثانیه و در زمان‌های بسیار کوتاه تا ۶۰۰۰۰۰ فریم بر ثانیه تصویربرداری کند که در شکل ۳-۷ می‌توان تصویر این دوربین را مشاهده کرد. در این آزمایش‌ها تصاویر عریض با ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه و بعضی از تصاویر ماکرو با ۲۰۰۰ فریم بر ثانیه گرفته شده‌اند. نورپردازی با استفاده از دو پرژکتور یونیمات^۲ که هر کدام دارای دو لامپ ۱۰۰۰ وات اوسرام^۳ هستند انجام شده است. در این آزمایش‌ها سه نوع تصویر عریض، نیمه عریض و ماکرو به منظور پردازش تصویر، نشان دادن نحوه شکل‌گیری کاواک پس از برخورد گوی به سطح آب و نمایش کوچک‌ترین جزئیات شکل‌گیری کاواک گرفته شده است که

^۲ Unimat

^۳ Osram

چگونگی گرفتن این تصاویر توضیح داده خواهد شد.



شکل ۳-۷: دوربین پرسرعت PCO dimax S

۳-۱-۲-۱- تصاویر عریض

این تصاویر به منظور استفاده برای پردازش تصویر و به دست آوردن نمودار مکان، سرعت و شتاب هر گوی گرفته شده‌اند و دارای کیفیت کمی می‌باشند. این تصاویر با استفاده از لنز Carl Zeiss 85mm f/1.4 Planar و از فاصله دور برای به منظور پوشش دادن کل ارتفاع سقوط گوی‌ها در استخر گرفته شده‌اند. این تصاویر طول کم و عرض نسبتاً زیادی را دارند. در شکل ۳-۸ می‌توان تصویر دوربین را مشاهده کرد.



شکل ۳-۸: لنز Carl Zeiss 85mm f/1.4 Planer

۳-۱-۲-۲- تصاویر نیمه عریض

این تصاویر به منظور ثبت مراحل شکل‌گیری کاواک و مشخص کردن نوع آن با استفاده از Carl Zeiss 85mm f/1.4 planar از فاصله تقریباً ۳ متری گرفته شده‌اند. در واقع این لنز یک لنز پرتره است برای این نوع تصاویر بسیار کارآمد است، در شکل ۳-۹ یک تصویر نیمه عریض از برخورد یک گوی دارای شیار با سطح آب و تشکیل کاواک را می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۳-۹: تصویر نیمه عریض از تشکیل کاواک بعد از برخورد گوی دارای شیار به سطح آب

۳-۱-۲-۳- تصاویر ماکرو

تصاویر ماکرو کوچک‌ترین جزئیات را نیز در خود جای می‌دهند. در این تحقیق این تصاویر به منظور مشاهده چگونگی رخ دادن جدایش کاواک و همچنین چگونگی احاطه کردن گوی توسط کاواک گرفته شده است. این تصاویر با استفاده از دو لنز ماکرو گرفته شده که لنز اولی 105mm Micro Nikkor VR می‌باشد که در شکل ۳-۱۰ می‌توان آن را مشاهده کرد و لنز دومی نیز AF Nikkor 200mm F/4D ED-IF است و تصویر آن در شکل ۳-۱۱ آورده شده است. لنز ۲۰۰ میلی‌متری عمق میدان کمتری نسبت به لنز ۱۰۵ میلی‌متری دارد و تصاویر را با جزئیات بهتری ثبت می‌کند.



شکل ۳-۱۰: لنز ماکرو Micro Nikkor 105mm VR



شکل ۳-۱۱: لنز ماکرو AF Nikkor 200mm F/4D ED-IF

۳-۱-۳- رها سازی گوی‌ها

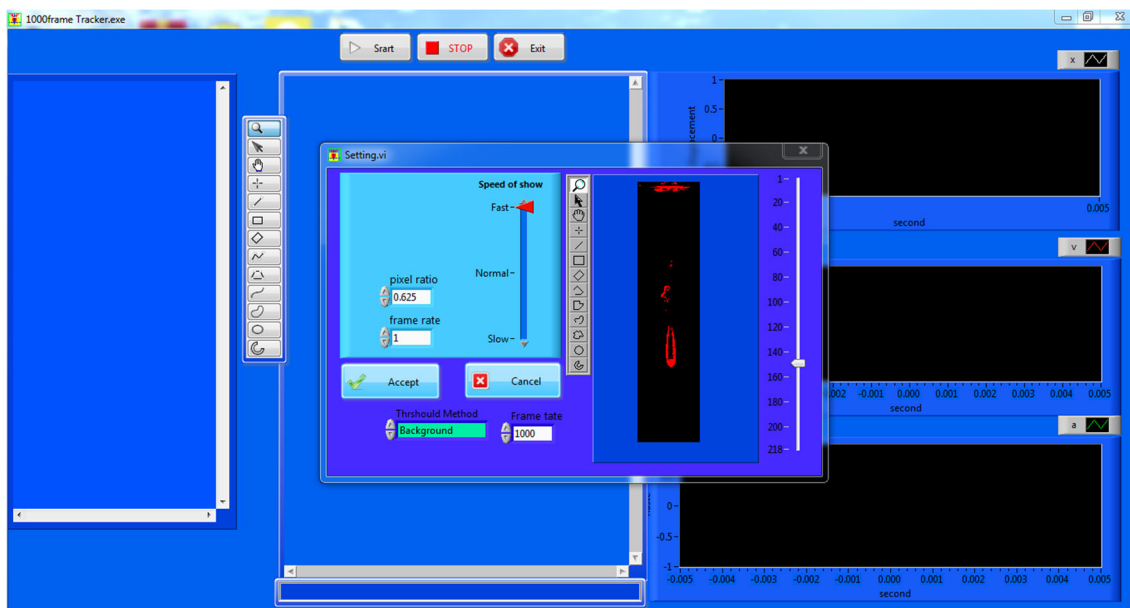
قبل از رها شدن، گوی‌ها با دقت و به طوری که گوی‌های دارای شیار کاملاً در جهت مناسب روی سطح آهنربای الکترومغناطیسی قرار بگیرند (به طوری که گوی‌های شیاردار هنگام برخورد با سطح آب کج نشوند) تنظیم شده‌اند. پس از خاموش شدن آهنربای الکترومغناطیسی به وسیله کلید قطع و وصل آن، گوی‌ها آزادانه به سمت استخر آب سقوط می‌کنند، سرعت گوی‌ها هنگام برخورد به سطح آب را می‌توان با استفاده از رابطه $U_0 \approx \sqrt{2gh}$ تخمین زد، البته این سرعت به صورت تقریبی است و از اثر نیروی

پسای هوا و ایجاد شیار روی سطح گوی‌ها صرف‌نظر شده است. که در این رابطه U_0 سرعت برخورد گوی به سطح آب و h_r فاصله رهاسازی گوی از سطح آب است، در شکل ۱-۳ و کار رها سازی گوی کاملاً مشهود است. نتایج مقایسه سرعت، شتاب و دیگر کمیت‌های هیدرودینامیکی یک گوی بدون شیار با شش گوی دیگر با سطح شیاردار که از سه ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر، ۵۰ سانتی‌متر و ۱۰۰ سانتی‌متر رها شده‌اند ذکر شده است. نتایج رهاسازی گوی‌ها از در چند فاصله دیگر نیز توسط تصاویر نیمه عریض فقط به‌منظور نشان دادن نحوه شکل‌گیری کاواک در رژیم‌های متفاوت برخورد آورده شده است.

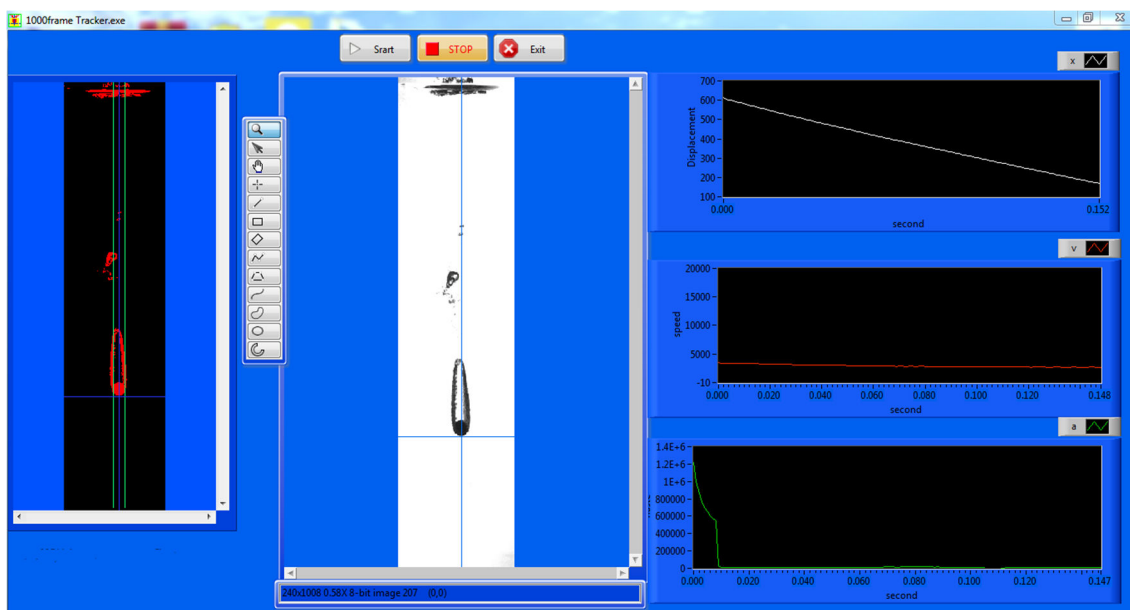
۳-۱-۴- پردازش تصاویر

برای به دست آوردن موقعیت مکانی، سرعت، شتاب و دیگر پارامترهای هیدرودینامیکی آزمایش‌ها از یک کد پردازش تصویر استفاده شده است. این کد با استفاده از نرم‌افزار لب‌ویو^۴ نوشته شده و از ماژول Edge Detective به‌عنوان هسته مرکزی برای تشخیص پیکسل‌ها استفاده می‌کند. این کد با استفاده از تصاویر عریض که در آن‌ها گوی کاملاً پیکسل‌های سیاه دارد و آب با پیکسل‌های سفید دیده می‌شود، در لحظه (هزارم ثانیه) تغییرات پیکسل در پایین‌ترین نقطه گوی را نسبت به گوی قبلی محاسبه می‌کند و نمودار موقعیت مکانی، سرعت و شتاب را به‌صورت خروجی اکسل می‌دهد. این کد تمام تصاویر گوی از لحظه برخورد با سطح آب تا لحظه‌ای که مورد نظر است دریافت و با استفاده از عدد فریمی که تصاویر با آن گرفته شده‌اند و همچنین طول هر پیکسل که کاربر تعریف می‌کند خروجی مورد نظر را به کاربر می‌دهد. شکل ۳-۱۲ چگونگی دریافت مشخصات تصاویر از جمله فریم و طول پیکسل و شکل ۳-۱۳ نحوه پردازش تصاویر توسط نرم‌افزار و نمودارهای خروجی آن را نشان می‌دهد.

⁴ Labview



شکل ۳-۱۲: دریافت عکس‌ها و تشخیص پیکسل‌های سیاه و سفید از هم توسط نرم‌افزار



شکل ۳-۱۳: خروجی‌های نمودار مکان، سرعت و شتاب بر حسب زمان توسط نرم‌افزار

فصل ۴:

نتایج و تفسیر آنها

در این فصل نتایج آزمایشگاهی اثر شیار و دما بر سقوط گوی در آب از سه ارتفاع مختلف (۵/۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر) ارائه خواهد شد. همان‌گونه که در فصل قبل گفته شد به دلیل سخت بودن ثابت کردن دمای گوی‌ها در آزمایش‌هایی که اثر دما بر سقوط گوی‌ها از ارتفاع بالاتر از ۵/۰ سانتی‌متر در آب بررسی شده است، آزمایش‌های اثر دما بر سقوط گوی‌ها در آب فقط در ارتفاع ۵/۰ سانتی‌متر انجام شده است و در بقیه ارتفاع‌ها این آزمایش‌ها انجام نشده است. همان‌گونه که در فصل سوم ذکر شد تعداد این گوی‌ها هفت عدد بوده که یکی از آن‌ها بدون شیار و روی سطح بقیه آن‌ها شیارهایی با الگوهای متفاوت ایجاد شده است. گوی‌های شیاردار داری شش الگوی متفاوت شیار هستند و هر کدام از آن‌ها داری یک شناسه هستند که در جدول ۳-۱ کاملاً توضیح داده شده است و شماتیک یکی از گوی‌های شیاردار نیز در شکل ۳-۱ آورده شده است.

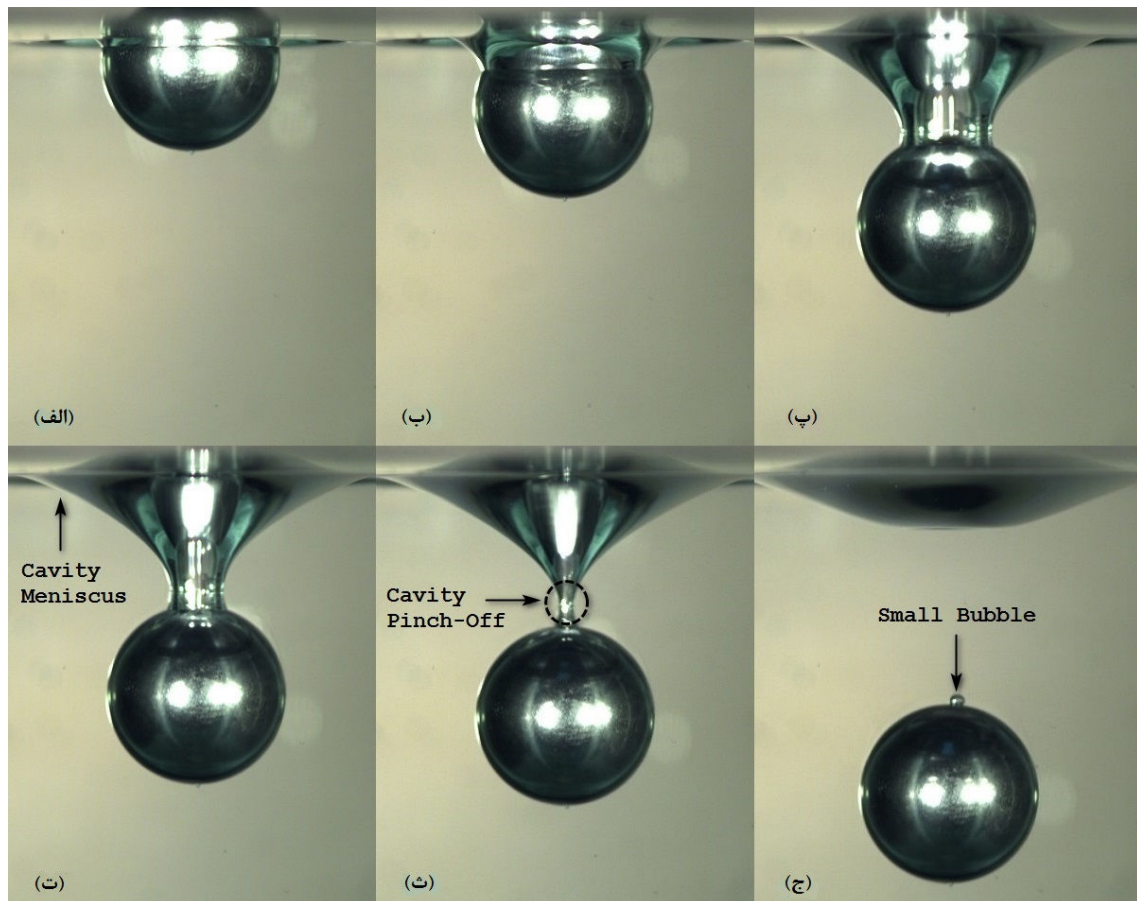
۴-۱- نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۵/۰ سانتی‌متر

در این بخش نتایج اثر شیار و دما روی سرعت، شتاب و ضریب هیدرودینامیکی آورده شده است. سرعت سقوط گوی‌ها از این ارتفاع که با استفاده از رابطه $U_0 \approx \sqrt{2gh_r}$ محاسبه شده است برابر با ۰/۳۱ متر بر ثانیه می‌باشد و در این سرعت برای این گوی‌ها با قطر ۲۰ میلی‌متر، مقادیر اعداد بی‌بعد $B = 13.60$ ، $W = 13.60$ و $Fr = 1$ می‌باشد. تمام مشخصات کاواک تشکیل شده پس از سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۵/۰ سانتی‌متر در آب مطابق با رژیم شبه استاتیک است و اعداد بی‌بعد نیز برای این گوی‌ها با قطر ۲۰ میلی‌متر در محدوده رژیم شبیه استاتیک می‌باشند.

۴-۱-۱- نتایج سقوط گوی‌ها با دمای ۲۵ درجه در آب

گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ پس از سقوط از ارتفاع ۵/۰ سانتی‌متری کاملاً در آب فرو می‌رود و وقتی تا نیمه در آب فرو رفت یک کاواک کوچک با سطحی کاملاً پایدار شروع به تشکیل می‌شود که همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد به آن هلال پایدار نیز می‌گویند (شکل ۴-۱، (الف)-(ت))، دلیل آن

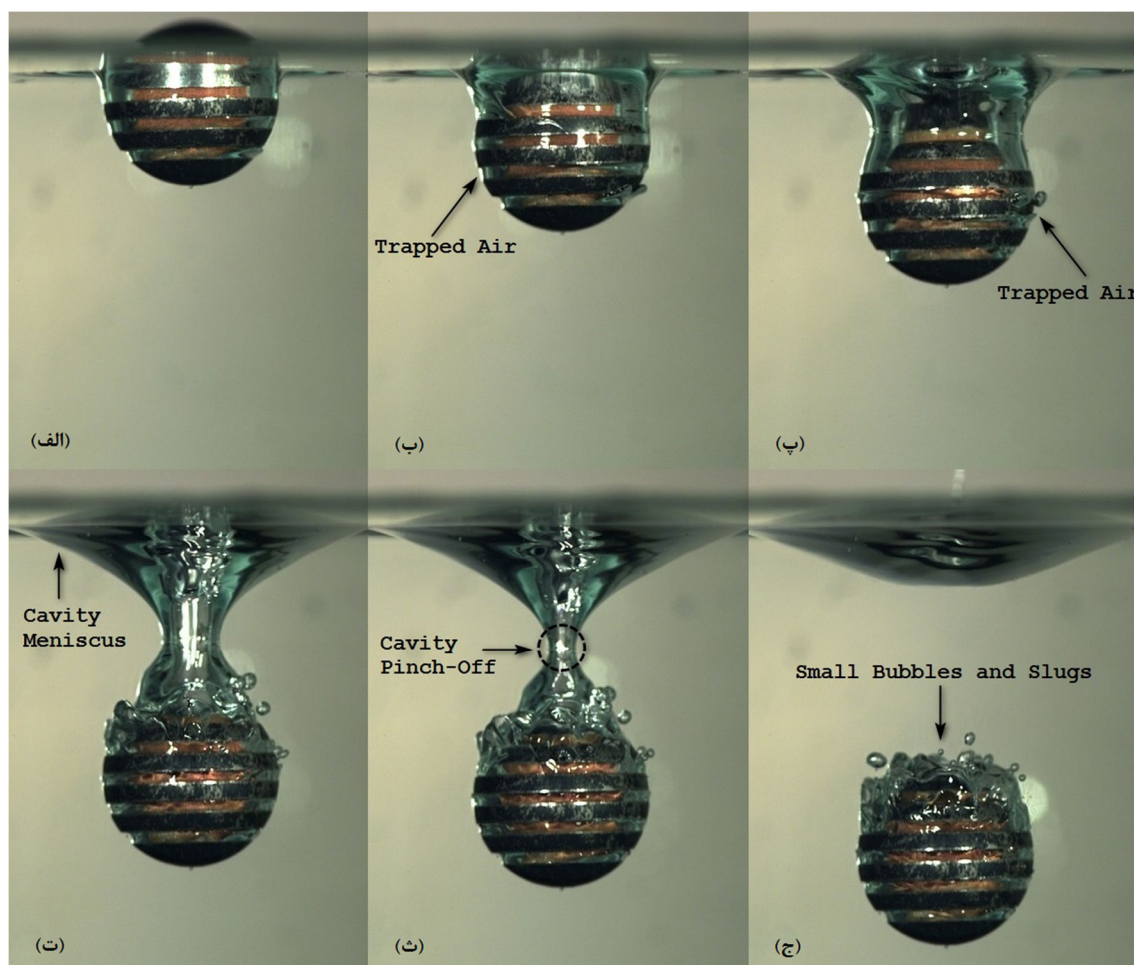
تعدادل بین نیروی کشش سطحی آب و نیروی جاذبه است زیرا هنگام سقوط از این ارتفاع کم گوی نیز نیروی بسیار کمی به سطح آب وارد می‌کند و مولکول‌های سطح آب به دلیل پیوند قوی که با یکدیگر دارند به آرامی شکل سطحی خود را از دست می‌دهند. کاواک پس از اینکه به صورت کامل تشکیل شد، به نقطه جدایش می‌رسد که این نقطه روی سطح گوی رخ می‌دهد (شکل ۴-۱، (ث)) و پس از جدایش تنها یک حباب کوچک روی سطح گوی باقی می‌ماند تا قسمتی از مسیر به گوی چسبیده است و سپس از گوی جدا شده و به سمت بالا حرکت می‌کند. پس از جدایش کاواک روی سطح گوی، کاواک به سمت سطح آب حرکت می‌کند و همراه با آن یک جت برگشتی کوچک تشکیل شده و همراه با کاواک به سمت بالا حرکت می‌کند، (شکل ۴-۱، (ج)).



شکل ۴-۱: ورود گوی با شناسه $S_{0,0}$ به آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک، ($U_0 = 0.31 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 13.6, Fr = 1.0, Re_0 = 702.5, D_0 = 20 \text{ [mm]}$)

در هنگام ورود به آب گوی‌های شیاردار هوا در بین شیارهای گوی به دام افتاده و پس از غرق شدن

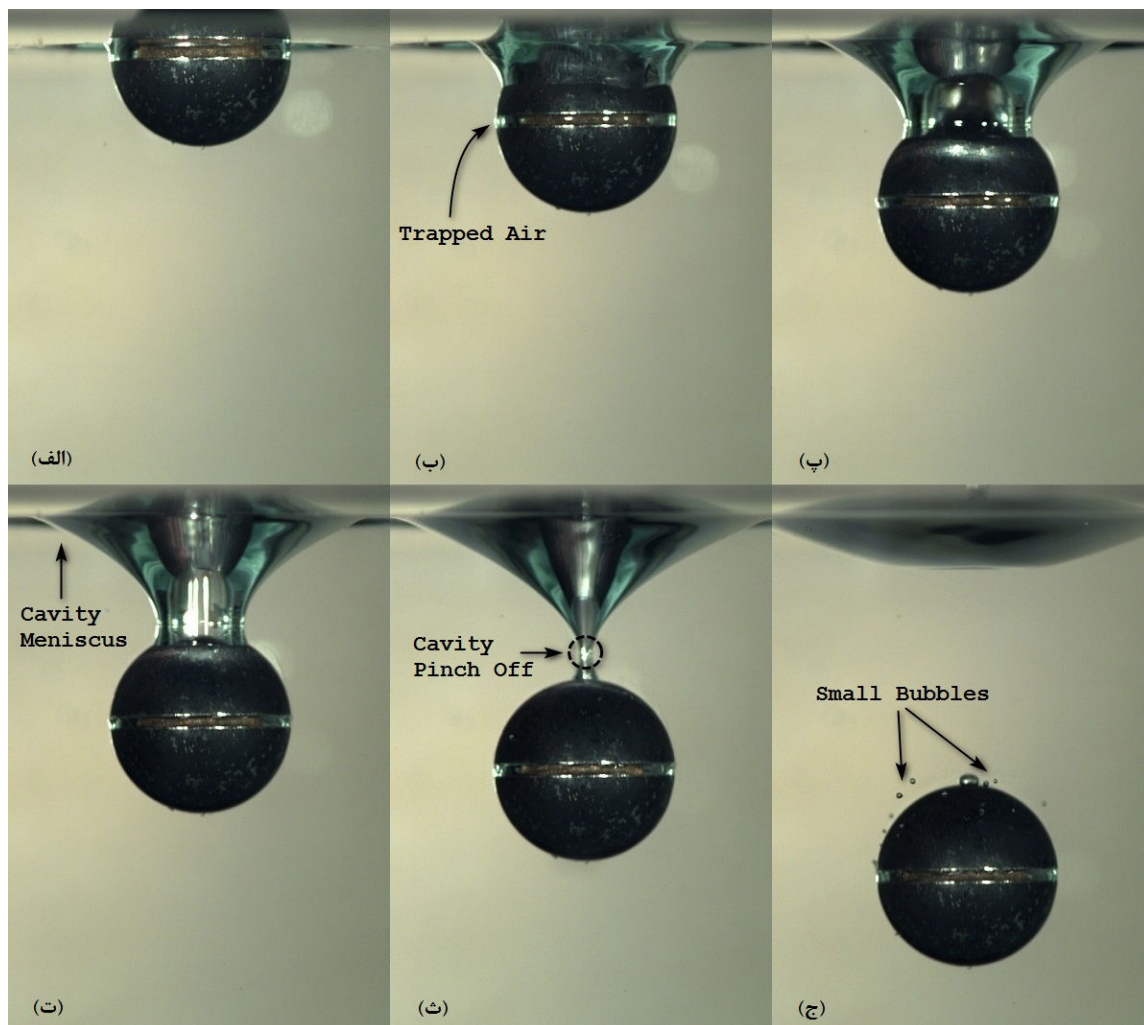
گوی در آب و تشکیل کاوک حباب‌ها و لخته‌های کوچک هوا شروع به بیرون آمدن از شیارها می‌کند و به سمت بالای گوی حرکت می‌کنند (شکل ۴-۲، (الف)-(ت))، هم‌زمان مقداری از هوا نیز به صورت یک توده در بالاترین قسمت گوی تجمع می‌کند و پس از جدایش کاواک توده هوای جمع شده در بالای گوی همراه با گوی تا قسمتی از مسیر حرکت می‌کند و پس از آن شروع به فروپاشی می‌کند و از گوی جدا می‌شود که این اتفاق را می‌توان در (شکل ۴-۲، (ج)) مشاهده کرد.



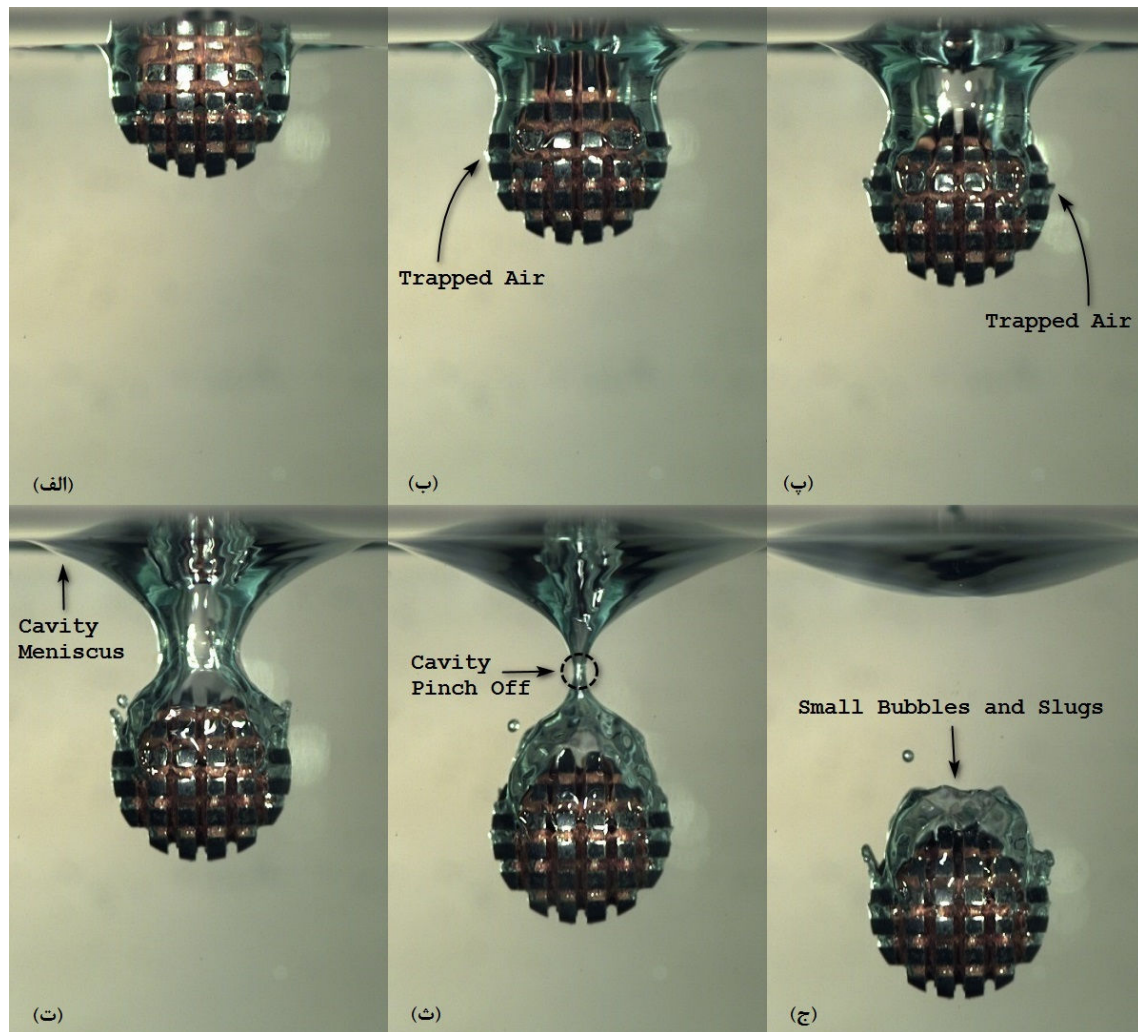
شکل ۴-۲: ورود گوی با شناسه $S_{5,0}$ به آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک، ($U_0 = 0.31 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$, $B = 13.6$, $W = 13.6$, $Fr = 1.0$, $Re_0 = 702.5$, $D_0 = 20 \text{ [mm]}$)

با توجه به الگوی شیارهای هر گوی میزان و شکل به دام افتادن هوا متفاوت است، به صورتی که برای گوی با شناسه $S_{1,0}$ به دام افتادن و ورود هوا به داخل آب کمترین میزان و رفتار آن در هنگام ورود به آب کاملاً شبیه گوی بدون شیار است. تنها تفاوت این گوی با گوی بدون شیار این است که

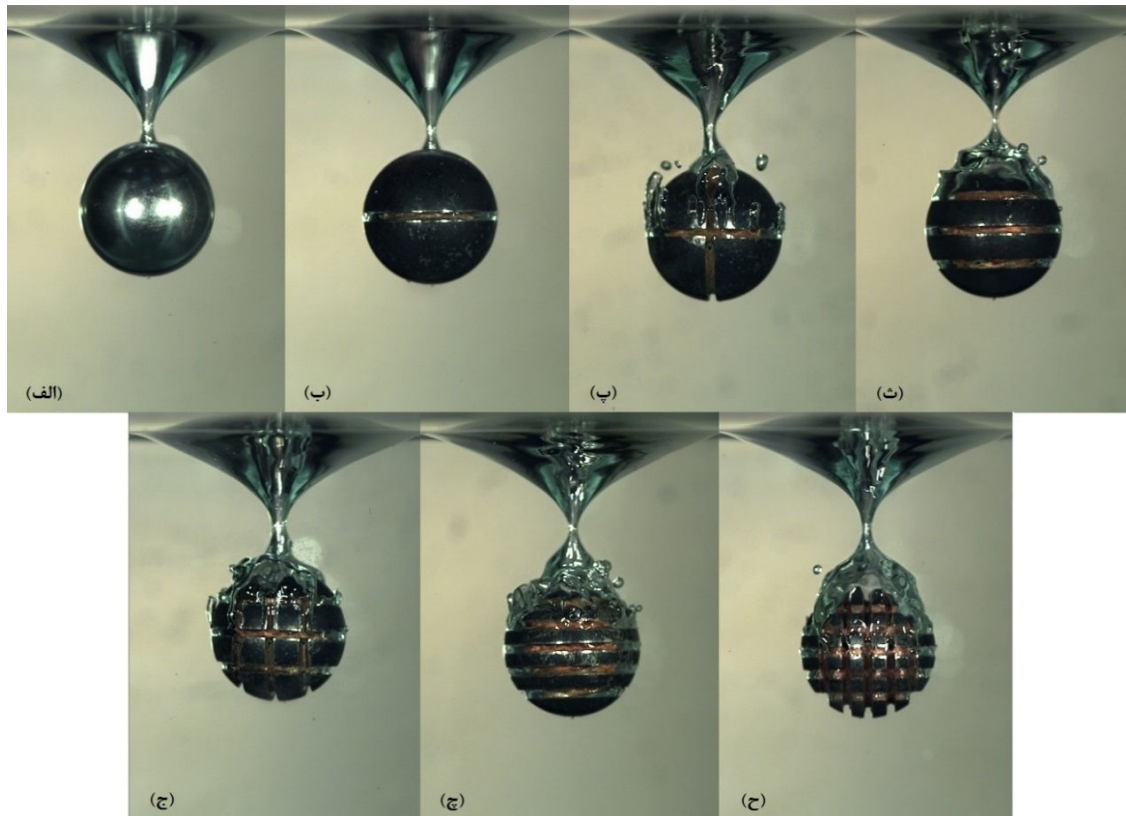
مقداری کمی هوا در بین شیار آن به دام افتاده و پس جدایش کاواک این هوا به صورت حباب‌های خیلی کوچک شروع به بیرون آمدن و به سمت بالای گوی حرکت می‌کند، در شکل ۴-۳ می‌توان ورود این گوی به آب را در رژیم شبه استاتیک مشاهده کرد. بیشترین میزان به دام انداختن و ورود هوا به داخل آب را نیز گوی با شناسه $S_{5,5}$ دارد و پس از ورود گوی به داخل آب هوا در میان همه شیارهای این گوی به دام افتاده و هنگامی که کاواک گوی به صورت کامل تشکیل شد برخلاف گوی $S_{1,0}$ که جدایش آن روی سطح گوی اتفاق می‌افتد، جدایش این گوی روی یک توده هوا رخ می‌دهد (شکل ۴-۴، الف تا ث). پس از جدایش کاواک این توده هوا روی سطح گوی باقی می‌ماند و در ادامه مسیر حرکت گوی مقداری از هوای به دام افتاده در میان شیارها به مرور به شکل حباب و لخته‌های کوچک هوا از میان شیارها خارج شده و به سمت توده هوای بالای گوی حرکت می‌کنند. در ادامه نیز این توده هوا با افزایش عمق شروع به جدا شدن از سطح گوی می‌کند و به شکل لخته‌های هوا جدا می‌شود که در شکل ۴-۴ (ج) قابل مشاهده است. در کل سطح هلالی شکل کاواک در رژیم شبه استاتیک بسیار پایدار است، اما در این پژوهش در مقایسه با گوی بدون شیار، سطح کاواک‌های ایجاد شده توسط گوی‌های دارای شیار کمی ناهموار است. در شکل ۴-۵ می‌توان تصاویر همه گوی‌ها را در لحظه جدایش کاواک مشاهده کرد.



شکل ۳-۴: ورود گوی با شناسه $S_{1,0}$ به آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی گراد، در رژیم شبه استاتیکی، ($U_0 = 0.31 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$, $B = 13.6$, $W = 13.6$, $Fr = 1.0$, $Re_0 = 702.5$, $D_0 = 20 \text{ [mm]}$)



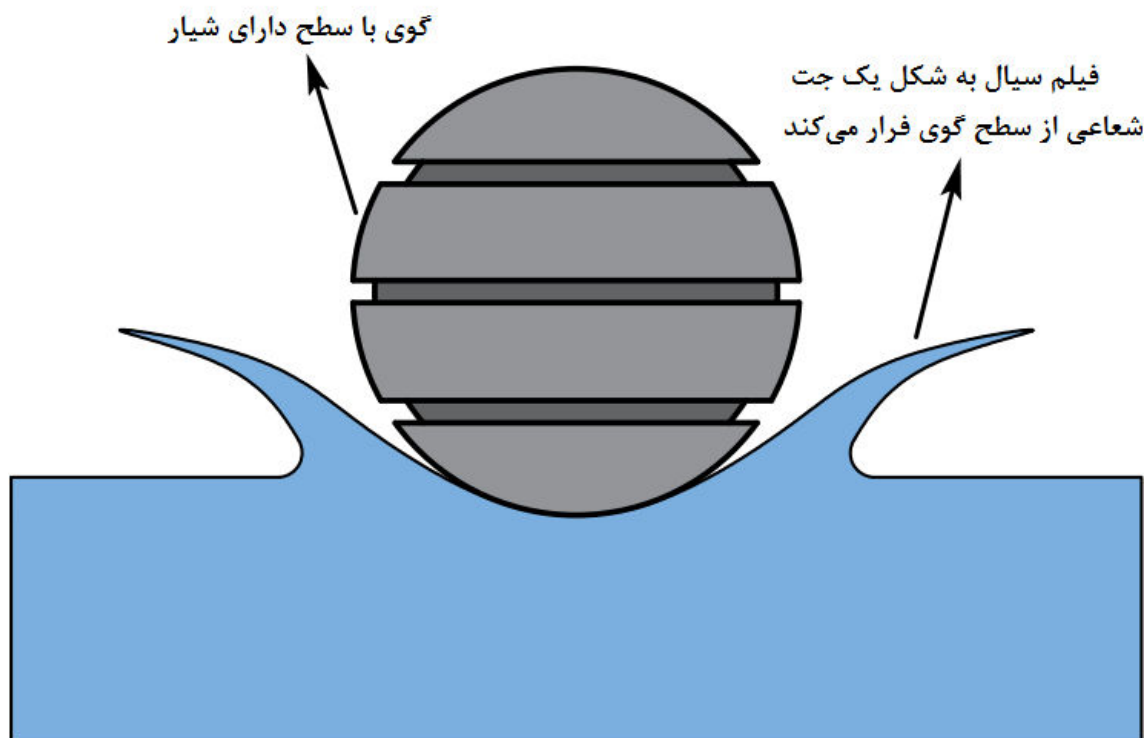
شکل ۴-۴: ورود گوی با شناسه $S_{5.5}$ به آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی گراد، در رژیم شبه استاتیک، ($U_0 = 0.31 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$, $B = 13.6$, $W = 13.6$, $Fr = 1.0$, $Re_0 = 702.5$, $D_0 = 20 \text{ [mm]}$)



شکل ۴-۵: جدایش کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S_{5,5}$, $S_{5,0}$, $S_{3,3}$, $S_{3,0}$, $S_{1,1}$, $S_{1,0}$, $S_{0,0}$ دمای سطح گوی‌ها ۲۵ درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک، $(U_0 = 0.31 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 13.6, Fr = 1.0, Re_0 = 702.5, D_0 = 20 \text{ [mm]})$

با توجه به مطالب ذکر شده در فصل دوم در مورد عوامل مؤثر بر آب‌دوستی و آب‌گریزی، ایجاد شیار روی سطح اجسام آب‌دوست می‌تواند با تغییر زاویه برخورد (θ_a) درصد آب‌دوستی اجسام را تا حد زیادی بکاهد و خواص آب‌گریزی را در این اجسام به وجود آورد. در هنگام برخورد گوی بدون شیار به سطح آب چون سطح گوی آب‌دوست است آب به راحتی به سطح گوی می‌چسبد و هم‌زمان که گوی درون آب فرو می‌رود از سطح گوی بالا می‌رود و گوی با کمترین میزان ورود هوا کاملاً در آب فرو می‌رود، اما برخلاف گوی بدون شیار در هنگام برخورد گوی‌ها دارای شیار با سطح آب، آب ابتدا به سطح پایینی گوی می‌چسبد اما وقتی گوی کمی بیشتر در آب فرو می‌رود و آب به شیار روی سطح گوی می‌رسد چون فضای داخل شیار با هوا پر شده است و هوا آب‌گریز است، آب به صورت یک جت جریان آب شعاعی از سطح گوی فاصله می‌گیرد و دور می‌شود. گوی‌های دارای شیار نیز هنگام ورود به آب

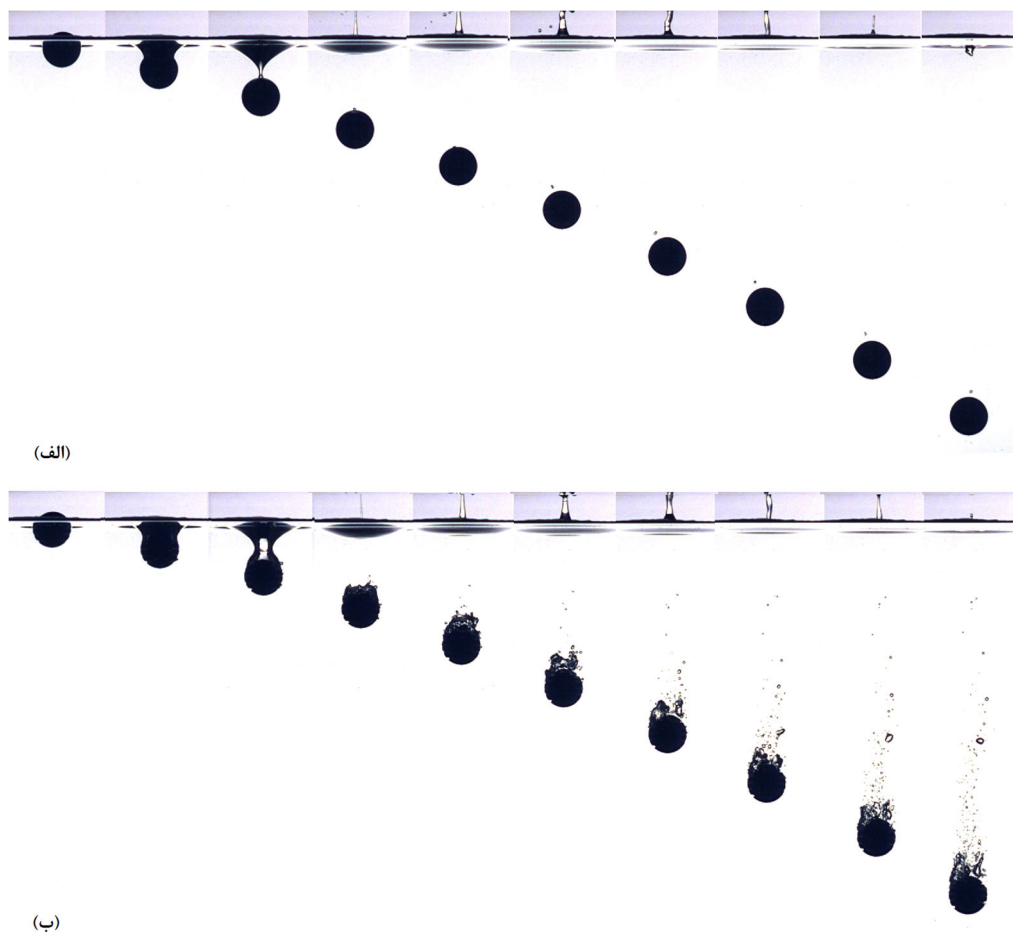
مقداری هوا نیز به داخل آب می‌کشند، این هوای وارد شده به آب که تا بخشی از مسیر حرکت همراه با گوی‌ها است با روان کاری سطح گوی‌ها باعث کاهش نیروی پسای اصطکاکی شده و سرعت سقوط گوی‌ها را افزایش می‌دهد. در شکل ۴-۶ شماتیک یک گوی با سطح دارای شیار هنگام برخورد به سطح آب نمایش داده شده است.



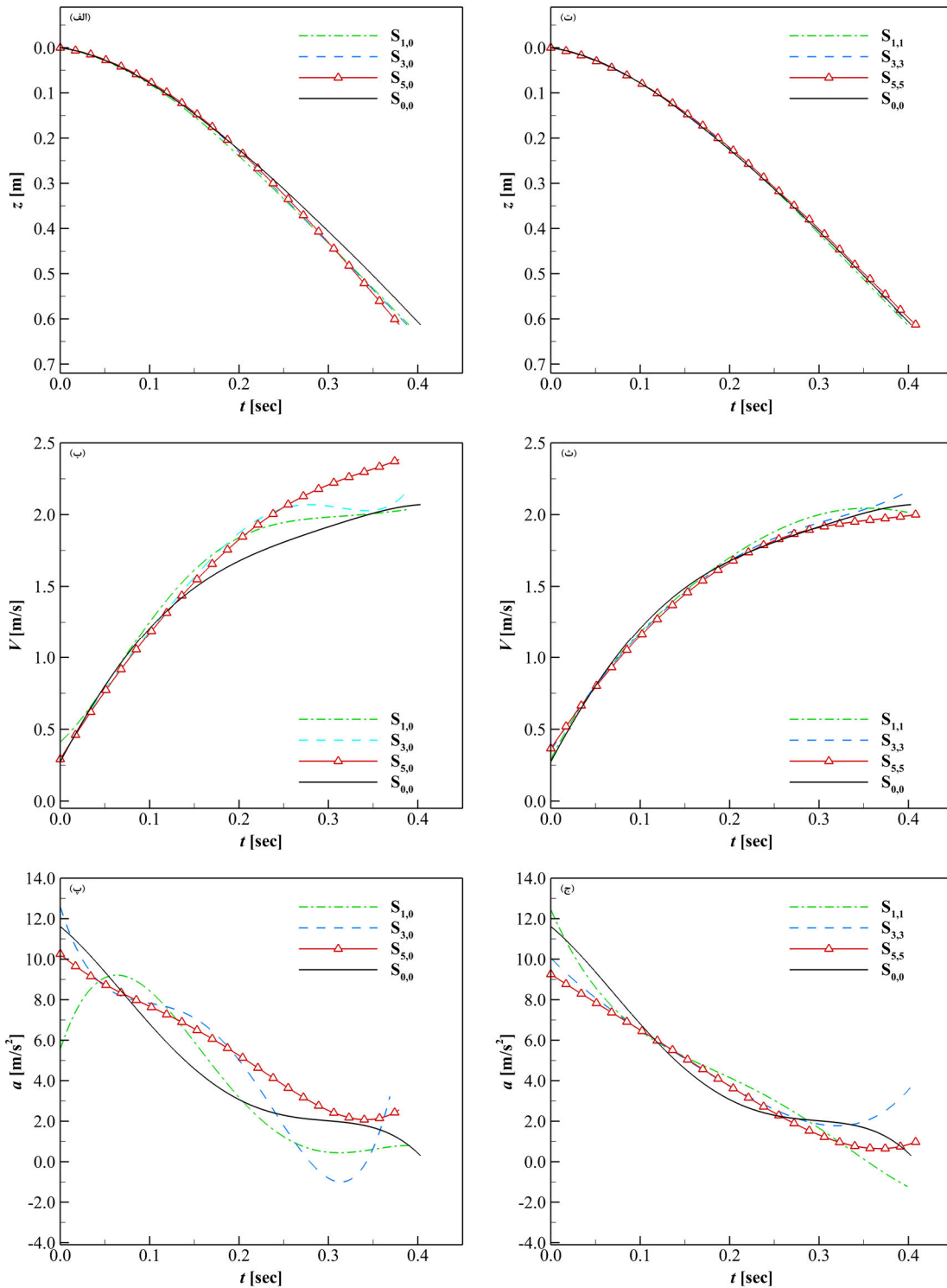
شکل ۴-۶: شماتیک برخورد گوی دارای شیار با سطح آب

در شکل ۴-۷ نیز تفاوت ورود گوی بدون شیار با گوی دارای شیار با شناسه $S_{5,0}$ را به آب در رژیم شبه استاتیک مشاهده کرد. شکل ۴-۸ نمودار مکان، شتاب و سرعت همه گوی‌ها را بر حسب زمان نشان داده است. در شکل ۴-۸ (الف) نمودارهای مکان لحظه‌ای گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ و $S_{5,0}$ بر حسب زمان آورده شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود گوی با شناسه $S_{5,0}$ مسیر حرکت را در زمان کمتری نسبت به بقیه گوی‌ها طی کرده است و گوی با شناسه $S_{0,0}$ در مقایسه با سه گوی دیگر مسیر حرکت را زمان بیشتری طی کرده است. در شکل ۴-۸ (ب و پ) نیز نمودار سرعت و شتاب این چهار

گوی آورده شده است که طبیعتاً بیشترین سرعت متعلق به گوی با شناسه $S_{5,0}$ و کمترین سرعت متعلق به گوی با شناسه می‌باشد. در شکل ۴-۸ (ت) نیز نمودارهای مکان لحظه‌ای گوی‌های $S_{3,3}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{0,0}$ و $S_{5,5}$ آورده شده است که همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین زمان طی مسیر حرکت متعلق به گوی $S_{5,5}$ و گوی با شناسه $S_{1,1}$ نیز در مقایسه با سه گوی دیگر مسیر حرکت را در زمان کمتری طی کرده است. در شکل ۴-۸ (ث و ج) نیز می‌توان نمودارهای سرعت و شتاب این چهار گوی را مشاهده کرد که گوی با شناسه $S_{1,1}$ دارای بیشترین سرعت و شتاب و گوی با شناسه $S_{5,5}$ کمترین میزان سرعت و شتاب است.

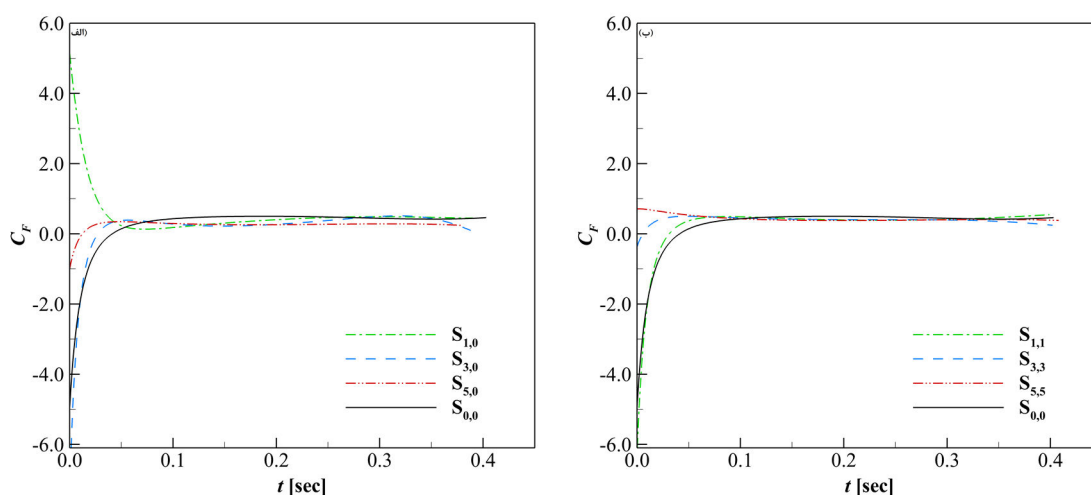


شکل ۴-۷: (الف) ورود گوی با شناسه $S_{0,0}$ به آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک. (ب) ورود گوی با شناسه $S_{5,0}$ به آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک



شکل ۴-۸: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ ، $S_{0,0}$ (ب) نمودار سرعت گوی‌های $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ ، $S_{0,0}$ (پ) نمودار شتاب گوی‌های $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ ، $S_{0,0}$ (ت) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ ، $S_{0,0}$ (ث) نمودار سرعت گوی‌های $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ ، $S_{0,0}$ (ج) نمودار شتاب گوی‌های $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ ، $S_{0,0}$

در شکل ۴-۹ نمودارهای ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها نشان داده شده است. معمولاً در رژیم شبه استاتیک به علت سرعت و شتاب کم قضاوت کردن درباره رفتار گوی‌ها بسیار سخت و همراه با خطا است و به همین علت در این رژیم معمولاً رفتار پرتابه‌ها با توجه به نمودارهای سرعت و شتاب و تصاویر حرکت در آب تحلیل می‌شود. به صورت کلی می‌توان گفت از نقطه‌ای که شیب نمودار شروع به ثابت شدن می‌کند، گوی به تعادل هیدرودینامیکی نزدیک می‌شود تا جایی که گوی به سرعت حدی می‌رسد و نیروهای هیدرودینامیک به تعادل کامل می‌رسند و گوی با یک سرعت ثابت و بدون شتاب حرکت می‌کند.



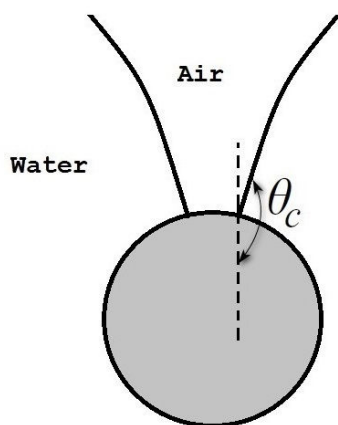
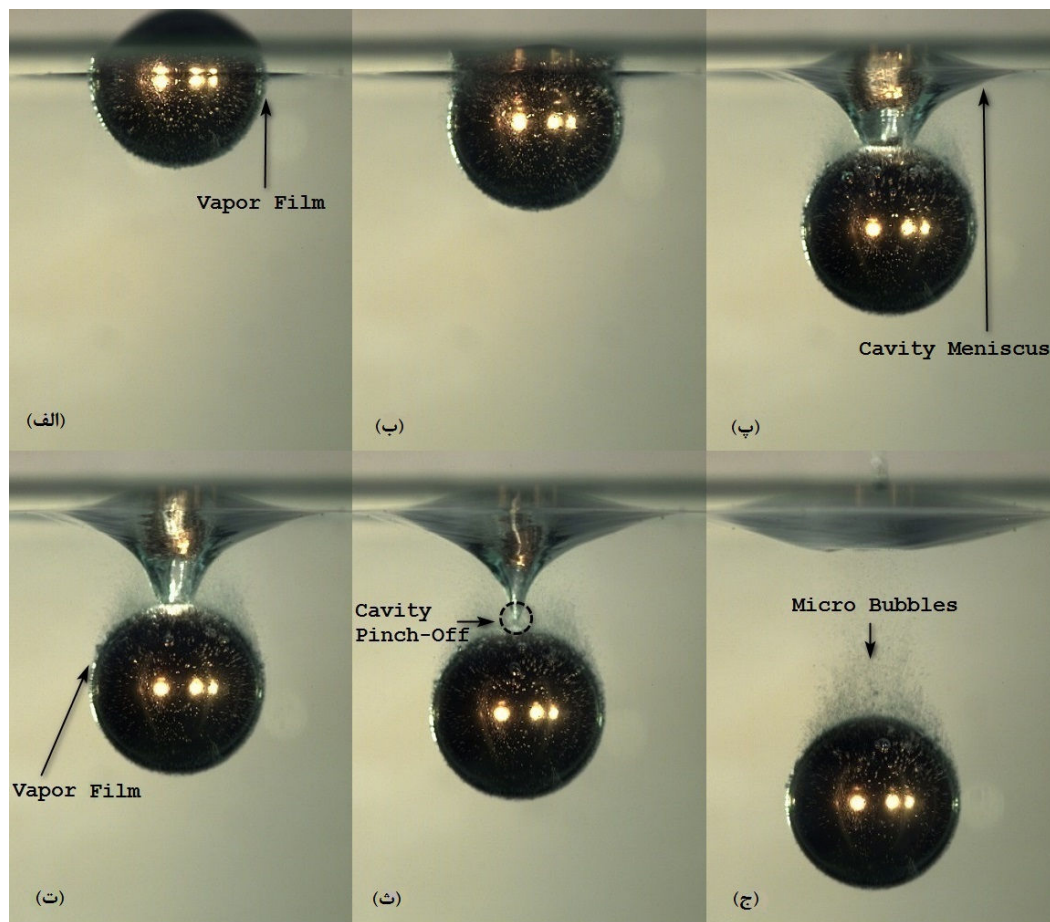
شکل ۴-۹: (الف) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ و $S_{5,0}$ و $S_{0,0}$. (ب) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ و $S_{5,5}$ و $S_{0,0}$.

۴-۱-۲- نتایج سقوط گوی با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در آب

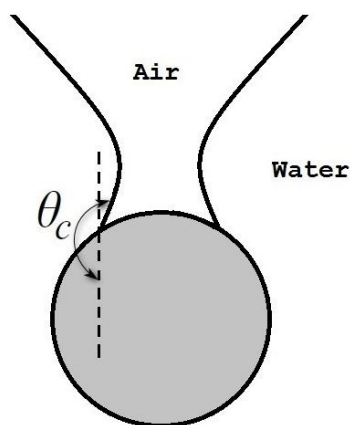
همان‌گونه که می‌دانیم با افزایش دمای آب نیروی کشش سطحی آن کاهش پیدا می‌کند و این اتفاق در هنگام ورود اجسام با دمای بالا به آب نیز رخ می‌دهد. در هنگام ورود به آب گوی با شناسه $S_{0,0}$ بخار آب از محلی که گوی وارد آب می‌شود بلند می‌شود و حباب‌های کوچک بخار درون آب تشکیل و به سرعت ناپدید می‌شوند، گوی کاملاً در آب فرو می‌رود و یک کاواک با سطحی تقریباً پایدار تشکیل

می‌دهد که در شکل ۴-۱۰ (الف-ت) قابل مشاهده است. در این زمان از سطح گوی حباب‌های کوچک بخار جدا شده و به سمت بالا حرکت می‌کنند تا جدایش کاواک کاملاً روی سطح گوی رخ می‌دهد که در شکل ۴-۱۰ (ث) نشان داده شده است. پس از آن کاواک به سمت سطح آب حرکت می‌کند و گوی در حالی که سطح آن پوشیده از حباب‌های کوچک بخار است به سمت پایین حرکت می‌کند (شکل ۴-۱۰، ج). مقایسه ورود به آب گوی $S_{0,0}$ با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد با ورود به آب گوی $S_{0,0}$ با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که برای گوی با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد زاویه مخروطی (θ_c) که زاویه بین سطح کاواک و خط مماس بر آن در نقطه اتصال با گوی هنگام جدایش کاواک است، کمتر از π که شماتیک آن در شکل ۴-۱۰ (چ) نشان داده شده است. برای گوی با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد این زاویه بزرگ‌تر از π می‌باشد و شماتیک آن نیز در شکل ۴-۱۰ (ح) نشان داده شده است. این موضوع بیانگر این است که در گوی با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد جدایش کاواک کمی بالاتر از سطح گوی اتفاق رخ می‌دهد ولی در گوی با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد دقیقاً روی سطح گوی اتفاق می‌افتد. در گوی‌های دارای شیار نیز روند ورود به آب گوی‌ها با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تا حد زیادی شبیه ورود به آب گوی بدون شیار است با این تفاوت که به علت وجود شیار علاوه بر میکرو حباب‌ها و حباب‌های کوچکی که روی سطح گوی‌ها تشکیل می‌شوند، حباب‌های بزرگ‌تر و لخته‌های بخار نیز در میان شیارها و روی سطح گوی‌ها تشکیل می‌شوند. برای مثال در هنگام ورود به آب گوی با شناسه $S_{5,0}$ با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که پس از ورود به آب گوی کاواک تشکیل شده و هم‌زمان حباب‌های کوچک و میکرو حباب‌ها از روی سطح گوی تشکیل شده و از آن جدا می‌شوند و حباب‌ها و لخته‌های بخار نیز از میان شیارهای گوی بیرون می‌آیند. در واقع به نظر می‌رسد که یک فیلم بخار نازک همه محیط گوی را در بر گرفته است و حباب‌ها از میان آن بیرون می‌آیند و به سمت بالا حرکت می‌کنند، تا جایی که کاواک تشکیل شده دقیقاً روی سطح گوی جدا می‌شود که در شکل ۴-۱۱ (الف-ث) قابل مشاهده است. کاواک بعد از جدایش به سمت بالا حرکت و گوی نیز به سمت پایین حرکت می‌کند در حالی که حباب‌های بخار همچنان از سطح گوی و از میان شیارهای آن جدا شده و

به سمت بالا حرکت می‌کنند (شکل ۴-۱۱، ج).

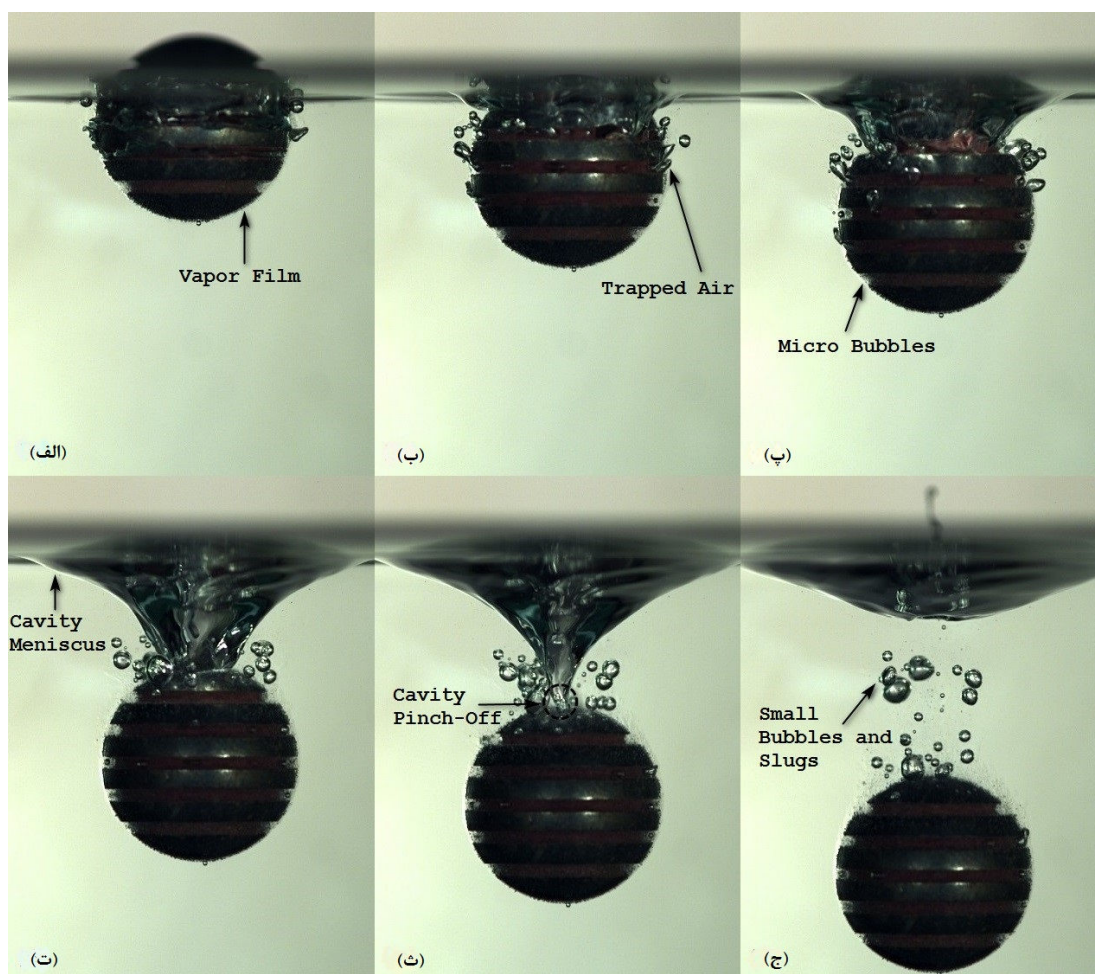


(ج) Heated Sphere



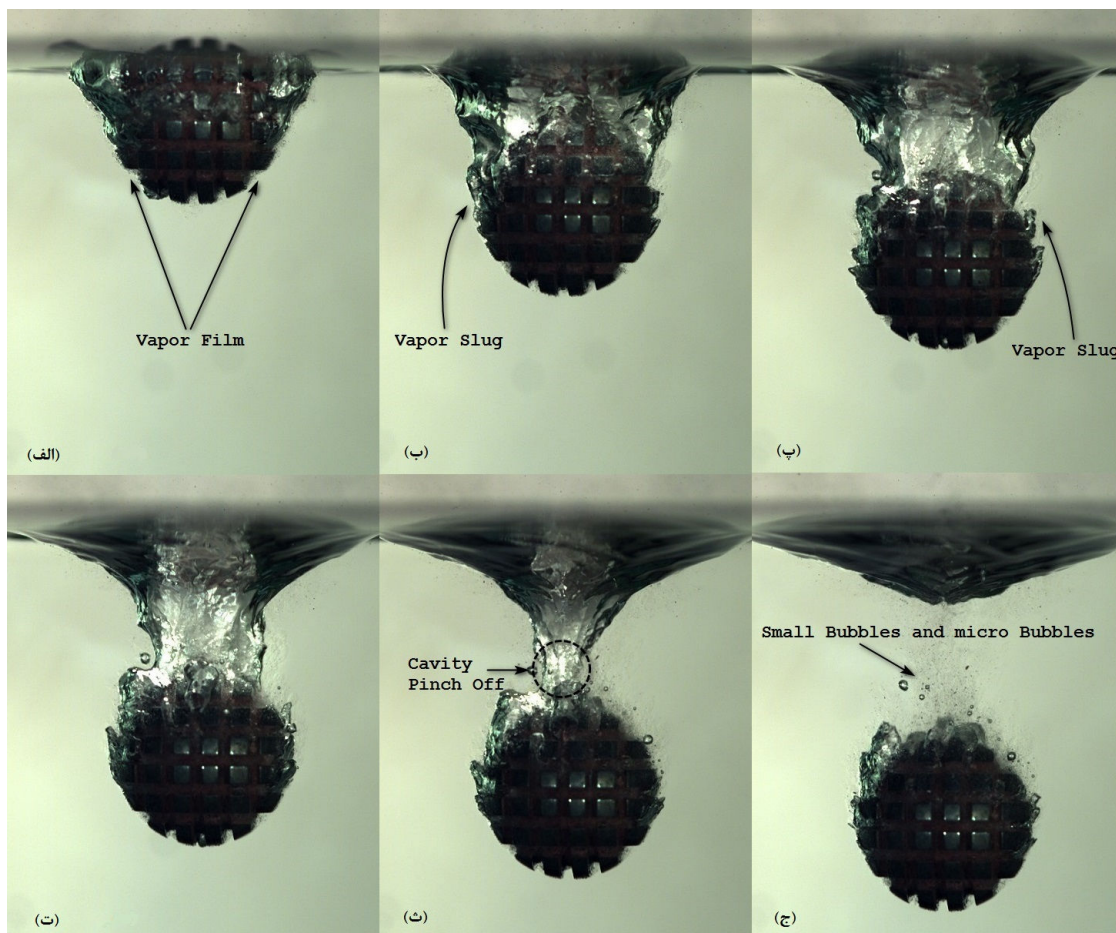
(ح) No-Heated Sphere

شکل ۴-۱۰: ورود گوی با شناسه $S_{0,0}$ به آب، دمای سطح گوی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیکی، ($U_0 = 0.31 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$, $B = 13.6$, $W = 13.6$, $Fr = 1.0$, $Re_0 = 702.5$, $D_0 = 20 \text{ [mm]}$)



شکل ۴-۱۱: ورود گوی با شناسه $S_{5,0}$ به آب، دمای سطح گوی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک، ($U_0 = 0.31 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$, $B = 13.6$, $W = 13.6$, $Fr = 1.0$, $Re_0 = 702.5$, $D_0 = 20 \text{ [mm]}$)

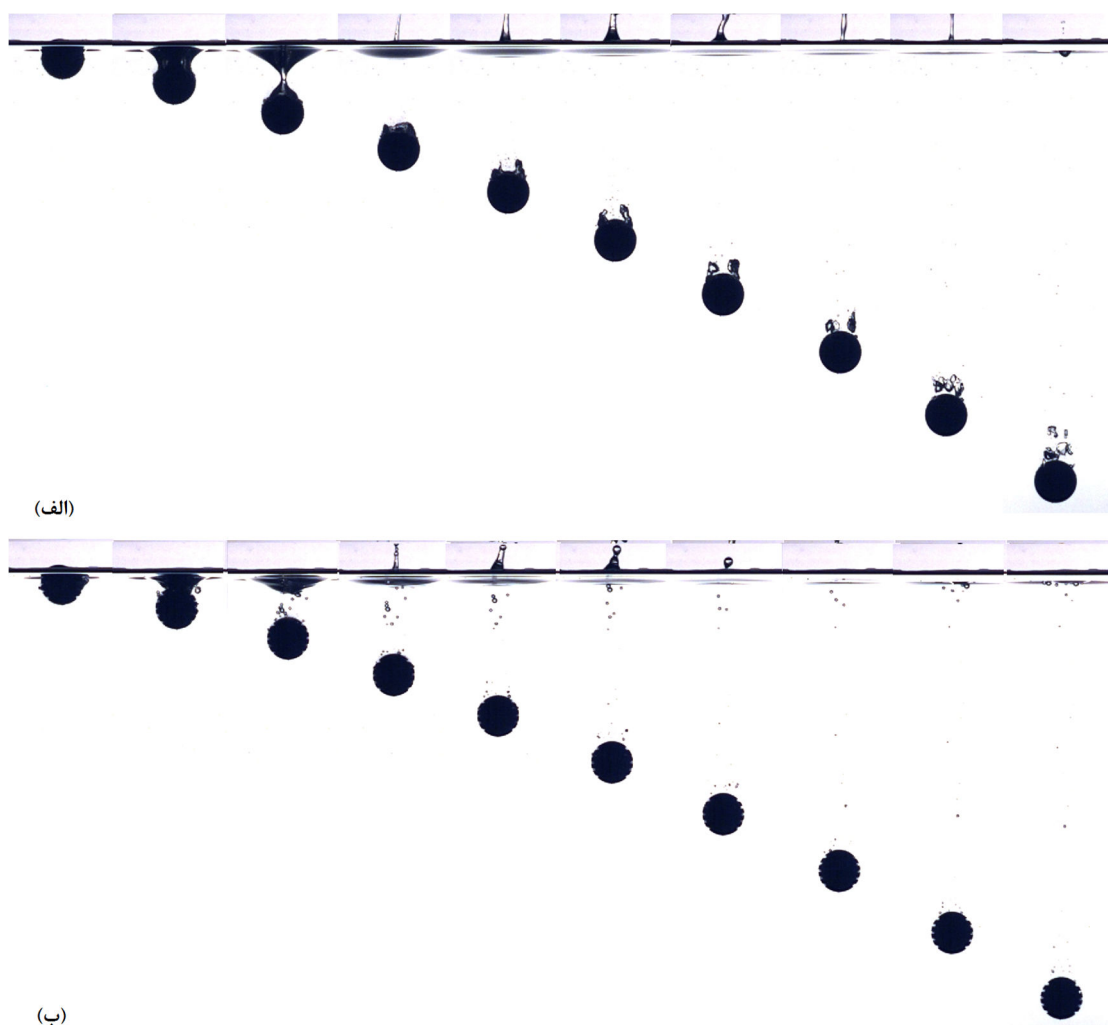
در گوی‌هایی که علاوه بر شیارهای افقی، شیارهای عمودی نیز دارند طول جدایش کاواک بیشتر است و لخته‌های بخار بیشتری روی سطح این گوی‌ها به وجود می‌آید. می‌توان مشاهده کرد که جدایش کاواک در این گوی‌ها درون شیارها رخ می‌دهد و بخشی از کاواک را بخار هوا تشکیل داده است، علت رخ دادن این اتفاق‌ها را می‌توان گرمای بیشتر درون شیارها نسبت به سطح گوی دانست که باعث بخار شدن آب بیشتری از سطح گوی می‌شود و این موضوع را می‌توان با مقایسه دو شکل ۴-۱۱ و ۴-۱۲ فهمید.



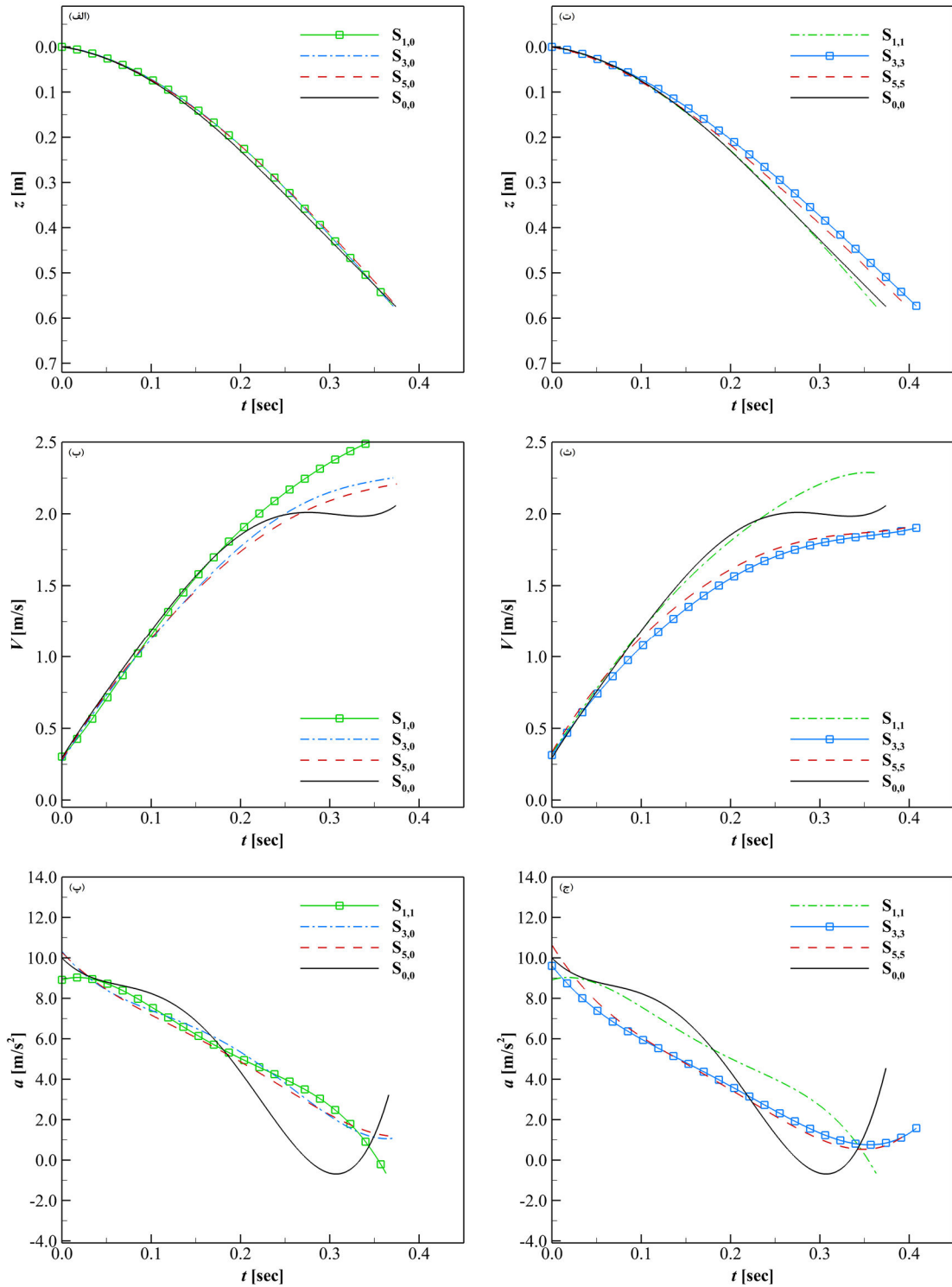
شکل ۴-۱۲: ورود گوی با شناسه $S_{5,5}$ به آب، دمای سطح گوی 100 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیک، ($U_0 = 0.31 [m \cdot s^{-1}]$, $B = 13.6$, $W = 13.6$, $Fr = 1.0$, $Re_0 = 702.5$, $D_0 = 20 [mm]$)

در شکل ۴-۱۴ نمودار مکان، سرعت و شتاب گوی‌های دارای شیار در مقایسه با گوی بدون شیار بر حسب زمان قابل مشاهده می‌باشد. در شکل ۴-۱۴ (الف) نمودار مکان لحظه‌ای سقوط گوی‌های شیاردار و گوی بدون شیار با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ که هنگام ورود در آب دمای 100 درجه سانتی-گراد دارند نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود گوی با شناسه $S_{1,0}$ مسیر حرکت گوی‌ها را در کمترین زمان طی کرده است و گوی با شناسه $S_{0,0}$ در مقایسه با سه گوی دیگر مسیر حرکت را در بیشترین زمان طی کرده است و در شکل ۴-۱۴ (ب و پ) قابل ملاحظه است که بیشترین سرعت و شتاب را نیز گوی $S_{1,0}$ و کمترین سرعت و شتاب را گوی $S_{0,0}$ داشته است. همچنین در شکل ۴-۱۴ (ت) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های دارای شیار با شناسه $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ و گوی بدون شیار با شناسه

$S_{0,0}$ که هنگام سقوط در آب دمای 100 درجه سانتی‌گراد دارند نمایش داده شده است. با توجه به این نمودارها گوی با شناسه $S_{1,1}$ مسیر حرکت را در کمترین زمان و گوی با شناسه $S_{3,3}$ مسیر حرکت را در بیشترین زمان طی کرده است. در شکل ۴-۱۴ (ث و ج) نیز نمودار سرعت و شتاب این چهار گوی را می‌توان مشاهده کرد و همان‌طور که مشاهده می‌شود گوی با شناسه $S_{1,1}$ دارای بیشترین سرعت و شتاب و گوی با شناسه $S_{3,3}$ دارای کمترین سرعت و شتاب می‌باشد. در شکل ۴-۱۳ نیز می‌توان تفاوت ورود گوی بدون شیار با گوی دارای شیار با شناسه $S_{5,0}$ به آب را مشاهده کرد.

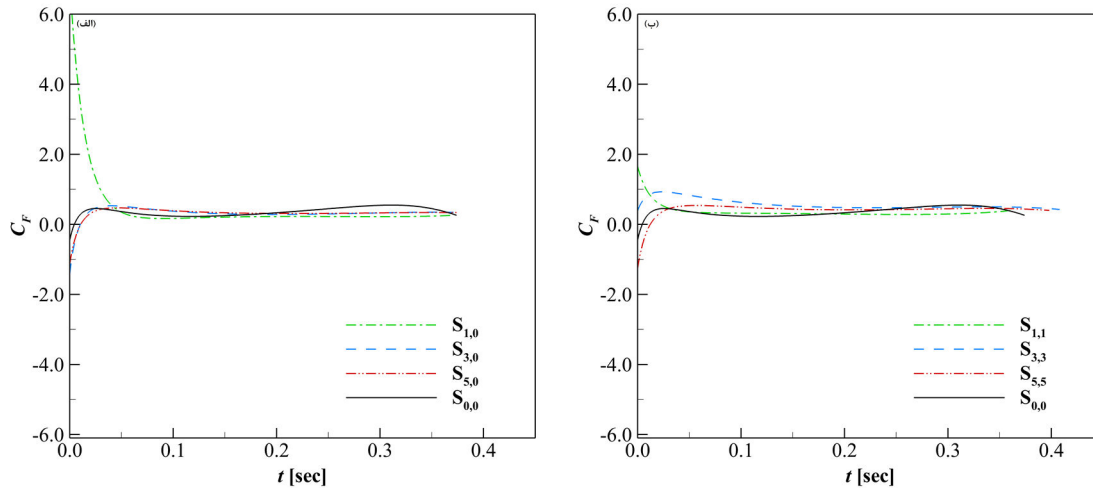


شکل ۴-۱۳: (الف) ورود گوی با شناسه $S_{0,0}$ به آب، دمای سطح گوی 100 درجه سانتی‌گراد در رژیم شبه استاتیکی. (ب) ورود به آب گوی با شناسه $S_{5,0}$ به آب، دمای سطح گوی 100 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیکی.



شکل ۴-۱۴: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$. (ب) نمودار سرعت گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$. (پ) نمودار شتاب گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$. (ت) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$. (ج) نمودار شتاب گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$.

در شکل ۴-۱۵ نمودارهای ضریب نیروی هیدرودینامیکی همه گوی‌ها آورده شده است و همان گونه که در بخش قبلی هم ذکر شد به دلیل اینکه در این رژیم سرعت و شتاب کم است نمی‌توان تحلیل دقیقی از رفتار هیدرودینامیکی گوی‌ها طبق این نمودارها انجام داد.



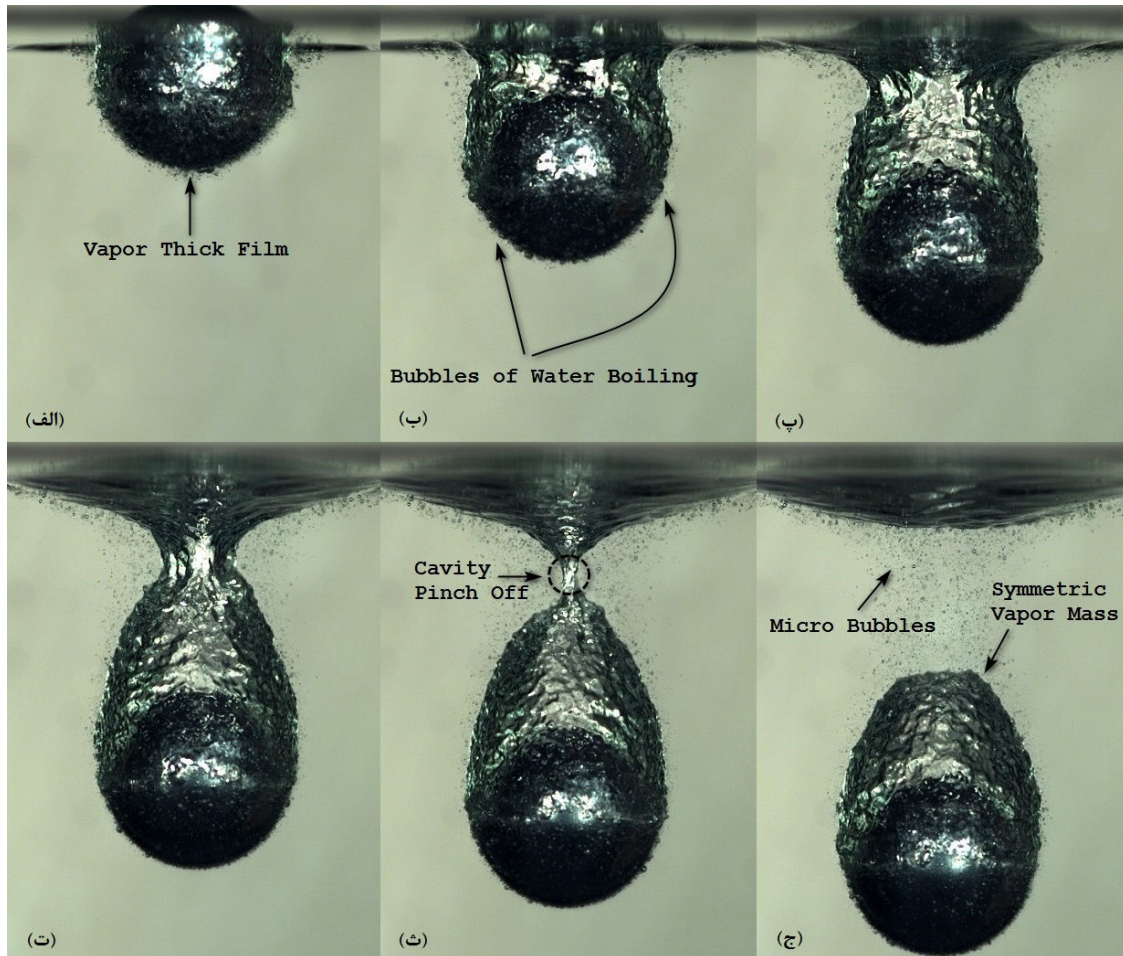
شکل ۴-۱۵: (الف) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$, $S_{1,0}$, $S_{3,0}$, $S_{5,0}$. (ب) نمودار ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$, $S_{1,1}$, $S_{3,3}$, $S_{5,5}$.

۴-۱-۳- نتایج سقوط گوی با دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در آب

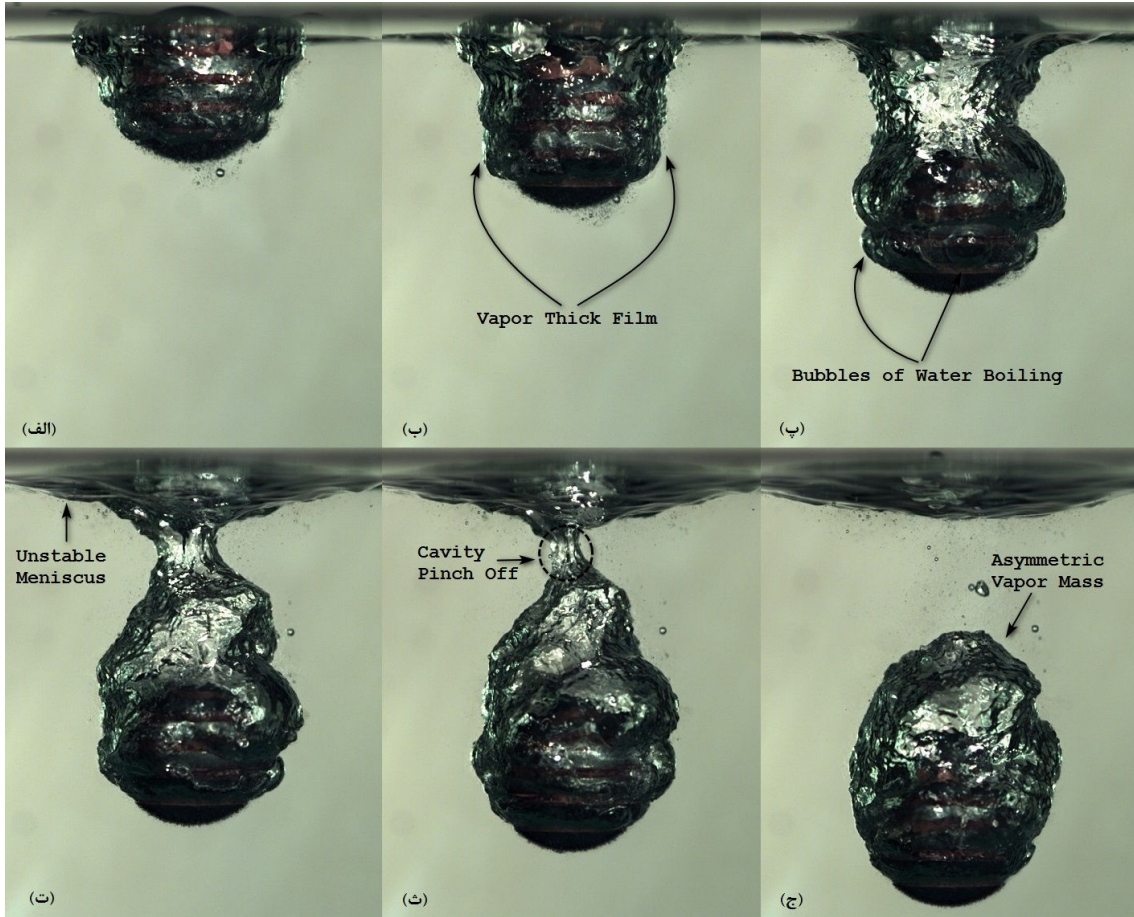
با بالا رفتن دمای گوی‌ها هنگام سقوط در آب طبیعتاً میزان آب بیشتری در اطراف آن‌ها بخار می‌شود اگر بخار به صورت یک هاله با ضخامت بالا اطراف گوی را بگیرد پدیده لیدنفروست رخ می‌دهد. هنگامی که گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد وارد آب می‌شود، آب در اطراف آن شروع به جوشش می‌کند و یک هاله بخار در اطراف آن تشکیل می‌شود به طوری که وقتی گوی تا نیمه در آب فرو می‌رود پوششی از بخار در قسمت پایین گوی تشکیل می‌شود. هم‌زمان حباب‌هایی مشاهده می‌شود که از سطح گوی جدا شده و تا قسمت بیرونی پوشش بخار حرکت کرده که منفجر می‌شوند و حباب‌های کوچکی از پوشش بخار جدا شده و به سمت بالا می‌روند که در شکل ۴-۱۶ (الف و ب) قابل مشاهده است. با افزایش عمق نفوذ گوی در آب و وقتی به صورت کامل در آب فرو

رفت (حدود ۲۰ هزارم ثانیه)، در قسمت بالای گوی یک توده بزرگ بخار مشاهده می‌شود که شکلی متقارن دارد که به گوی چسبیده است و به سمت پایین حرکت می‌کند. هم‌زمان به علت افزایش فشار آب حباب‌ها و پوشش بخاری که در قسمت پایین گوی وجود داشت به سمت بالای گوی حرکت می‌کنند و به توده بزرگ بخار در قسمت بالای گوی است می‌چسبند که در شکل ۴-۱۶ (پ و ت) نشان داده شده است. پس از آن کاواک گوی شروع به تشکیل می‌کند و به نقطه جدایش می‌رسد که در شکل ۴-۱۶ (ث) قابل ملاحظه است. بعد از جدایش، کاواک از توده بخار متصل به گوی جدا شده و به سمت سطح آب حرکت می‌کند و به همراه این توده بخار به سمت پایین حرکت می‌کند و با افزایش عمق نفوذ گوی و افزایش فشار آب این توده بخار به قسمت‌های بالاتر گوی رانده می‌شود و هم‌زمان حباب‌های کوچک نیز از اطراف توده بخار جدا شده و به سمت بالا حرکت می‌کنند و در شکل ۴-۱۶ (ج) می‌توان این اتفاق را مشاهده کرد. ورود گوی‌های دارای شیار به آب که دمای سطح آنها ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است، ناپایداری‌های بسیار بیشتری نسبت به گوی بدون شیار دارد. برای مثال گوی با شناسه $S_{5,0}$ هنگام ورود به آب و وقتی تا نیمه در آب فرو می‌رود، آب از میان شیارهای آن شروع به جوشش می‌کند و یک هاله ضخیم بخار اطراف آن را فرا می‌گیرد و هم‌زمان که گوی به سمت پایین حرکت می‌کند حباب‌های بزرگ بخار ناشی از جوشش آب را می‌توان مشاهده کرد که از میان شیارها به بیرون می‌آیند و به سمت بالا حرکت می‌کنند که در شکل ۴-۱۷ (الف و ب) قابل ملاحظه می‌باشد. وقتی گوی به صورت کامل وارد آب شد نیز مشاهده می‌شود که آب در میان شیارها در حال جوشش است و یک توده بخار بزرگ که شکلی نامتقارن و ناپایدار دارد را در قسمت بالای گوی تشکیل شده است و در شکل ۴-۱۷ (پ و ت) نشان داده شده است. با افزایش عمق نفوذ گوی در آب یک کاواک بسیار ناهموار تشکیل می‌شود و پس از چند هزارم ثانیه به نقطه جدایش می‌رسد و پس از آن کاواک به سمت سطح آب حرکت می‌کند و گوی در حالی که بیش از نیمی از آن را یک توده بزرگ بخار فرا گرفته است به سمت پایین حرکت می‌کند و هم‌زمان لخته‌ها و حباب‌های کوچک هوا نیز از آن جدا شده و به سمت بالا حرکت می‌کنند، این توده بخار در مقایسه با گوی بدون شیار بزرگ‌تر و ناپایدارتر است و در شکل ۴-۱۷

۱۷ (ث و ج) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۴-۱۶: ورود گوی با شناسه $S_{0,0}$ به آب، دمای سطح گوی 200 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیکی، ($U_0 = 0.31 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$, $B = 13.6$, $W = 13.6$, $Fr = 1.0$, $Re_0 = 702.5$, $D_0 = 20 \text{ [mm]}$)



شکل ۴-۱۷: ورود گوی با شناسه $S_{5,0}$ به آب، دمای سطح گوی 200 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیکی، ($U_0 = 0.31 [m.s^{-1}]$, $B = 13.6$, $W = 13.6$, $Fr = 1.0$, $Re_0 = 702.5$, $D_0 = 20 [mm]$)

در شکل ۴-۱۸ (الف) می‌توان ورود گوی بدون شیار به آب با دمای 200 درجه سانتی‌گراد و در شکل ۴-۱۸ (ب) نیز می‌توان ورود گوی دارای شیار با شناسه $S_{5,0}$ با دمای 200 درجه سانتی‌گراد را به صورت تصاویر نیمه عریض مشاهده کرد. در شکل ۴-۱۹ می‌توان نمودارهای مکان، سرعت و شتاب سقوط گوی‌های دارای شیار و گوی بدون شیار را بر حسب زمان مشاهده نمود. در شکل ۴-۱۹ (الف) نمودارهای مکان لحظه‌ای گوی‌های دارای شیار با شناسه $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ و گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود گوی با شناسه $S_{0,0}$ مسیر حرکت را در کمترین زمان طی و گوی با شناسه $S_{5,0}$ مسیر حرکت را در بیشترین زمان بین این چهار گوی طی کرده است. در شکل ۴-۱۹ (ب و پ) نیز به ترتیب نمودارهای سرعت و شتاب این چهار گوی آورده شده است و همان‌طور

که انتظار می‌رود گوی بدون شیار دارای بیشترین سرعت و شتاب است. در شکل ۴-۱۹ (ت) نیز نمودارهای مکان لحظه‌ای گوی‌های دارای شیار با شناسه $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ و گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ مشاهده می‌شود و در این نمودارها نیز گوی بدون شیار مسیر حرکت را در کمترین زمان طی کرده است. با توجه به نمودارهای موجود در شکل ۴-۱۹ (ث و ج) نیز می‌توان مشاهده کرد که گوی بدون شیار بیشترین سرعت و شتاب را نیز در بین این چهار گوی دارد. علت این اتفاق که در دمای ۲۰۰ درجه گوی بدون شیار دارای بیشترین سرعت است را می‌توان ناپایداری‌های موجود در توده بخار اطراف گوی‌های دارای شیار در مقایسه با گوی بدون شیار دانست. همان‌طور که در شکل ۴-۱۶ مشاهده می‌شود توده بخاری که اطراف گوی بدون شیار تشکیل شده است بسیار هموارتر از توده بخاری است که اطراف گوی دارای شیار $S_{5,0}$ تشکیل شده است و در شکل ۴-۱۷ قابل مشاهده است. از این مشاهدات می‌توان این موضوع را استنباط کرد که ناپایداری‌های اطراف توده بخار گوی‌های دارای شیار نیروی پسای اطراف گوی‌ها را افزایش داده‌اند و این باعث کاهش سرعت گوی‌های دارای شیار نسبت به گوی بدون شیار شده است. با توجه به اینکه هرچه تعداد شیارهای اطراف گوی‌ها زیاده‌تر بوده است، ناپایداری‌های اطراف آن زیاده‌تر شده است پس می‌توان این نکته را متذکر شد که در دمای ۲۰۰ درجه هر چه شیار سطحی گوی‌ها بیشتر شده است، نیروی پسای اطراف آن‌ها بیشتر و سرعت آن‌ها کاهش پیدا کرده است. در شکل ۴-۱۹ (ب و ث) با توجه به نمودارهای سرعت همه گوی‌ها می‌توان این موضوع را مشاهده کرد. در شکل ۴-۲۰ (الف) نیز می‌توان نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی گوی‌های با شناسه-های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ و در شکل ۴-۲۰ (ب) می‌توان نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ را مشاهده کرد.

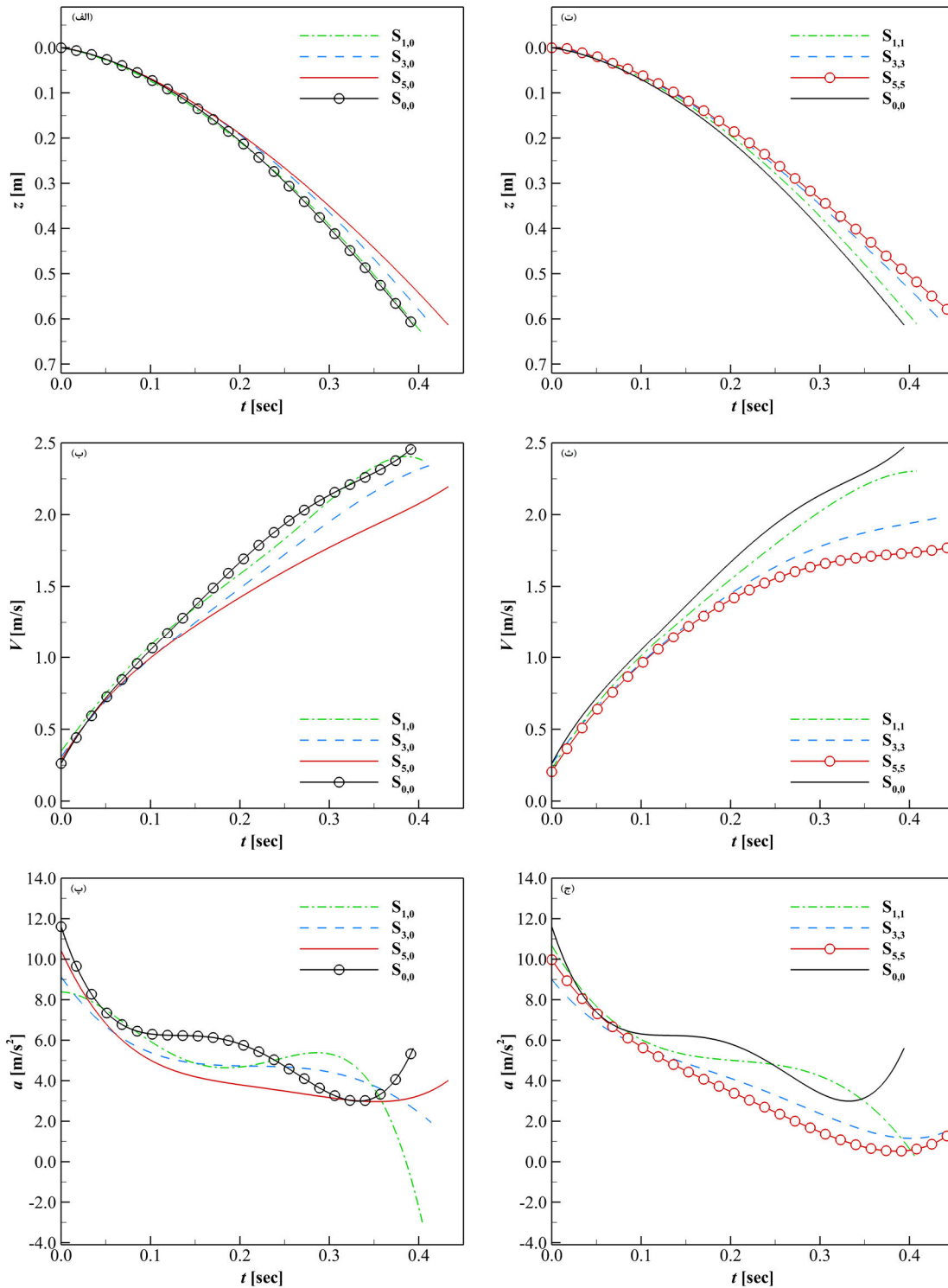


(الف)

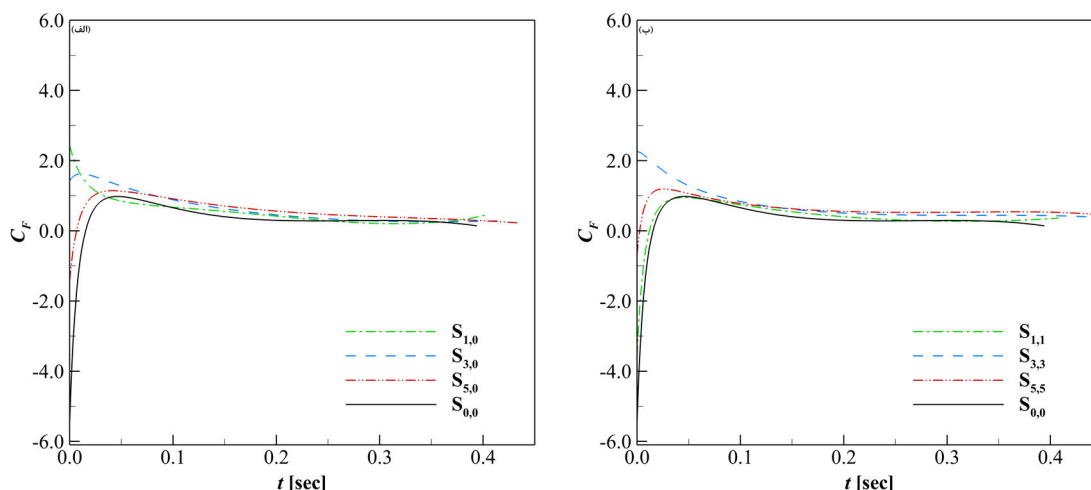


(ب)

شکل ۴-۱۸: (الف) ورود گوی با شناسه $S_{0,0}$ به آب، دمای سطح گوی 200 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیکی. (ب) ورود گوی با شناسه $S_{5,0}$ به آب، دمای سطح گوی 200 درجه سانتی‌گراد، در رژیم شبه استاتیکی.



شکل ۴-۱۹: (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$. (ب) نمودار سرعت گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$. (ت) نمودار شتاب گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$. (ث) نمودار شتاب گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$. (ج) نمودار شتاب گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$.

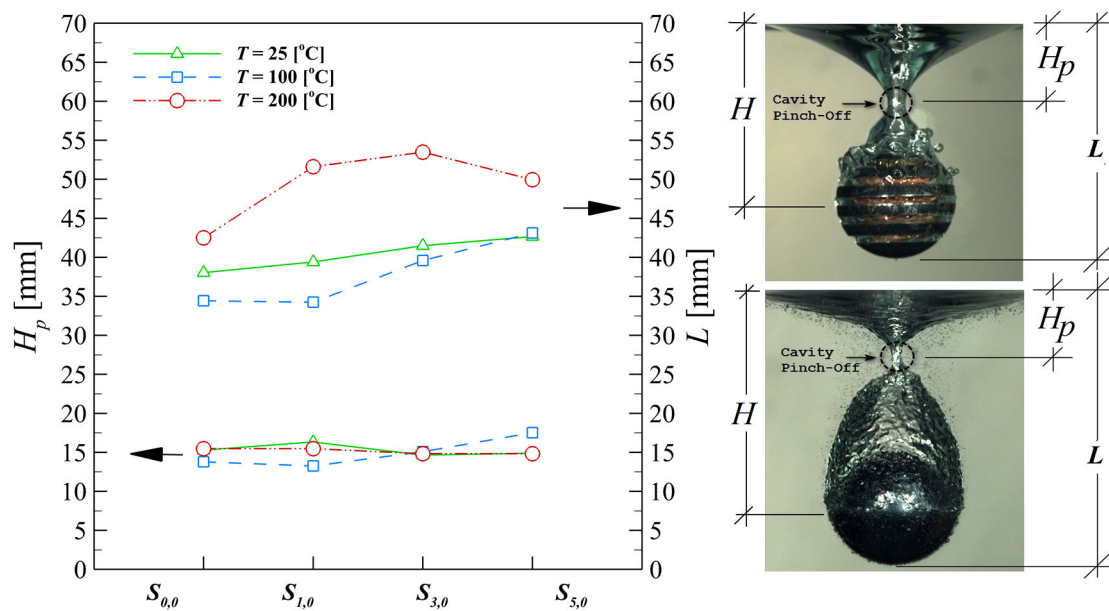


شکل ۴-۲۰: (الف) نمودارهای ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ ، $S_{0,0}$. (ب) نمودارهای ضریب نیروهای هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ ، $S_{0,0}$.

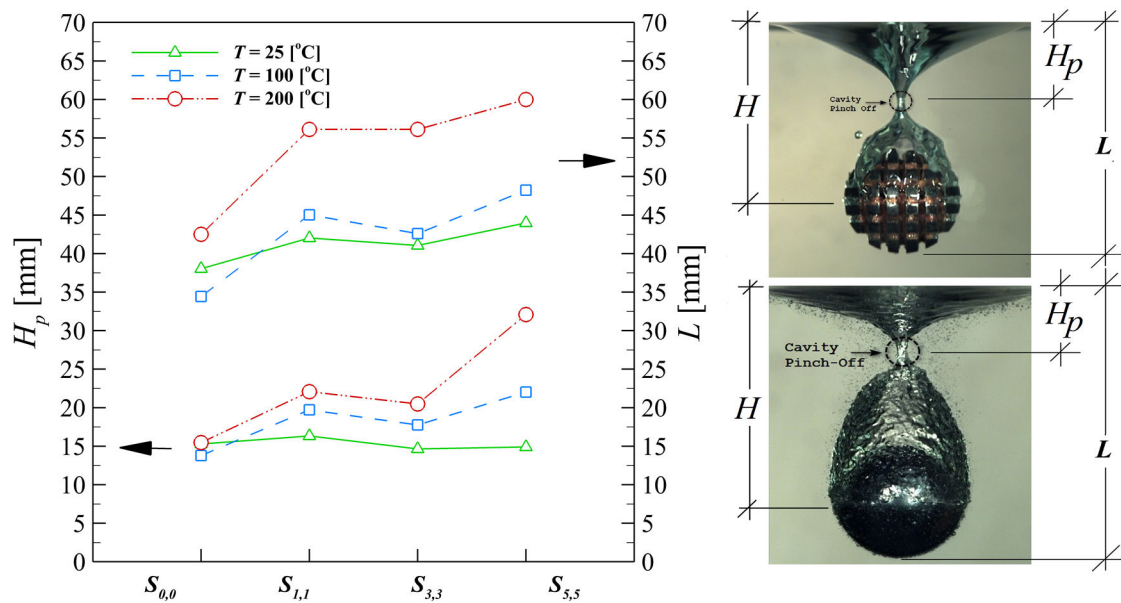
۴-۱-۴- اثر شیار و دمای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد بر طول کاواک

با توجه به مطالبی که در بخش‌های قبل درباره ورود گوی‌ها با الگوهای شیار مختلف و در دماهای متفاوت به آب ذکر شد می‌توان دریافت که تغییر این دو عامل به شدت بر نوع کاواکی که تشکیل می‌شود تأثیرگذار است و هرگونه تغییر در کاواک می‌تواند بر سرعت و نحوه حرکت گوی‌ها اثر بگذارد. در شکل ۴-۲۱ نمودارهای طول نقطه جدایش کاواک و طول کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S_{5,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{0,0}$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد بر حسب تعداد شیار هر گوی نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۴-۲۱ قابل ملاحظه است با افزایش دمای سطح گوی هنگام ورود به آب طول کاواک برای همه گوی‌ها افزایش پیدا کرده است و در دما ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین طول کاواک برای گوی‌ها مشاهده می‌شود و گوی با شناسه $S_{3,0}$ بیشترین طول کاواک را در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد دارد. کم‌ترین طول کاواک در میان این چهار گوی هم در ورود گوی‌ها با دمای سطح ۲۵ درجه به آب دیده می‌شود و گوی با شناسه $S_{1,0}$ کم‌ترین طول کاواک را دارد. مطلب دیگری که در نمودارهای شکل ۴-۲۱ قابل مشاهده است طول جدایش کاواک است که بر خلاف طول کاواک برای گوی‌ها وابسته به دما

نبوده و طول نقطه جدایش کاواک برای این چهار گوی تقریباً در یک محدوده است و حتی در دمای ۲۰۰ درجه برای گوی با شناسه $S_{5,0}$ به کم‌ترین میزان نیز رسیده است. در شکل ۴-۲۲ نیز نمودارهای طول نقطه جدایش کاواک و طول کاواک برای گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) درجه سانتی‌گراد بر حسب تعداد شیار هر گوی نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۴-۲۲ مشاهده می‌شود با افزایش شیار در همه دماها طول کاواک نیز افزایش پیدا کرده است و گوی‌های دارای شیار بیشترین طول کاواک را در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد دارند و در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد طول کاواک به صورت محسوسی در گوی‌های دارای شیار کاهش پیدا کرده است و در کم‌ترین میزان خود قرار دارد. گوی بدون شیار در هر سه دما کمترین طول کاواک را دارد به صورتی که در میان این چهار گوی، گوی بدون شیار در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد کمترین میزان طول کاواک و گوی دارای شیار با شناسه $S_{5,0}$ در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین طول کاواک را دارا می‌باشد. در شکل ۴-۲۲ نمودارهای طول نقطه جدایش این گوی‌ها را نیز می‌توان مشاهده کرد و همان‌گونه که قابل ملاحظه است با افزایش توأمان دمای سطح و تعداد شیار گوی‌ها طول نقطه جدایش نیز افزایش یافته است.



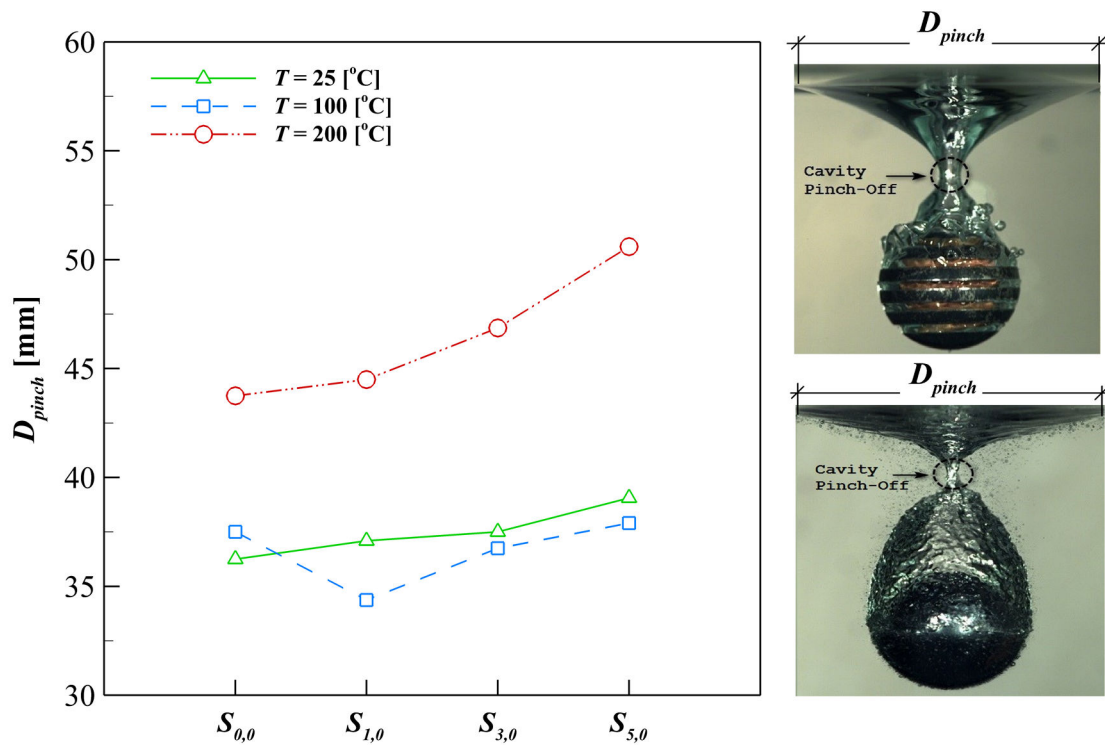
شکل ۴-۲۱: نمودار طول نقطه جدایش کاواک و طول کاواک گوی‌ها با شناسه $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ در دما-های (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد.



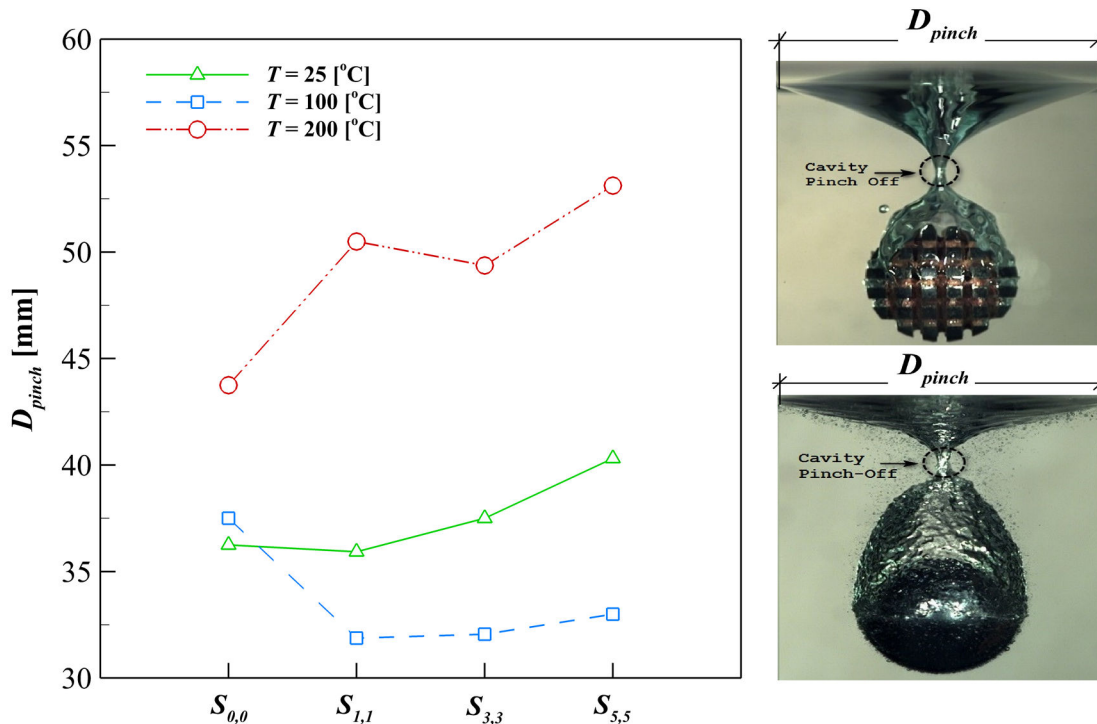
شکل ۴-۲۲: نمودار طول نقطه جدایش کاواک و طول کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S_{5,5}$, $S_{3,3}$, $S_{1,1}$, $S_{0,0}$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد.

قطر کاواک نیز یکی دیگر از فاکتورهایی است که با تغییر دما و تعداد شیار تأثیر می‌پذیرد و تغییر در اندازه آن می‌تواند بر چگونگی حرکت و افزایش و کاهش سرعت گوی‌ها هنگام حرکت در آب تأثیر بگذارد. در شکل ۴-۲۳ نمودارهای قطر کاواک (در لحظه جدایش کاواک) در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) برای گوی‌ها با شناسه‌های $S_{5,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{0,0}$ همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است در دمای با افزایش دما قطر کاواک نیز افزایش داشته است اما این تغییر برای تغییر دمای سطح گوی‌ها از ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بسیار کم بوده است و حتی گوی بدون شیار در دمای ۱۰۰ درجه کاهش قطر کاواک داشته است. با تغییر دمای سطح گوی‌ها به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد یک جهش بزرگ اتفاق افتاده است و قطر کاواک به نسبت قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. با افزایش تعداد شیار این گوی‌ها نیز در هر سه محدوده دمایی قطر کاواک افزایش پیدا کرده است، البته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد گوی با شناسه $S_{1,0}$ استثناء است و قطر کاواک آن از گوی بدون شیار کمتر است. در شکل ۴-۲۴ نیز نمودارهای قطر کاواک (در لحظه جدایش کاواک) در دماهای

(۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) برای گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش توأمان دما و تعداد شیار قطر کاواک نیز افزایش یافته است و البته استثناءهایی نیز مشاهده می‌شود. با تغییر دمای سطح گوی‌ها از ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ۱۰۰ درجه تغییر کمی در قطر کاواک گوی‌ها ایجاد شده است و قطر آن‌ها کمی افزایش یافته است و البته گوی بدون شیار با افزایش دما از ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قطر کاواکش کم‌تر شده است. با افزایش دمای سطح گوی‌ها به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز قطر کاواک گوی‌ها افزایش پیدا کرده است اما با یک نسبت قابل توجه. در کل با توجه به نمودارهای شکل‌های ۴-۲۳ و ۴-۲۴ می‌توان این نکته را بیان کرد که افزایش دما نسبت به افزایش تعداد شیار گوی‌ها اثر بیشتری بر افزایش قطر کاواک گوی‌ها داشته است.



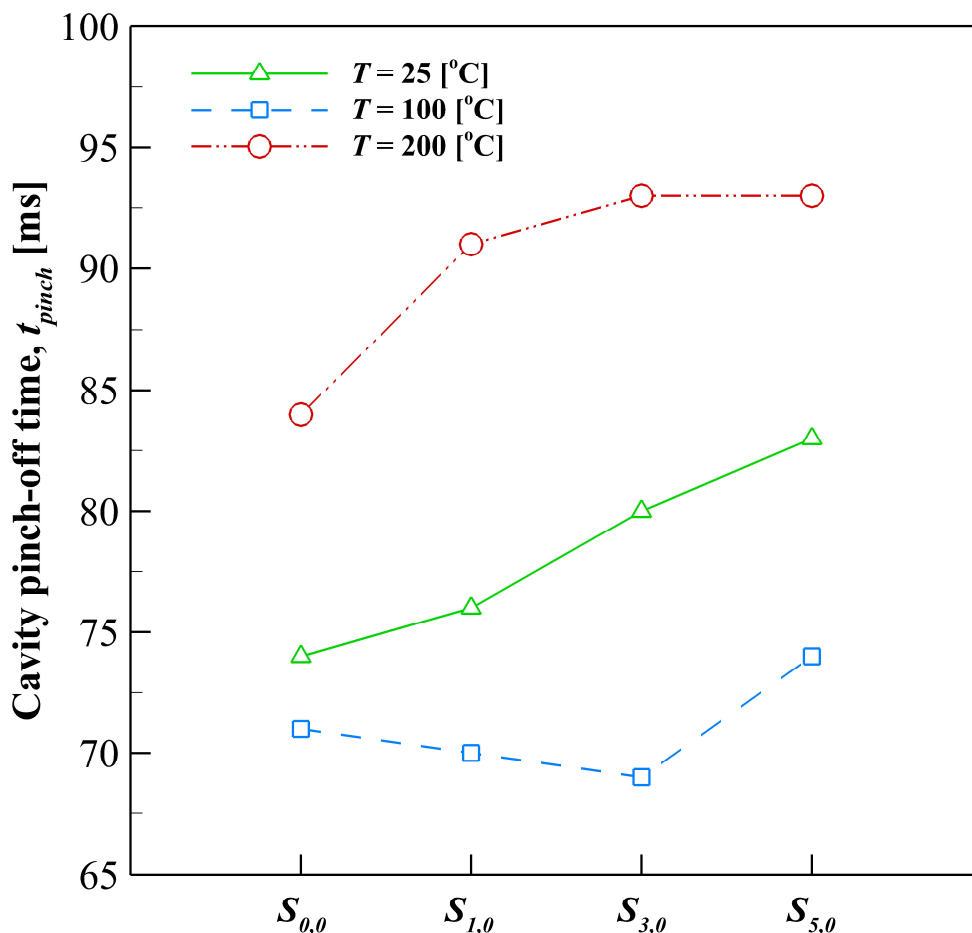
شکل ۴-۲۳: نمودار قطر کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد.



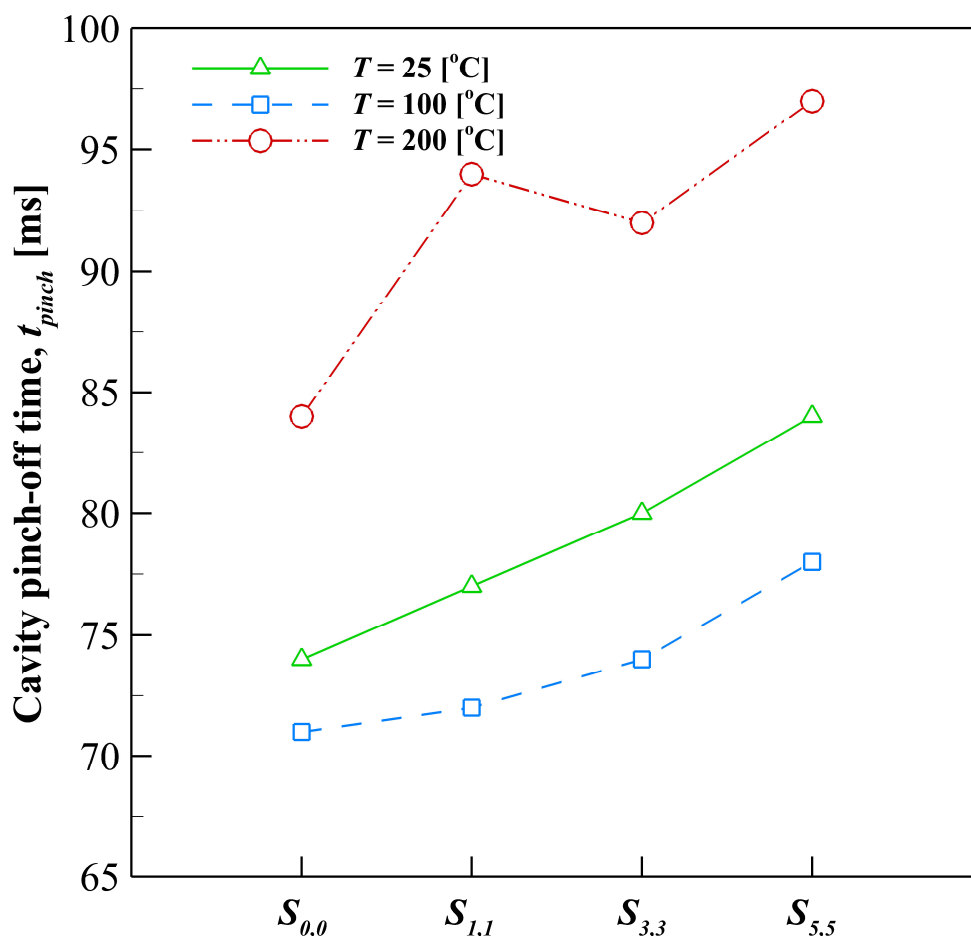
شکل ۴-۲۴: نمودار قطر کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S_{5,5}$, $S_{3,3}$, $S_{1,1}$, $S_{0,0}$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی-گراد.

زمان جدایش کاواک هم یکی از عواملی است که می‌تواند در رفتار گوی‌ها هنگام حرکت در زیر آب تأثیر زیادی را داشته باشد، البته این نکته قابل ذکر است که این عامل در کنار دیگر عواملی که ذکر شد بر رفتار گوی هنگام حرکت در زیر آب تأثیر بگذارد و به‌تنهایی نمی‌تواند عاملی تعیین کننده باشد. در شکل ۴-۲۵ نمودارهای زمان جدایش کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S_{5,0}$, $S_{3,0}$, $S_{1,0}$, $S_{0,0}$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد نشان داده شده است. همان‌گونه در شکل مشاهده می‌شود با افزایش دما و شیار زمان جدایش کاواک در این گوی‌ها نیز افزایش پیدا کرده است که البته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد دو استثناء نیز وجود دارد و گوی‌های $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ با افزایش تعداد شیار زمان جدایش کاواک کمتری نسبت به گوی بدون شیار دارند. با افزایش دمای گوی‌ها از ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد زمان جدایش کاواک کمی افزایش پیدا کرده است اما با افزایش دمای گوی‌ها به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد زمان جدایش کاواک گوی‌ها جهش نسبتاً قابل توجهی داشته است. در شکل

۴-۲۶ نیز نمودارهای زمان جدایش کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است در این گوی‌ها نیز مانند گوی‌هایی که تنها شیار افقی داشتند با افزایش دما و شیار زمان جدایش کاواک نیز افزایش می‌یابد و البته در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد یک استثناء دیده می‌شود و آن گوی $S_{3,3}$ است که نسبت به گوی $S_{1,1}$ زمان جدایش کمتری دارد. همان‌طور که در مورد گوی‌های با شیار افقی نیز گفته شد با افزایش دما از ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد زمان جدایش در این گوی‌ها که هم شیار افقی و هم شیار عمودی دارند نیز به میزان کمی افزایش پیدا می‌کند اما در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش زمان جدایش کاواک جهش پیدا می‌کند و اختلاف قابل توجهی با دو دمای دیگر دارد.



شکل ۴-۲۵: نمودار زمان جدایش کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد.



شکل ۴-۲۶: نمودار زمان جدایش کاواک گوی‌ها با شناسه‌های $S_{5,5}$, $S_{3,3}$, $S_{1,1}$, $S_{0,0}$ در دماهای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) سانتی‌گراد.

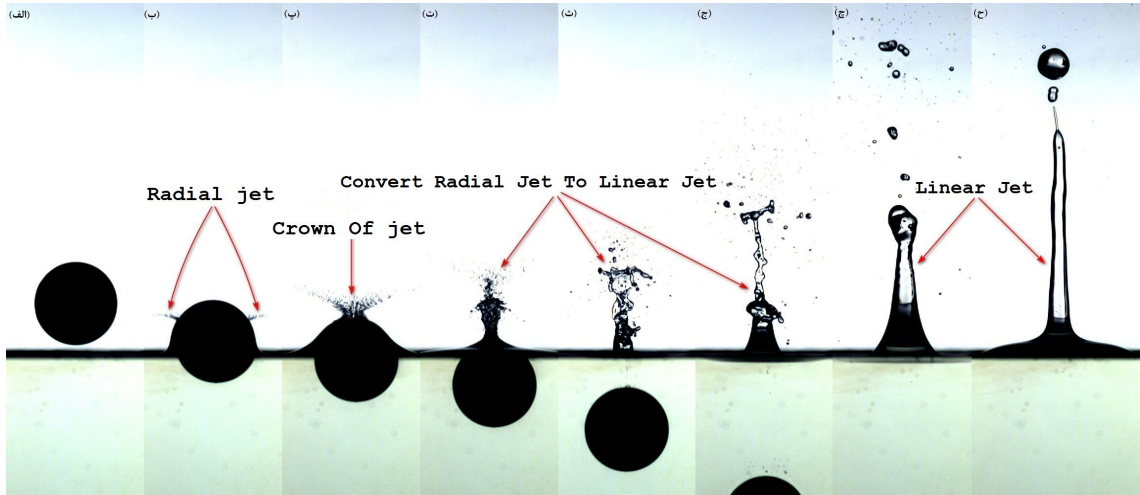
۴-۲- نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر

در این بخش نتایج اثر شیار سطحی بر سرعت، شتاب و ضریب هیدرودینامیکی گوی‌ها آورده شده است. سرعت سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری $3/13$ متر بر ثانیه می‌باشد و از رابطه $U_0 \approx \sqrt{2gh_r}$ محاسبه شده است. مقادیر اعداد بی‌بعد در این سرعت برای این گوی‌ها با قطر ۲۰ میلی‌متر به صورت $Re_0 = 7025$ و $Fr = 100$ ، $W = 1360$ ، $B = 13.60$ می‌باشند. مشخصات نوع و شکل کاواک‌های تشکیل شده در آب پس از سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و اعداد بی‌بعد برای گوی با قطر ۲۰

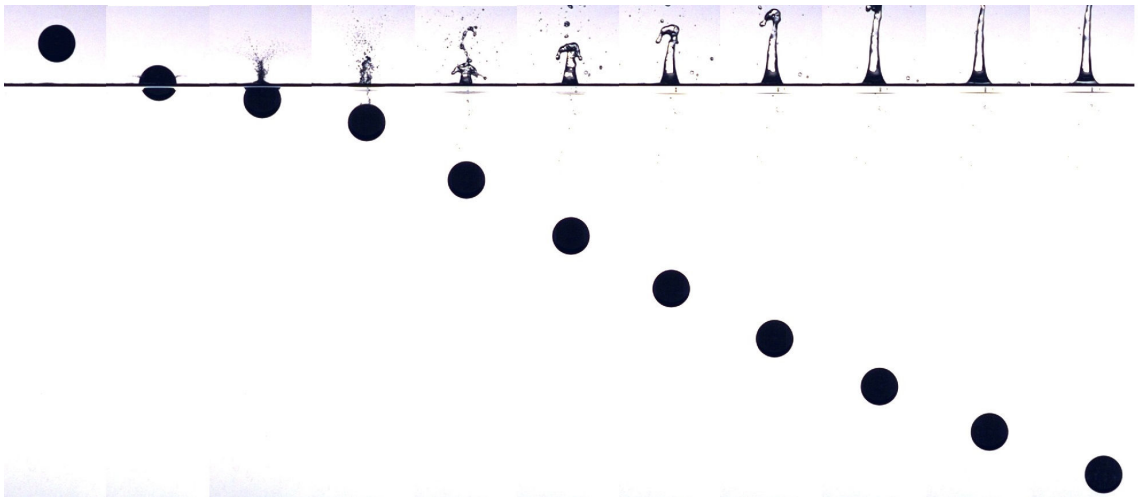
میلی‌متر نشان دهنده این است که، سقوط از این ارتفاع در حوزه رژیم جدایش عمیق قرار دارد، البته همه رژیم‌های برخورد دارای محدوده‌ای هستند و منحصر به یک سرعت برخورد نمی‌باشند. کاواک‌هایی که پس از برخورد گوی‌های دارای شیار به سطح آب در این رژیم به وجود می‌آیند بسیار بزرگ‌تر از کاواک‌هایی هستند که در رژیم شبیه استاتیک تشکیل می‌شوند و شکل کلی آن‌ها نیز با کاواک‌های تشکیل شده در رژیم شبه استاتیک تفاوت اساسی دارد. نکته جالب این است که در این رژیم برخورد کاواک تشکیل شده توسط یک گوی با بقیه تفاوت اساسی دارد و یک گوی دارای شیار هم اصلاً کاواکی تشکیل نمی‌دهد.

گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر سقوط می‌کند و به سطح آب برخورد می‌کند، و در هنگام برخورد از کناره‌های گوی آب به شکل یک جت شعاعی با سرعت به سمت بالا حرکت می‌کند که در شکل ۴-۲۷ (الف) نشان داده شده است. چون سطح گوی آب‌دوست است این جت شعاعی به سطح گوی می‌چسبد و پس از حرکت از روی سطح گوی به بالای گوی می‌رسد و به صورت یک جت خطی در می‌آید که در شکل ۴-۲۷ (پ و ت) می‌توان این موضوع را مشاهده کرد. پس از آن جت به سمت بالا حرکت می‌کند که در نهایت به صورت پاشش قطره‌های آب میرا می‌شود و پس از ۱۵ هزارم ثانیه یک جت پیوسته آب تشکیل می‌شود که به سمت بالا حرکت می‌کند و پس از مدتی میرا می‌شود و در آب سقوط می‌کند که در شکل ۴-۲۷ (ث-ح) نشان داده شده است. هنگام سقوط گوی بدون شیار از این ارتفاع ورود هوا حداقل است و تنها یک کاواک با ابعاد بسیار کوچک تشکیل می‌شود و گوی پس از آن به حرکت خود در آب ادامه می‌دهد تا به انتهای مسیر برسد، در شکل ۴-۲۸ بخشی از مسیر حرکت این گوی در آب نشان داده شده است. گوی با شناسه $S_{1,0}$ نیز در هنگام سقوط در آب از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری با اینکه سطح آن دارای یک شیار افقی است و انتظار می‌رود دارای خاصیت آب‌گریزی در آن محل را داشته باشد، رفتاری دقیقاً مشابه با گوی بدون شیار را دارد با این تفاوت که پس از برخورد این گوی به سطح آب یک کاواک بسیار کوچک استوانه‌ای تشکیل می‌شود که تا قسمتی از مسیر به بالای گوی چسبیده است و در شکل ۴-۲۹ (الف-ح) چگونگی برخورد این گوی با سطح آب

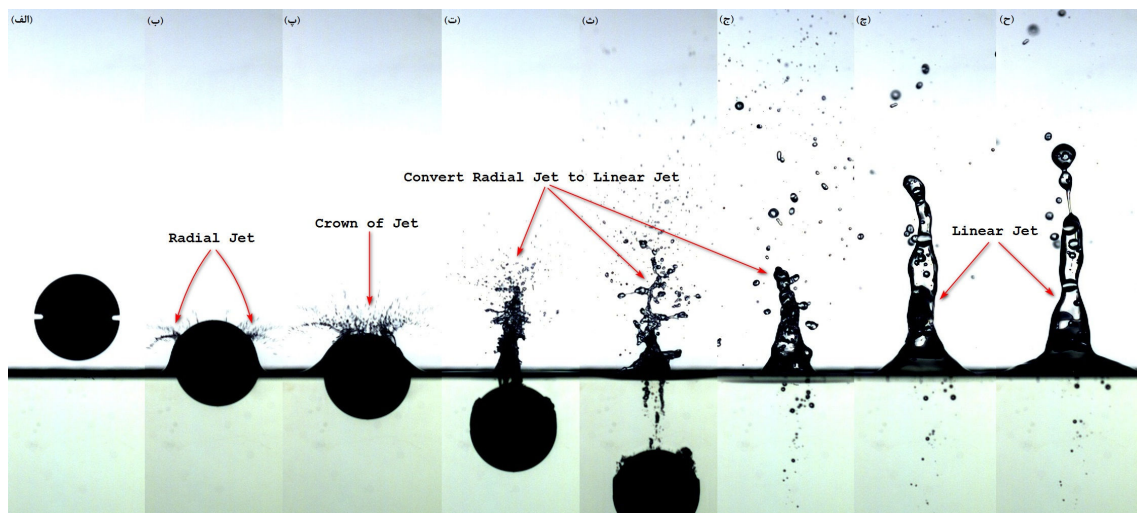
قابل ملاحظه است. با افزایش عمق نفوذ گوی در آب به صورت لخته‌های هوا از آن جدا می‌شود که در شکل ۴-۳۰ می‌توان بخشی از چگونگی حرکت این گوی در زیر آب را مشاهده کرد.



شکل ۴-۲۷: برخورد گوی با شناسه $S_{0,0}$ به سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 3.13 \text{ [m.s}^{-1}], B = 13.6, W = 13 \square, Fr = 1 \square, Re_0 = 702 \square, D_0 = 20 \text{ [mm]})$



شکل ۴-۲۸: برخورد گوی با شناسه $S_{0,0}$ به سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 3.13 \text{ [m.s}^{-1}], B = 13.6, W = 13 \square, Fr = 1 \square, Re_0 = 702 \square, D_0 = 20 \text{ [mm]})$



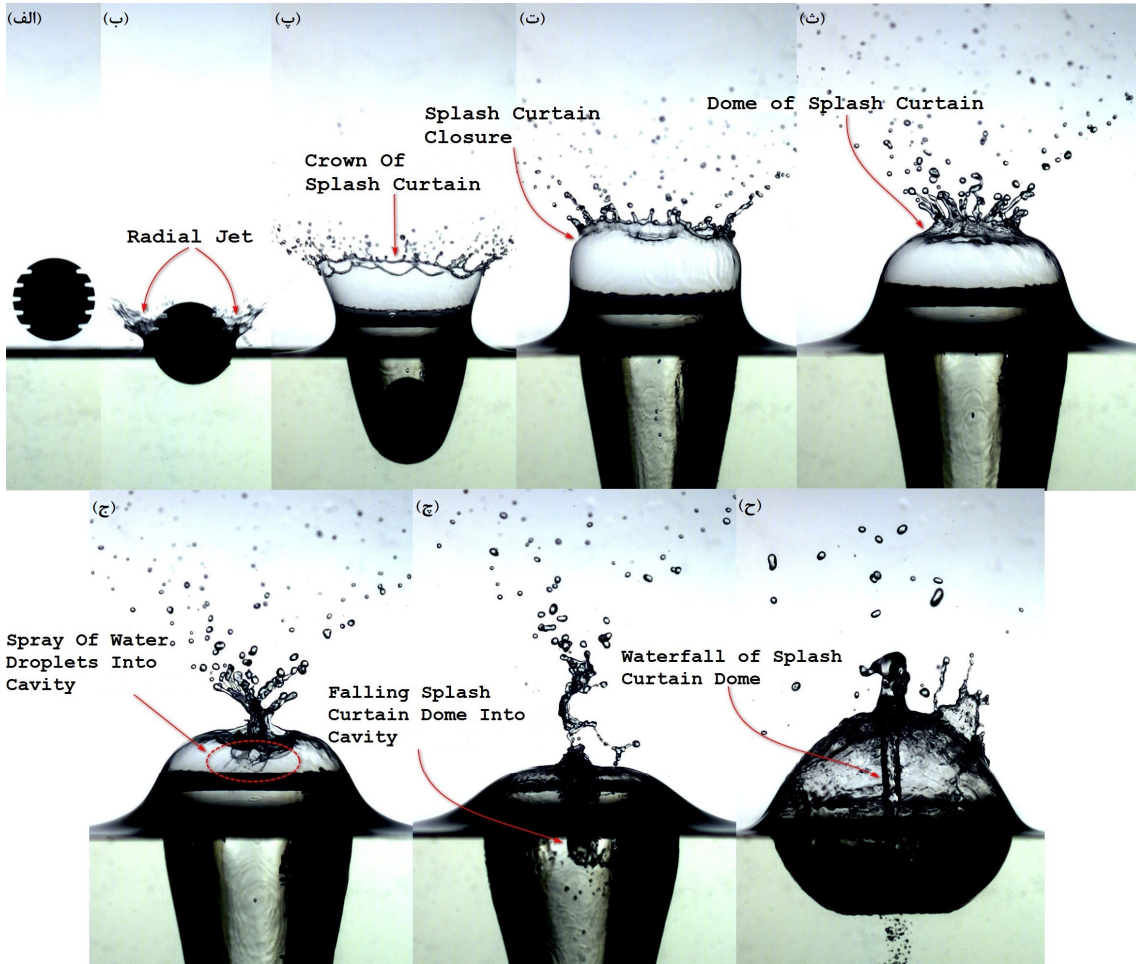
شکل ۴-۲۹: برخورد گوی با شناسه $S_{1,0}$ به سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 3.13 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 13 \text{ [mm]}, Fr = 1 \text{ [mm]}, Re_0 = 702 \text{ [mm]}, D_0 = 20 \text{ [mm]})$



شکل ۴-۳۰: برخورد گوی با شناسه $S_{1,0}$ به سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 3.13 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 13 \text{ [mm]}, Fr = 1 \text{ [mm]}, Re_0 = 702 \text{ [mm]}, D_0 = 20 \text{ [mm]})$

در هنگام سقوط پنج گوی دیگر از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری در آب کاوک‌های بزرگ و قابل توجهی تشکیل می‌شود و این گوی‌ها به خاطر خاصیت آب‌گریزی که ناشی از ایجاد شیار روی سطح آن‌ها است مقدار زیادی هوا به داخل آب می‌کشند. به هنگام برخورد گوی‌های با شناسه‌های $S_{3,0}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,0}$ و $S_{5,5}$ کاواک‌هایی مشابه تشکیل می‌شود با این تفاوت که گوی‌های دارای شیار عمودی کاواک‌هایی که تشکیل می‌دهند سطح ناهموارتری نسبت به گوی‌هایی که تنها شیار افقی دارند تشکیل می‌دهند ولی همان‌طور که گفته شد روند تشکیل کاواک در این چهار گوی یکسان می‌باشد. برای مثال گوی با شناسه $S_{5,0}$ پس از برخورد به سطح آب ابتدا قطره‌های آب که به شکلی شعاعی در اطراف گوی به سمت کناره‌های گوی پاشیده می‌شوند و در پشت سر آن‌ها یک جت شعاعی آب تشکیل شده و از کناره‌های گوی شروع به رشد می‌کند، که به دلیل اینکه سطح گوی با ایجاد شیار آب‌گریز شده است به سطح گوی نمی‌چسبد و از سطح گوی دوری می‌کند که در شکل ۴-۳۱ (ب) می‌توان آن را مشاهده کرد. گوی به‌صورت کامل به داخل آب فرو می‌رود و کاواکی تقریباً بزرگ شروع به تشکیل می‌کند، هم‌زمان جت شعاعی تشکیل شده ناشی از برخورد گوی به سطح آب بزرگ‌تر شده تا به پرده پاشش تبدیل می‌شود و وقتی با افزایش عمق نفوذ گوی کاواک به نقطه جدایش می‌رسد، پرده پاشش تقریباً بسته شده و شکلی گنبدی شکل به خود می‌گیرد و در شکل ۴-۳۱ (پ-ث) نشان داده شده است. پس از آن کاواک به دو قسمت تقسیم شده و قسمت بالایی کاواک همراه با یک جت برگشتی قدرتمند و پیوسته که گاهی ارتفاع نهایی آن تا ۴۰ سانتی‌متر هم می‌رسد به سمت سطح آب حرکت می‌کند و جت با پرده پاشش که کاملاً شکل گنبدی به خود گرفته است برخورد کرده و اندکی از سرعت آن کاسته می‌شود ولی پرده پاشش را شکافته و به سمت بالا حرکت می‌کند تا میرا شود، در شکل ۴-۳۱ (ج-ح) این موضوع قابل مشاهده است. قسمت دوم کاواک نیز که گوی را احاطه کرده است همراه با یک جت برگشتی کوچک به سمت پایین حرکت می‌کند و در شکل ۴-۳۲ نشان داده شده است، سپس جت با محیط دوفازی درون کاواک و دیواره آن برخورد نموده و کاواک‌ها کوچک‌تری به شکل کره و استوانه درون کاواک اصلی تشکیل می‌دهد که پس از تشکیل به سمت بالای کاواک اصلی حرکت می‌کنند و هم‌زمان دیواره‌های کاواک

اصلی دچار فروریزش می‌شود که چگونگی این اتفاق را می‌توان در شکل‌های ۴-۳۳ و ۴-۳۴ مشاهده کرد.



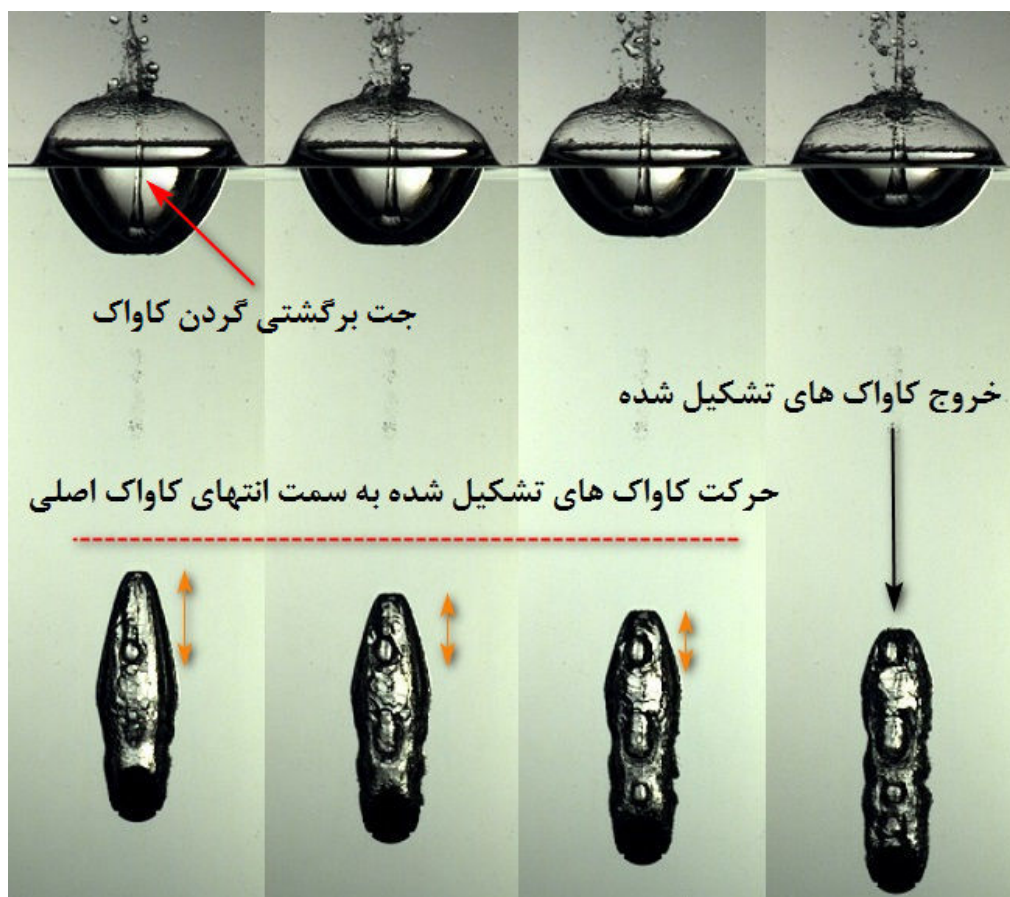
شکل ۴-۳۱: برخورد گوی با شناسه $S_{5,0}$ به سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 3.13 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 13\text{[mm]}, Fr = 1\text{[mm]}, Re_0 = 7025, D_0 = 20 \text{ [mm]})$



شکل ۴-۳۲: برخورد گوی با شناسه $S_{5,0}$ به سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 3.13 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 13\text{[mm]}, Fr = 1\text{[mm]}, Re_0 = 702\text{[mm]}, D_0 = 20 \text{ [mm]})$

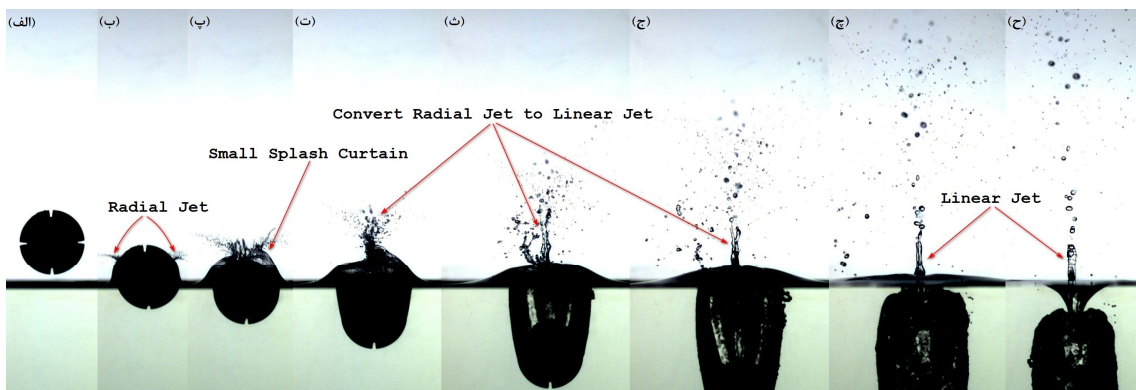


شکل ۴-۳۳: چگونگی تشکیل شدن جت برگشتی در برخورد گوی با شناسه $S_{5,0}$ به سطح آب، $(U_0 = 3.13 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 13\text{ }\square, Fr = 1\text{ }\square, Re_0 = 702\text{ }\square, D_0 = 2\text{ }\square \text{ [mm]})$

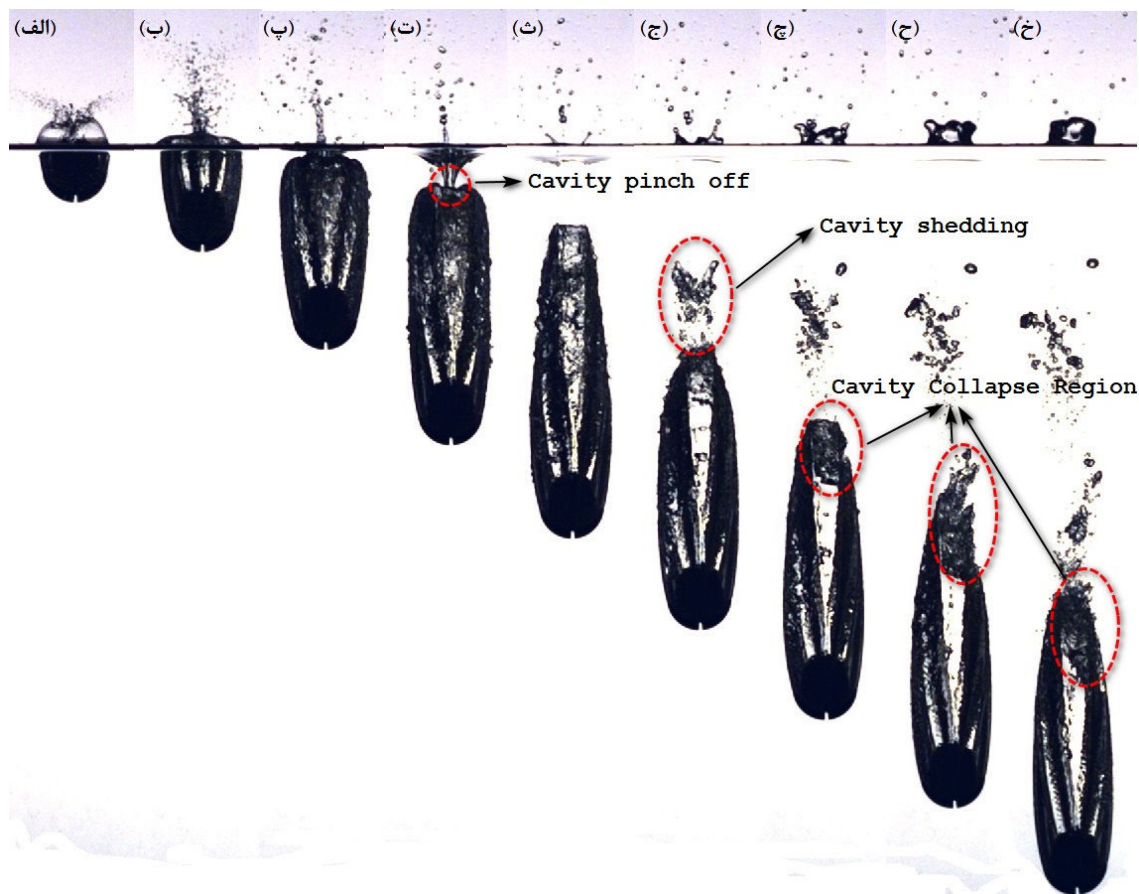


شکل ۴-۳۴: برخورد جت برگشتی با محیط دوفازی درون کاواک و دیواره های کاواک، $(U_0 = 3.13 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 13\text{ }\square, Fr = 1\text{ }\square, Re_0 = 702\text{ }\square, D_0 = 20 \text{ [mm]})$

کاواکی که در هنگام برخورد گوی با شناسه $S_{1,1}$ از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری به سطح آب تشکیل می‌شود با کاواکی که بقیه گوی‌ها هنگام برخورد به سطح آب تشکیل می‌دهند تفاوت دارد، پس از برخورد این گوی به سطح آب یک جت شعاعی کوچک تشکیل شده که رو سطح گوی حرکت می‌کند و وقتی گوی بیش از نیمه وارد آب شد، جت شعاعی از سطح گوی فاصله می‌گیرد و یک پرده پاشش آب شکل می‌گیرد و در شکل ۴-۳۵ (الف-پ) نشان داده شده است. وقتی گوی به‌صورت کامل وارد آب شد این پرده پاشش در فاصله بسیار کمی از سطح آب به شکل گنبدی شکل در می‌آید و پس از آن یک جت خطی کوچک تشکیل می‌شود و در شکل ۴-۳۵ (ت-ج) نشان داده شده است. با افزایش عمق نفوذ گوی در آب کاواک گوی شروع به شکل گرفتن می‌کند و پس از حدود ۵۰ هزارم ثانیه جدایش کاواک رخ می‌دهد که در فاصله کمی از سطح آب اتفاق می‌افتد و همان‌گونه که در شکل ۴-۳۵ (چ و ح) مشخص است در این برخورد کاواکی که تشکیل می‌شود گردن کوچکی دارد. بعد از جدایش کاواک، گردن کوچک کاواک به سمت سطح آب حرکت می‌کند و گوی همراه به کاواکی که آن را احاطه کرده است به سمت پایین حرکت می‌کند و با افزایش عمق آب کاواک از انتها شروع به فروریزش کرده و لخته‌های هوا از آن جدا می‌شوند و این اتفاق تا انتهای مسیر حرکت گوی صورت می‌پذیرد و در شکل ۴-۳۶ (ت-خ) می‌توان این موضوع را مشاهده کرد.



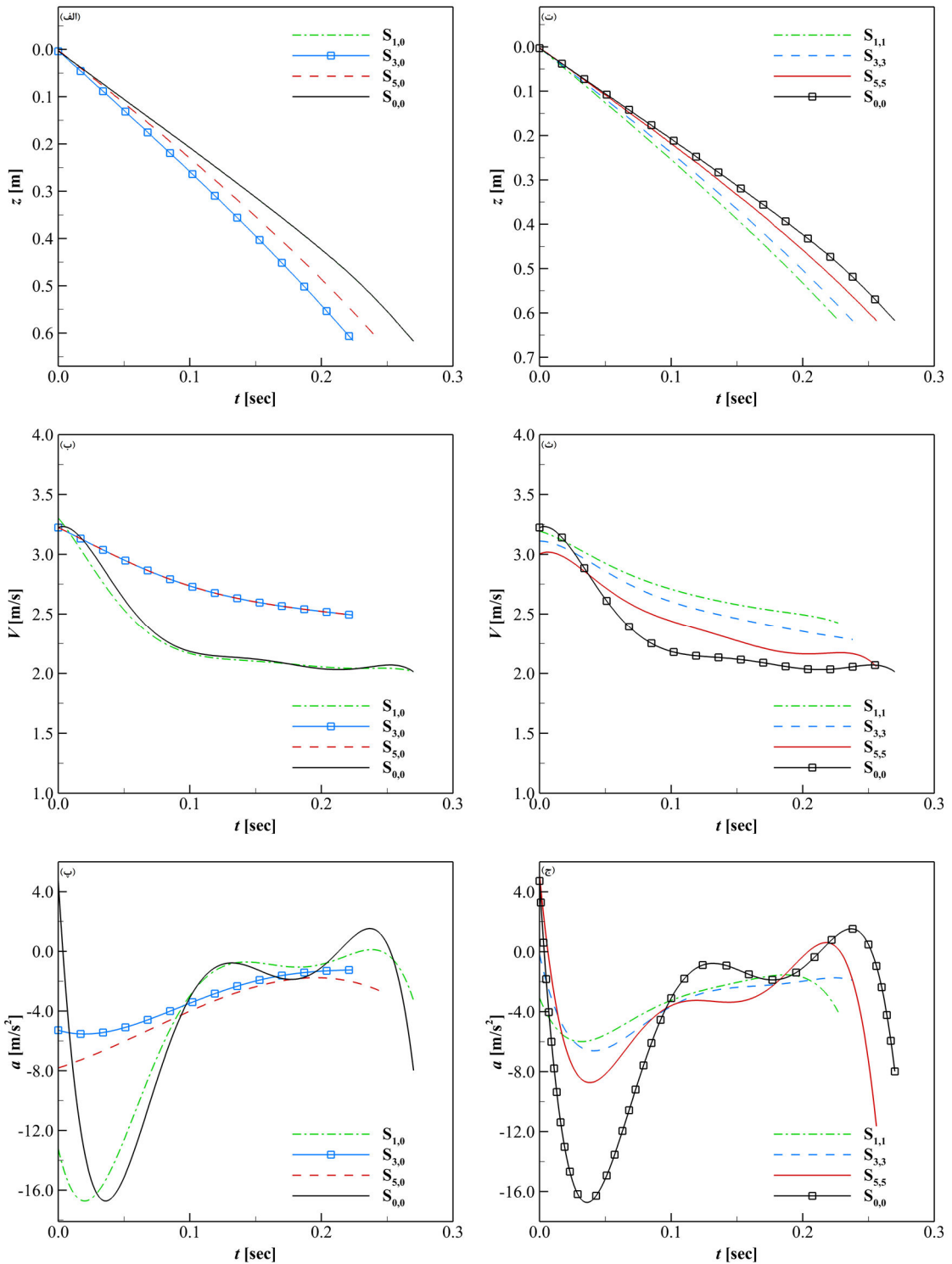
شکل ۴-۳۵: برخورد گوی با شناسه $S_{1,1}$ به سطح آب، دمای گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 3.13 [m \cdot s^{-1}], B = 13.6, W = 13\%, Fr = 1\%, Re_0 = 702\%, D_0 = 20 [mm])$



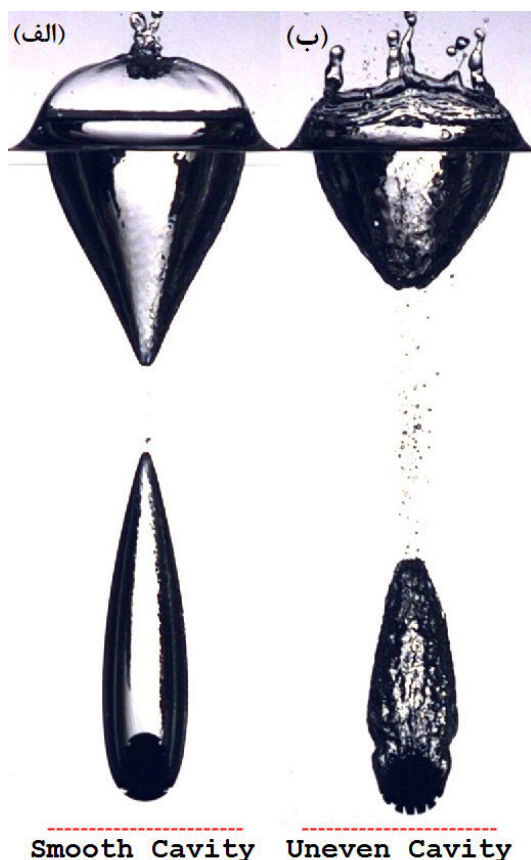
شکل ۴-۳۶: برخورد گوی با شناسه $S_{1,1}$ به سطح آب، دمای گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 3.13 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 13\text{ }\square, Fr = 1\text{ }\square, Re_0 = 7\text{ }\square, D_0 = 20 \text{ [mm]})$

در شکل ۴-۳۷ نمودارهای مکان، سرعت و شتاب بر حسب زمان در هنگام سقوط از ارتفاع ۵۰ سانتی-متری نشان داده شده است. در شکل ۴-۳۷ (الف) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های دارای شیار با شناسه $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ و گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ را می‌توان مشاهده کرد و همان‌گونه که قابل ملاحظه است گوی با شناسه $S_{3,0}$ مسیر حرکت را در کمترین زمان و گوی با شناسه $S_{0,0}$ مسیر حرکت را در بیشترین زمان از بین این چهار گوی طی کرده است. نمودار مکان گوی با شناسه $S_{1,0}$ نیز تقریباً بر نمودار گوی بدون شیار منطبق است و رفتاری مشابه با این گوی دارد. در شکل ۴-۳۷ (ب و پ) نیز به ترتیب نمودارهای سرعت و شتاب این چهار گوی را می‌توان مشاهده کرد و همان‌گونه که مشاهده می‌شود گوی با شناسه $S_{3,0}$ بیشترین سرعت و شتاب را در بین این چهار گوی دارد و البته گوی با شناسه $S_{5,0}$ نموداری کاملاً شبیه به این گوی دارد، گوی با شناسه $S_{0,0}$ نیز دارای کمترین سرعت و

شتاب است. در واقع در اینجا تأثیر تشکیل کاواک بر افزایش سرعت گوی‌ها کاملاً مشهود است و در نمودارهای شکل ۴-۳۷ (ب) می‌توان مشاهده کرد که دو گوی با شناسه‌های $S_{0,0}$ و $S_{1,0}$ که هنگام برخورد به سطح آب کاواک تشکیل نمی‌دهند کمترین سرعت را دارند و دو گوی دیگر با شناسه‌های $S_{3,0}$ و $S_{5,0}$ که هنگام برخورد با سطح آب کاواک تشکیل می‌دهند سرعتی به مراتب بیشتر از دو گوی دیگر دارند. در شکل ۴-۳۷ (ت) نیز نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های دارای شیار با شناسه‌های $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ و همچنین گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ قابل مشاهده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود گوی با شناسه $S_{1,1}$ مسیر حرکت را در کمترین زمان و گوی با شناسه $S_{0,0}$ مسیر حرکت را در بیشترین زمان در بین این چهار گوی طی کرده‌اند. همچنین در شکل ۴-۳۷ (ث و ج) به ترتیب نمودار سرعت و شتاب این گوی‌ها را می‌توان مشاهده کرد که طبیعتاً گوی با شناسه $S_{1,1}$ بیشترین سرعت و گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ دارای کمترین سرعت در بین چهار گوی است. اگر نمودار سرعت گوی‌های دارای شیار افقی در شکل ۴-۳۷ (ب) را با نمودار سرعت گوی‌های دارای شیار افقی و عمودی در شکل ۴-۳۷ (ث) مقایسه کنیم متوجه خواهیم شد که در نمونه‌هایی که پس از برخورد به سطح آب کاواک تشکیل شده است، گوی‌های دارای شیار افقی نسبت به گوی‌های دارای شیار افقی و عمودی سرعت بیشتری دارند. علت سرعت بیشتر گوی‌های با شیار افقی نسبت به گوی‌هایی که شیار افقی و عمودی دارند را می‌توان نوع کاواکی که بعد از برخورد به سطح آب تشکیل می‌دهند دانست. گوی‌های دارای شیار افقی کاواک‌هایی با سطح صاف و هموارتر تشکیل می‌دهند که فروریزش در آن‌ها کمتر است اما گوی‌های دارای شیار افقی و عمودی بعد از برخورد به سطح آب کاواک‌هایی با سطحی ناهموار تشکیل می‌دهند که زودتر دچار فروریزش می‌شوند و به همین علت سرعت در این گوی‌ها کمتر است، در شکل ۴-۳۸ کاواکی که گوی $S_{5,0}$ و گوی $S_{5,5}$ بعد از برخورد به سطح آب تشکیل می‌دهند باهم مقایسه شده‌اند.

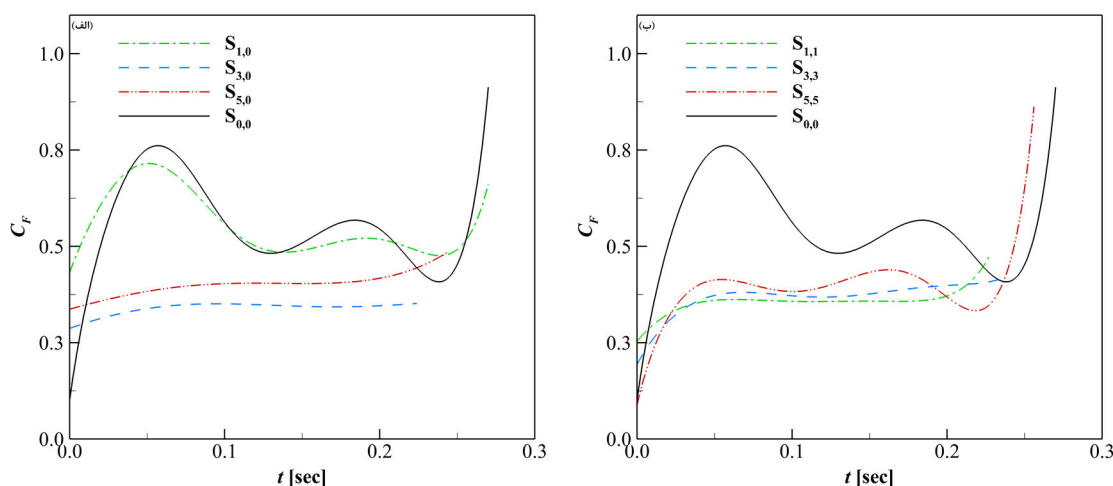


شکل ۴-۳۷: نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$. (ب) نمودار سرعت گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$. (پ) نمودار شتاب گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$. (ت) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$. (ج) نمودار شتاب گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$. (ث) نمودار سرعت گوی‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$.



شکل ۴-۳۸: (الف) کاواک تشکیل شده از برخورد گوی با شناسه $S_{5,0}$ با سطح آب. (ب) کاواک تشکیل شده از برخورد گوی با شناسه $S_{5,5}$ با سطح آب.

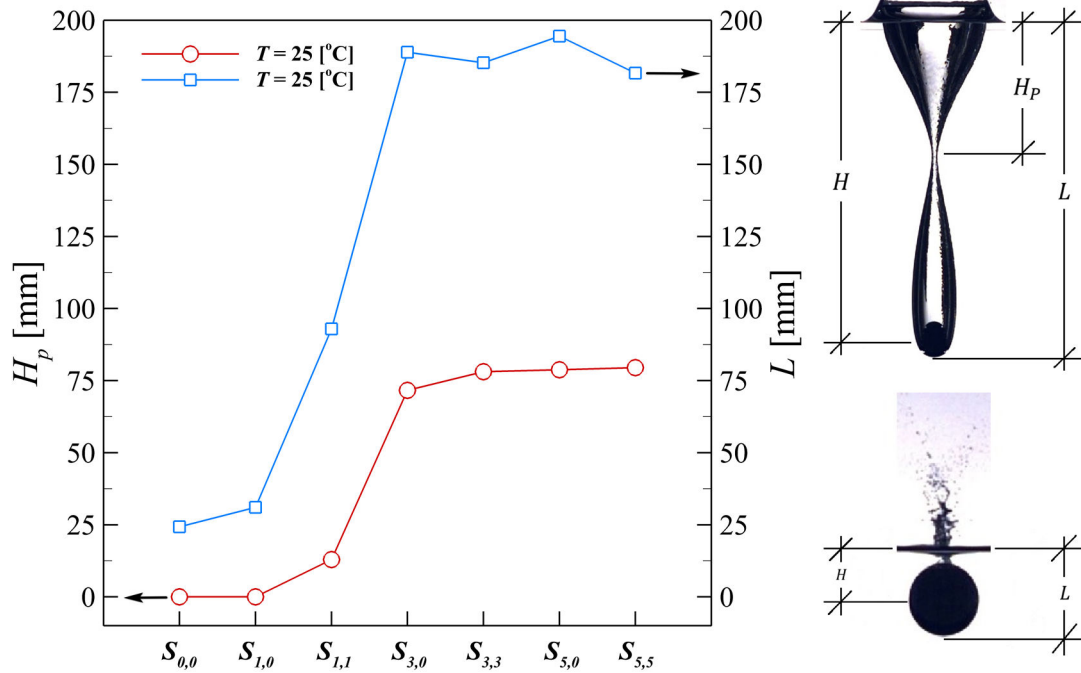
همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز گفته شد نیروی کل هیدرودینامیکی رفتار گوی‌ها هنگام حرکت در زیر آب را مدل می‌کند و به همین خاطر این ضریب جهت تحلیل چگونگی حرکت گوی‌ها در زیر آب می‌تواند بسیار مناسب باشد. در شکل ۴-۳۹ (الف) نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ و در شکل ۴-۳۹ (ب) نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ نشان داده شده است. اگر نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی در شکل ۴-۳۹ را با نمودارهای سرعت همین گوی‌ها در شکل ۴-۳۷ (ب) مقایسه کنیم متوجه می‌شویم که گوی‌هایی که سرعت بیشتری دارند نمودار ضریب هیدرودینامیکی آن‌ها نوسان کمتری نسبت دیگر گوی‌ها دارند و همین موضوع را نیز می‌توان در مقایسه نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی شکل ۴-۳۹ (ب) با نمودارهای سرعت شکل ۴-۳۷ (ث) متوجه شد.



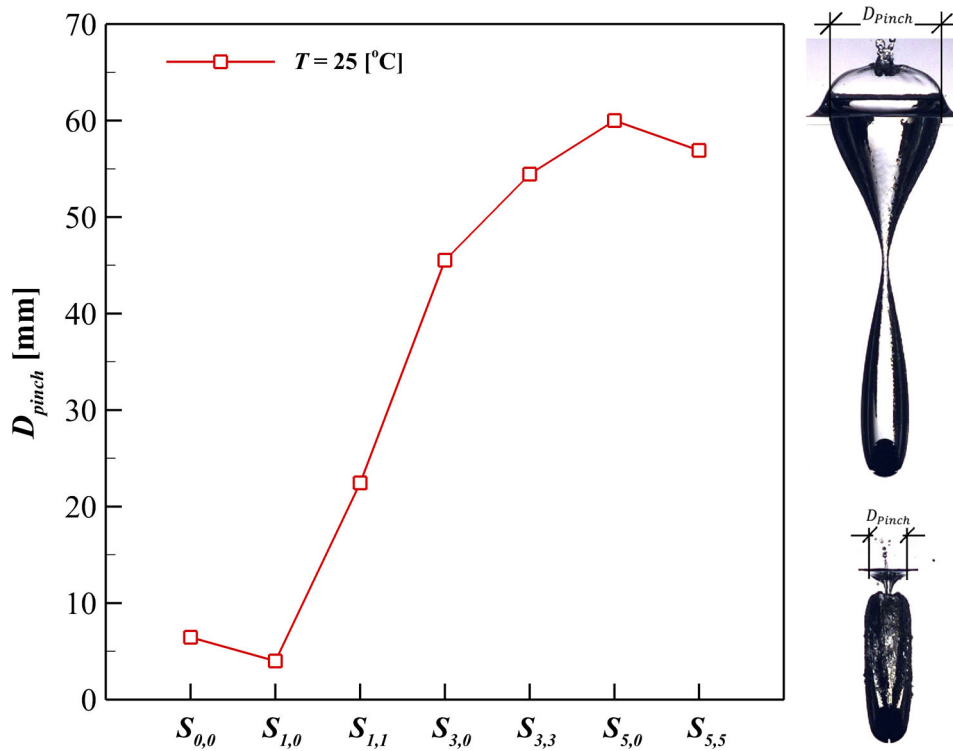
شکل ۴-۳۹: (الف) نمودارهای ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ ، $S_{0,0}$.
(ب) نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ ، $S_{0,0}$.

در شکل ۴-۴۰ نمودارهای طول نقطه جدایش کاواک و طول کاواک نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است با افزایش تعداد شیار گوی‌ها طول نقطه جدایش نیز افزایش یافته است. در واقع گوی بدون شیار گوی با شناسه $S_{1,0}$ چون کاواکی که تشکیل می‌دهند بسیار کوچک است نقطه جدایش آن‌ها بسیار نزدیک به سطح آب رخ می‌دهد و بنابراین طول نقطه جدایش در این دو گوی صفر در نظر گرفته شده است. سه گوی اول با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{1,1}$ طول نقطه جدایش کاواک کمی دارند ولی در چهار گوی دیگر با شناسه‌های $S_{3,0}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,0}$ ، $S_{5,5}$ به یک‌باره طول نقطه جدایش کاواک جهش پیدا می‌کند و زیاد می‌شود و این موضوع به دلیل افزایش قابل توجه طول کاواک این چهار گوی نسبت به سه گوی دیگر با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{1,1}$ می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۴-۴۰ هم قابل ملاحظه است با افزایش تعداد شیار گوی‌ها طول کاواک هم افزایش پیدا کرده است به جز دو استثناء که گوی $S_{3,3}$ و $S_{5,5}$ می‌باشند که کمی نسبت به گوی نظیر خود با شیار افقی کاهش طول کاواک دارند. در شکل ۴-۴۱ نیز نمودار قطر کاواک در لحظه جدایش نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است با افزایش شیار قطر کاواک گوی‌ها افزایش یافته است به جز دو استثناء که گوی‌های $S_{1,0}$ و $S_{5,5}$ هستند و قطر کاواک آن‌ها نسبت به گوی با شیار کمتر از آن‌ها

کاهش پیدا کرده است.

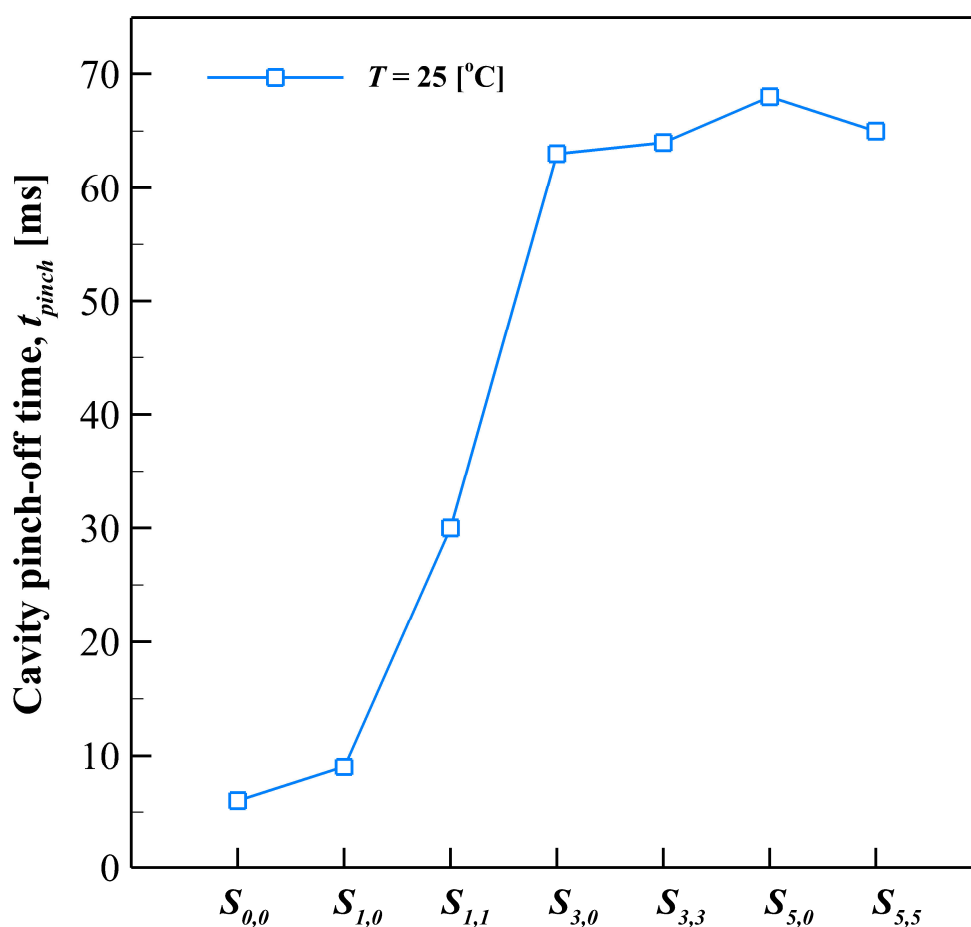


شکل ۴-۴: نمودارهای طول نقطه جدایش کاواک و طول کاواک بر حسب تعداد شیار گوی‌ها



شکل ۴-۴۱: نمودار قطر کاواک (در لحظه جدایش) بر حسب تعداد شیار گوی‌ها

در شکل ۴-۴۲ نمودار زمان نقطه جدایش کاواک بر حسب تعداد شیار هر گوی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود به‌جز گوی با شناسه $S_{5,5}$ با افزایش تعداد شیار هر گوی زمان نقطه جدایش نیز افزایش یافته است. اگر این نمودار را با نمودار طول کاواک در شکل ۴-۴۰ مقایسه کنیم متوجه خواهیم شد که حد زیادی به هم شباهت دارند و می‌توان این نکته را گفت که در واقع زمان جدایش کاواک تابعی از طول آن است.



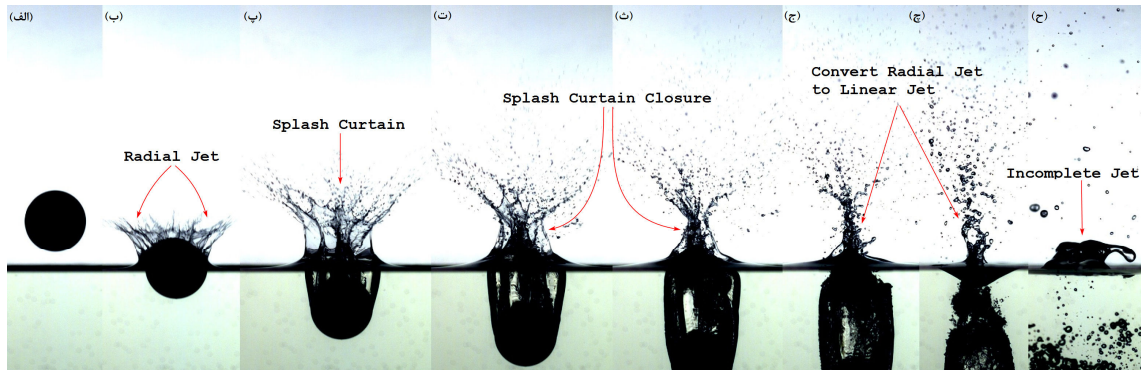
شکل ۴-۴۲: نمودار زمان نقطه جدایش کاواک بر حسب تعداد شیارهای هر گوی

۳-۴- نتایج سقوط گوی‌ها از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر

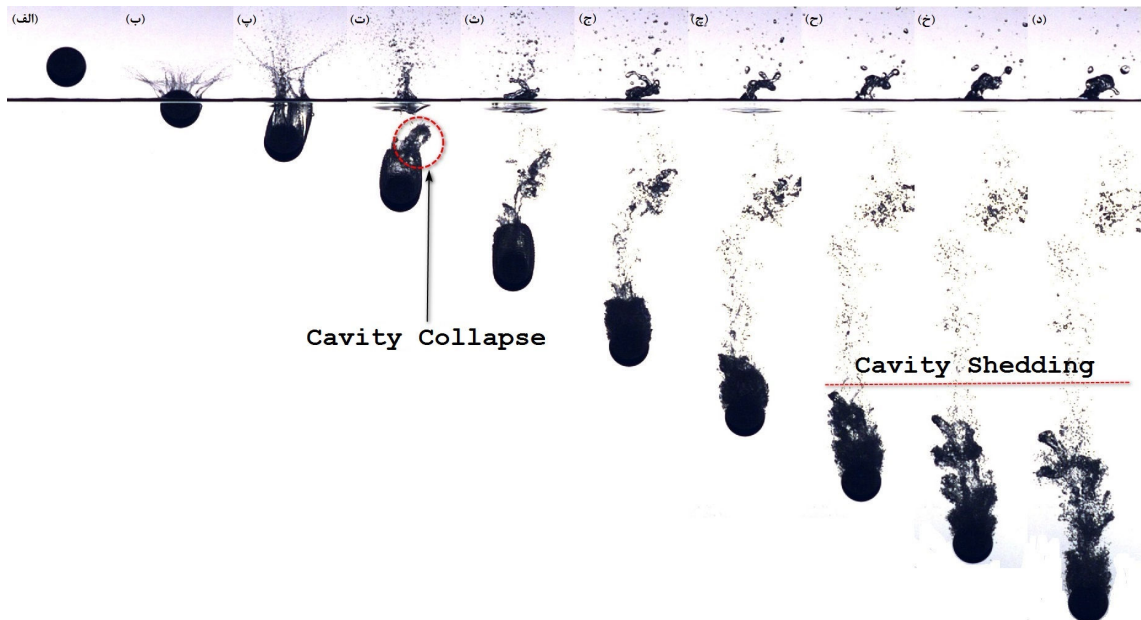
در این بخش نتایج اثر شیار سطحی بر سرعت، شتاب و ضریب هیدرودینامیکی گوی‌ها هنگام سقوط از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری در آب آورده شده است. سرعت سقوط گوی‌ها از این ارتفاع با استفاده از رابطه $U_0 \approx \sqrt{2gh_r}$ برابر با ۴/۴۲ متر بر ثانیه است و مقادیر اعداد بی‌بعد در این سرعت برای این گوی‌ها با $Re_0 = 9935$ و $Fr = 200$ ، $W = 2720$ ، $B = 13.60$ میلی‌متر به صورت $S_{5,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{3,3}$ و $S_{5,5}$ می‌باشند. مقادیر اعداد بی‌بعد برای همه گوی‌ها یکسان است اما شکل و مشخصات نوع کاواکی که تشکیل می‌دهند یکسان نیست. مشخصات و شکل کاواک برای چهار گوی با شناسه‌های $S_{5,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{3,3}$ و $S_{5,5}$

تقریباً یکسان است و فقط طول کلی کاواک‌هایی که تشکیل می‌دهند و قطر آن‌ها با کمی با هم اختلاف دارد، اما مشخصات و شکل کاواک‌هایی که سه گوی دیگر با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ و $S_{1,1}$ تشکیل می‌دهند با گوی‌های دیگر تفاوت دارند. گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری سقوط و به سطح آب برخورد می‌کند و پس از برخورد به سطح آب یک جت شعاعی در اطراف گوی تشکیل می‌شود و با افزایش عمق نفوذ گوی در آب این جت بزرگ‌تر می‌شود تا یک پرده پاشش تشکیل شود و پس از اینکه گوی به صورت کامل در آب فرو رفت این پرده پاشش از نیمه شروع به جمع شدن می‌کند که در شکل ۴-۴۳ (الف-ث) نشان داده شده است. وقتی پرده پاشش به صورت کامل جمع شد به صورت قطره‌های آب به سمت بالا پاشش می‌کند و برخلاف هنگامی که گوی از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری به سطح آب برخورد می‌کند هیچ جت خطی تشکیل نمی‌شود و تنها یک جت ناقص و میرا شده با طول کم که ناشی از نیروی برخورد است تشکیل می‌شود و در شکل ۴-۴۳ (ج-ح) قابل مشاهده است. در هنگام برخورد این گوی به سطح آب نیز یک کاواک کوچک تشکیل می‌شود که قسمتی از آن با افزایش عمق نفوذ گوی در آب فروریزش می‌کند و به صورت لخته‌های هوا از سطح آن جدا می‌شود و با نزدیک شدن به انتهای مسیر هر مقدار از کاواک به گوی متصل باشد از هم پاشیده می‌شود و از گوی صورت لخته‌های

کوچک جدا می‌شود و در شکل ۴-۴ می‌توان این موضوع را مشاهده کرد.



شکل ۴-۴: برخورد گوی با شناسه $S_{0,0}$ با سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}], B = 13.6, W = 27^\circ, Fr = 2^\circ, Re_0 = 9^\circ, D_0 = 20 \text{ [mm]})$



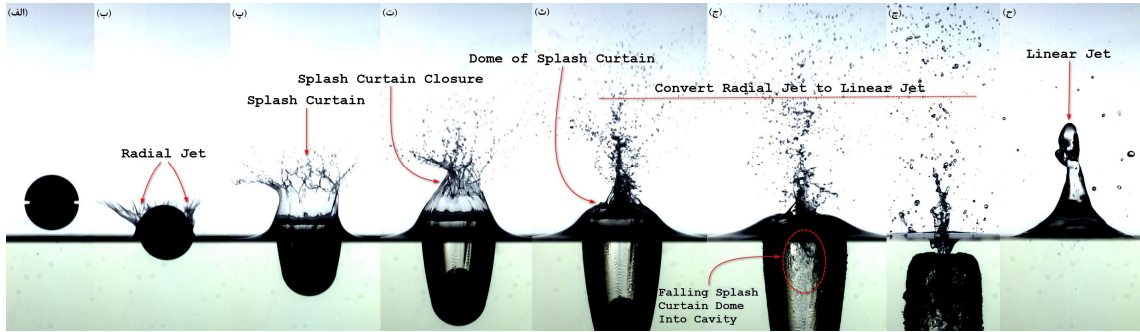
شکل ۴-۴: برخورد گوی با شناسه $S_{0,0}$ با سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}], B = 13.6, W = 27^\circ, Fr = 2^\circ, Re_0 = 9935, D_0 = 20 \text{ [mm]})$

همان‌طور که در بخش‌های قبل گفته شد نحوه برخورد گوی‌های دارای شیار با گوی بدون شیار کاملاً متفاوت است و به دلیل خاصیت آب‌گریزی که شیار روی سطح گوی‌ها ایجاد می‌کند در لحظه برخورد آب از سطح گوی دور می‌شود و به سطح گوی نمی‌چسبد اما شکل کاواک‌هایی که ایجاد می‌کنند متفاوت است که در ادامه به تفصیل در مورد سقوط گوی‌های دارای شیار از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری در

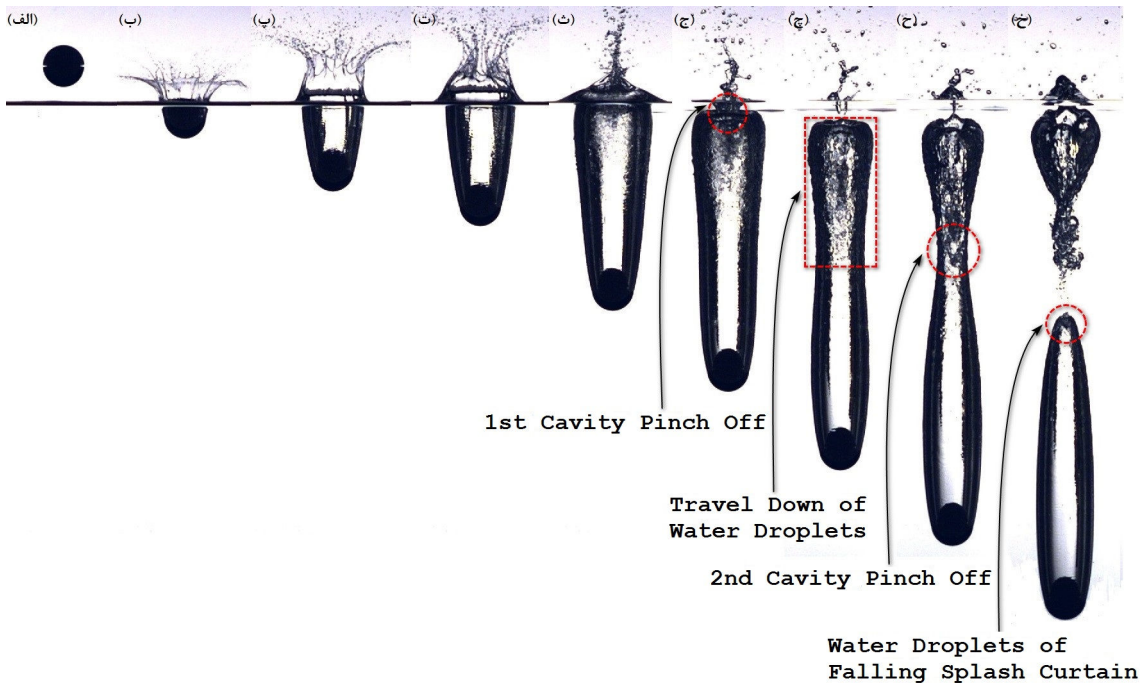
آب توضیح داده می‌شود.

گوی دارای یک شیار افقی با شناسه $S_{1,0}$ از پس از سقوط از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری و برخورد به سطح آب یک جت شعاعی در اطراف خود تشکیل می‌دهد که پس از گذشت ۵ هزارم ثانیه شکل کامل یک پرده پاشش را به خود می‌گیرد و در شکل ۴-۴۵ (الف-پ) قابل مشاهده است. هم‌زمان یک کاواک در حال شکل گرفتن است و پس از گذشت ۴ هزارم ثانیه پرده پاشش بسته می‌شود و شکل گنبدی به خود می‌گیرد، ابتدا قسمتی از پرده پاشش به شکل قطره‌های بسیار ریز آب در کاواک پاشیده می‌شوند و پس از چند هزارم ثانیه گنبد پرده پاشش شروع به سقوط در کاواک می‌کند و در شکل ۴-۴۵ (ت-ج) نشان داده شده است. در این لحظه اولین جدایش کاواک رخ می‌دهد و کاواک از گردن بسیار کوچک خود جدا می‌شود و در این رخداد شکل ۴-۴۵ (چ) نشان داده شده است. قسمتی از پرده پاششی که درون کاواک سقوط کرده است به دیواره‌های آن برخورد می‌کند و در قسمتی که بیشترین برخورد قطره‌های آب با دیواره‌های کاواک انجام می‌شود و دومین جدایش کاواک رخ می‌دهد که در شکل ۴-۴۶ (چ-ح) قابل مشاهده است. قسمتی از کاواک که جدا شده است به سمت سطح آب حرکت می‌کند و قسمتی از آن که به گوی متصل است همراه با گوی به سمت پایین حرکت می‌کند و در شکل ۴-۴۶ (خ) نشان داده شده است. هنگامی که پرده پاشش در کاواک سقوط می‌کند و قطره‌های آب به درون کاواک سقوط می‌کنند تا اینکه قبل از لحظه جدایش کاواک مقداری از قطره‌های آب به درون نیمه پایینی کاواک می‌ریزند و بعد از اینکه جدایش رخ می‌دهد قطره‌های آب شروع به ریزش در کاواکی که متصل به گوی است می‌کنند و به دیواره‌های آن برخورد می‌کنند و در شکل ۴-۴۷ (الف-ت) نشان داده شده است. بدین ترتیب بخشی از قسمت بالایی کاواک دچار فروریزش می‌شود و قسمتی از کاواک جدا می‌شود و به صورت لخته‌های بزرگ هوا جدا می‌شود، این اتفاق تا انتهای مسیر حرکت گوی رخ می‌دهد و کاواک چندین بار جدا می‌شود که در شکل ۴-۴۷ (ث-ح) می‌توان آن را مشاهده نمود. در هنگام حرکت کاواک متصل به گوی با افزایش عمق آب موج‌هایی (ریپل‌ها) روی سطح آن تشکیل می‌شود و طول موج آن‌ها نسبت به موج‌هایی که روی سطح کاواک هنگام سقوط از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری تشکیل

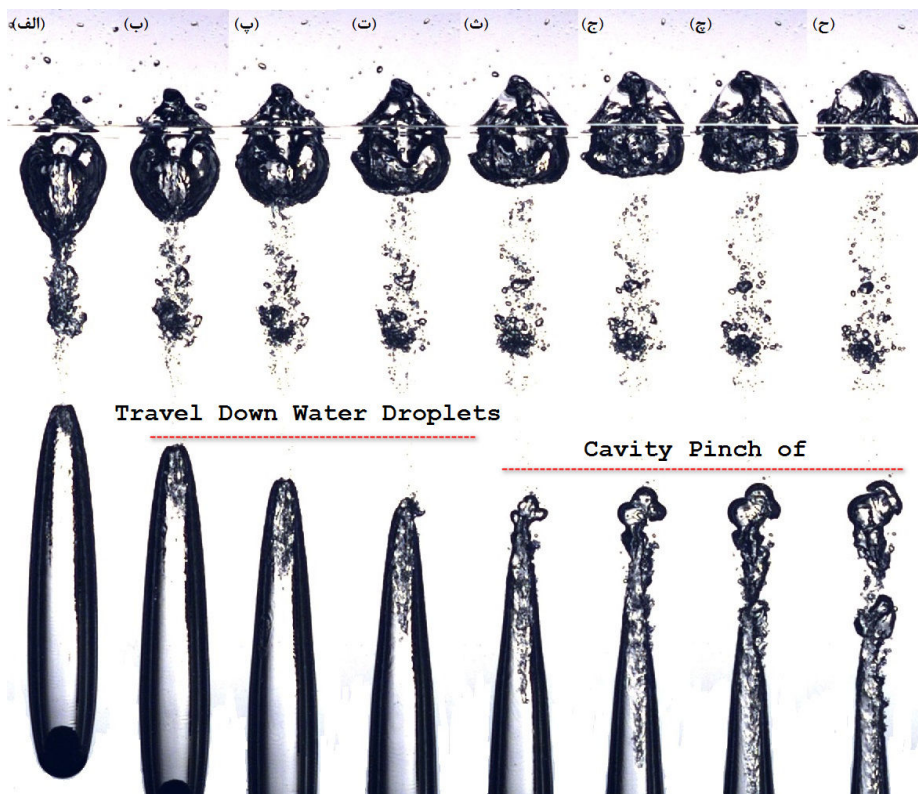
می شوند کمی بلندتر است.



شکل ۴-۴۵: برخورد گوی با شناسه $S_{1,0}$ با سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی گراد، $(U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}], B = 13.6, W = 27^\circ, Fr = 2^\circ, Re_0 = 9^\circ, D_0 = 20 \text{ [mm]})$



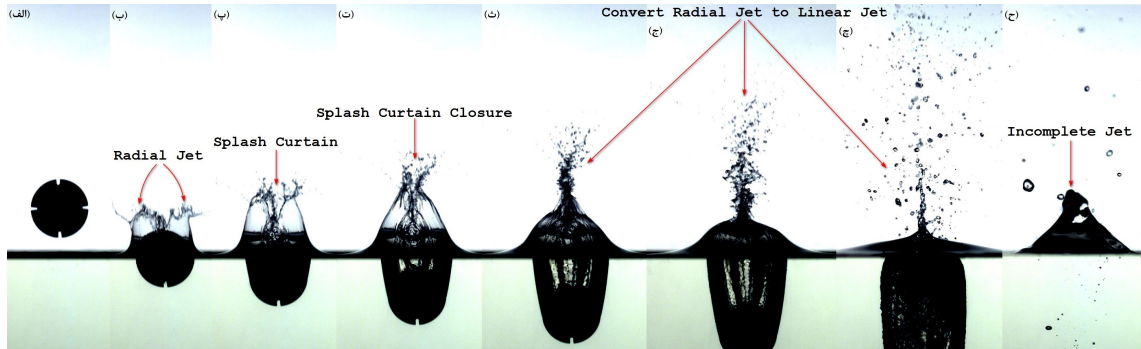
شکل ۴-۴۶: برخورد گوی با شناسه $S_{1,0}$ با سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی گراد، $(U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}], B = 13.6, W = 27^\circ, Fr = 2^\circ, Re_0 = 993^\circ, D_0 = 20 \text{ [mm]})$



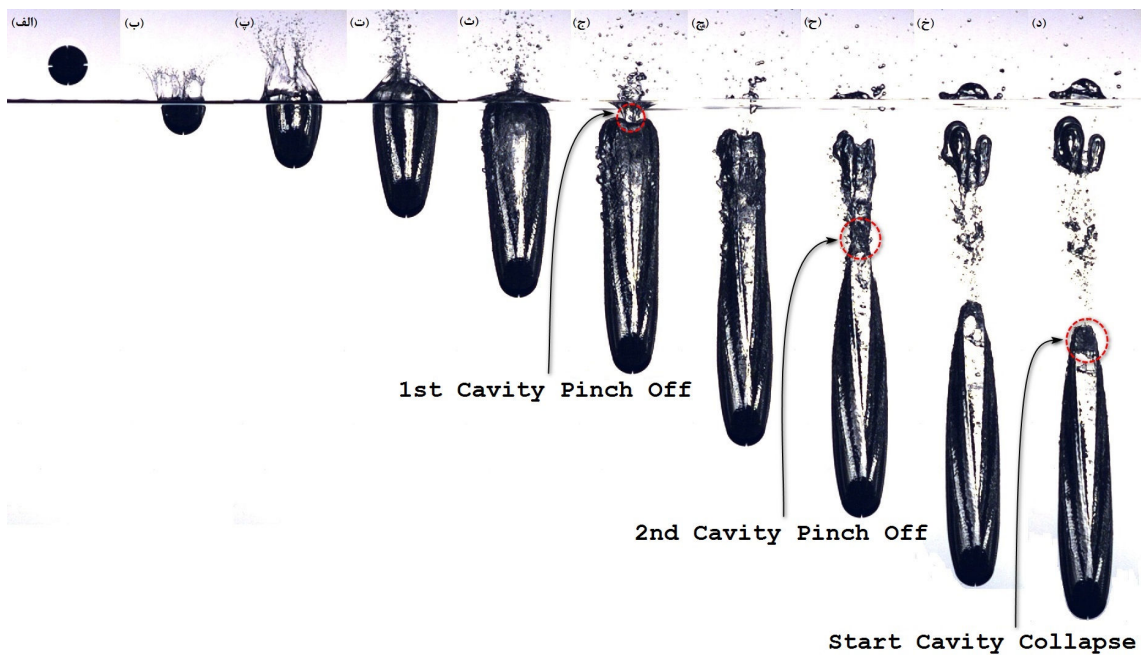
شکل ۴-۴۷: چگونگی فروریزش کاواک گوی با شناسه $S_{1,0}$ پس از برخورد با کاواک

گوی با شناسه $S_{1,1}$ نیز پس از سقوط از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری و برخورد با سطح آب یک جت شعاعی که فاصله کمی با سطح گوی دارد و پس از ۴ هزارم ثانیه این جت تبدیل به یک پرده پاشش می‌شود و سپس بسته شده و به شکل گنبدی در می‌آید و در شکل ۴-۴۸ (الف-ث) نشان داده شده است. همزمان یک کاواک تشکیل شده و پرده پاشش که به شکل گنبدی درآمد در کاواک ریزش می‌کند که قطره‌های آب به دیواره‌های کاواک برخورد و قسمتی از قطره‌های آب به سمت انتهای کاواک ریزش می‌کنند و در شکل ۴-۴۹ (ج و چ) قابل مشاهده است. قسمت جدا شده کاواک به سمت سطح آب حرکت می‌کند و قسمت دوم که به گوی متصل است همراه با گوی به سمت پایین حرکت می‌کند که در شکل ۴-۴۹ (ح) نشان داده شده است. کاواک دوباره جدا می‌شود و قبل از جدایش مقداری از قطره‌های آب به قسمت دوم کاواک ریزش می‌کنند و پس از چند هزارم ثانیه باعث فروریزش قسمت بالای کاواک می‌شوند که قسمتی از آن به صورت لخته‌های بزرگ هوا جدا می‌شود و جدایش سوم رخ می‌دهد و در

شکل ۴-۴۹ (خ و د) قابل مشاهده است. تا انتهای مسیر این روند ادامه پیدا می‌کند، هنگام حرکت کاواک متصل به گوی روی سطح آن نیز موج‌هایی (ریپل‌ها) به وجود می‌آید.



شکل ۴-۴۸: برخورد گوی با شناسه $S_{1,1}$ با سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 27 \text{ [mm]}, Fr = 2 \text{ [mm]}, Re_0 = 993 \text{ [mm]}, D_0 = 2 \text{ [mm]})$



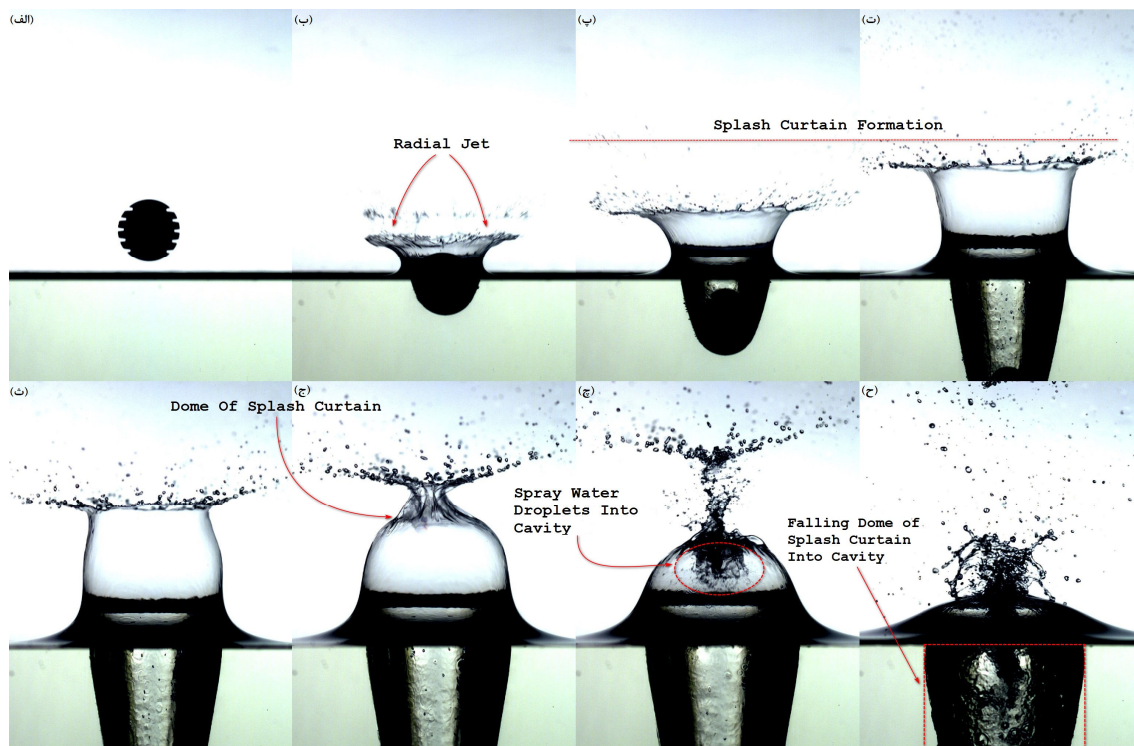
شکل ۴-۴۹: برخورد گوی با شناسه $S_{1,1}$ با سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 27 \text{ [mm]}, Fr = 2 \text{ [mm]}, Re_0 = 9935, D_0 = 20 \text{ [mm]})$

چهار گوی دارای شیار دیگر همان‌گونه که گفته شد پس از برخورد به سطح آب روند تشکیل یکسانی را دارند اما از لحاظ اما کاواک‌های آن‌ها از لحاظ مشخصات فیزیکی (همواری و ناهمواری، طول و ...)

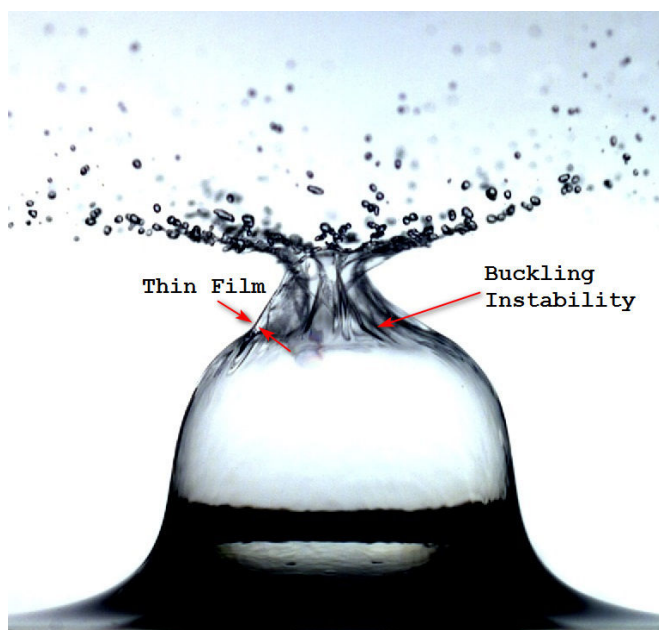
کمی با هم تفاوت دارند. برای مثال گوی با شناسه $S_{5,0}$ بعد از سقوط از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری و برخورد به سطح آب مجموعه‌ای از قطرات آب به شکلی کاملاً شعاعی با سمت بالا پاشیده می‌شوند و سپس یک جت شعاعی که فاصله نسبتاً زیادی از گوی دارد تشکیل شده و بعد از ۵ هزارم ثانیه به یک پرده پاشش کامل تبدیل می‌شود و در شکل ۴-۵۰ (الف-ت) نشان داده شده است. هم‌زمان به کاواک شکل می‌گیرد و پرده پاشش بعد چند هزارم ثانیه به شکل گنبدی در می‌آید، در این حالت یک اتفاق جالب رخ می‌دهد که در جایی که پرده پاشش شروع به گنبدی شدن می‌کند به شکل زائده‌هایی نازک که فرورفته و برآمدگی دارند (آکاردئونی شکل) در می‌آید و در شکل ۴-۵۰ (ث و ج) قابل مشاهده است. زائده‌های خطی شکلی در واقع فیلم‌های نازکی از پرده پاشش آب هستند که هوا بین آن‌ها گیر افتاده است و اصطلاحاً به آن‌ها کیسه‌های هوا نیز می‌گویند که در شکل ۴-۵۱ نشان داده شده است. این اتفاق به خاطر نوعی ناپایداری رخ می‌دهد که کاملاً به کشش سطحی آب بستگی دارد و با کاهش نیروی کشش سطحی آب این ناپایداری بیشتر می‌شود، مارتسون و همکاران [۱۸] در مقاله خود این ناپایداری را ناپایداری کمانشی^۵ نام برده‌اند. پرده پاشش ابتدا به شکل قطره‌های بسیار کوچک آب درون کاواک اسپری می‌شود و سپس درون آن فرومی‌ریزد. کاواک پس از ۱۱ هزارم ثانیه جدا می‌شود و پس از آن قسمتی که جدا شده است همراه با یک جت برگشتی به سمت سطح آب بر می‌گردد و به قسمتی از ریزش پرده پاشش برخورد می‌کند و میرا می‌شود و در شکل ۴-۵۰ (چ و ح) قابل مشاهده است. کاواکی که متصل به گوی است همراه به یک جت برگشتی ناپیوسته به سمت پایین حرکت می‌کند که به صورت قطره‌های آب در کاواک ریزش می‌کند و در شکل ۴-۵۲ (د) نشان داده شده است. پس از جدایش نیز با افزایش عمق نفوذ گوی در آب روی سطح کاواک موج‌هایی به جود می‌آید که این موج‌ها از محل اتصال گوی به کاواک شروع می‌شوند و به سمت بالای کاواک حرکت می‌کنند و در شکل ۴-۵۳ (پ و ت) قابل مشاهده می‌باشند. کاواک از سطح بالایی خود فروریزش می‌کند و جدا می‌شود در این لحظه

⁵ Instability Buckling

یک لخته بزرگ هوا از کاواک جدا می‌شود که این اتفاق تا انتهای مسیر رخ می‌دهد و کاواک چندین بار دچار جدایش می‌شود که در شکل ۴-۵۳ (ث-ج) می‌توان شروع فروریزش کاواک را مشاهده کرد.

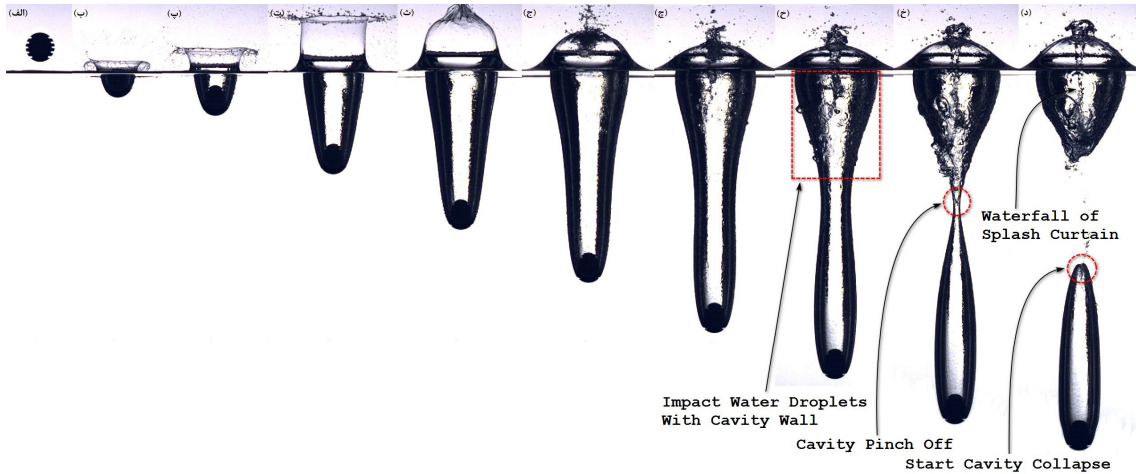


شکل ۴-۵۰: برخورد گوی با شناسه $S_{5,0}$ به سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 4.42 [m \cdot s^{-1}], B = 13.6, W = 27, Fr = 2, Re_0 = 993, D_0 = 20 [mm])$

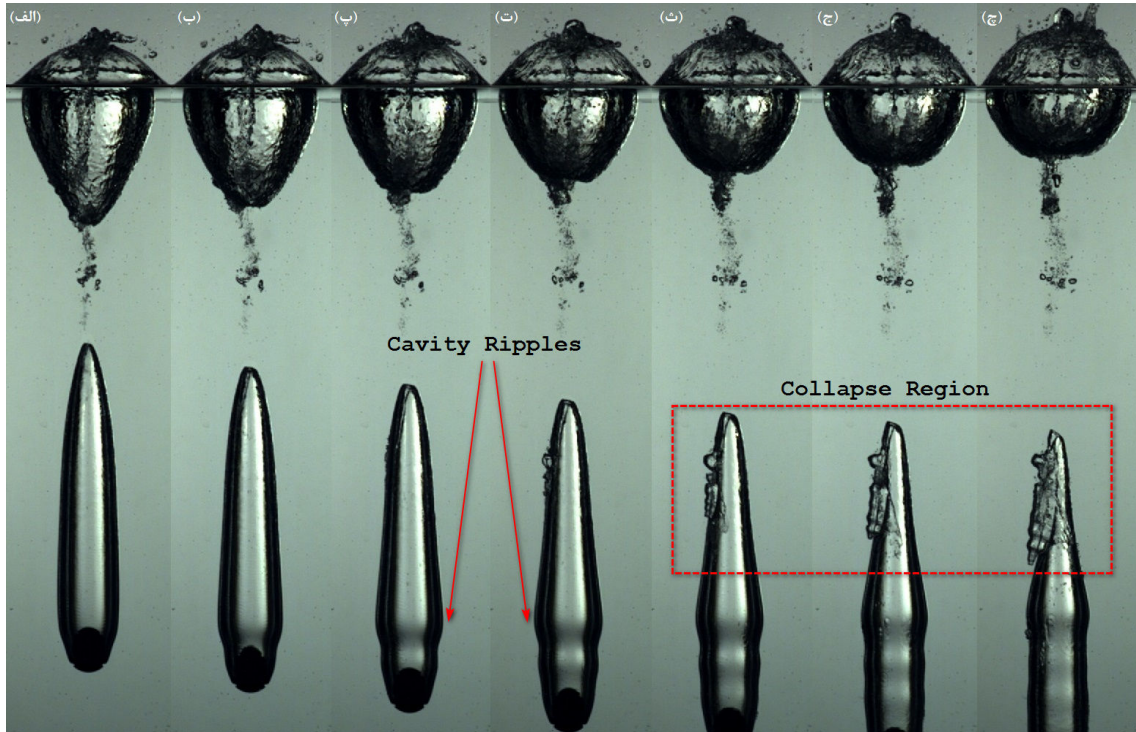


شکل ۴-۵۱: به وجود آمدن ناپایداری کمانشی پس از برخورد گوی با شناسه $S_{5,0}$ به سطح آب، $(U_0 =$

4.42 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], $B = 13.6$, $W = 27^\circ$, $Fr = 2^\circ$, $Re_0 = 993^\circ$, $D_0 = 20$ [mm]



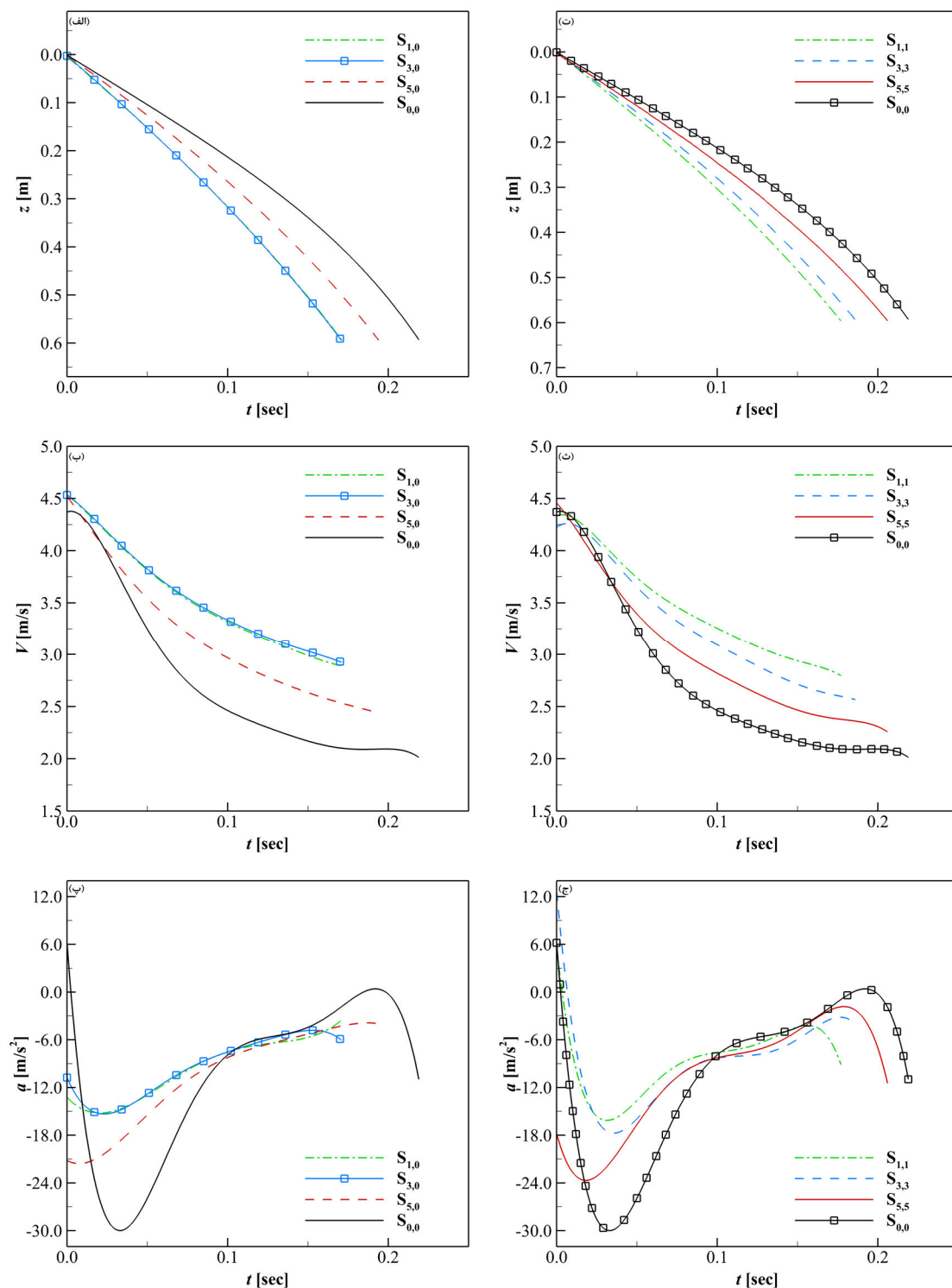
شکل ۴-۵۲: برخورد گوی با شناسه $S_{5,0}$ به سطح آب، دمای سطح گوی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(U_0 = 4.42$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], $B = 13.6$, $W = 27^\circ$, $Fr = 2^\circ$, $Re_0 = 993^\circ$, $D_0 = 20$ [mm])



شکل ۴-۵۳: به وجود آمدن موج روی سطح کاواک در رژیم جدایش عمیق پس از برخورد گوی با شناسه $S_{5,0}$ به سطح آب، $(U_0 = 4.42$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], $B = 13.6$, $W = 27^\circ$, $Fr = 2^\circ$, $Re_0 = 993^\circ$, $D_0 = 20$ [mm])

در شکل ۴-۵۴ نمودارهای مکان، سرعت و شتاب بر حسب زمان در هنگام سقوط از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری در آب آورده شده است. در شکل ۴-۵۴ (الف) می‌توان نمودارهای مکان لحظه‌ای گوی‌های دارای شیار با شناسه $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ و گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ را می‌توان مشاهده کرد که گوی با شناسه $S_{3,0}$ مسیر حرکت را در کم‌ترین و گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ مسیر حرکت در بیشترین زمان در بین این چهار گوی طی کرده‌اند. همچنین در شکل ۴-۵۴ (ب) و (پ) به ترتیب می‌توان نمودارهای سرعت و شتاب این چهار گوی را مشاهده کرد که گوی با شناسه $S_{3,0}$ بیشترین سرعت و شتاب و گوی با شناسه $S_{0,0}$ کم‌ترین سرعت و شتاب را دارند. در شکل ۴-۵۴ (ت) نیز می‌توان نمودار-های مکان لحظه‌ای گوی‌های دارای شیار با شناسه‌های $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ و همچنین گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ مشاهده کرد و همان‌گونه که مشاهده می‌شود گوی دارای شیار با شناسه $S_{1,1}$ مسیر حرکت را در کم‌ترین زمان و گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ مسیر حرکت را در بیشترین زمان در بین این چهار گوی طی کرده‌اند. همچنین در شکل ۴-۵۴ (ث) و (ج) به ترتیب نمودارهای سرعت و شتاب این چهار گوی نشان داده شده است که گوی با شناسه $S_{1,1}$ بیشترین سرعت و شتاب و گوی با شناسه $S_{0,0}$ کم‌ترین میزان سرعت و شتاب را دارا می‌باشند. همان‌طور که در بخش‌های قبل هم ذکر شد تفاوت سرعت بین گوی‌های دارای شیار و گوی بدون شیار به خاطر اثر آب‌گریزی است که روی سطح گوی‌های دارای شیار ایجاد می‌شود و این گوی‌ها پس از برخورد به سطح آب با ایجاد یک کاواک هوا در اطراف خود، نیروی پسای اصطکاکی را تا حد قابل توجهی می‌کاهند که این موضوع سرعت گوی‌ها را نسبت به گوی بدون شیار افزایش می‌دهد. البته پس از ایجاد کاواک در اطراف گوی‌های دارای شیار نیروی پسای فشاری نیز در اطراف گوی‌ها افزایش پیدا می‌کند اما کاهش قابل توجه نیروی پسای اصطکاکی باعث می‌شود که افزایش نیروی پسای فشاری تأثیر چندانی سرعت گوی‌ها نداشته باشد. در مقایسه گوی‌های دارای شیار با یکدیگر هم باید به این نکته اشاره کرد که گوی‌هایی که تنها شیار افقی دارند ($S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$) نسبت به گوی‌هایی که شیار افقی و عمودی دارند ($S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$) همان‌گونه که می‌توان در نمودار شکل ۴-۵۴ (ب) و (ث) مشاهده کرد، عملکرد بهتری در افزایش سرعت دارند و علت

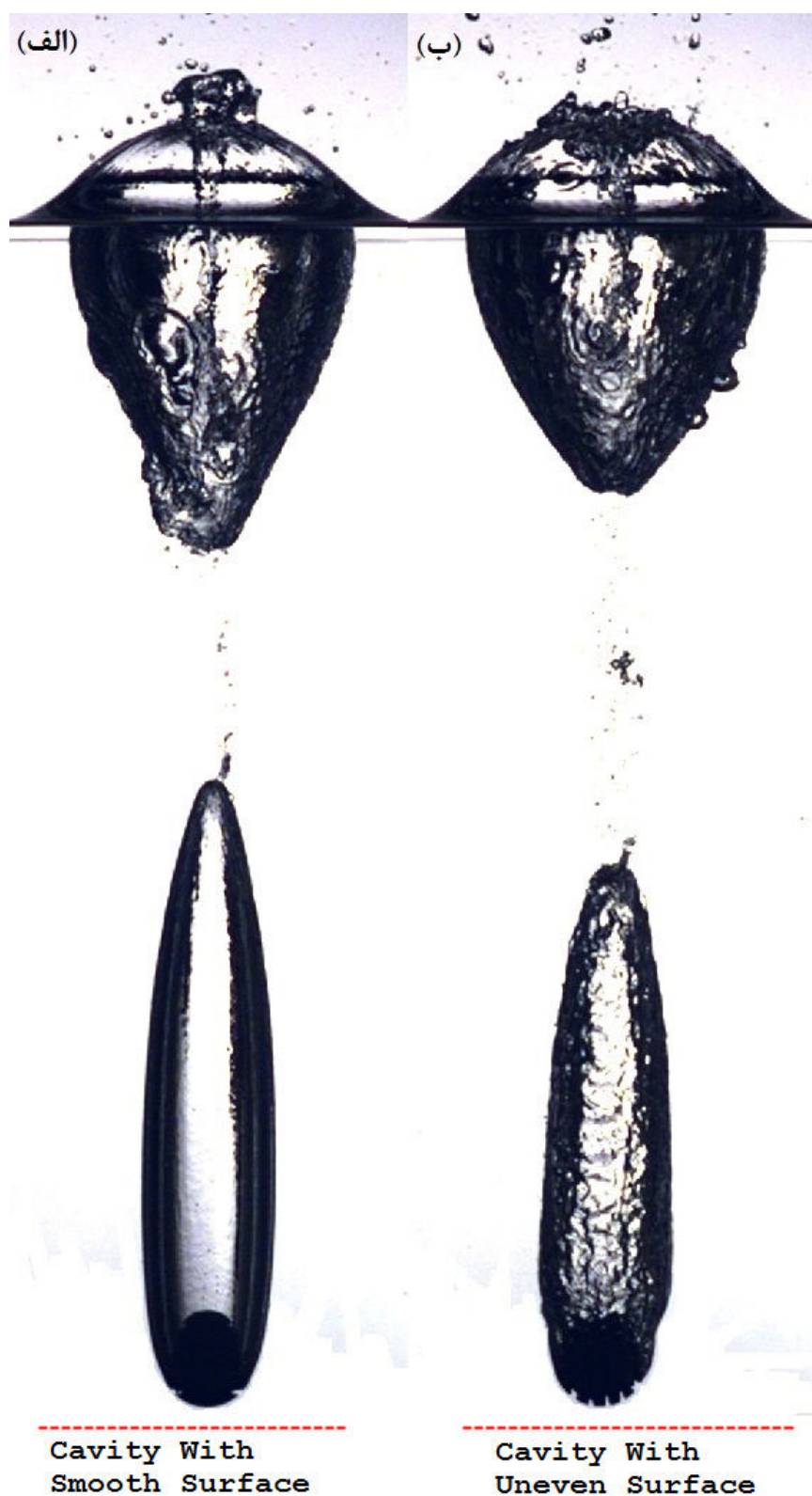
این موضوع را می‌توان آشفتگی‌ها و ناهمواری بیشتر در دیواره کاواک‌های ایجاد شده به وسیله گوی‌های دارای شیار افقی و عمودی دانست که در شکل ۴-۵۵ و ۴-۵۶ نشان داده شده است. در واقع این ناهمواری‌ها باعث آسان‌تر شدن فروریزش در دیواره کاواک شده و باعث می‌شود حجم هوای موجود در اطراف گوی‌ها زودتر از اطراف گوی جدا شود. معمولاً با هر فروریزش در دیواره کاواک یک جدایش رخ می‌دهد و همین موضوع خود باعث ناپایداری در هنگام حرکت گوی در آب می‌شود که کاهش سرعت را به دنبال دارد.



شکل ۴-۵۴: نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های $S_{1,0}$, $S_{3,0}$, $S_{5,0}$, $S_{0,0}$ (ب) نمودار سرعت گوی‌های $S_{1,0}$, $S_{3,0}$, $S_{5,0}$, $S_{0,0}$ (پ) نمودار شتاب گوی‌های $S_{1,1}$, $S_{3,3}$, $S_{5,5}$, $S_{0,0}$ (ت) نمودار مکان لحظه‌ای گوی‌های $S_{1,1}$, $S_{3,3}$, $S_{5,5}$, $S_{0,0}$ (ج) نمودار شتاب گوی‌های $S_{1,1}$, $S_{3,3}$, $S_{5,5}$, $S_{0,0}$ (ث) نمودار سرعت گوی‌های $S_{1,1}$, $S_{3,3}$, $S_{5,5}$, $S_{0,0}$

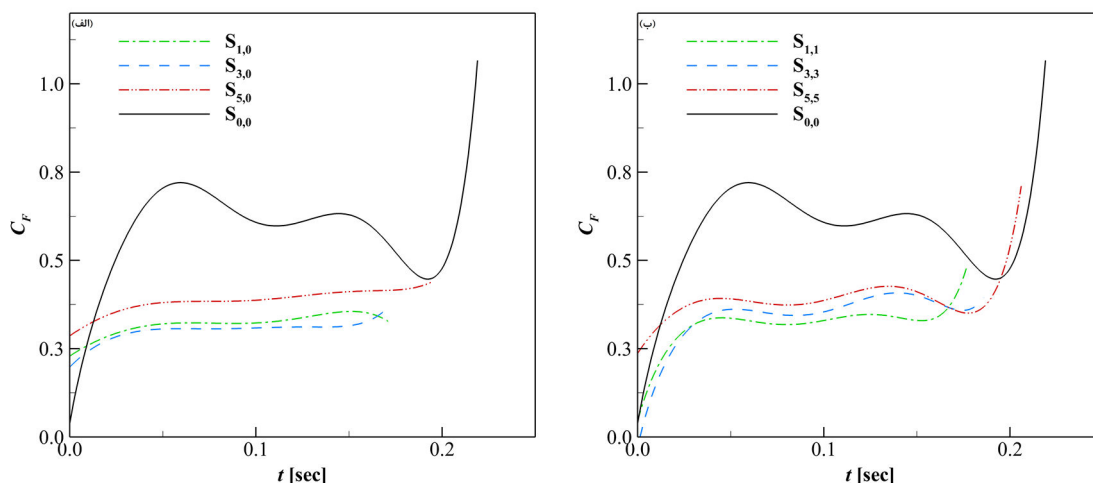


شکل ۴-۵۵: (الف) کاواک تشکیل شده پس از برخورد گوی با شناسه $S_{1,0}$ به سطح آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری. (ب) کاواک تشکیل شده پس از برخورد گوی با شناسه $S_{1,1}$ به سطح آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری



شکل ۴-۵۶: (الف) کاواک تشکیل شده پس از برخورد گوی با شناسه $S_{5,0}$ به سطح آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری. (ب) کاواک تشکیل شده پس از برخورد گوی با شناسه $S_{5,5}$ به سطح آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری

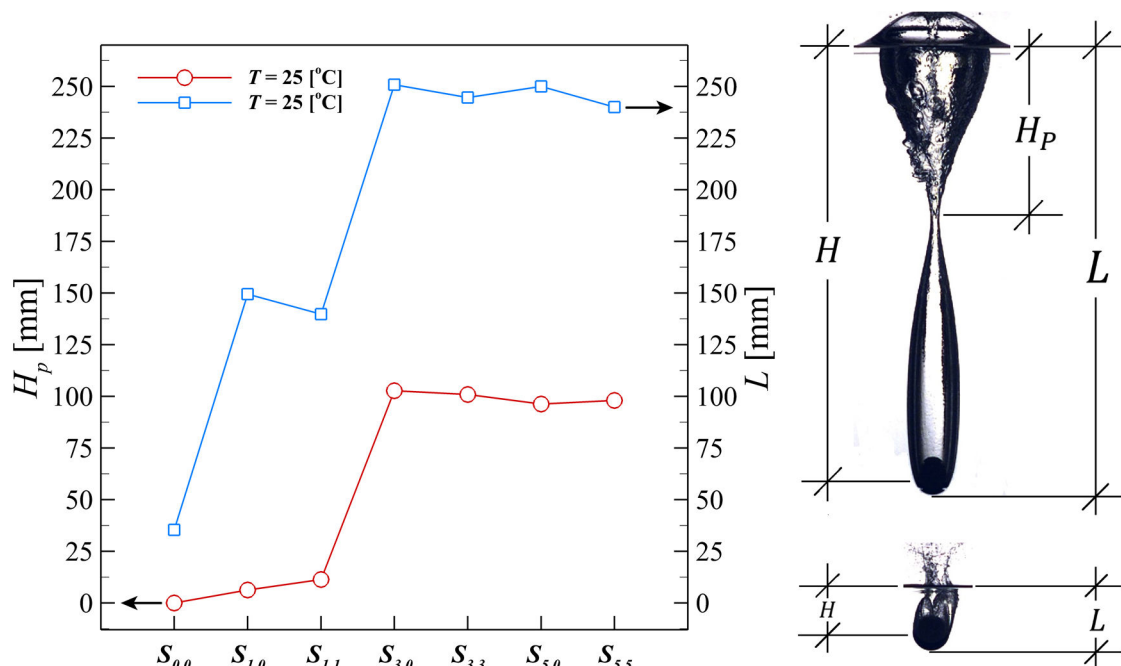
در شکل ۴-۵۷ (الف) نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$ نشان داده شده است. همان‌طور در این شکل می‌توان مشاهده کرد گوی‌های $S_{1,0}$ و $S_{3,0}$ نمودارهایی بسیار کم نوسان‌تر نسبت به دو گوی دیگر دارند و اگر این نمودارها را با نمودار سرعت این گوی‌ها در شکل ۴-۵۴ (ب) مقایسه کنیم خواهیم دید که این دو گوی سرعت بیشتری نسبت به دو گوی دیگر دارند. در شکل ۴-۵۷ (ب) نیز نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$ را می‌توان مشاهده کرد و همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودار گوی‌های $S_{1,1}$ و $S_{3,3}$ نوسان کمتری نسبت به دو گوی دیگر دارند و اگر نمودار ضریب هیدرودینامیکی این دو گوی را با نمودار سرعتشان در شکل ۴-۵۴ مقایسه کنیم خواهیم دید که این دو گوی نسبت به دو گوی دیگر سرعت بیشتری دارند. در میان همه گوی‌ها گوی با شناسه $S_{3,0}$ کم نوسان‌ترین نمودار ضریب هیدرودینامیکی را دارد و سریع‌ترین گوی نیز هست و گوی بدون شیار نیز پر نوسان‌ترین نمودار را دارد که کندترین گوی نیز می‌باشد.



شکل ۴-۵۷: (الف) نمودارهای ضریب نیروی هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ ، $S_{3,0}$ ، $S_{5,0}$.
(ب) نمودارهای ضریب هیدرودینامیکی گوی‌ها با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,1}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,5}$

در شکل ۴-۵۸ نمودار طول نقطه جدایش کاواک و طول کاواک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود گوی بدون شیار طول جدایش کاواک صفر است چون کاواک آن دقیقاً در سطح آب

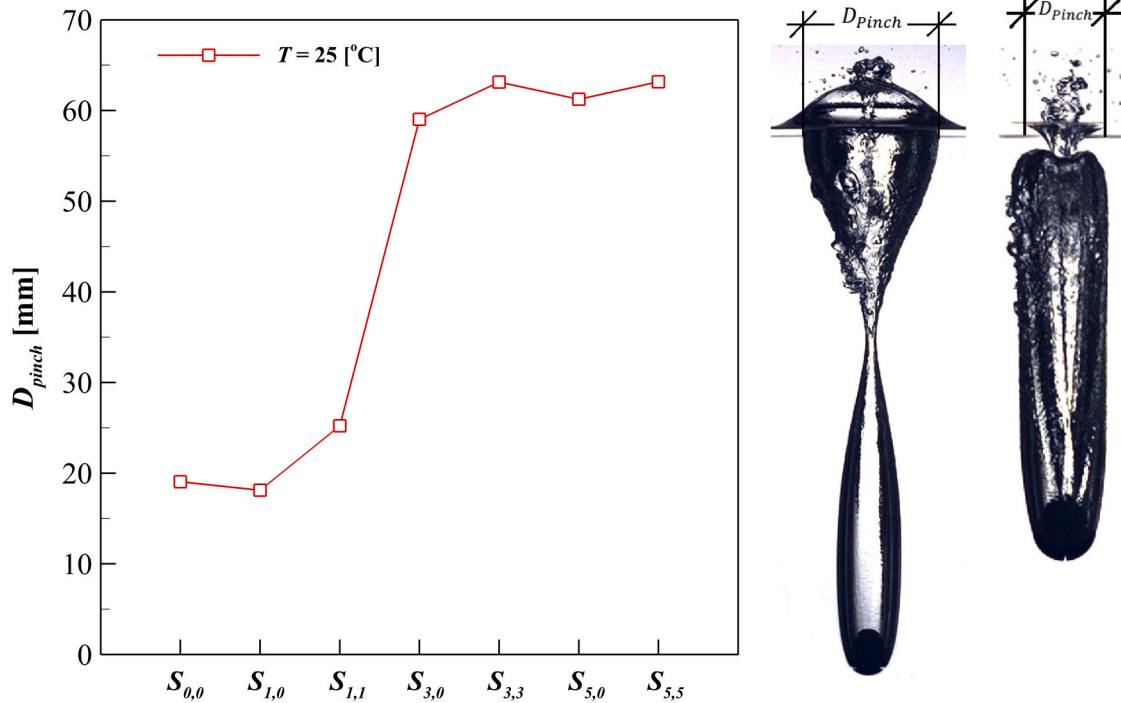
جدا می‌شود و گوی‌های $S_{1,0}$ و $S_{1,1}$ از نظر طول جدایش به ترتیب بعد از گوی بدون شیار قرار دارند اما چهار گوی دیگر با شناسه‌های $S_{3,0}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,0}$ ، $S_{5,5}$ طول بیشتری از این سه گوی دارند و در این میان یک جهش طولی وجود دارد. گوی بدون شیار نیز کمترین طول کاواک را دارد و گوی با شناسه $S_{3,0}$ نیز بیشترین طول کاواک را دارا می‌باشد. در نمودار طول کاواک هم مثل نمودار طول جدایش کاواک یک فاصله نسبتاً زیاد بین سه گوی اول و چهار گوی بعدی وجود دارد.



شکل ۴-۵۸: نمودار طول نقطه جدایش و طول کاواک بر حسب تعداد شیار هر گوی، $(U_0 = 4.42 \text{ [m. s}^{-1}], B = 13.6, W = 27^\circ, Fr = 2^\circ, Re_0 = 9935, D_0 = 20 \text{ [mm]})$

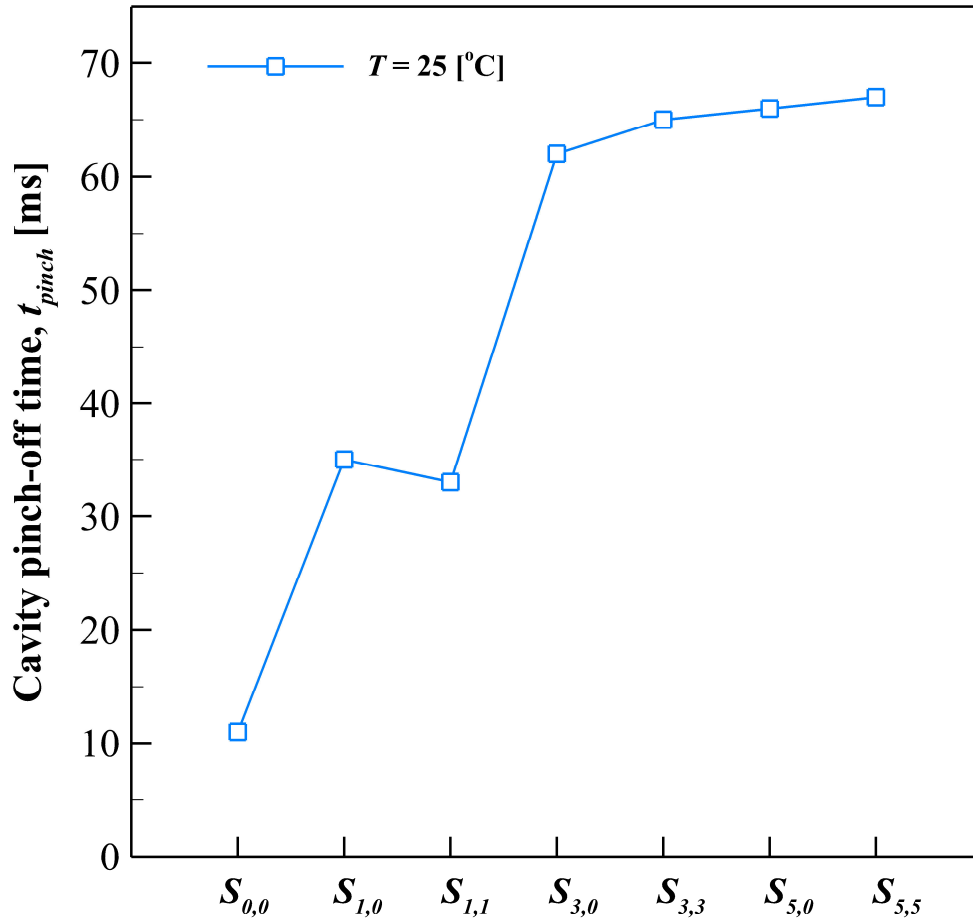
در شکل ۴-۵۹ نمودار قطر کاواک (در لحظه جدایش) گوی‌ها بر حسب تعداد شیار آنها را می‌توان مشاهده کرد. همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده کرد، با افزایش شیار قطر کاواک هر گوی افزایش یافته است و البته دو استثناء نیز وجود دارد که گوی با شناسه‌های $S_{1,0}$ و $S_{5,0}$ نسبت به گوی قبلی خود قطر کاواک کمتری را دارند. همان‌طور که در نمودار مشخص است نیز در میان سه گوی با شناسه‌های $S_{0,0}$ ، $S_{1,0}$ و $S_{1,1}$ با چهار گوی دیگر با شناسه‌های $S_{3,0}$ ، $S_{3,3}$ ، $S_{5,0}$ ، $S_{5,5}$ یک جهش در اندازه قطر کاواک وجود دارد که در دیگر نمودارهای مربوط به مشخصات فیزیکی کاواک گوی‌ها نیز مشاهده

شد. گوی $S_{3,3}$ بیشترین قطر کاواک و گوی $S_{1,0}$ کم‌ترین قطر کاواک را دارند.



شکل ۴-۵۹: نمودار قطر کاواک بر حسب تعداد شیار هر گوی، ($U_0 = 4.42 [m \cdot s^{-1}]$, $B = 13.6$, $W = 2720$, $Fr = 2$, $Re_0 = 993$, $D_0 = 20 [mm]$)

در شکل ۴-۶۰ نمودار زمان جدایش کاواک بر حسب تعداد شیارهای هر گوی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود به‌جز گوی با شناسه $S_{1,1}$ در همه گوی‌ها با افزایش تعداد شیار زمان جدایش کاواک نیز افزایش یافته است. بیشترین زمان جدایش متعلق به گوی $S_{5,5}$ و کم‌ترین زمان جدایش را گوی با شناسه $S_{1,1}$ می‌باشد.



شکل ۴-۶۰: نمودار زمان جدایش کاواک بر حسب تعداد شیار هر گوی، $(U_0 = 4.42 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, B = 13.6, W = 27, Fr = 2, Re_0 = 993, D_0 = 20 \text{ [mm]})$

فصل ۵:

جمع‌بندی و پیشنهادها

۵-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه به بررسی آزمایشگاهی اثر شیار سطحی و دما بر سرعت سقوط اجسام کروی در آب پرداخته شد. هفت گوی که یکی از آن‌ها بدون شیار بود و شش گوی دیگر شش‌الگوی متفاوت دما را داشتند در سه رژیم مختلف با اعداد فراد ($Fr = 1, Fr = 100, Fr = 200$) آزمایش شدند و در رژیمی که کم‌ترین عدد فراد را داشت (رژیم شبه استاتیک) نیز گوی‌ها در سه دمای (۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰) درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

گوی‌ها بعد از سقوط از ارتفاع ۰/۵ سانتی‌متر و برخورد به آب کاواک‌هایی در محدوده رژیم شبه استاتیک تشکیل دادند. در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای گوی دارای شیار با شناسه $S_{5,0}$ بیشترین سرعت حرکت در آب و گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ کم‌ترین سرعت حرکت در آب مشاهده شد. در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای گوی دارای شیار با شناسه $S_{1,0}$ بیشترین سرعت حرکت در آب و برای گوی با شناسه $S_{3,3}$ بیشترین سرعت حرکت در آب مشاهده شد. در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز بیشترین سرعت حرکت در آب را گوی بدون شیار با شناسه $S_{0,0}$ و کم‌ترین سرعت حرکت در آب را گوی دارای شیار با شناسه $S_{5,5}$ داشتند. مشاهدات ورود گوی‌ها به آب در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که جدایش کاواک در این دما دقیقاً روی سطح گوی‌ها رخ می‌دهد در حالی که در دو دمای دیگر کاواک بافاصله از سطح گوی دچار جدایش می‌شود. در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد پس از ورود گوی‌ها به آب یک کاواک بخار در اطراف هر گوی ایجاد می‌شود که کاواک ایجاد شده در اطراف گوی بدون شیار بسیار متقارن‌تر از کاواک ایجاد شده در اطراف گوی‌های دارای شیار است و به‌طور کلی هرچه تعداد شیار روی سطح گوی‌ها افزایش پیدا کند کاواک تشکیل شده در اطراف آن‌ها در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نامتقارن‌تر می‌شود.

پس از برخورد گوی‌ها دارای شیار به سطح آب از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری کاواک‌های هوا با اندازه‌هایی قابل توجه تشکیل می‌شود که البته بعد از برخورد گوی با شناسه $S_{1,0}$ به سطح آب یک کاواک استوانه‌ای

بسیار کوچک تشکیل می‌شود و بعد از برخورد گوی بدون شیار به سطح آب نیز یک کاواک بسیار کوچک تشکیل می‌شود. علت ایجاد کاواک در گوی‌های دارای شیار را می‌توان هوای به دام افتاده در میان شیار گوی‌ها دانست که چون هوا خاصیتی آب‌گریز دارد باعث می‌شود هنگام برخورد گوی‌ها به سطح آب، آب به سطح گوی‌ها نچسبیده و از آن دوری می‌کند و بدین صورت یک کاواک هوا تشکیل می‌شود. برای گوی با شناسه $S_{3,0}$ بیشترین سرعت حرکت در آب و برای گوی بدون شیار کم‌ترین سرعت حرکت در آب مشاهده شد.

پس از برخورد گوی‌های دارای شیار با سطح آب از ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری کاواک‌هایی بزرگ تشکیل می‌شود و پس از برخورد گوی بدون شیار به سطح آب نیز یک کاواک کوچک تشکیل می‌شود. در این ارتفاع نیز همچون ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر بیشترین سرعت حرکت در آب برای گوی با شناسه $S_{3,0}$ و کم‌ترین سرعت حرکت در آب برای گوی بدون شیار مشاهده شد. با توجه به نمودارهای سرعت گوی‌ها پس از برخورد به سطح آب از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری و ۱۰۰ سانتی‌متری می‌توان فهمید که گوی‌های دارای شیار افقی هنگام حرکت در آب سرعت بیشتری نسبت به گوی‌های دارای شیار افقی و عمودی دارند. علت بیشتر بودن سرعت گوی‌های دارای شیار افقی را می‌توان در کاواک‌هایی که پس از برخورد به آب تشکیل می‌دهند دانست زیرا کاواک این گوی‌ها نسبت به کاواکی که گوی‌های با شیارهای افقی و عمودی تشکیل می‌دهند سطح هموارتری دارد.

۵-۲- پیشنهادها برای تحقیقات آینده

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

- بررسی آزمایشگاهی اثر شیار سطحی بر سرعت سقوط اجسام استوانه‌ای
- برخورد پرتابه‌های دارای شیار سطحی با سرعت‌بالا به سطح آب
- ورود پرتابه‌های سرعت‌بالا با زاویه کم به آب

- برخورد پرتابه‌های دیمپل شده به سطح آب
- بررسی اثر مکان شیار سطحی هنگام سقوط پرتابه‌ها به درون آب
- بررسی چگونگی تشکیل شدن اثر کاویتاسیون هنگام برخورد پرتابه‌های دارای شیار سطحی به سطح آب

مراجع

مراجع

- [1] Von Karman, T., The impact of seaplane floats during landing, *National Advisory Committee for Aeronautics*, NACA TN **321**, 1929, 1-8.
- [2] May, A. and Woodhull, J.C., Drag coefficients of steel spheres entering water vertically, *Journal of Applied Physics*, **19**(12), 1948, 1109-1121.
- [3] Greenhow, M. and Lin, W.M., Nonlinear-free surface effects: experiments and theory, *Massachusetts Institute of Technology: Report No. 83-19*, 1983.
- [4] Cole, J.K., Hailey, C.E., Gutierrez, W.T. and Ferrario, M.T., An experimental investigation of high-speed water-entry for full-size and scale-model pointed nose vehicles, *Cavitation and Multiphase Flow Forum*, Los Angeles, USA 171-16, 1992.
- [5] 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.
- [6] Faltinsen, O. and Zhao, R., Water entry of ship sections and axisymmetric bodies, *Fluid Dynamics Panel Workshop, High speed body motion in water*, Kiev, Ukraine, 1-3 September 1997.
- [7] 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.

- [8] 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.
- [9] Truscott, T.T., *Cavity dynamics of water entry for spheres and ballistic projectiles*, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA, 2009.
- [10] Truscott, T.T. and Techet, A.H., A spin on cavity formation during water entry of hydrophobic and hydrophilic spheres, *Physics of Fluids*, **21**, 2009, 121703-8.
- [11] Aristoff, J.M. and Bush, J.W.M., Water entry of small Hydrophobic Spheres, *Journal of Fluid Mechanics*, **619**, 2009, 45-78.
- [12] Aristoff, J.M., Truscott, T.T., Techet, A.H. and Bush, J.W.M., The water entry of decelerating spheres, *Physics of Fluids*, **22**, 032102-8, 2010.
- [13] Techet, A.H. and Truscott, T.T., Water entry of spinning hydrophobic and hydrophilic spheres, *Journal of Fluids and Structures*, **27**(5-6), 2011, 716-726.
- [14] Marston, J.O., Vakarelski, I.U. and Thoroddsen, S.T., Cavity formation by impact of lidenfrost spheres, *Journal of Fluid Mechanics*, **699**, 2012, 465-488.
- [15] 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.
- [16] Mansoor, M.M., Marston, J.O., Vakarelski, I.U. and Thoroddsen, S.T., Water entry without surface seal: extended cavity formation, *Journal of Fluid Mechanics*, **743**, 2014, 295-326.
- [17] Jiang, C.X., Shuai, Z.J., Zhang, X.Y., Li, W.Y. and Li, F.C., Numerical study on the transient behavior of water entry supercavitating flow around a cylindrical projectile influenced by turbulent drag-reducing additives, *Applied Thermal Engineering*, **104**, 2016, 450-460.
- [18] Marston, J. O., Truscott, T. T., Speirs, N. B., Mansoor, M. M. and Thoroddsen, S. T., Crown sealing and buckling instability during water entry of spheres, *Journal of Fluid Mechanics*, **794**, 2016, 506-529.
- [19] 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.

- [20] Szebheley, V. G., Hydrodynamic Impact, *Journal of Applied Mechanics*, **12**, 1959, 279-300.
- [21] Miloh, T., On the initial-stage slamming of a rigid sphere in a vertical water entry, *Applied Ocean Research*, **13**(1), 1991, 43-48.
- [22] Miloh, T., On the oblique water entry problem of a rigid sphere, *Journal of Engineering Mathematics*, **25**(1), 1991, 77-92.
- [23] Howison, S. D., Ockendon, J. R., & Wilson, S. K., Incompressible water-entry problems at small deadrise angles, *Journal of Fluid Mechanics*, **222**, 1991, 215-230.
- [24] Anghileri, M., and Spizzica, A., Experimental validation of finite element models for water impacts, *2nd International KRASH Users Seminar (IKUS2)*, 1995, 1-9.
- [25] Hu, H. H., Direct simulation of flows of solid-liquid mixtures, *International Journal of Multiphase Flow*, **22**(2), 1996, 335-352.
- [26] Esmaeeli, A., and Tryggvason, G., Direct numerical simulations of bubbly flows. Part 1. Low Reynolds number arrays, *Journal of Fluid Mechanics*, **377**, 1998, 313-345.
- [27] 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.
- [28] Wagner, H., Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces, *Z. Angew. Math. Mech*, **12**(4), 1932, 193-215.
- [29] Chuang, S. L., Slamming of rigid wedge-shaped bodies with various deadrise angles, *Structural Mechanics Laboratory Research and Development*, Report **2268**, 1966.
- [30] Korobkin, A. A., and Ohkusu, M., Impact of two circular plates one of which is floating on a thin layer of liquid, *Journal of Engineering Mathematics*, **50**(4), 2004, 343-358.
- [31] Battistin, D., and Iafrazi, A., Hydrodynamic loads during water entry of two-dimensional and axisymmetric bodies, *Journal of fluids and structures*, **17**(5), 2003, 643-664.

- [32] Park, M. S., Jung, Y. R., and Park, W. G., Numerical study of impact force and ricochet behavior of high speed water-entry bodies, *Computers & Fluids*, **32**(7), 2003, 939-951.
- [33] Roe, S. M.,). Numerical and experimental analysis of initial water impact of an air-dropped REMUS AUV, Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [34] Kleefsman, T., Water impact loading on offshore structures, *A Numerical Study*, PHD thesis, 2005.
- [35] Yang, Q., Numerical solution of 2-D slamming problem with a CIP method, Doctoral dissertation, Memorial University of Newfoundland, 2007.
- [36] Fairlie-Clarke, A. C., and Tveitnes, T., Momentum and gravity effects during the constant velocity water entry of wedge-shaped sections, *Ocean Engineering*, **35**(7), 2008, 706-716.
- [37] 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.
- [38] Yang, Q., and Qiu, W., Numerical simulation of water impact for 2D and 3D bodies, *Ocean Engineering*, **43**, 2012, 82-89.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Leidenfrost, J. G., *De aquae communis nonnullis qualitatibus tractatus*. Ovenius, 1756.
- [42] 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.

- [43] Quéré, D., Leidenfrost dynamics, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **45**, 2013, 197-215.
- [44] 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.
- [45] Gylys, J., Skvorcinskiene, R., Paukstaitis, L., Gylys, M. and Adomavicius, A., Water temperature influence on the spherical bodies falling velocity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **89**, 2015, 913-919.
- [46] Mansoor, M.M., Vakarelski, I.U., Marston, J.O., Truscott, T.T. and Thoroddsen, S.T., Stable-streamlined and helical cavities following the impact of Leidenfrost spheres, *Journal of Fluid Mechanics*, **823**, 2017, 716-754.
- [47] Duez, C., Ybert, C., Clanet, C., and Bocquet, L., Making a splash with water repellency, *Nature physics*, **3**(3), 2007, 180-183.
- [48] Truscott, T. T., Epps, B. P., and Belden, J., Water entry of projectiles, *Annual review of fluid mechanics*, **46**, 2014, 355-378.
- [49] Speirs, N. B., Mansoor, M. M., Belden, J., and Truscott, T. T., Water entry of spheres with various contact angles, *Journal of Fluid Mechanics*, **862**, 2019, 1-13.

ABSTRACT:

Today, physical changes (such as grooves, dimples, textures, vortex-generators, and etc.) in objects moving in water are considered as factors that can make a lot of changes in the hydrodynamic properties of objects. These methods are low cost, simple, and eco-friendly. In this investigation, the effect of surface grooves (horizontal and vertical grooves) and temperature on hydrodynamic performance, movement direction, fall speed, acceleration, cavity formation, cavity pinch off and hydrodynamic force coefficient of spherical bodies with a diameter of 20 mm Studied. All experiments are performed with seven spheres, and the spheres include six spheres with a surface groove with a different groove pattern and a sphere without a groove. All samples experimented with three different impact regimes with Froude numbers ($Fr = 1, Fr = 100, Fr = 200$), Weber numbers ($W = 13.6, W = 1360, W = 2720$), Bond number ($B = 13.6$) and Reynolds numbers ($Re = 702.5, Re = 7025, Re = 9935$). For the heated tests, the surface temperature of spheres is set to 100°C and 200°C . The trajectory of spheres is visualized by a high-speed camera at a frame rate of $1\sim 2$ [kfps]. The results prove in the lowest Froude number ($Fr = 1$) increasing the number of horizontal grooves has a remarkable effect on descent performances. In the other two regimes with Froude numbers ($Fr = 100, Fr = 200$), observed that the spheres with the surface groove after impact to water surface create the noticeable cavity, while the sphere without groove create the very small cavity. Speed plots for spheres showed that the velocity of spheres with groove in these two regimes is far greater than the velocity of a sphere without groove.

Keywords: Water entry; Grooved spheres; Descent velocity; Cavity formation; Heated spheres.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanic and Mecatronic Engineering

M.Sc. Thesis in Aerodynamic Engineering

**Experimental investigation of surface groove and temperature on
falling velocity of spherical bodies inside water**

By:

Ali Mehri

Supervisor:

Dr. Pouria Akbarzadeh